

# **REACÇÕES ÁLCALIS-SÍLICA E RESISTÊNCIA AOS SULFATOS EM BETÃO - ENSAIOS**

**JOSÉ MIGUEL MARINHO NEVES**

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 2010

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2009/2010**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto: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](mailto: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 - 2009/2010 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2009.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo 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 electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

*Julguei que fosse eterna a luz dessa alvorada,  
E que era sempre dia, e nunca tinha fim.*

*José Régio*



## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, gostaria de demonstrar a minha enorme gratidão à Professora Joana Sousa Coutinho, não só por me ter dado esta oportunidade, mas sobretudo por todo apoio que me dispensou e pela paciência, incentivo e disponibilidade constante ao longo da elaboração deste trabalho. Muito obrigado.

À D. Maria Teresa não posso deixar de agradecer ter estado sempre disponível para me atender com a sua enorme simpatia.

Agradeço também à Eng<sup>a</sup> Patrícia e a todos os Técnicos do Laboratório de Ensaios de Materiais de Construção a valiosa ajuda que me prestaram durante a realização dos ensaios.

Contei também com a ajuda da Eng<sup>a</sup> Maria da Luz Garcia, que não posso deixar de agradecer, na recolha de informação imprescindível para o desenvolvimento dos estudos efectuados.

Quero também lembrar os amigos que me acompanharam nestas tarefas, ajudando no que era necessário ou simplesmente estando ao meu lado.

Por último, um agradecimento especial à minha família.



## RESUMO

O aumento da durabilidade e desempenho das estruturas de betão é um desafio para o qual é necessário encontrar as respostas mais adequadas, observando-se um acréscimo substancial no estudo dos aspectos relacionados com o ciclo de vida útil das estruturas. Esta melhoria da durabilidade do betão passa por conseguir que ele seja capaz de resistir, ao longo do tempo, a “ataques” de natureza física ou química, nomeadamente às reacções álcalis-agregado (RAS) e ao ataque por sulfatos.

A produção de cimento Portland consome grandes quantidades de energia e contribui para o agravamento das emissões de CO<sub>2</sub>, o que tem levado ao desenvolvimento de estratégias de mitigação, através, nomeadamente, da utilização de novas adições, obtidas a partir de resíduos industriais que possam vir a ser incorporados no betão, de forma a melhorar a durabilidade e desempenho das estruturas, e a permitir a valorização dos resíduos, a diminuição dos consumos energéticos na fabricação do cimento e a preservação dos recursos naturais.

No presente trabalho desenvolveu-se o estudo das reacções álcalis-silica (RAS) e do ataque externo por sulfatos (ESA) em argamassas de cimento Portland, com substituição parcial do cimento por adições provenientes de resíduos industriais, designadamente, cinzas volantes de biomassa moídas (GBFA) e não moídas (BFA), cinzas de fundo de biomassa florestal (GWA), com 3 e 24 horas de moagem, grits (GRT), sílica de fumo (SF) e pó de vidro (GP), com o objectivo de ajudar a compreender a influência destas adições no comportamento do betão e a possibilidade de as valorizar, contribuindo para a sustentabilidade na construção.

No estudo das reacções álcalis-silica, optou-se pelo ensaio acelerado em barra de argamassa (ASTM 1260), previsto para avaliar a reactividade dos agregados aos álcalis em 14 dias, através da transposição dos resultados obtidos, de modo a permitir a verificação da ocorrência de reacções expansivas com a utilização das adições.

No estudo do ataque externo por sulfatos (ESA), realizaram-se ensaios de acordo com a metodologia estabelecida na Especificação LNEC E 462:2004, que determina a variação da resistência dos ligantes ao ataque de uma solução de sulfato de sódio.

**PALAVRAS-CHAVE:** argamassa, resíduos industriais, sustentabilidade, reacção álcalis-silica, ataque externo por sulfatos.



## **ABSTRACT**

Increased durability and performance of concrete structures is a challenge for which we must find the appropriate policy responses, observing a substantial increase in the study of aspects of the life cycle of the structures. The goal is to improve the durability of concrete to resist, over time, physical or chemical "attacks", in particular the alkali-aggregate reaction (ASR) and sulphate attack.

The production of Portland cement consumes large amounts of energy and contributes to the increase of CO<sub>2</sub> emissions, which has led to the development of mitigation strategies, notably through the use of new additions, obtained from industrial waste that may be embedded in concrete to improve durability and performance of structures, and to permit the recovery of waste, reducing energy consumption in the manufacture of cement and the preservation of natural resources.

The present work was intended to study the alkali-silica reaction (ASR) and the external attack by sulphates (ESA) in Portland cement mortars with partial replacement of cement by additions from industrial wastes, particularly biomass fly ash ground (GBFA) and unground (BFA), wood bottom ash (GWA), with 3 and 24 hours of grinding, grits (GRT), silica fume (SF) and glass powder (GP) in order to help understand the influence of these additions on the behaviour of concrete and the possibility of the value and contributes to sustainability in construction.

In order to study the alkali-silica reaction, the accelerated mortar bar method (ASTM 1260) was selected to assess the reactivity of alkali-aggregate in 14 days, through the transposition of the results in order to allow verification of occurrence of expansive reactions with the use of additions.

In the study of external sulphate attack (ESA), assays were performed according to the methodology set out in the Specification LNEC E 462:2004, which determines the variation of resistance of binders to the attack of a solution of sodium sulphate.

**KEYWORDS:** mortar, industrial waste, sustainability, alkali-silica reaction, external sulphate attack.



## ÍNDICE GERAL

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	i
<b>RESUMO</b> .....	iii
<b>ABSTRACT</b> .....	v
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>1.1. ENQUADRAMENTO GERAL</b> .....	1
<b>1.2. PROPOSTA DE TRABALHO DE INVESTIGAÇÃO</b> .....	2
<b>1.3. ORGANIZAÇÃO DO PRESENTE DOCUMENTO</b> .....	2
<b>2. ESTADO DA ARTE</b> .....	3
<b>2.1. REACÇÃO ÁLCALIS-SÍLICA</b> .....	3
2.1.1. INTRODUÇÃO .....	3
2.1.2. HISTÓRIA DA REACÇÃO ÁLCALIS-SÍLICA .....	3
2.1.3. MECANISMO DA REACÇÃO ÁLCALIS-SÍLICA .....	6
2.1.4. FACTORES NECESSÁRIOS À OCORRÊNCIA DA REACÇÃO ÁLCALIS-SÍLICA .....	8
2.1.4.1. Os álcalis .....	8
2.1.4.2. Agregados reactivos.....	10
2.1.4.3. Humidade elevada e razão água/cimento.....	12
2.1.4.4. Regulamentação aplicável .....	13
<b>2.2. ATAQUE POR SULFATOS</b> .....	14
2.2.1. INTRODUÇÃO .....	14
2.2.2. HISTÓRIA DO ATAQUE POR SULFATOS.....	15
2.2.3. MECANISMO DO ATAQUE POR SULFATOS DE ORIGEM EXTERNA .....	17
2.2.4. FACTORES NECESSÁRIOS À OCORRÊNCIA DO ATAQUE POR SULFATOS DE ORIGEM EXTERNA.....	18
2.2.5. REGULAMENTAÇÃO APLICÁVEL .....	18
2.2.6. RELAÇÃO ENTRE O ATAQUE POR SULFATOS E A REACÇÃO ÁLCALIS-SÍLICA.....	19
<b>2.3. ADIÇÕES MINERAIS</b> .....	21
2.3.1. DADOS HISTÓRICOS .....	21
2.3.2. SÍLICA DE FUMO .....	23
2.3.3. RESÍDUOS .....	24
2.3.3.1. Resíduos da indústria de papel.....	24
2.3.3.2. Cinzas volantes de biomassa (BFA) .....	26

2.3.3.3. Cinzas volantes de biomassa moídas (GBFA) .....	29
2.3.3.4. Grits (GRT).....	30
2.3.3.5. Resíduos de uma Central de Biomassa.....	33
2.3.3.6. Cinzas fundo de biomassa moídas durante 24 horas (GWA 24h) .....	33
2.3.3.7. Cinzas fundo de biomassa moídas durante 3 horas (GWA 3h).....	35
2.3.3.8. Resíduos da indústria vidreira.....	36
2.3.3.8.1. Pó de vidro (GP).....	36
<b>3. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>38</b>
<b>3.1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>38</b>
<b>3.2. DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>39</b>
3.2.1. MATERIAIS UTILIZADOS NO FABRICO DAS ARGAMASSAS .....	39
3.2.2. COMPOSIÇÃO DAS ARGAMASSAS .....	40
3.2.3. FABRICO DAS ARGAMASSAS.....	41
<b>3.3. ENSAIOS .....</b>	<b>42</b>
3.3.1. ENSAIO ACELERADO DE EXPANSÃO EM BARRA DE ARGAMASSA – ASTM C 1260 .....	42
3.3.1.1. Procedimento experimental .....	42
3.3.1.2. Resultados dos ensaios .....	44
3.3.2. ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO ATAQUE POR SULFATOS – E 461-2004 .....	46
3.3.2.1. Procedimento experimental .....	46
3.3.2.2. Resultados dos ensaios .....	48
<b>4. CONCLUSÕES .....</b>	<b>49</b>
<b>4.1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>49</b>
<b>4.2. MATERIAIS ESTUDADOS .....</b>	<b>49</b>
<b>4.3. ENSAIOS REALIZADOS .....</b>	<b>52</b>
<b>4.4. RESULTADOS OBTIDOS .....</b>	<b>52</b>
4.4.1. ENSAIO ACELERADO DE EXPANSÃO EM BARRA DE ARGAMASSA – ASTM C 1260 .....	52
4.4.2. ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO ATAQUE POR SULFATOS – E 461-2004 .....	53
<b>4.5. ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>53</b>
4.5.1. ENSAIO ACELERADO DE EXPANSÃO EM BARRA DE ARGAMASSA – ASTM C 1260 .....	53
4.5.2. ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO ATAQUE POR SULFATOS – E 461-2004 .....	53
<b>4.6. BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>54</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>58</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.1 – Barragem de Pracana no rio Ocreza .....	4
Fig.2 – Viaduto Duarte Pacheco e sinais de fissuração num elemento estrutural .....	4
Fig.3 – Reacção álcalis-silica reactiva. Estados de alteração (1 a 4) de quartzo-filoneano em gel.....	7
Fig.4 – Deterioração do betão por reacções álcalis-silica reactiva .....	7
Fig.5 – Representação esquemática do ataque dos álcalis à sílica bem cristalizada(a) e mal cristalizada(b).....	8
Fig.6 – Tabela periódica .....	8
Fig.7 – Concentração de iões na solução dos poros do cimento ao longo do tempo de cura .....	9
Fig.8 – Influência na expansão da quantidade de agregado reactivo.....	11
Fig.9 – Influência do tamanho da partícula reactiva na expansão por RAS.....	12
Fig.10 – Efeito da humidade relativa sobre a expansão do betão devido a reacções álcalis-silica .....	13
Fig.11 – Betão não exposto ao ataque por sulfatos, mostrando hidróxido de cálcio (CH), silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) e monosulfoaluminato de cálcio hidratado (AFm).....	14
Fig.12 – Betão exposto ao ataque por sulfatos ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), mostrando aumento de porosidade (lado esquerdo da zona 1), perda de hidróxido de cálcio (CH), deposição de gesso no lugar do CH e substituição de monosulfoaluminato de cálcio hidratado (AFm) por etringite .....	15
Fig.13 – Taumasite produzida por um ataque por sulfatos .....	15
Fig.14 – Representação esquemática do mecanismo de expansão de uma barra de argamassa devida à ocorrência de DEF. A expansão não uniforme da pasta dá origem a fissuras na pasta e na interface com as partículas de agregado .....	20
Fig.15 – Representação esquemática do efeito filer.....	21
Fig.16 – Vista do Monte Vesúvio .....	22
Fig.17 – Sílica de fumo vista em microscópio electrónica de varrimento, ampliada 50 000 e 200 000 vezes .....	23
Fig.18 – Comparação de curvas granulométricas do cimento Portland, cinza volante calcária e siliciosa e sílica de fumo.....	24
Fig.19 – Processo da produção da pasta kraft .....	25
Fig.20 – Cinzas volantes de biomassa (BFA) .....	26
Fig.21 – Análise granulométrica a laser das cinzas volantes de biomassa (BFA) .....	26
Fig.22 – Imagens das cinzas volantes de biomassa (BFA) ao microscópio electrónico de varrimento .....	27
Fig.23 – Espectro de raios X pontuais da amostra de cinzas volantes de biomassa (BFA) .....	27
Fig.24 – Difractograma das cinzas volantes de biomassa (BFA).....	28
Fig.25 – Moinho de bolas cerâmicas .....	29
Fig.26 – Análise granulométrica a laser das cinzas volantes de biomassa moídas (GBFA).....	30
Fig. 27 – Imagens das cinzas volantes de biomassa moídas (GBFA) ao microscópio electrónico de varrimento.....	30
Fig.28 – Grits moído (GRT) .....	31

Fig.29 – Análise granulométrica a laser dos grits (GRT) .....	31
Fig.30 – Imagens de uma amostra de grits (GRT) ao microscópio electrónico de varrimento e espectros de raios X pontuais .....	31/32
Fig.31 – Difractograma dos grits (GRT) .....	32
Fig.32 – Análise granulométrica a laser das cinzas de fundo de biomassa (GWA 24h) .....	34
Fig.33 – Imagens de uma amostra de cinzas de fundo de biomassa (GWA 24h) ao microscópio electrónico de varrimento e espectros de raios X pontuais.....	34
Fig.34 – Difractograma das cinzas de fundo de biomassa (GWA 24h).....	35
Fig.35 – Análise granulométrica a laser das cinzas de fundo de biomassa (GWA 3h) .....	36
Fig.36 – Pó de vidro (GP) .....	36
Fig.37 – Análise granulométrica a laser do pó de vidro (GP).....	37
Fig.38 – Curva granulométrica laser do CEM I 42.5R- .....	39
Fig.39 – Avaliação da trabalhabilidade de uma amassadura.....	41
Fig.40 – Misturadora .....	42
Fig.41 – Molde utilizado no ensaio ASTM C 1260 .....	42
Fig.42 – Identificação e numeração dos provetes.....	43
Fig.43 – Leitura do comprimento dos provetes .....	43
Fig.44 – Banho-maria a 80°C.....	43
Fig.45 – Resultados do ensaio ASTM C 1260 .....	45
Fig.46 – Molde do ensaio de resistência ao ataque por sulfatos .....	46
Fig.47 – 6 provetes de 20mmx20mmx20mm.....	46
Fig.48 – Compactação do ensaio de resistência ao ataque por sulfatos .....	47
Fig.49 – Conservação dos provetes no ensaio de resistência ao ataque por sulfatos.....	47

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Principais casos de estudo de obras afectadas pela RAS em Portugal.....	5/6
Quadro 2 – Tipos de rochas e minerais potencialmente reactivos aos álcalis.....	10
Quadro 3 – Tipos de rochas e minerais potencialmente fornecedoras de álcalis.....	11
Quadro 4 – Dados anuais de produção e consumo na indústria da construção, em milhões de toneladas, de cinzas volantes, escória granulada de alto-forno moída e sílica de fumo.....	22
Quadro 5 – Análise Mineralógica (BFA).....	28
Quadro 6 – Análise química segundo a NP EN 196-2 (BFA).....	29
Quadro 7 – Análise Mineralógica.....	32
Quadro 8 – Análise química segundo a NP EN 196-2.....	33
Quadro 9 – Análise química das cinzas de fundo de biomassa (GWA 24h).....	35
Quadro 10 – Análise química das cinzas de fundo de biomassa (GWA 24h).....	37
Quadro 11 – Composição química do cimento utilizado (disponibilizado pela SECIL).....	39
Quadro 12 – Composição granulométrica da areia de referência CEN.....	40
Quadro 13 – Composição e diâmetro de espalhamento das argamassas.....	41
Quadro 14.1 – Principais características das adições utilizadas.....	50
Quadro 14.2 – Principais características das adições utilizadas.....	51
Quadro 15 – Resultados do ensaio ASTM C 1260-07.....	52
Quadro 16 – Resultados do ensaio E 461-2004.....	53
Quadro 17 – Adições por ordem decrescente de resultados da expansão.....	54

## **SÍMBOLOS E ABREVIATURAS**

CO<sub>2</sub> – Dióxido de carbono.

GP – Pó de vidro.

BFA – Cinzas volantes de biomassa.

GBFA – Cinzas volantes de biomassa moídas.

GWA – Cinzas de fundo de biomassa.

GRT – Grits.

CTL – Argamassa de controlo.

SF – Sílica de fumo.

MEV – Microscópio electrónico de varrimento.

CEM I 42,5 R – Cimento Portland do tipo I e classe de resistência 42,5 R.

RAS – Reacção álcalis-silica.

EEF – “Early ettringite formation

DEF – “Delayed ettringite formation”

ESA – “External sulfate attack”

ISA – “Internal sulfate attack”



# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. ENQUADRAMENTO GERAL

O betão de cimento Portland está associado ao grande desenvolvimento registado na indústria da construção nos últimos anos do século XX, tendo estado presente não só na construção corrente mas sobretudo nas grandes obras públicas, não havendo razões para duvidar de que continuará a dar uma ajuda decisiva para o crescimento da economia mundial, particularmente dos países emergentes, tais como a China e a Índia. Nestas circunstâncias, continuarão a existir motivos suficientes para incentivar investimentos no desenvolvimento tecnológico dos materiais de construção e particularmente do betão, com o objectivo de responder aos novos desafios colocados pelo ambiente, nomeadamente a diminuição das emissões de CO<sub>2</sub> e do consumo de matérias primas, contribuindo deste modo para a sustentabilidade da construção.

O documento “Cement Technology Roadmap 2009”, relativo à redução das emissões de CO<sub>2</sub> até ao ano 2050, do World Business Council for Sustainable Development e da International Energy Agency, aponta, entre outras medidas, a substituição parcial do clínquer no cimento por adições, indicando um teor de clínquer de 71% como objectivo a atingir em 2050, considerando como ponto de partida 78% em ano de 2008.

Inserem-se nestes desafios os esforços que têm vindo a ser desenvolvidos para aumentar a durabilidade e o desempenho das estruturas de betão, tendo em atenção a relação entre os conceitos “durável” e “sustentável”. Com efeito, aumentar a durabilidade é também uma opção para diminuir o consumo do desenvolvimento e reduzir as cargas ambientais, através da menor produção e depósito de resíduos, constituindo assim uma vantagem ambiental que não pode ser desperdiçada (Sjöstrom; Agopyan, 2002).

Estas preocupações reflectem-se no texto do preâmbulo do Decreto-Lei nº 178/2006 de 5 de Setembro, que faz a transposição para o ordenamento jurídico interno a Directiva nº 2006/12/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 5 de Abril, sobre a gestão de resíduos, onde é evidenciada a importância da valorização dos resíduos sobre a sua eliminação e a necessidade de minimizar a produção de resíduos e de assegurar a sua gestão sustentável, transformando estas orientações em questões de cidadania.

Importa continuar a investigação de novas adições, obtidas a partir de resíduos industriais que possam vir a ser incorporados no betão, com a finalidade de melhorar certas propriedades ou mesmo alcançar propriedades especiais, aumentando não só a durabilidade e desempenho das estruturas, mas também permitindo a valorização dos resíduos, a diminuição dos consumos energéticos na fabricação do cimento e a preservação dos recursos naturais.

A durabilidade do betão está relacionada com a sua capacidade de resistir às acções ambientais a que a estrutura vai estar sujeita ao longo da sua vida útil, tendo em consideração os principais factores de ataque ao betão armado ou pré-esforçado, nomeadamente as reacções álcalis-agregado (RAS) e os ataques por sulfatos, pelo que as investigações de novas adições passa pela verificação das suas capacidades de resistência a estas acções.

A experiência tem demonstrado que um dos parâmetros que contribui para a durabilidade do betão é a melhoria da sua permeabilidade, responsável pelo transporte de gases e líquidos, com ou sem substâncias em solução ou suspensão, que pode ser obtida através da utilização de adições pozolânicas (Petranek, 2006). Nesta perspectiva, a investigação de novas adições obtidas a partir de resíduos industriais com grau de finura superior à do cimento Portland pode permitir que se alcance uma maior durabilidade do betão estrutural, mesmo que em detrimento das resistências mecânicas (Swamy, 2007).

## **1.2. PROPOSTA DE TRABALHO DE INVESTIGAÇÃO**

A proposta de trabalho enquadra-se no âmbito do estudo da possibilidade de aproveitar resíduos industriais para o fabrico de adições que possam substituir parcialmente o cimento Portland.

Neste contexto, em primeiro lugar, foram analisados diversos resíduos industriais, designadamente, cinzas de fundo de biomassa florestal (GWA), grits, cinzas volantes de biomassa, dregs, sílica de fumo e pó de vidro (GP), que tinham potencial de valorização no âmbito da sustentabilidade na construção.

Numa fase posterior, procedeu-se à definição de um programa experimental para avaliar o comportamento destes resíduos, convenientemente tratados e incorporados em argamassa de cimento Portland, substituindo parcialmente o cimento, quando submetida a ataque externo por sulfatos (ESA) e reacções álcalis-silica (RAS).

No programa experimental foram estabelecidos os ensaios, tendo em atenção os documentos normativos disponíveis, com as adaptações consideradas adequadas para atender às limitações de tempo disponível para o desenvolvimento do programa. Assim, seguiu-se a Especificação LNEC E 462:2004, para determinar a variação da resistência das argamassas ao ataque de uma solução de sulfato de sódio e a ASTM 1260 para verificar a ocorrência de reacções expansivas devido à RAS, a partir dos resultados obtidos nos ensaios, que servem para avaliar a reactividade dos agregados aos álcalis em 14 dias.

## **1.3. ORGANIZAÇÃO DO PRESENTE DOCUMENTO**

O documento está organizado em quatro capítulos, em que nos dois primeiros se pretende fazer o enquadramento geral do trabalho desenvolvido, apresentando uma introdução ao assunto e o estado da arte da matéria que interessa aos estudos realizados. Por um lado, passou-se em revista as reacções álcalis-silica e os ataques por sulfatos, e, por outro, analisaram-se as adições que podem ser utilizadas no betão com a finalidade de melhorar certas propriedades ou mesmo alcançar propriedades especiais.

No terceiro capítulo, é estabelecido o Programa Experimental para o estudo do ataque externo por sulfatos (ESA) e álcalis-silica (RAS) em argamassa de cimento Portland, com substituição parcial do cimento por adições provenientes de resíduos industriais, por forma a ajudar a compreender a influência destas adições no comportamento do betão e a sua eventual valorização.

No último capítulo, apresentaram-se as conclusões relativas à avaliação do comportamento das várias adições, através do ensaio acelerado em barra de argamassa (ASTM 1260-07) e do ensaio de resistência ao ataque por sulfatos (LNEC E 462:2004).

# 2

## ESTADO DA ARTE

### 2.1. REACÇÃO ÁLCALIS-SÍLICA

#### 2.1.1. INTRODUÇÃO

Factores exógenos e endógenos têm contribuído para que as construções em betão, muito novas quando comparadas com as construções milenares da nossa antiguidade, continuem apresentar grandes problemas de durabilidade, que têm motivado um crescente interesse na investigação das patologias que lhes estão associadas, responsáveis pela degradação precoce das construções, tendo em vista evitar a sua ocorrência em obras futuras e minimizar a sua progressão nas estruturas já existentes.

As reacções álcalis-agregado (RAS), identificadas desde 1940, são uma das causas da degradação do betão, associadas às reacções químicas que se desenvolvem entre os constituintes reactivos dos agregados e os iões alcalinos e hidroxilos presentes na solução intersticial do betão, originando a expansão e a fissuração do betão e favorecendo significativamente outros processos de deterioração, nomeadamente, a corrosão das armaduras no caso do betão armado. Segundo Diamond, tem-se verificado um reforço da consciencialização relativamente ao problema da reacção álcalis-sílica por parte dos especialistas e uma maior sensibilidade relativamente às perdas económicas resultantes. Em sintonia com esta preocupação crescente, tem-se procurado realizar uma melhor apreciação do problema (Diamond, 1997)

A necessidade de se ter um diagnóstico correcto das causas de degradação de uma estrutura de betão é determinante, nomeadamente, na escolha do método de reparação a empregar, o que nem sempre é fácil em resultado da semelhança, em termos macroscópicos, entre esta reacção e a sulfática. Alguns casos conhecidos de insucesso na opção por um determinado método de reparação vieram a ser justificados por um incorrecto ou incompleto diagnóstico.

#### 2.1.2. HISTÓRIA DA REACÇÃO ÁLCALIS-SÍLICA

Entre 1920 e 1930, no Estado da Califórnia dos Estados Unidos da América (EUA), registou-se o aparecimento dum grande número de estruturas com fissuras, incluindo edifícios escolares, pontes, pavimentos e uma estrutura portuária, cujas causas foram atribuídas a deficiências da qualidade da construção, do projecto e dos materiais empregues, não tendo sido encontrada outra explicação plausível para os fenómenos observados (Hobbs, 1988).

Em 1940, o norte-americano Thomas Stanton, engenheiro de materiais da divisão de auto-estradas do estado da Califórnia, atribui a expansão e fissuração detectada no betão da barragem de Parker, na Califórnia, à reactividade química dos agregados utilizados. Os ensaios em laboratório, realizados por Stanton, revelaram que a expansão e a fissuração de amostras de argamassa estava relacionada com uma reacção entre os álcalis da pasta do cimento e a areia local que havia sido utilizada como agregado no betão das estruturas afectadas (Stanton, 1940).

Os trabalhos de Stanton causaram um grande interesse e levaram a que a RAS fosse diagnosticada em vários locais dos EUA, envolvendo também outros tipos de agregados, o que levou à publicação de uma “lista negra” de agregados reactivos aos álcalis (McConnell et al., 1947).

Embora a primeira estrutura portuguesa na qual foi detectada a RAS tenha sido a barragem de Pracana (Fig.1), por volta de 1980 (Silva, 1992), só em meados dos anos 90, com a descoberta do caso do viaduto Duarte Pacheco em Lisboa (Braga Reis et al., 1993), é que o meio técnico nacional tomou maior conhecimento desta patologia no betão.

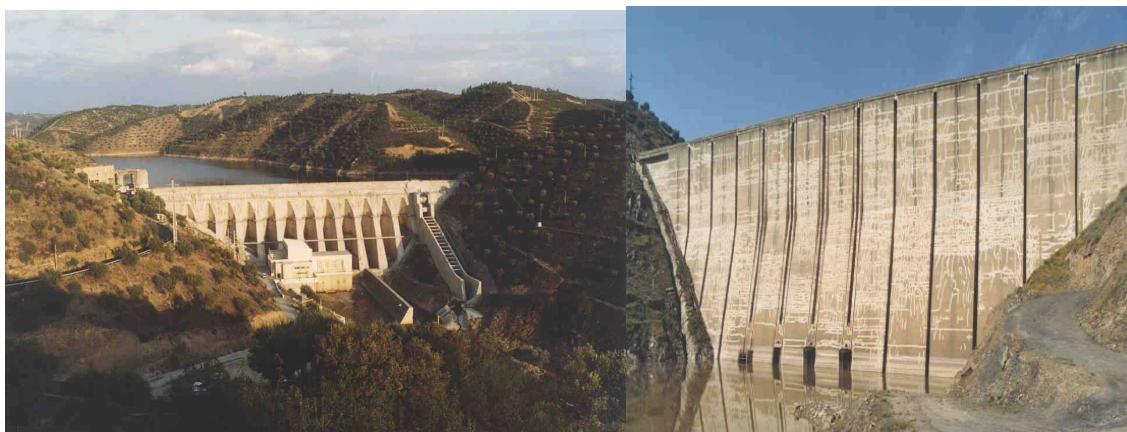


Fig.1 – Barragem de Pracana no rio Ocreza

Actualmente, existem já algumas dezenas de estruturas recenseadas em Portugal como estando afectadas por RAS, sendo previsível que este número venha a aumentar rapidamente face aos condicionamentos geológicos e a insuficiências na aplicação do dispositivo normativo nacional em matéria de construção.

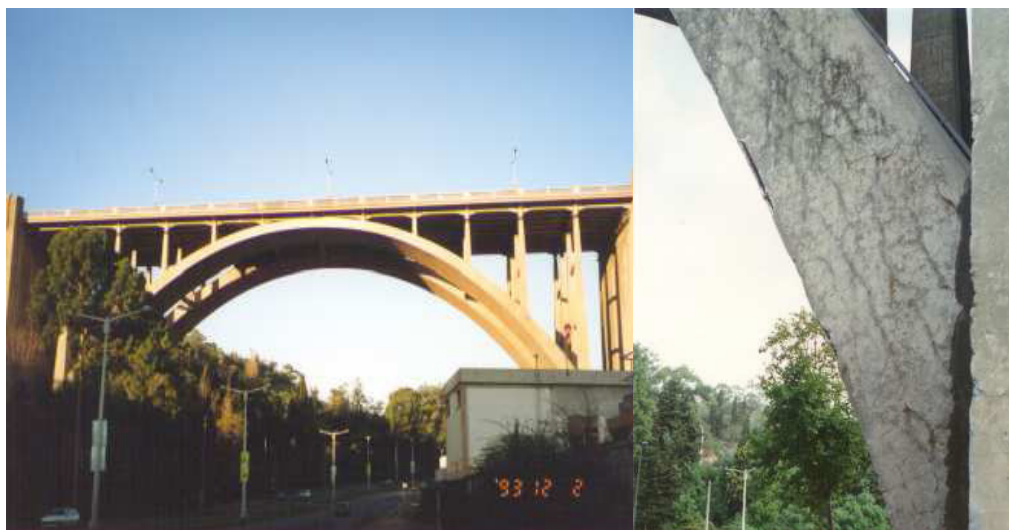


Fig.2 – Viaduto Duarte Pacheco e sinais de fissuração num elemento estrutural

Quadro 1 – Principais casos de estudo de obras afectadas pela RAS em Portugal (Brito; Barreto Santos, 2008).

Casos de Estudo	Imagens
<p><b>Barragem Santa Luzia</b></p> <p>Concluída em 1942</p> <p>(Gomes et al., 2004)</p>	
<p><b>Barragem do Alto Ceira</b></p> <p>Concluída em 1949</p> <p>(Braga Reis et al., 1996)</p>	
<p><b>Barragem de Pracana</b></p> <p>Concluída em 1951</p> <p>(Neiva et al., 1995)</p>	
<p><b>Barragem do Cabril</b></p> <p>Concluída em 1951</p> <p>(Silva, 1992; Braga Reis et al., 1996)</p>	
<p><b>Barragem do Picote</b></p> <p>Concluída em 1958</p> <p>(Ribeiro et al., 1996)</p>	
<p><b>Barragem de Caia</b></p> <p>Concluída em 1967</p>	
<p><b>Barragem do Roxo</b></p> <p>Concluída em 1968</p>	

---

**Pavimento do aeroporto de Santa Maria  
(Açores)**

(Reis et al., 1996)



---

**Viaduto Duarte Pacheco**

(Appleton e Costa, 2001)



---

**Ponte da Figueira da Foz**

(Rito e Appleton, 2000; Horta e Plácido, 2004)



---

**Viaduto da Baixa do Mondego (A1 Lisboa -  
Porto)**

(Santos Silva, 2002)



---

**Ponte sobre o rio Guadiana em Pedrógão**

(Vieira e Santos Silva, 2004)



---

### 2.1.3. MECANISMO DA REACÇÃO ÁLCALIS-SÍLICA

A reacção álcalis-silica corresponde ao ataque dos iões alcalinos ( $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$ ) e hidroxilos ( $\text{OH}^-$ ), presentes na solução intersticial do betão, a certas formas de sílica reactiva, com uma estrutura mais ou menos desordenada e por isso instável num meio de elevado pH (meio alcalino). A reacção produz no betão, em torno dos agregados, um gel sílico-alcalino de composição variável (Fig.7), que ao absorver a água disponível expande-se, ocupando um volume maior do que os materiais originários da reacção, podendo gerar tensões elevadas, capazes de fissurar as partículas de agregado ou de betão e assim causar danos muitas vezes irreparáveis na estrutura (Fig.8). A intensidade da força expansiva varia com a composição do gel, de uma forma que não é ainda bem conhecida, e com a quantidade total de gel formado (Santos Silva, 2006) (West, 1996; Fernandes, 2005).

É hoje geralmente aceite que o hidróxido de cálcio (portlandite), sendo a principal fonte de iões cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), tem um papel muito importante no desenvolvimento da RAS, como fonte de iões hidroxilos, permitindo a reacção dos sais alcalinos com a sílica reactiva e intervindo no desenvolvimento das forças expansivas (Santos Silva, 2006).

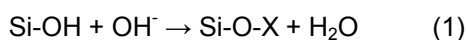


Fig.3 – Reacção álcalis-silica reactiva. Estados de alteração (1 a 4) de quartzo-filoneano em gel (Santos Silva, 1996).



Fig.4 – Deterioração do betão por reacções álcalis-silica reactiva (Santos Silva, 2007).

Esquemáticamente a RAS pode representar-se pela reacção de neutralização dos grupos silanol ácidos ( $\text{Si-OH}$ ), presentes na superfície da sílica, quando atacados pelos iões hidroxilos, libertando água:



Numa segunda fase o grupo siloxano ( $\text{Si-O-Si}$ ) é atacado pelos iões hidroxilo, que conduzem à quebra das ligações do grupo e substituindo-as por pares  $\text{SiO}^-$ .



O processo exposto decorre continuamente, provocando a fragmentação tridimensional da sílica em aniões de silicatos com diversos tamanhos. As cargas negativas são influenciadas pelo sódio ( $\text{Na}^+$ ) e pelo potássio ( $\text{K}^+$ ), levando à formação do gel sílico-alcalino (Hasparyk, 2005).

A velocidade do ataque dependerá da concentração dos hidróxidos alcalinos na solução intersticial e da estrutura da sílica. No caso do quartzo “bem cristalizado”, este é geralmente considerado não reactivo em solução alcalina, o que leva a que o ataque pelos hidróxidos alcalinos ocorre essencialmente à sua superfície (Fig.5). A velocidade de penetração dos hidróxidos alcalinos na estrutura bem cristalizada do quartzo é baixa devido à sua pequena área superficial interna, enquanto que no quartzo criptocristalino já é maior, devido ao aumento da área superficial (Fig.5b). Este mesmo comportamento é observado em grãos de grandes dimensões de quartzo que apresentem defeitos ou estejam deformados, o que sugere que nenhum agregado silicioso possa ser considerado à partida “inerte” no que se refere à RAS (Fournier and Bérubé, 1993; Thomas, 1994; Broekmans, 2004).



A sua origem está, a maioria das vezes, na matéria-prima utilizada para o fabrico do cimento, principalmente do calcário, marga, argila, xisto argiloso e do carvão, quando é utilizado combustível, encontrando-se fundamentalmente sob a forma de sulfatos, silicatos e aluminatos. Para além do cimento, os álcalis podem também ter origem em alguns minerais dos agregados, no contacto com a água do mar ou nos químicos utilizados em acções de degelo (Fernandes, 2005).

No cimento, a presença de álcalis resulta do processo de calcinação do clínquer do cimento, em que os iões  $K^+$  e  $Na^+$  são vaporizados pelas altas temperaturas do forno, acabando por condensar à medida que o material é transportado através dele e criar uma camada superficial de álcalis na superfície do clínquer. Estes álcalis que permanecem na superfície do clínquer, como é o caso dos sulfatos alcalinos, são facilmente solubilizados na água de amassadura, enquanto que os que se encontram dentro da sua estrutura, caso dos aluminatos e dos silicatos, são libertados lentamente durante o processo de hidratação (Fournier and Bérubé, 1993). Na figura 4, podemos observar a evolução da concentração de iões na solução intersticial ao longo do tempo de cura, onde é visível que os álcalis são predominantes na solução aquosa que preenche a matriz do cimento (Kurtis et al., 2002).

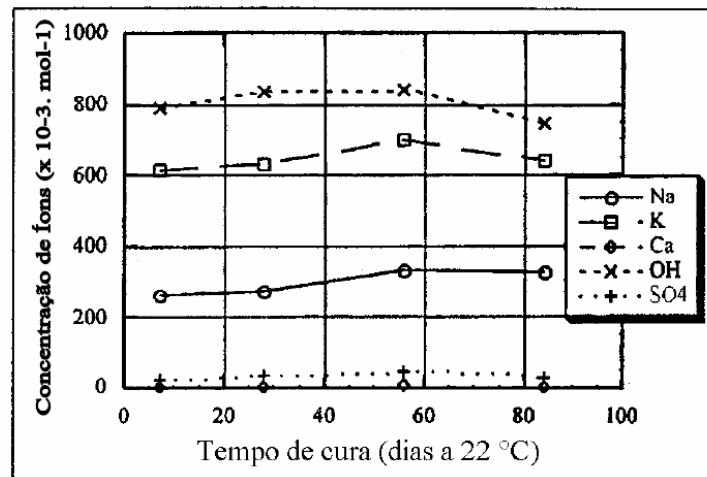


Fig.7 – Concentração de íons na solução dos poros do cimento ao longo do tempo de cura (Kurtis et al., 2002).

Os álcalis incorporam-se parcialmente nos produtos de hidratação do cimento e são facilmente solúveis na água dos poros, o que faz com que a concentração de íons hidroxilos aumente, incrementando igualmente o pH da solução de cerca de 12,4 para um valor entre 13 e 14 (Lopes, 2004), potenciando a ocorrência de RAS. Para Hobbs (1988), o betão com um elevado teor em álcalis, apresenta um pH que varia entre 13,5 e 13,9, enquanto que no betão com baixo teor em álcalis varia entre 12,7 e 13,1.

Por forma a caracterizar o risco de ocorrência da RAS associado ao teor de álcalis, tendo presente a contribuição de cada um dos álcalis (sódio e potássio), o seu teor é expresso em termos de  $Na_2O_{eq}$ , que é calculado de acordo com a equação 1, em que 0,658 corresponde à razão entre as massas moleculares do  $Na_2O$  e  $K_2O$  (Santos Silva, 2006).

$$Na_2O_{eq} = Na_2O + 0,658 \times K_2O \quad (1)$$

Importa salientar que nem todos os álcalis no betão são utilizados no ataque à sílica reactiva, apenas os “álcalis activos” (Oberholster, 1983), isto é, aqueles que não ficam fixos na estrutura cristalina dos silicatos de cálcio hidratados ou nos próprios agregados, é que podem participar na RAS.

Trabalhos recentes, desenvolvidos por Bérubé (2002), confirmaram a libertação de quantidades significativas de álcalis activos ao longo do tempo para a solução intersticial do betão, provenientes dos agregados, especialmente em agregados graníticos, e que são responsáveis pelo aparecimento de casos de degradação do betão devido à RAS em estruturas onde foi utilizado cimento com teor em álcalis inferior ao limite máximo estabelecido (inferior a 0,60% Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub>) (Bérubé, 2002).

No entanto, como referem outros autores, a melhor garantia para impedir a RAS será antes a de impor um valor limite para o teor de álcalis activos do betão, já que um teor elevado de cimento no betão contribui com mais álcalis do que um betão com menos cimento do mesmo tipo (Oberholster, 1983; Jensen, 1993).

No intuito de impor um teor de álcalis que prevenisse a RAS no betão, a maioria dos países adoptou o valor limite de 3,0 kg/m<sup>3</sup> de Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub> de álcalis solúveis no betão (Nixon and Sims, 1992). Porém, rapidamente se constatou, com a descoberta de RAS em betões que haviam satisfeito esse limite, da necessidade de incluir outro tipo de prevenção adicional (Wood, 2000). Nesse sentido as mais recentes recomendações definem diferentes valores limite em função da classe de reactividade dos agregados (LNEC E 461, 2007).

#### 2.1.4.2. Agregados reactivos

A segunda condição para a ocorrência de RAS no betão é a presença de agregados reactivos com os álcalis, tais como os que têm origem em rochas siliciosas com estruturas amorfas e desordenadas, designadamente a opala e a obsidiana, que é o vidro natural altamente silicioso. As sílicas cristalinas polimorfas, como a cristobalite e a tridimite, também possuem elevado potencial reactivo (Lopes, 2004). Segundo Kurtis (2002), qualquer agregado que tenha sílica na sua constituição tem potencial para participar na RAS, exemplo disso é o quartzo, que embora apresente uma estrutura altamente cristalina, possui na sua superfície ligações Si-O polarizadas negativamente, possibilitando deste modo a reacção expansiva.

No quadro 2 indicam-se os tipos de minerais e de rochas potencialmente reactivos aos álcalis existentes em Portugal, complementando-se a informação no quadro 3 com as rochas e minerais potencialmente fornecedores de álcalis.

Quadro 2 – Tipos de rochas e minerais potencialmente reactivos aos álcalis (LNEC E 461-2007)

Minerais	Rochas	Principais minerais reactivos nas rochas
Opala	Jaspes, Liditos	Opala, calcedónia, cherte,
Calcedónia	Ftanitos, Diatomitos	quartzo tectonizado
Cherte	Xistos siliciosos, Filitos	
Quartzo tectonizado	Grauvacóides	Quartzo tectonizado, cherte
Tridimite	Corneanas	
Cristobalite	Quartzitos	
Obsidiana	Granitóides	
	Vulcanitos (riolito, dacito, andesito, basalto)	Sílica vítrea
	Calcários	Inclusões siliciosas (cherte)
	Dolomitos	

Quadro 3 – Tipos de rochas e minerais potencialmente fornecedoras de álcalis (LNEC E 461-2007)

Minerais fornecedores de:		Rochas
potássio	sódio	
Sanidina	Albite	Granitóides
Ortoclase	Oligoclase	Sieníticas
Microclina	Nefelina	Traquíticas
Leucite	Sodalite	Corneanas Feldspáticas
Biotite		Leptiniticas
Moscovite		Arcólicas
		Grauvacóides

A proporção de sílica reactiva no betão constitui um factor importante para determinar a reactividade dos agregados, na medida em que para uma dada quantidade de álcalis disponível e condições ambientais específicas, parece haver um teor mais desfavorável ou crítico de sílica reactiva disponível que conduz a uma expansão máxima (Hobbs, 1988). A figura 5 permite observar a variação de expansão consoante a quantidade de agregado reactivo, de acordo com Hobbs.

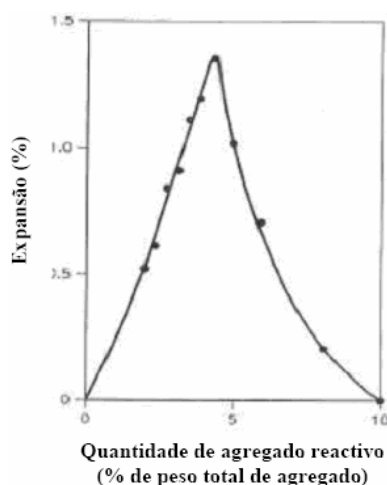


Fig.8 – Influência na expansão da quantidade de agregado reactivo (ICOLD, 1991).

Da análise do gráfico, verifica-se que, até a uma determinada percentagem, a expansão aumenta com o aumento de quantidade de agregado, até que chega a um ponto a partir do qual, embora aumentando a quantidade de agregado reactivo, a expansão diminui. O pico de expansão é o efeito péssimo no exemplo apresentado (Hobbs, 1988).

No entanto, o aumento ou diminuição da expansão relativamente à concentração de constituinte reactivo é variável, verificando-se, em alguns casos, que, com formas de sílica muito reactivas, esta proporção crítica (por vezes designada de “péssimo”) representa apenas alguns por cento do agregado, enquanto que com formas de sílica menos reactivas aquele “péssimo” pode corresponder à totalidade do agregado. Quando a proporção de sílica reactiva é superior ao “conteúdo péssimo”, a concentração de iões hidroxilos não é suficiente para manter a reacção e a expansão decresce (Fernandes, 2005).

Atendendo a que a reacção entre os iões hidroxilo e a sílica reactiva é restringida à superfície do grão de agregado, o grau de expansão do betão será influenciado pela superfície específica do agregado e daí pela granulometria (Fig.6) e em menor extensão pela sua forma e textura (Hobbs, 1988). A superfície específica pode ser definida como a área total de superfície por unidade de massa ou volume sendo, no entanto, geralmente apresentada relativamente à massa. Este parâmetro é inversamente proporcional à dimensão de um agregado e, dessa forma, quanto mais fina for uma partícula, maior será a sua superfície específica e consequentemente maior será a quantidade de sílica disponível para a reacção álcalis-silica (Foradaba, 2005). No caso da fracção areia, tem vindo a ser comprovado experimentalmente que a expansão do betão é tanto maior quanto menor o tamanho da partícula, até a um diâmetro aproximadamente de 75  $\mu\text{m}$ , sendo que para valores inferiores a reacção desenvolve-se de forma mais dispersa e sem grandes expansões (Metha, 1986; Foradaba, 2005).

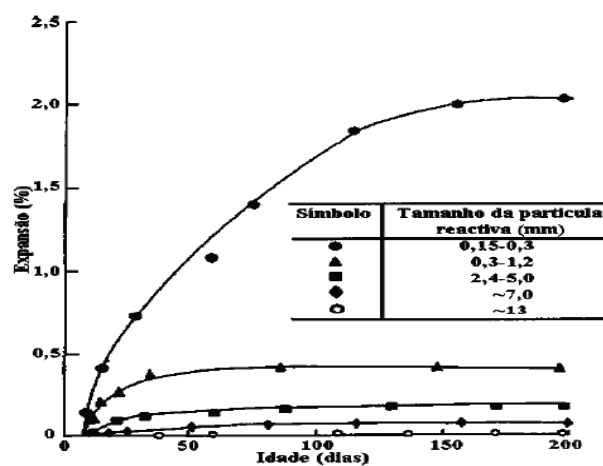


Fig.9 – Influência do tamanho da partícula reactiva na expansão por RAS (Hobbs, 1988).

#### 2.1.4.3. Humidade elevada e razão água/cimento

A água de diferentes origens, desde a água livre no interior do betão à contribuição exterior, parece desempenhar um duplo efeito na RAS. Como agente reactivo, a água influencia a velocidade de expansão aquando da sua absorção pelo gel sílico-alcálico e como meio reaccional, assegura o transporte dos catiões alcalinos e dos iões  $\text{OH}^-$  (Larive, 1998).

A expansão do betão varia directamente com a humidade relativa, verificando-se, pela análise da figura 7, que para valores de humidade relativa superiores a 80 % a expansão aumenta exponencialmente (Poole, 1992). Várias pesquisas realizadas em laboratório chegaram à conclusão que a RAS pode ocorrer no betão para valores críticos de humidade relativa (HR) de pelo menos 85 % para temperaturas da ordem dos 20°C (68°F) (Neville, 1995). No entanto, os trabalhos realizados por Olafson (Olafson, 1986) demonstram que o limite dos 85 % de HR desce com o aumento da temperatura, tendo-se inclusive observado expansões significativas para valores de 70 % de HR a 38°C. Também parece haver uma relação entre o teor de álcalis e a HR necessária para o desenvolvimento da RAS, pois constatou-se, para uma mesma composição de betão, que o aumento no teor de álcalis necessita duma menor HR para desencadear a RAS (Tomosawa et al., 1989).

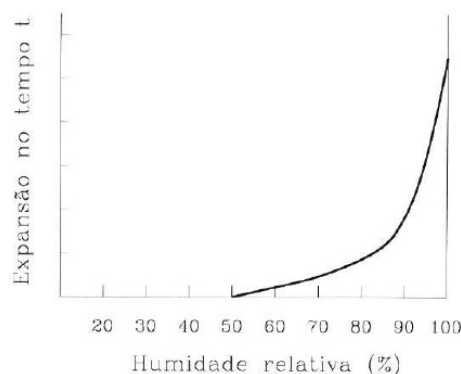


Fig.10 – Efeito da humidade relativa sobre a expansão do betão devido a reacções álcalis-silica (Poole, 1992).

Os resultados apresentados na literatura relativamente ao efeito da razão água/cimento (A/C) no desenvolvimento da RAS não são consensuais, embora seja conhecido que a permeabilidade do betão, relacionada com aquela razão, seja um dos factores mais importantes para a sua durabilidade. Para alguns autores uma menor razão A/C provoca um aumento da concentração em álcalis na solução intersticial e, conseqüentemente, um incremento da expansão, o que está de acordo com a opinião de outros autores, que defendem que o aumento do teor de água (maior razão A/C) provoca uma diminuição da RAS, já que a concentração em álcalis na solução dos poros é reduzida, podendo no entanto esta ser agravada se ocorrer exsudação, para além do aumento da porosidade poder servir com “vaso expansivo” para os produtos da reacção entretanto produzidos (Gillot, 1975; Bérubé and Fournier, 1993; Neville, 1995).

#### 2.1.4.4. Regulamentação aplicável

As reacções álcalis-silica desenvolvem-se quando estão reunidas as três condições a seguir discriminadas: uma alcalinidade suficientemente elevada da solução intersticial do betão, a existência de agregados reactivos com concentrações dentro duma gama crítica e humidade elevada (Lopes, 2004).

A NP EN 206-1 2007 estabelece que, em matéria requisitos básicos para a composição de betão, em 5.2.3.4 - Resistência à reacção álcalis-silica, no caso dos agregados conterem variedades de sílica susceptíveis de ataque pelos álcalis ( $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$  provenientes do cimento ou de outras fontes) e o betão se encontrar exposto à humidade, devem ser levadas a cabo acções para prevenir a ocorrência da reacção álcalis-silica, usando procedimentos com aptidão estabelecida. Estas acções são remetidas, no respectivo Documento Nacional de Aplicação DNA 5.2.3.4, para a Especificação LNEC E461-2007 “Betões. Metodologia para prevenir reacções expansivas internas”.

Esta especificação do LNEC define um conjunto de medidas preventivas a seguir discriminadas:

- Controlar a alcalinidade da solução dos poros do betão, limitando o teor de álcalis ou usando ligantes apropriados, constituídos por cimentos (ver NP EN 197-1) e misturas de cimentos e adições (ver Especificações LNEC E 464);
- Evitar a presença de um teor crítico de sílica reactiva;
- Controlar a humidade e manter o betão num estado relativamente seco;
- Modificar as propriedades do gel formado de modo a não ser expansivo.

## 2.2. ATAQUE POR SULFATOS

### 2.2.1. INTRODUÇÃO

O ataque por sulfatos é um termo genericamente usado para descrever a deterioração do betão resultante de interacções químicas entre os compostos da pasta de cimento hidratado de Portland e iões sulfatos provenientes do ambiente envolvente ou dos constituintes do betão, que conduzem à formação de produtos de expansão, dos quais se destaca a etringite (sulfoaluminato de cálcio hidratado -  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ), o gesso (sulfato de cálcio hidratado -  $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) e, por vezes, a taumasite (sulfocarbonato de cálcio e sílica hidratada -  $\text{CaSiO}_2\cdot\text{CaCO}_3\cdot\text{CaSO}_4\cdot 15\text{H}_2\text{O}$ ).

No início da amassadura do betão, a reacção do gesso, que é adicionado ao clínquer, durante o processo de produção de cimento, para actuar como um retardador de presa, reage com os aluminatos de cálcio ( $\text{CaOAl}_2\text{O}_3$ ) e a água, originando etringite, que não é prejudicial para o betão, uma vez que a mistura de cimento e água ainda está numa fase plástica (Collepari, 2003). Cerca de 24 horas depois do início da amassadura, após o gesso ter sido consumido na reacção acima referida, começa a transformação da etringite em monosulfoaluminato de cálcio hidratado, ao reagir com os aluminatos de cálcio em presença da água, passando a fazer parte da constituição do betão (Coutinho, 2006).

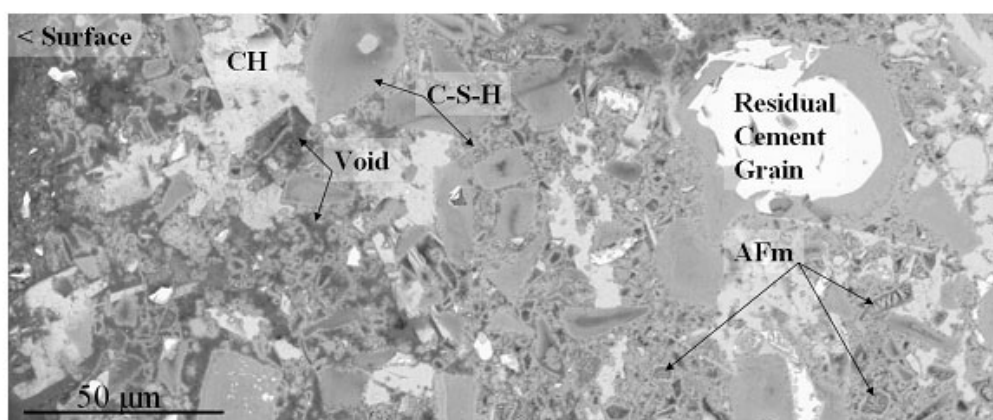


Fig.11 – Betão não exposto ao ataque por sulfatos, mostrando hidróxido de cálcio (CH), silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) e monosulfoaluminato de cálcio hidratado (AFm) (Ferraris et al., 2005).

Uma vez o betão endurecido, a formação de etringite provoca uma acção de expansão num meio rígido, que pode conduzir à deterioração do betão.

Segundo Collepari (2003), enquanto que a primeira etringite é designada por “early ettringite formation” (EEF) ou “primary ettringite”, e não provoca qualquer deterioração do betão, a última é designada por “delayed ettringite formation” (DEF) ou “secondary ettringite”, e está na origem de dois tipos de deterioração do betão, que se designam por “external sulfate attack” (ESA) e “internal sulfate attack” (ISA), dependendo da fonte dos sulfatos que entram na reacção.

Na terminologia corrente, o termo “delayed ettringite formation” (DEF) ou etringite retardada, está reservado para a etringite que se forma em resultado da acção da temperatura, especialmente nas primeiras idades do betão, como resultado quer de tratamentos térmicos, quer do desenvolvimento de elevados calores de hidratação nos betões em massa ou com elevadas dosagens de cimento, e da presença de sulfatos em quantidade suficiente (Especificação LNEC E461 – 2004).

O termo “secondary ettringite” refere-se à etringite que ocorre após o final da presa do betão, em resultado da circulação de água na massa do betão (fenómenos de dissolução/precipitação) e da presença de sulfatos com origem em fontes externas (solo, água, etc.) ou interna (agregados, água de amassadura) (Recommendations for preventing disorders due to delayed ettringite formation, publicado pelo Laboratoire Central des Ponts et Chaussées). Na terminologia corrente, estes dois ataques por sulfatos são designados por externos e internos, em conformidade com a origem dos sulfatos.

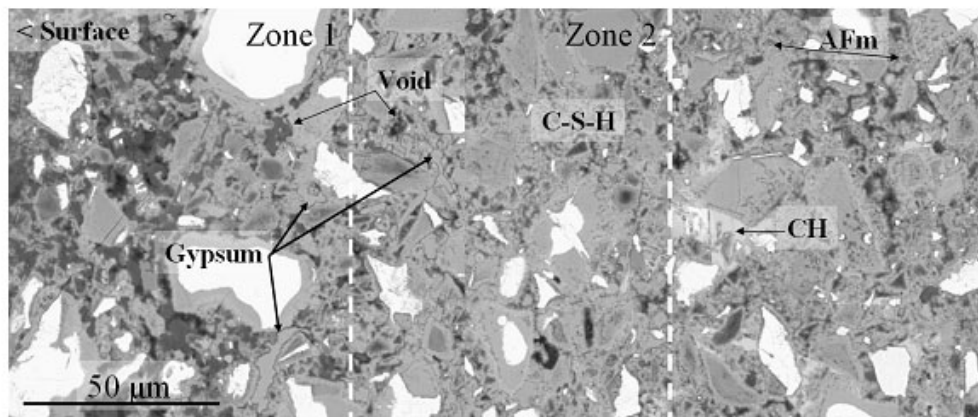


Fig.12 – Betão exposto ao ataque por sulfatos ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), mostrando aumento de porosidade (lado esquerdo da zona 1), perda de hidróxido de cálcio (CH), deposição de gesso no lugar do CH e substituição de monosulfoaluminato de cálcio hidratado (AFm) por etringite (Ferraris et al., 2005).

O aparecimento da taumasite em resultado do ataque por sulfatos é menos frequente, uma vez que se forma em condições especiais, nomeadamente em ambientes frios e húmidos e na presença de iões carbonatos, envolvendo o desaparecimento do silicato de cálcio hidratado da pasta de cimento.



Fig.13 – Taumasite produzida por um ataque por sulfatos

### 2.2.2. HISTÓRIA DO ATAQUE POR SULFATOS

Durante muitos anos apenas se considerou a formação de gesso e de etringite como única forma de ataque de sulfatos e só mais tarde foi encontrada outra forma de ataque, a taumasite, cuja estrutura é muito semelhante à da etringite, pelo que poderão ter sido confundidas durante muitos anos. Enquanto as primeiras dependem de uma fonte de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), a segunda depende de uma fonte de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e carbonato.

As primeiras patologias que apareceram em betões atacados por sulfatos estiveram sempre associadas à formação de gesso e etringite e são quase tão antigas como o descobrimento do cimento Portland. Vicat observou que as argamassas hidráulicas em contacto com a água do mar se decompunham, expandindo-se, o que originava fissuras que se espalhavam por toda a massa. Apesar de ainda desconhecer o sulfoaluminato de cálcio, escreveu, em 1856, que a transformação da cal em gesso era responsável por aquela decomposição (Sousa Coutinho, 1988).

No final do último século, Candlot descobriu os sulfoaluminatos, entre outros compostos, enquanto realizava ensaios sobre a acção dos principais sais existentes na água do mar sobre o cimento hidratado. Na tentativa de descobrir a proporção de gesso na mistura que produzia fissuras nas amostras de argamassa colocadas em água doce, ele concluiu que as alterações produzidas dependiam do teor de alumina ( $Al_2O_3$ ) e do óxido de cálcio (CaO) presentes no cimento. Quando uma dada relação entre as percentagens de alumina e de sulfatos era atingida, a decomposição ocorria, o que o levou a prever, em 1880, a existência de uma combinação de sulfato de cálcio com aluminato de cálcio, à qual atribuiu a fórmula que acabou por ser determinada com rigor por Deval,  $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$  (Li; Le Bescop; Bournazel, 1996).

O sulfatoaluminato de cálcio hidratado foi designado por “Candlot salt” durante algumas décadas, sendo actualmente conhecido por etringite, nome que deriva do facto de ter a mesma composição de um mineral natural descoberto por Lehman, em Ettringen, na Alemanha, mais especificamente nas Eifel Mountains em 1874.

Michaelis obteve também etringite em 1892, através da reacção de sulfato de alumínio e água de cal, que designou por “cement bacillus”, dada a forma e tamanho dos cristais observados (Li; Le Bescop; Bournazel, 1996).

O ataque por sulfatos foi observado pela primeira vez por Candlot, em 1887, em argamassas dos fortes de Paris construídos sobre terrenos gipsíferos (Divet, 2001).

Em Portugal, o ataque por sulfatos foi relatado, em 1940, na sequência do estudo dos problemas de deterioração ocorridos na alvenaria dos muros cais da doca nº 1 do porto de Leixões, cujas argamassas de refechamento das juntas fabricadas com agregados graníticos começaram a evidenciar grandes expansões e fissuras dois anos após o primeiro enchimento. Um relatório elaborado em 1952, atribuía a deterioração das argamassas à formação de sulfoaluminato expansivo em resultado de reacções envolvendo os sulfatos da água do mar e a alumina reactiva do feldspato molhado presente nos agregados e não da alumina do cimento, com até então se pensava (Coutinho, 1988).

Em 1965, Kennerley foi o primeiro a referir a formação de etringite numa junta da barragem de Roxburg, em Otago, Nova Zelândia.

A taumasite foi identificada por Nordenskjöld, provavelmente pela primeira vez, em 1878, havendo diversos registos da sua ocorrência em produtos resultantes da deterioração do betão, atribuindo-se a primeira referência a Erlin e Stark, em 1965 (Baronio; Berra, 1986).

Na década de 80 e princípios dos anos 90, foram detectados, no Reino Unido, vários casos de degradação de betão enterrado em que a matriz cimentícia tinha sido completamente substituída por taumasite, transformando o betão num material mole, empapado e sem coesão.

### 2.2.3. MECANISMO DO ATAQUE POR SULFATOS DE ORIGEM EXTERNA

Para compreender os mecanismos e os efeitos das deteriorações no betão em resultado do ataque por sulfatos é necessário conhecer as soluções de sulfatos que participam na reacção com os compostos hidratados do cimento, que podem ser de cálcio, sódio, magnésio e potássio (Santhanam et al., 2001).

O sulfato de sódio reage com o hidróxido de cálcio existente na massa de betão, formando sulfato de cálcio hidratado (gesso). Esta reacção pode prosseguir, enquanto houver circulação de água que forneça o sulfato de sódio e remova o hidróxido de sódio formado, até dissolver todo o hidróxido de cálcio, que, em termos de volume, é o maior produto de hidratação do cimento Portland. De outro modo é atingido um ponto de equilíbrio (Neville, 2004).

O sulfato de magnésio reage com todos os produtos de hidratação do cimento, produzindo sulfato de cálcio (gesso) e hidróxido de magnésio (brucite).

Por sua vez, o sulfato de cálcio pode reagir com os aluminatos de cálcio hidratados ou com os monosulfoaluminatos, para produzir sulfoaluminato de cálcio hidratado (etringite). A reacção com os sulfatos de magnésio tem uma acção mais devastadora do que com os outros sulfatos, em resultado de consumir grandes quantidades de hidróxido de cálcio (CH), produzindo gesso e brucite e baixando o pH da solução intersticial do betão, o que implica a libertação de mais CH pelos silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) para aumentar o pH e, assim, manter a estabilidade da solução. Este processo contribui para a descalcificação da C-S-H e, numa fase mais avançada da reacção, pode levar à substituição completa do ião Ca pelo ião Mg na C-S-H, formando silicatos de magnésio hidratado (Mg-S-H), que tem sido referido não ser um produto cimentício. (Santhanam et al., 2001).

Dependendo do tipo de sulfato presente, tanto o hidróxido de cálcio como o silicato de cálcio hidratado da pasta de cimento podem ser convertidos em gesso, principal produto da reacção com soluções de elevados teores do ião sulfato, que ocasiona o amolecimento da superfície do betão e a perda de betão por expansão. Quando o pH da solução intersticial da pasta de cimento hidratada cai abaixo de 11,5, a etringite deixa de ser estável e decompõe-se em gesso. (Santhanam et al., 2001).

Em relação aos sulfatos provenientes da água do mar, que contem também cloretos, verifica-se que o ataque é mais moderado, em virtude dos cloretos se combinarem com os aluminatos formando cloroaluminatos (sais de Fridell) (CEB, 1992), impedindo a reacção de sulfatos com os aluminatos para formar a etringite, que é uma reacção mais expansiva (Ftikos e Parissakis, 1987; Novokshenov, 1987; CEB, 1992).

A taumasite forma-se na sequência de um ataque por sulfatos a temperaturas baixas (0°C a 5°C), em resultado da reacção entre os silicatos cálcicos hidratados (C-S-H) e  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{CO}_2$  ou  $\text{CO}_3^{2-}$  e água, podendo formar-se também a partir da etringite. A detecção da taumasite por microscópio electrónico é difícil em virtude ter um padrão similar ao da etringite (Santhanam et al., 2001).

O ataque com formação de taumasite difere do ataque comum com formação de gesso e etringite, pois não são os aluminatos cálcicos hidratados que são atacados mas sim os silicatos cálcicos hidratados (C-S-H), que são o principal agente ligante do cimento Portland. A substituição do C-S-H por taumasite é acompanhada da redução das propriedades ligantes do betão endurecido, com perda de resistência e transformação numa massa pastosa sem coesão. (Coutinho, 2001).

#### 2.2.4. FACTORES NECESSÁRIOS À OCORRÊNCIA DO ATAQUE POR SULFATOS DE ORIGEM EXTERNA

Os principais factores que influenciam o desenvolvimento do ataque por sulfatos são (Coutinho, 1998):

- Condições de exposição, isto é, a severidade do ataque e portanto da quantidade de substância agressiva;
- Acessibilidade da substância agressiva e, portanto, a permeabilidade do betão que influencia a velocidade de transporte;
- Susceptibilidade do betão que depende do tipo de cimento usado, ou seja, da quantidade de substância reactiva que ele contém;
- Quantidade de água em presença.

Para se verificar a ocorrência do ataque por sulfatos terão que ser preenchidas três condições: uma fonte externa com elevada concentração em iões sulfato, presença de água em contacto com o betão e um betão com uma grande permeabilidade. Na ausência de qualquer um destes factores, o ataque não ocorre (Collepari, 2003).

As fontes externas de iões sulfato podem ser naturais, a água do mar e da chuva (Jakobsen e Thaulow, 2000), os solos e rochas ricos em gesso, ou provir de poluição doméstica e industrial e fertilizantes (Divet, 2001; Skalny et al., 2002).

A forma mais comum de ataque por sulfatos está associada à difusão, para o interior da pasta de cimento hidratada, através da rede porosa da massa do betão, de sulfatos de cálcio, magnésio, sódio e potássio existentes em solos, nomeadamente nos argilosos, em soluções com diferentes concentrações em função da solubilidade de cada um deles na água, ou na água do mar (Coutinho, 2001).

A degradação resultante do ataque de sulfatos, para uma determinada dosagem de cimento, depende claramente do teor de aluminato tricálcico desse cimento, dependência que se atenua à medida que a dosagem aumenta (Gonçalves, 2000) (Taylor, Famy, Scrivener, 2001).

O processo de formação de taumasite pode ocorrer com qualquer tipo de sais de sulfato e desenvolve-se melhor em atmosferas húmidas e temperaturas baixas. (<10°C) (Collepari, 2003). O aumento utilização de pó de calcáreo como filer no fabrico do cimento e de agregado calcário na produção de betão contribui para uma maior disponibilidade do ião  $\text{CO}_3^{2-}$  necessário para a reacção com os sulfatos, em ambientes com temperaturas baixas (Santhanam et ai., 2001).

#### 2.2.5. REGULAMENTAÇÃO APLICÁVEL

No ataque por sulfatos é relevante a sua concentração na água em contacto com o betão, uma vez que os sulfatos apenas se podem mover para o interior do betão dissolvidos numa solução (Neville, 2004).

A água desempenha assim um papel fundamental no desenvolvimento do ataque, intervindo quer no processo de transferência quer no de formação dos produtos de reacção. Os movimentos da água são indispensáveis para favorecer a transferência dos iões sulfatos contidos quer na solução intersticial do betão quer fisicamente adsorvidos na C-S-H, em direcção aos locais onde se produzem as reacções (Divet, 2001). De facto, a reacção apenas se processa quando existe humidade (Fu et ai., 1997; Taylor et ai., 2001), pelo que, para que a deterioração por ataque por sulfatos seja prevenida ou reduzida, o betão deve ter baixa permeabilidade (Mehta, 1992; St John et ai., 1998; Skalny et ai., 2002; Collepari, 2003).

Contemplando as preocupações de durabilidade do betão, a NP EN 206-1 2007 estabelece classes de exposição relacionadas com acções ambientais, designadamente a classe 6 – Ataque químico –, para o betão que se encontrar exposto ao ataque químico proveniente de solos naturais e de águas subterrâneas, que se divide em ligeiramente agressivo (XA1), moderadamente agressivo (XA2) e fortemente agressivo (XA3), e estabelece os respectivos valores limites em função das características químicas do solo e da água nele contida. Tendo em atenção as classes de exposição, são recomendados determinados valores limites para a composição do betão, designadamente para a máxima razão A/C, mínima classe de resistência e mínima dosagem de cimento, e a utilização de cimento resistente aos sulfatos nas classes XA2 e XA3.

O documento também refere que as propriedades requeridas ao betão na estrutura apenas são alcançadas se no local de utilização forem cumpridos os requisitos para o transporte, colocação, compactação e qualquer outro tratamento adicional aplicável, para o que deverão ser tido em conta o que esta especificado noutras normas relevantes para o efeito, nomeadamente a NP ENV 13670-1 2007.

As recomendações para o estabelecimento da composição do betão tem como objectivo incrementar a durabilidade do betão, melhorando a sua resistência e permeabilidade. A inclusão de adições, como por exemplo a sílica de fumo, cujas partículas têm menor diâmetro do que as do cimento, vão ocupar os vazios entre as partículas de cimento e do agregado, diminuindo o diâmetro dos poros de maiores dimensões, tornando a massa de betão mais densa, com vantagens para a sua porosidade, permeabilidade e resistência, produzindo betões de elevado desempenho. Por outro lado a utilização de outros produtos, como por exemplo escórias do alto forno, como adição ou substituto parcial do cimento Portland, permite obter betões com menores concentrações de hidróxido de cálcio, minimizando o ataque por sulfatos. (Coutinho, 2002).

A Especificação do LNEC E461-2007 define um conjunto de medidas preventivas aplicáveis às reacções sulfáticas internas, a seguir discriminadas, que interessa ter em conta, na medida em que minimizam as contribuições internas para as reacções com os sulfatos provenientes do exterior:

- Controlar a temperatura máxima do betão;
- Controlar o teor de álcalis do betão e de aluminatos e sulfatos do ligante;
- Controlar a humidade e manter o betão num estado relativamente seco;
- Controlar o teor de hidróxido de cálcio.

#### 2.2.6. RELAÇÃO ENTRE O ATAQUE POR SULFATOS E A REACÇÃO ÁLCALIS-SÍLICA

O ataque por sulfatos raramente é o único fenómeno responsável pela deterioração do betão (Mehta, 1992; Taylor et al., 2001), ocorrendo com frequência etringite e gel sílico-alcalino em simultâneo, quando existem agregados reactivos (Pettifer e Nixon, 1980; Johansen et al., 1993; Louarn e Larive, 1993; Lawrence, 1995; Shayan e Ivanusec, 1996; Divet, 2001).

Não reúne ainda consenso a explicação do fenómeno que origina a expansão por ataque por sulfatos, encontrando-se referências a dois processos possíveis: a expansão uniforme da pasta de cimento e a pressão por crescimento dos cristais de etringite (Sahu et al., 1998). A primeira hipótese poderá explicar a abertura de fissuras nas interfaces pasta-agregado, com cristalização posterior da etringite no espaço assim formado. No betão afectado por ataques por sulfatos de origem interna gera-se um padrão de fissuração típico, em que a pasta expande e tende a separar-se das partículas de agregado. Quando existem condições para o betão expandir em

todas as direcções, as fissuras rodeiam totalmente as partículas dos agregados, como demonstra a figura 4 (Gonçalves Fernandes, 2005).

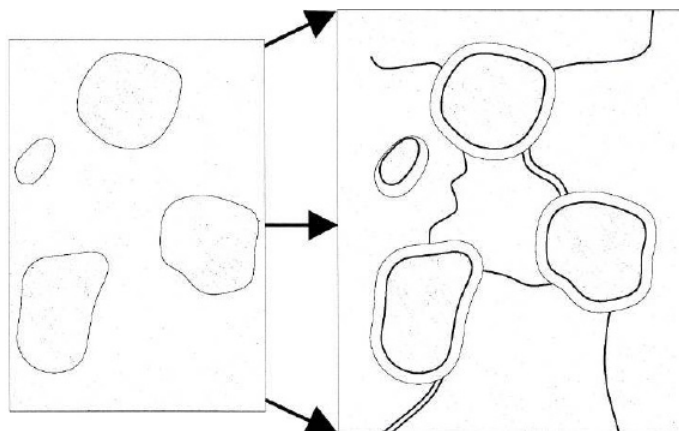


Fig.14 – Representação esquemática do mecanismo de expansão de uma barra de argamassa devido à ocorrência de DEF. A expansão não uniforme da pasta dá origem a fissuras na pasta e na interface com as partículas de agregado (Taylor et al., 2001).

Segundo alguns autores (Johansen et al., 1993; Lawrence, 1995; Sahu et al., 1998; Jakobsen e Thaulow, 2000; Hobbs, 2001), existe proporcionalidade entre a abertura das fissuras e o diâmetro das partículas, assumindo que a pasta expande uniforme e isotropicamente. Esta opinião não reúne, contudo, unanimidade, já que outros investigadores contestam esta afirmação. De facto, verifica-se que a espessura destas orlas pode variar em volta de um mesmo agregado, a orla pode ser apenas parcial ou rodear algumas partículas e não outras, ou fazer parte de uma rede de fissuras que atravessa também a pasta de cimento (Diamond, 1996). Assim, a expansão que se verifica no betão que sofreu ataque por sulfatos pode também resultar da cristalização da etringite (Mehta, 1992), cujos cristais crescem numa direcção perpendicular à interface sólido-líquido.

Procurando estabelecer uma relação entre a ocorrência de ataque por sulfatos e reacções álcali-silica, Shayan e Quick, 1991/92, realizaram ensaios em laboratório com agregados de diferente reactividade e o mesmo cimento. Concluíram que os produtos da reacção álcali-silica se formam mais cedo do que a etringite secundária, que ocupa as fissuras originadas pelas reacções álcali-silica, podendo contribuir para a expansão.

A existência dos dois fenómenos levanta dúvidas acerca de qual ocorre em primeiro lugar e aquele que causa danos no betão. A fissuração das partículas de agregado e a sua extensão para a pasta de cimento são características das reacções álcali-silica, enquanto a formação de fissuras em volta das partículas de agregado é típica de fenómenos relativos ao ataque por sulfatos.

Na perspectiva de alguns investigadores, a etringite preenche total ou parcialmente os poros e fissuras e é considerada não expansiva, uma vez que é uma consequência da expansão verificada e não uma causa. Por outro lado, a expansão e fissuração podem resultar do crescimento dos cristais em fissuras e poros, hipótese defendida por Diamond, 1996, e para a qual Hobbs, 2001, refere um valor para a expansão da pasta de cimento de cerca de 0,3%. Neste processo, é excluída a etringite depositada como revestimento parcial de poros e outros vazios.

### 2.3. ADIÇÕES MINERAIS

As adições são materiais inorgânicos finamente divididos, de origem natural, tais como filer calcário e pozolanas naturais, ou subprodutos industriais, tais como cinzas volantes, escórias de alto forno e sílica de fumo, que podem ser adicionadas ao betão, com a finalidade de melhorar certas propriedades ou para adquirir propriedades especiais. No caso de serem incorporados no cimento Portland durante o processo de fabrico, nas condições da NP EN 197-1, não se deveria utilizar-se o termo adição para designar estes materiais, mas sim constituintes principais (Coutinho, 2002).

De acordo com a NP EN 206: Betão, as adições classificam-se em dois tipos, consoante têm propriedades hidráulicas latentes ou propriedades pozolânicas:

- As adições do tipo I são adições quase inertes, como por exemplo o filer calcário, e não têm propriedades hidráulicas latentes nem propriedades pozolânicas.
- As adições do tipo II apresentam propriedades hidráulicas latentes, como por exemplo a escória granulada de alto forno moída, ou propriedades pozolânicas, como por exemplo as pozolanas naturais, as cinzas volantes ou a sílica de fumo.

As adições do tipo II podem influenciar as características do betão através do efeito pozolânico (reacções químicas com o cimento) e de filer (influência física na mistura), enquanto as adições do tipo I, em princípio, apenas desenvolvem o efeito de filer.

O efeito filer consiste no preenchimento dos espaços entre as partículas de cimento pelas partículas das adições, normalmente de menores dimensões, conforme se pode ver na figura 15, dando origem a uma pasta menos porosa, com menor necessidade de água de amassadura e mais durável.

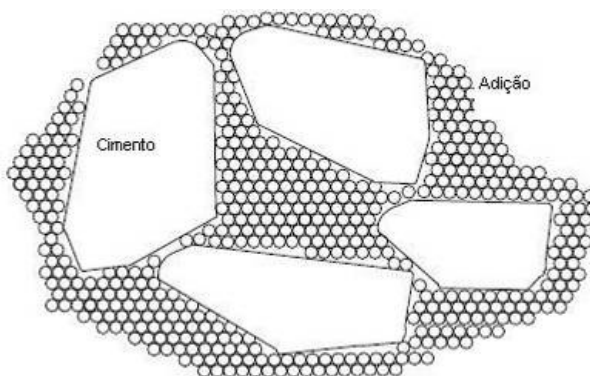


Fig.15 – Representação esquemática do efeito filer (Camões; Aires, 2007).

Por seu lado, o efeito pozolânico está associado à reacção da sílica presente nas adições com os cristais instáveis de hidróxido de cálcio (CH) libertado durante a hidratação do cimento, originando silicato de cálcio hidratado (CSH), que preenche os poros capilares, aumentando assim a compacidade da mistura e em muitos casos reduzindo a porosidade total.

#### 2.3.1. DADOS HISTÓRICOS

Os primeiros vestígios da utilização de materiais pozolânicos (tufos vulcânicos da Ilha de Santorini) na construção remontam à Grécia antiga (800 a.C. a 500 a.C.), onde foram encontradas argamassas hidráulicas naturais na construção de fontes atenienses. Partindo dos conhecimentos deixados pelos Gregos, os Romanos (300 a.C. a 476 d.C.) desenvolveram as argamassas, especialmente as hidráulicas, conseguindo produzir este tipo de argamassas a partir

de cal aérea com incorporação de pozolanas naturais (cinzas e tufos de origem vulcânica originários do Monte Vesúvio (Fig.16). Em 1756 John Smeaton descobre a cal hidráulica, tendo denominado inadvertidamente este material de cimento Romano, que mais não era do que uma cal que continha um elevado teor em argilas. Mais tarde, no ano de 1824, Aspdin descobriu o cimento Portland, a partir da calcinação de proporções bem definidas de pedra calcária e argilas moídas.

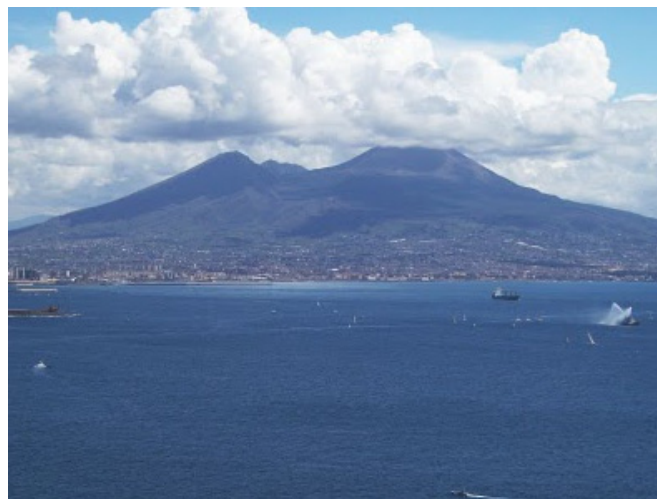


Fig.16 – Vista do Monte Vesúvio

No século XX, a reconstrução de uma grande parte da Europa, destruída durante a II Guerra Mundial, originou a falta de cimento, que foi colmatada pelo recurso a cinzas volantes e escórias granuladas de alto-forno (quadro 4), o que permitiu, sem necessidade de abrir novas fábricas de cimento, não atrasar a reconstrução empreendida (Santos Silva, 2006).

Quadro 4 – Dados anuais de produção e consumo na indústria da construção, em milhões de toneladas, de cinzas volantes, escória granulada de alto-forno moída e sílica de fumo (Santos Silva, 2006).

País	Cinzas Volantes		Escória granulada de alto-forno moída		Sílica de Fumo	
	Produção	Consumo	Produção	Consumo	Produção	Consumo
Índia (1984)	19	0,5	7,8	2,8	—	—
Europa (2002)	43	20,5	6,3 <sup>1</sup>	3,5 <sup>1</sup>	0,14 <sup>2</sup>	0,04 <sup>2</sup>
EUA (2003)	70	15	13	1	0,1	—
Canadá (2001)	4,8	2,2	1,4	0,4	0,02	0,02
China (1984)	35	7,2	22	16	—	—
Japão (1984)	3,7	0,5	24	8,2	0,02	—

<sup>1</sup> dados referentes apenas à França.

<sup>2</sup> dados referentes apenas à Noruega, o maior produtor mundial.

Nos últimos anos, generalizou-se a utilização de adições minerais, tais como cinzas volantes, escórias granuladas de alto-forno, sílica de fumo e outros materiais com características pozolânicas, substituindo parcialmente o cimento, com a finalidade de reduzir o custo do cimento, melhorar as características do betão e reduzir as emissões de CO<sub>2</sub>.

### 2.3.2. SÍLICA DE FUMO

A sílica de fumo é um subproduto industrial, constituída por um pó amorfo muito fino (tamanho médio de partícula é entre 0,1 e 0,2 µm), com a forma de microscópicas esferas de vidro, arrastadas pelos gases, provenientes da redução de quartzo extremamente puro, a altas temperaturas, em fornos eléctricos da indústria electrometalúrgica de silício e respectivas ligas, que são recolhidas em filtros por precipitação (EN 13263-1:2005+A1; Durand and Chen, 1993). A sua composição apresenta quase exclusivamente sílica (até 98%), podendo apenas conter algumas impurezas de alumina, ferro, cálcio, carbono ou álcalis. No entanto, para respeitar o EN 13263-1:2005+A1, a sílica de fumo deve ter, na sua composição química, mais de 85% de dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>) no caso de ser da classe 1, ou menos de 80% no caso da classe 2. O facto de ser um material tão fino, conduz obviamente a uma elevada superfície específica, que, de acordo com a norma, não deve ser inferior a 15 m<sup>2</sup>/g nem superior a 35 m<sup>2</sup>/g. A massa volúmica situa-se entre os 125kg/m<sup>3</sup> e os 600kg/m<sup>3</sup>, quando sobre a forma de pó, ou entre 2,16kg/dm<sup>3</sup> e 2,55kg/dm<sup>3</sup>, numa solução aquosa (Santos Silva, 2006).

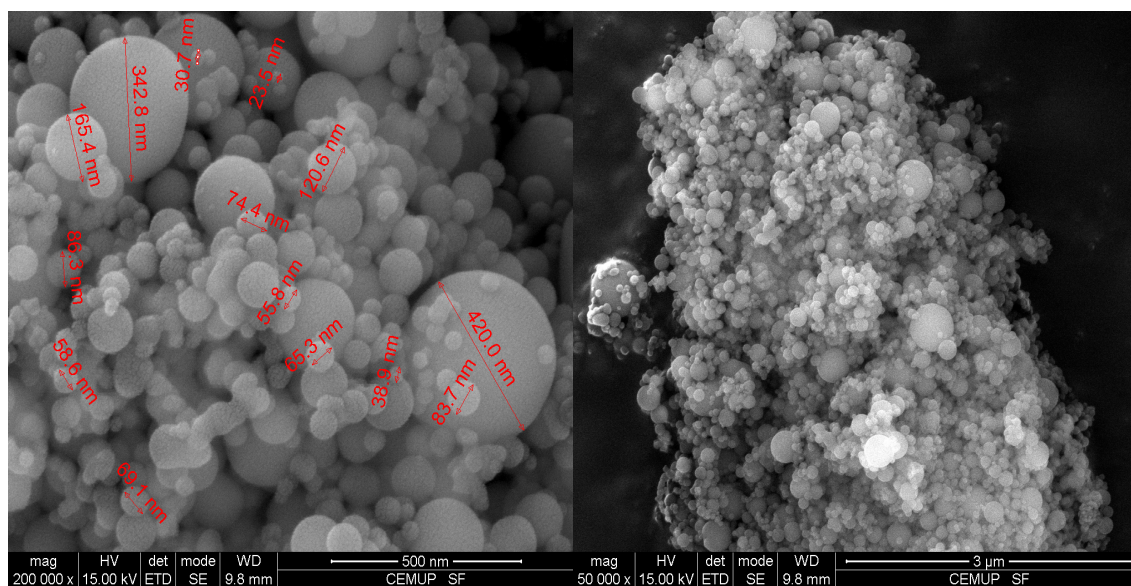


Fig.17 – Sílica de fumo vista em microscópio electrónica de varrimento, ampliada 50 000 e 200 000 vezes

A sua utilização inicia-se na Noruega, na sequência de estudos com vista a aumentar a durabilidade do betão a aplicar num túnel construído no mar do Norte, contudo a sua produção mundial é limitada, o que a torna uma das mais caras de todas.

Está bem demonstrado que a sílica de fumo é uma forma bastante eficiente de inibir a RAS no betão, quer através de ensaios em laboratório (Asgeirsson and Gudmundsson; Diamond, 1983; Pettersson, 1992; Hooton, 1993; Lane and Ozyildirim, 1999), quer pelos resultados obtidos na observação das estruturas de betão em obra (Altcin, and Regourd, 1985; Gudmundsson and Olafsson, 1996). A incorporação de pequenas dosagens de sílica de fumo no betão origina também um ganho na resistência à compressão, que se tornou mais significativo com a incorporação de superplastificantes (Duran and Chen, 1993).

Embora a porosidade total do betão com sílica de fumo seja semelhante à do betão convencional, o tamanho médio de poros é deslocado para a gama mais fina de porosidade (Feldman and Cheng-Yi, 1985), o que torna este betão mais resistente ao ataque químico do que, por exemplo, o betão com a incorporação de cinzas volantes ou metacaulino (Roy et al., 2001). As dosagens de substituição recomendadas para a inibição da RAS situam-se entre os 10% e 15%, no entanto não devem ultrapassar os 11% (em massa de cimento), por imposição da norma EN 206-1: 2007 (sílica de fumo/cimento  $\leq 0,11$  em massa). Substituições inferiores a 5% não evidenciaram um efeito de supressão, apenas retardaram o fenómeno (Oberholster, 1989).

O mecanismo pelo qual a sílica de fumo actua na RAS é motivo ainda de discussão, embora a teoria proposta por Hobbs seja a mais aceite (Hobbs, 1988). Segundo este autor, a grande quantidade de partículas de sílica amorfas ultra-finas existentes na sílica de fumo actua no betão, no estado fresco, como um agregado reactivo. Se o teor de substituição for controlado, os álcalis libertados pelo cimento, e eventualmente da sílica de fumo, são rapidamente consumidos na reacção pozolânica com a sílica, antes ainda do betão desenvolver resistência suficiente.

Este mecanismo permite compreender também a causa de insucesso da sílica de fumo relativamente à RAS em alguns casos reportados (Marusin and Shotwell, 2000; Escadeillas, et al., 2000). De facto, têm ocorrido alguns casos de degradação por RAS em betões ou argamassas contendo sílica de fumo devido a problemas relacionados com a sua aglomeração (dispersão não conseguida) no betão (Juenger and Ostertag, 2004). Nestas situações a sílica de fumo funciona como mais um agregado reactivo, não evitando a RAS.

Entre as desvantagens da utilização de sílica de fumo podem referir-se o aumento da retracção (torna o betão mais sensível à cura e aumenta o calor de hidratação), a maior perda de resistência ao fogo, uma perda mais rápida de trabalhabilidade e maior necessidade de água.

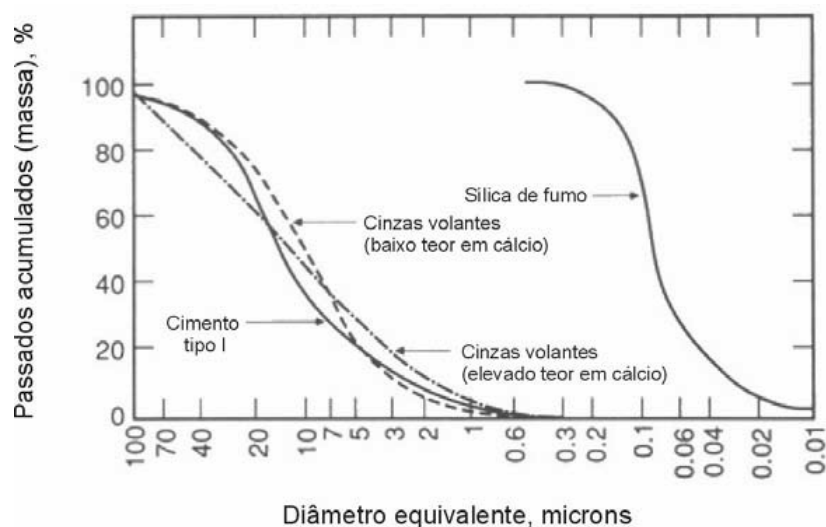


Fig.18 – Comparação de curvas granulométricas do cimento Portland, cinza volante calcária e siliciosa e sílica de fumo (Soroka, 1993).

### 2.3.3. RESÍDUOS

#### 2.3.3.1. Resíduos da indústria de papel

A indústria da pasta do papel é um dos sectores estratégicos da economia nacional, produzindo vários tipos de resíduos no decurso do seu processo produtivo, tais como cascas e resíduos da manipulação da madeira, lamas no processo de tratamento de efluentes (lamas primárias e lamas biológicas), cinzas provenientes dos filtros ou precipitadores electrostáticos, multiciclones da

caldeira de biomassa, areias do leito fluidizado das caldeiras de recuperação e da queima de biomassa e lamas inorgânicas (dregs e grits). Grandes quantidades destes resíduos são depositados em aterros, na ausência de outras opções economicamente viáveis, perdendo a indústria da pasta do papel oportunidades para contribuir, de uma forma mais significativa, para a sua sustentabilidade, quer através da redução das emissões de CO<sub>2</sub>, quer do aproveitamento dos seus resíduos (Garcia; Sousa Coutinho, 2009).

Actualmente já se verifica a produção de energia “limpa” com a queima de biomassa, entendida como a fracção biodegradável de produtos e resíduos da agricultura (incluindo substâncias vegetais e animais), da floresta e das indústrias conexas, bem como a fracção biodegradável dos resíduos industriais e urbano.

No entanto, os resíduos sólidos, como por exemplo dregs e grits, resultantes da produção da pasta kraft (Fig.19), continuam a ter como destino final o depósito em aterros, originando encargos adicionais para o processo produtivo decorrentes não só do seu transporte para o destino final, mas também da necessidade de os manter devidamente protegidos, para não poluírem o meio ambiente circundante e não terem um impacto visual significativo (Garcia; Sousa Coutinho, 2009).

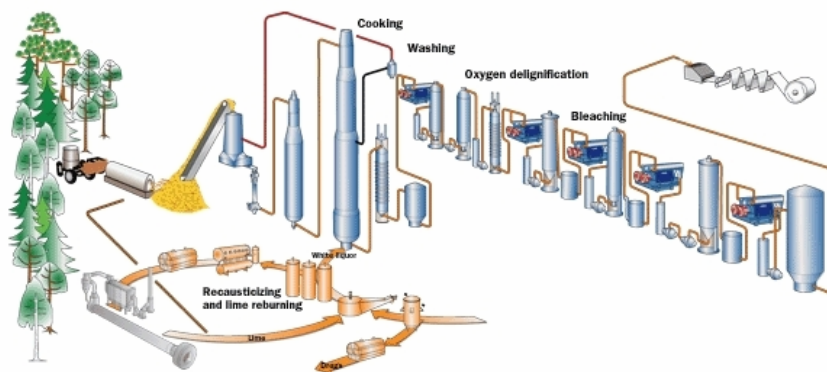
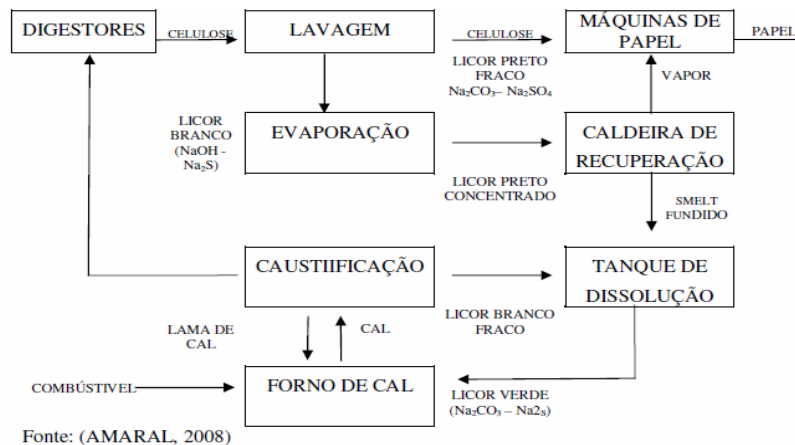


Fig.19 – Processo da produção da pasta kraft (wikipedia, kraft process).

### 2.3.3.2. Cinzas volantes de biomassa (BFA)

A incorporação das cinzas volantes de biomassa (BFA) em materiais cimentícios de construção civil pode ser uma contribuição para a resolução de um dos problemas dos resíduos produzidos pela indústria da pasta do papel. Para tal, é fundamental conhecer melhor o resíduo, não só as suas propriedades intrínsecas, mas sobretudo as propriedades mecânicas e de durabilidade das argamassas e betões que o vão incorporar (Garcia; Sousa Coutinho, 2009).

O resíduo é um material sólido com algumas fibras de madeira por queimar, com uma cor acastanhada, com cerca de 1% de humidade, provenientes dos multiciclones, filtros ou precipitadores electrostáticos da caldeira de recuperação, com o aspecto apresentado na figura 20 (Garcia; Sousa Coutinho, 2009).



Fig.20 – Cinzas volantes de biomassa (BFA)

A partir da análise granulométrica a laser efectuada, verificou-se que a amostra de BFA apresenta um valor de 7,159  $\mu\text{m}$  correspondente a 10 % de passados acumulados, de 210,767  $\mu\text{m}$  para 90 % de passados acumulados e de 28,972  $\mu\text{m}$  para 50 % de passados acumulados.

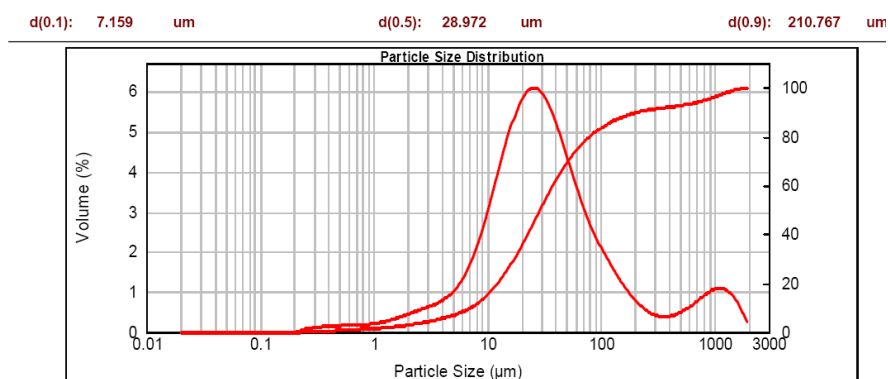


Fig.21 – Análise granulométrica a laser das cinzas volantes de biomassa (BFA)

A observação, no microscópio electrónico de varrimento (MEV), de amostras de cinzas volantes de biomassa não moídas (BFA) (Fig.22), mostra que algumas partículas de maior dimensão têm uma configuração morfológica arredondada, enquanto que as restantes apresentam uma configuração irregular e diversificada, que não é comum em cinzas volantes.

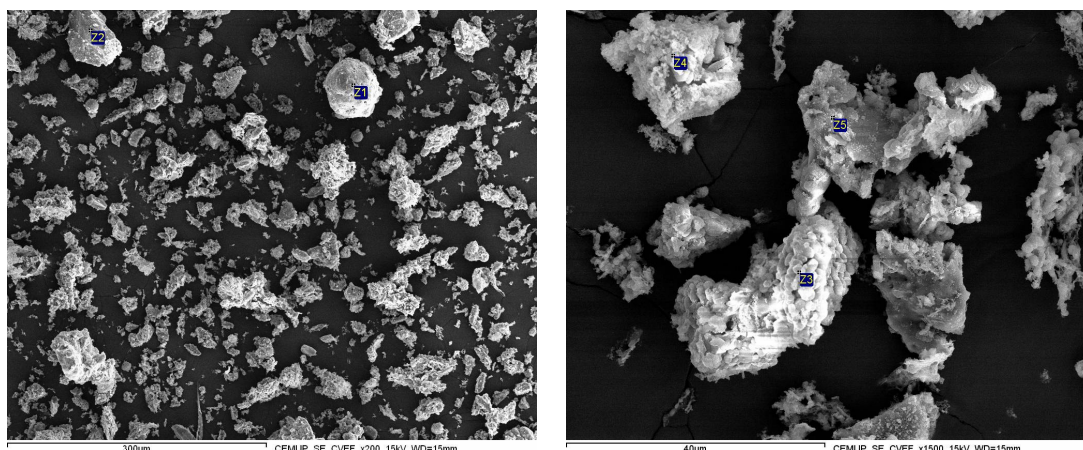


Fig.22 – Imagens das cinzas volantes de biomassa (BFA) ao microscópio electrónico de varrimento.

Analisando os espectros de raios X pontuais (Z1 a Z5, Z2 equivalente a Z1), apresentados na figura 23, verifica-se uma predominância de silício (Si), oxigénio (O) e alumínio (Al) nas partículas arredondadas de maiores dimensões (Z1 e Z2). Nas partículas irregulares os elementos predominantes variam entre cálcio (Ca), cloreto (Cl), potássio (K) e também oxigénio (O), silício (Si) e alumínio (Al) (Garcia; Sousa Coutinho, 2009).

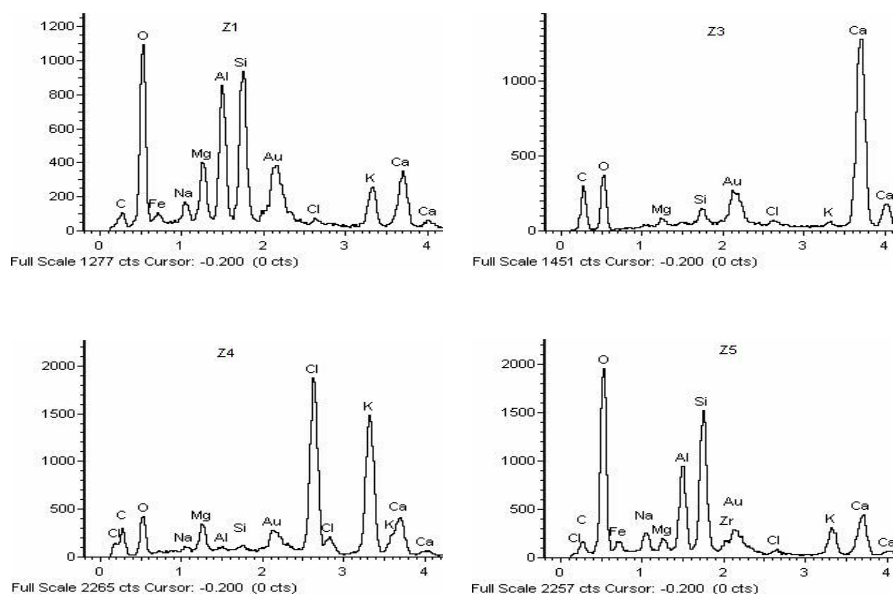


Fig.23 – Espectro de raios X pontuais da amostra de cinzas volantes de biomassa (BFA)

Na análise por difracção de raio X (DRX) (Fig.24) verifica-se que os minerais predominantes são a Calcite (60%) e o Quartzo (Quadro 7) e que não existe matéria amorfa, o que constitui uma desvantagem em termos de pozolanicidade potencial (Garcia; Sousa Coutinho, 2009).

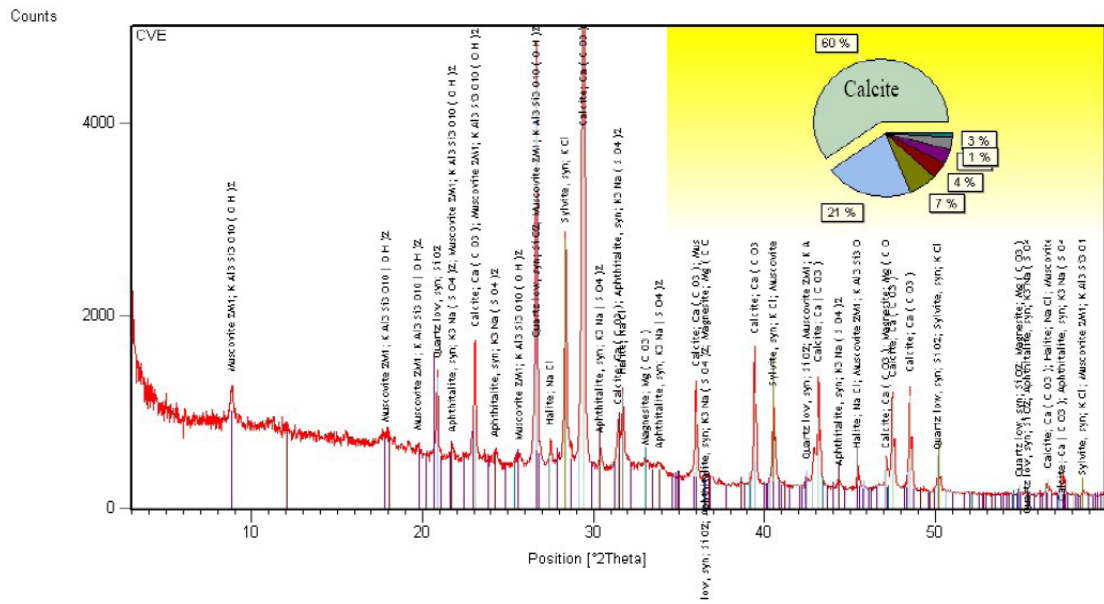


Fig.24 – Difractograma das cinzas volantes de biomassa (BFA).

Quadro 5 – Análise Mineralógica.

Fases mineralógicas identificadas	Fórmula Química	%
Calcite	CaCO <sub>3</sub>	60
Quartzo	SiO <sub>2</sub>	21
Silvite	KCl	7
Halite	NaCl	3
Aftitalite	K <sub>3</sub> Na(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	4
Magnesite	Mg(CO <sub>3</sub> )	4
Micas (Moscovite)	KAl <sub>3</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	1
Manganocalcite	(Ca,Mn)CO <sub>3</sub>	-

A análise química efectuada de acordo com a NP EN 196-2, que se apresenta no quadro 6, permite concluir que há uma predominância de óxido de cálcio e de sílica e um teor de cloretos elevado, que é significativo para efeitos da sua aplicação em betão armado.

Quadro 6 – Análise química segundo a NP EN 196-2.

Elementos constituintes	BFA (%)
Perda ao Rubro	29 ± 2
Resíduo Insolúvel	15 ± 2
SiO <sub>2</sub>	18 ± 2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,1 ± 0,3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,8 ± 0,2
MgO	5,5 ± 0,6
CaO	32 ± 2
Na <sub>2</sub> O	2,5 ± 0,3
K <sub>2</sub> O	6,8 ± 0,8
MnO	0,8 ± 0,1
SO <sub>3</sub>	2,6 ± 0,3
Cl	3,0 ± 0,6

Em face dos resultados da análise química, que estão em concordância com os resultados do MEV e do DRX, poder-se-á referir que, para a utilização deste material como adição não activa, substituindo parcialmente o cimento, será preciso tratar o material de forma a reduzir a quantidade de cloretos. Embora o valor da perda ao rubro seja excessivo, parte será causada pelo desdobramento do carbonato de cálcio presente. Em termos de resíduo insolúvel, o valor elevado será devido à presença de sílica (Garcia; Sousa Coutinho, 2009).

#### 2.3.3.3. Cinzas volantes de biomassa moídas (GBFA)

As cinzas volantes de biomassa moídas (GBFA) são obtidas por tratamento mecânico das cinzas volantes de biomassa (BFA), que engloba a secagem do material em estufa a 105 °C até massa constante e posterior moagem, durante 3 horas, num moinho de bolas cerâmicas, representado na figura 25, composto por 2 rolos giratórios (1360 a 1390 rpm) e um recipiente (cilindro fechado), onde são introduzidas esferas de porcelana com vários diâmetros (Garcia; Sousa Coutinho, 2009).



Fig.25 – Moinho de bolas cerâmicas

A partir da análise granulométrica a laser efectuada, verificou-se que a amostra de GBFA apresenta um valor de 1,802  $\mu\text{m}$  correspondente a 10 % de passados acumulados de 93,130  $\mu\text{m}$  para 90 % de passados acumulados e de 16,710  $\mu\text{m}$  para 50 % de passados acumulados.

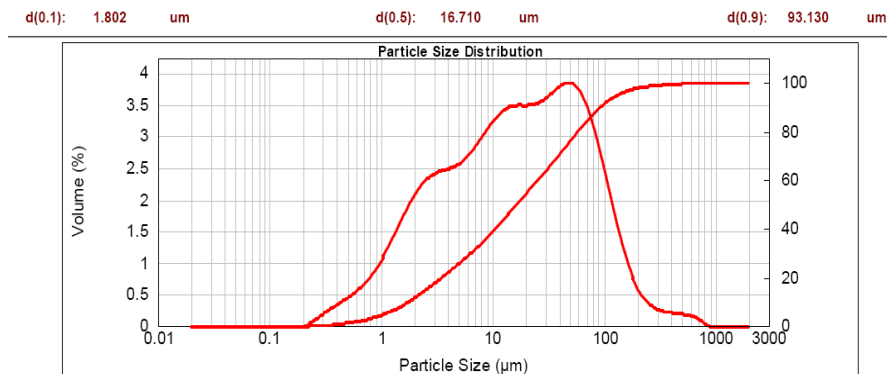


Fig.26 – Análise granulométrica a laser das cinzas volantes de biomassa moídas (GBFA).

A observação, no microscópio electrónico de varrimento (MEV), de uma amostra de cinzas volantes de biomassa moídas (GBFA) (Fig.27) mostra que as partículas apresentam uma configuração irregular e diversificada, com uma dispersão granulométrica elevada.

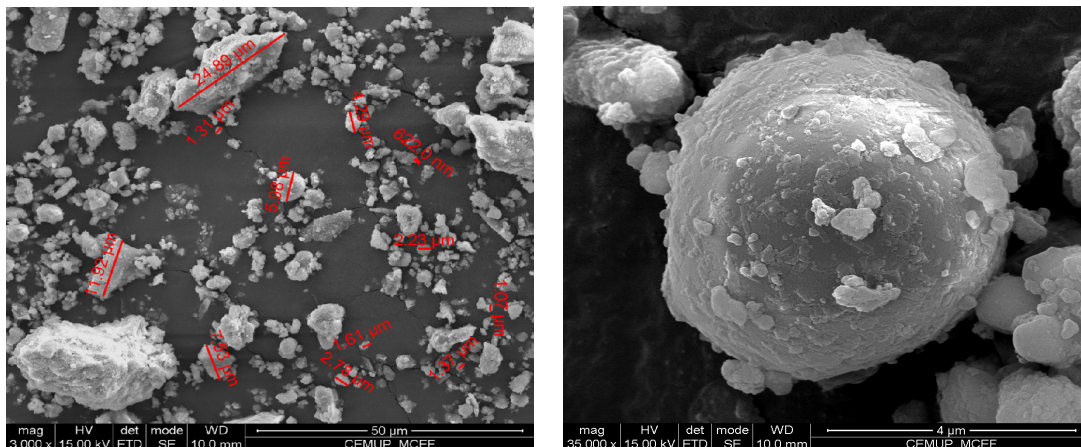


Fig.27 – Imagens das cinzas volantes de biomassa moídas (GBFA) ao microscópio electrónico de varrimento.

O facto de as cinzas volantes de biomassa moídas resultarem do processo de moagem das cinzas volantes de biomassa, faz com que apresentem uma composição química e mineralógica idêntica.

#### 2.3.3.4. Grits (GRT)

O material grits é um resíduo da indústria da pasta de papel de cor acinzentada, com cerca de 15% de humidade, que pode atingir 25%, proveniente do forno de cal onde se processa a calcinação do calcário e das lamas de cal a uma temperatura da ordem dos 1200  $^{\circ}\text{C}$ , sendo posteriormente removido para aterro (Garcia; Sousa Coutinho, 2008).

As amostras de grits foram sujeitas a um tratamento mecânico prévio, que consistiu numa secagem em estufa, a 105 °C, até massa constante e posterior moagem num moinho de bolas cerâmicas (Fig.28) durante 24 horas (Garcia; Sousa Coutinho, 2008).



Fig.28 – Grits moído (GRT).

A partir da análise granulométrica a laser, figura 29, verificou-se que a amostra de grits (GRT) apresenta um valor de 3,081 µm correspondente a 10 % de passados acumulados, de 95,924 µm para 90 % de passados acumulados e de 18,005 µm para 50 % de passados acumulados.

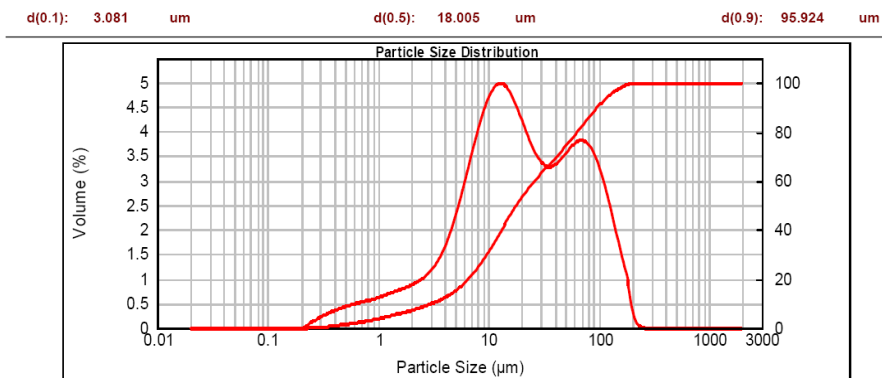


Fig.29 – Análise granulométrica a laser dos grits (GRT).

A análise no microscópio electrónico de varrimento (Fig.30) mostra partículas com uma forma irregular e diversificada e uma dispersão granulométrica elevada.

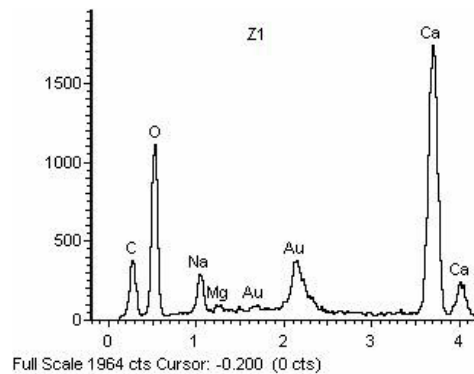
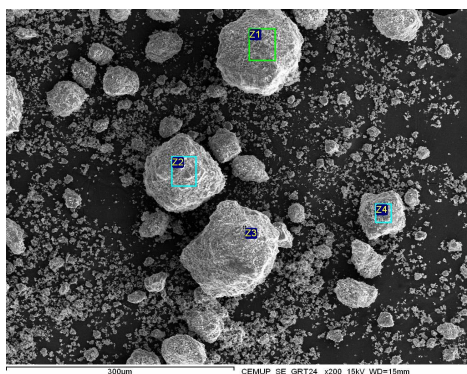


Fig.30 – Imagens de uma amostra de grits (GRT) ao microscópio electrónico de varrimento e espectros de raios X pontuais

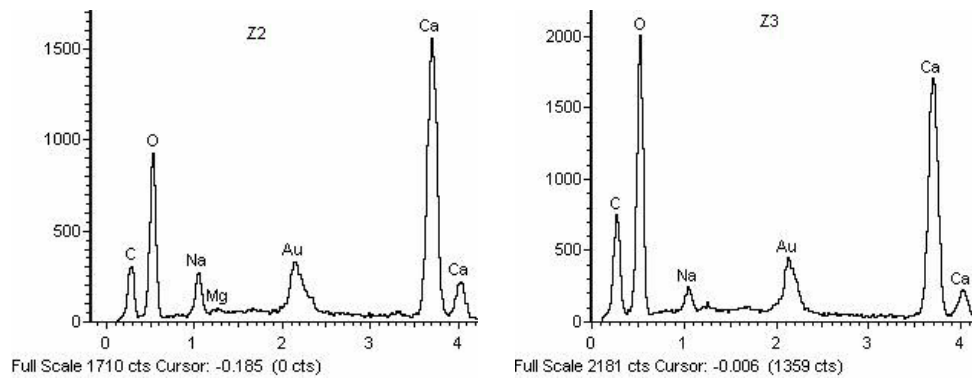


Fig.30 – Imagens de uma amostra de grits (GRT) ao microscópio electrónico de varrimento e espectros de raios X pontuais.

Comparando a análise química qualitativa dos espectros de raios X, apresentados na figura 30, verifica-se uma compatibilidade de valores, com predominância do cálcio (Ca) e algum sódio (Na), sendo este último predominante nas partículas de menor dimensão.

Na análise por difracção de raio X (DRX) (Fig.31) verifica-se que o mineral predominante é a Calcite (Quadro 7).

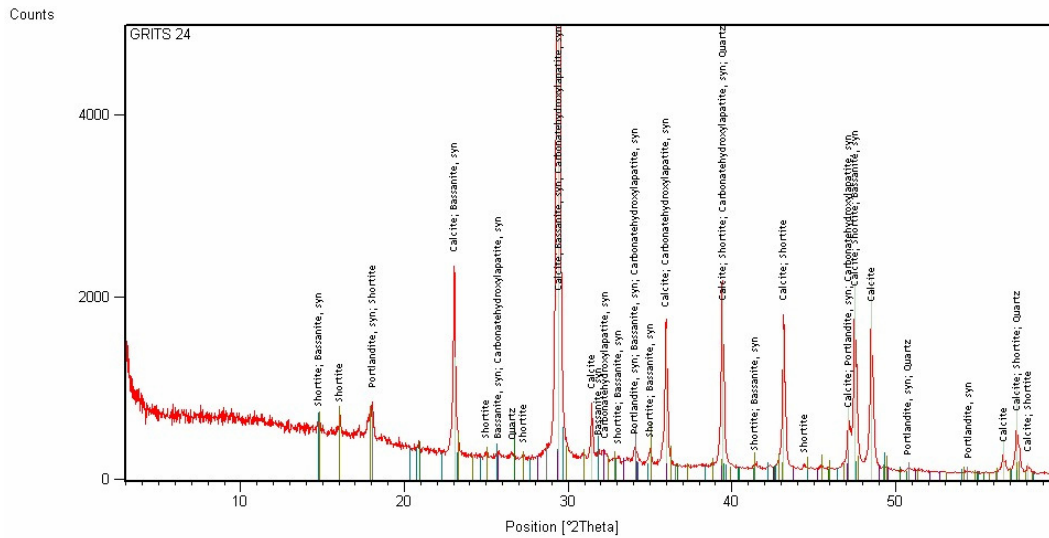


Fig.31 – Difractograma dos grits (GRT).

Quadro 7 – Análise Mineralógica.

Fases mineralógicas identificadas	Fórmula Química	%
Calcite	CaCO <sub>3</sub>	92
Portlandite	Ca(OH) <sub>2</sub>	1
Carbonato di-sódico e di-cálcico	Ca <sub>2</sub> Na <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	7

A análise química efectuada de acordo com a NP EN 196-2, que se apresenta no quadro 8, permite concluir que há uma predominância de óxido de cálcio.

Quadro 8 – Análise química segundo a NP EN 196-2.

Elementos constituintes	GRT (%)
Perda ao Rubro	42 ± 2
Resíduo Insolúvel	1,2 ± 2
SiO <sub>2</sub>	0,40 ± 2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<1 <sup>l.q.</sup>
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,11 ± 0,01
MgO	0,54 ± 0,06
CaO	56 ± 3
Na <sub>2</sub> O	3 ± 0,3
K <sub>2</sub> O	0,11 ± 0,01
MnO	0,008 ± 0,04
SO <sub>3</sub>	0,31 ± 0,02
Cl	0,15 ± 0,02

#### 2.3.3.5. Resíduos de uma Central de Biomassa

A biomassa florestal é constituída por um conjunto de madeiras e outros resíduos florestais que são recolhidos das florestas, contribuindo decisivamente para uma redução de possíveis focos de incêndio. Depois de recolhida, é transportada para centrais termoeléctricas onde é preparada e incinerada em um forno para produzir energia eléctrica.

As cinzas de fundo de biomassa florestal utilizadas no presente trabalho foram crivadas num peneiro de 4 mm e os passados moídos num moinho de bolas cerâmicas durante 3 horas (GWA 3h) e 24 horas (GWA 24H).

#### 2.3.3.6. Cinzas de fundo de biomassa moídas durante 24 horas (GWA 24h)

A análise granulométrica a laser, figura 32, permite observar que a amostra de cinzas de fundo de biomassa moída durante 24 horas (GWA 24h) apresenta um valor de 1,120 µm correspondente a 10 % de passados acumulados, de 27,546 µm para 90 % de passados acumulados e de 6,715 µm para 50 % de passados acumulados.

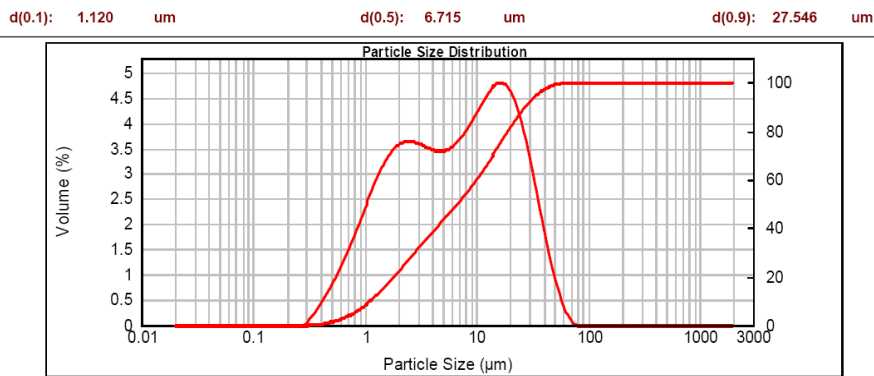


Fig.32 – Análise granulométrica a laser das cinzas de fundo de biomassa (GWA 24h).

Efectuada uma análise à amostra de GWA 24h por microscopia electrónica de varrimento (MEV) (Fig.33), observou-se a presença de Si e alguns Al, Mg, Ca e Na.

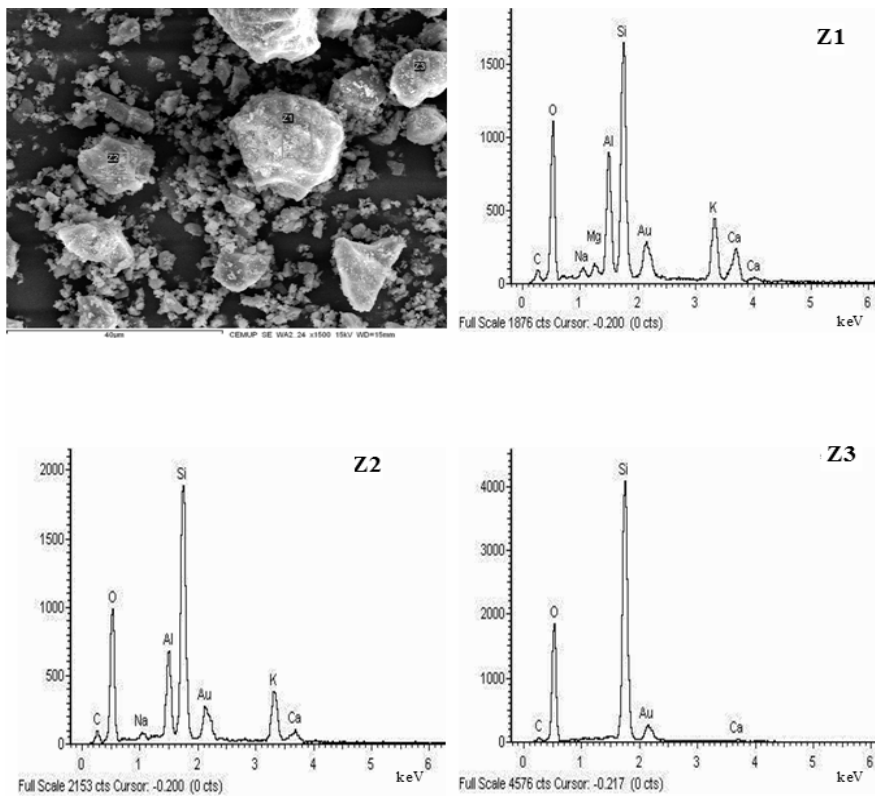


Fig.33 – Imagens de uma amostra de cinzas de fundo de biomassa (GWA 24h) ao microscópio electrónico de varrimento e espectros de raios X pontuais.

A análise química efectuada de acordo com a NP EN 196-2, que se apresenta no quadro 9, permite concluir que há uma predominância de óxido de sílica.

Quadro 9 – Análise química das cinzas de fundo de biomassa (GWA 24h)

	EN 196-2
SiO <sub>2</sub> (%)	69,5±4,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	4,18±0,52
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	1,99±0,24
CaO (%)	8,1±0,5
MgO (%)	1,24±0,14
K <sub>2</sub> O (%)	3,6±0,4
Na <sub>2</sub> O (%)	1,4±0,14
MnO (%)	0,24±0,03

A análise por Difracção de Raio-X (Fig.34) não detectou a presença de sílica amorfa, tendo revelado a presença das seguintes fases cristalinas (por ordem decrescente de abundância): Quartzo, Feldspato K e Plagioclase.

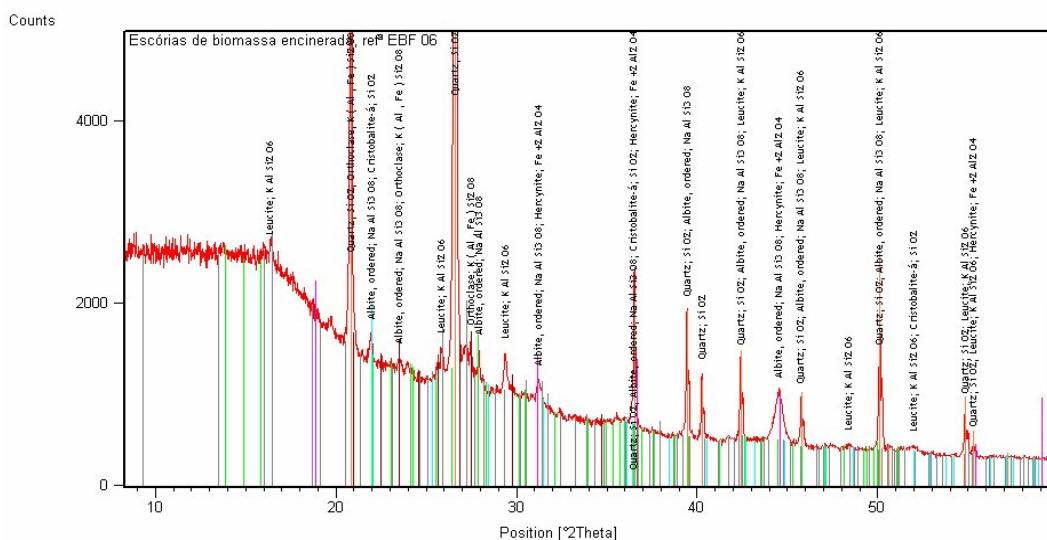


Fig.34 – Diffractograma das cinzas de fundo de biomassa (GWA 24h).

Embora os elementos e compostos químicos detectados não pareçam ser prejudiciais, a ausência da fase vítrea verificada na Difracção de Raio-X constitui um grande inconveniente, na medida em que compromete o efeito pozolânico, passando a desempenhar um papel de filler.

#### 2.3.3.7. Cinzas de fundo de biomassa moídas durante 3 horas (GWA 3h)

As cinzas de fundo de biomassa florestal utilizadas no presente trabalho foram obtidas na Central Termoeléctrica de Mortágua, onde resíduos florestais são queimados, produzindo cinzas volantes e cinzas de fundo de biomassa florestal (GWA), por vezes designadas por escórias.

A análise granulométrica a laser, figura 35, permite observar que a amostra de cinzas de fundo de biomassa moída durante 3 horas (GWA 3h) apresenta um valor de 2,902  $\mu\text{m}$  correspondente a 10 % de passados acumulados, de 95,150  $\mu\text{m}$  para 90 % de passados acumulados e de 32,918  $\mu\text{m}$  para 50 % de passados acumulados.

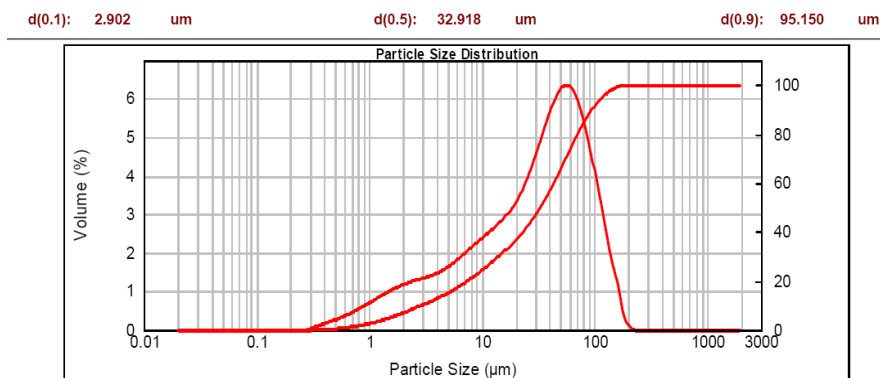


Fig.35 – Análise granulométrica a laser das cinzas de fundo de biomassa (GWA 3h).

As cinzas de fundo de biomassa moídas durante 24 horas apresentam as mesmas características químicas das cinzas de fundo de biomassa moídas durante 3 horas, podendo-se consultar os valores no quadro 9.

#### 2.3.3.8. Resíduos da indústria vidreira

A indústria vidreira produz resíduos que podem ser reaproveitados como matéria-prima para a produção de materiais de construção, uma vez que se trata de um dos materiais com maior tempo de decomposição na natureza. O vidro, cuja composição é formada principalmente por  $\text{SiO}_2$ , foi incluído no âmbito do presente estudo, sob a forma de pó de vidro (Fig.36), obtido a partir de tratamento mecânico de pára-brisas dos automóveis.



Fig.36 – Pó de vidro (GP).

##### 2.3.3.8.1 Pó de vidro (GP)

A partir da análise granulométrica a laser, figura 37, efectuada, verificou-se que a amostra de pó de vidro (GP) apresenta um valor de 1,776  $\mu\text{m}$  correspondente a 10 % de passados acumulados, de 34,108  $\mu\text{m}$  para 90 % de passados acumulados e de 10,186  $\mu\text{m}$  para 50 % de passados acumulados.

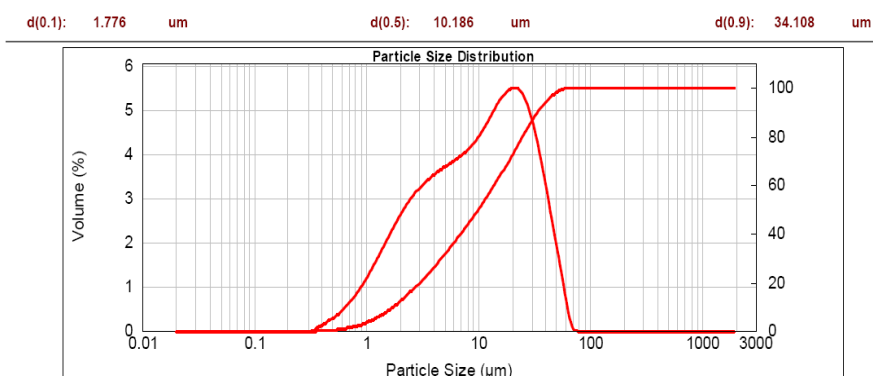


Fig.37 – Análise granulométrica a laser do pó de vidro (GP).

Os resíduos de vidro, de acordo com o quadro 10, são constituídos essencialmente por sílica ( $\text{SiO}_2 - 70 \pm 8,0 \%$ ) no estado amorfo e uma menor percentagem de sódio ( $\text{Na}_2\text{O} - 17 \pm 2 \%$ ) e cálcio ( $\text{CaO} - 8,7 \pm 0,5 \%$ ). De acordo com Caijun Shi e Yanzhong Wu (2002), trata-se de uma composição favorável ao desenvolvimento da reacção pozolânica, uma vez que apresenta duas características essenciais para este efeito: elevado conteúdo em sílica no estado amorfo e uma elevada superfície específica.

Quadro 10 – Análise química das cinzas de fundo de biomassa (GWA 24h)

	EN 196-2
Perda ao Rubro	0,92±0,09
$\text{SiO}_2$ (%)	70±8,0
$\text{Fe}_2\text{O}_3$ (%)	0,65±0,08
$\text{CaO}$ (%)	8,7±0,5
$\text{MgO}$ (%)	3,7±0,4
$\text{K}_2\text{O}$ (%)	0,35±0,04
$\text{Na}_2\text{O}$ (%)	17±2
$\text{SO}_3$ (%)	<0,05 <sup>l.q.</sup>
$\text{Cl}$ (%)	<0,005 <sup>l.q.</sup>

# 3

## PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 3.1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho tem como objectivo o desenvolvimento de um programa experimental para o estudo do ataque externo por sulfatos (ESA) e da reacção álcalis-silica (RAS) em argamassa de cimento Portland, com substituição parcial do cimento por adições provenientes de resíduos industriais, por forma a ajudar a compreender a influência destas adições no comportamento do betão e a sua eventual valorização no âmbito da sustentabilidade na construção.

No que se refere às reacções sulfática externas foram realizados ensaios de resistência ao ataque por sulfatos nos termos da metodologia estabelecida na Especificação LNEC E 462:2004, para determinar a variação da resistência dos ligantes usados ao ataque de uma solução de sulfato de sódio.

Para o estudo das reacções álcalis-silica, optou-se pelo ensaio acelerado em barra de argamassa (ASTM 1260), previsto para avaliar a reactividade dos agregados aos álcalis em 16 dias, através da transposição dos resultados obtidos de modo a permitir a verificação da ocorrência de reacções expansivas devido à RAS pela utilização das adições.

Em ambos os casos, foram ensaiados dois tipos de provetes de controlo, uns fabricados com 100% de cimento e outros com substituição parcial do cimento por sílica de fumo, tendo em atenção que muitos autores estabelecem que esta adição mitiga a RAS, tal como como referido em 2.5.2, cujos resultados serviram como termo de referência para o comportamento dos provetes fabricados com a introdução de adições provenientes de resíduos industriais.

A composição da argamassa e o método de colocação e compactação seguiram o estabelecido na norma NP EN 196-1, com a excepção do ensaio de resistência ao ataque por sulfatos, em que a argamassa foi compactada apenas com 10 pancadas, de acordo com o prescrito na especificação LNEC E 462:2004.

As argamassas dos provetes foram fabricadas com areia normalizada, cimento Portland (CEM I) e adições provenientes de resíduos industriais, designadamente, cinzas de fundo de biomassa florestal (GWA), com 3 e 24 horas de moagem, grits, cinzas volantes de biomassa (BFA), cinzas volantes de biomassa moídas (GBFA), sílica de fumo e pó de vidro (GP), em substituição de 10% do cimento previsto na composição dos CTL.

No caso das argamassas com adição de sílica de fumo, foi necessário introduzir 60 gotas de superplastificante na água da amassadura, para conseguir satisfazer os limites impostos para a trabalhabilidade (espalhamento da argamassa de controlo  $\pm 10$  mm).

### 3.2. DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

A realização dos ensaios incluídos no programa experimental obedeceu aos documentos normativos disponíveis, com as adaptações consideradas adequadas para atender às limitações de tempo disponível para o desenvolvimento do programa, conforme é exposto nos pontos seguintes.

#### 3.2.1. MATERIAIS UTILIZADOS NO FABRICO DAS ARGAMASSAS

- Cimento de Portland (CEM I) da classe 42,5R, de acordo com a norma NP EN 196-2001, produzido pela SECIL (ver ficha informativa em anexo);

Quadro 11 – Composição química do cimento utilizado (disponibilizada pela SECIL).

			Mensal	Anual
Perda ao fogo	%	P.F	2,61	2,43
Resíduo insolúvel	%	R.I.	1,33	1,32
Óxido de Silício	%	SiO <sub>2</sub>	20,36	20,39
Óxido de alumínio	%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,10	4,76
Óxido de ferro	%	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,12	3,15
Óxido de cálcio	%	CaO	62,72	62,17
Óxido de magnésio	%	MgO	1,81	1,90
Sulfatos	%	SO <sub>3</sub>	3,44	3,44
Cloretos	%	Cl	0,0120	0,0137
Cal livre	%	—	1,62	0,98

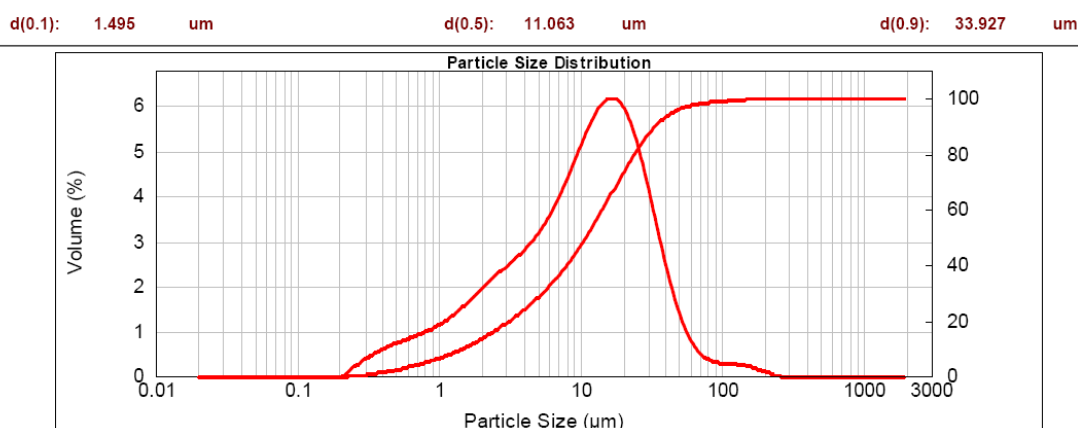


Fig.38 – Curva granulométrica laser do CEM I 42.5 R.

- Areia normalizada CEN (Comité Europeu de Normalização) – areia natural, siliciosa, de grão arredondado, com curva granulométrica imposta pela norma NP EN 196-1: 2006;

Quadro 12 – Composição granulométrica da areia de referência CEN

Abertura dos peneiros com malha quadrada (mm)	Resíduo no peneiro		Retidos acumulados (%)	Passados acumulados (%)
	g	%		
2,00	—	—	0	100
1,60	94,5	7	7 ± 5	93 ± 5
1,00	351	26	33 ± 5	67 ± 5
0,50	459	34	67 ± 5	33 ± 5
0,16	270	20	87 ± 5	13 ± 5
0,08	162	12	99 ± 1	1 ± 1
Resto	13,5	1	—	—
Total	1350	—	—	—

- Água destilada;
- Sílica de Fumo (SF) comercializada (Fozroc sprayset – ver ficha informativa em Anexo);
- GWA 3h e 24h;
- GRT 24h;
- BFA;
- GBFA 24h;
- GP;
- Superplastificante Sika ViscoCrete 3008, composto por carboxilatos modificados em base aquosa, isento de cloretos ou quaisquer outros ingredientes corrosivos para as armaduras, cumprindo os requisitos da norma NP EN 934-2:T3.1/3.2 (ver em Anexo a ficha informativa).

### 3.2.2. COMPOSIÇÃO DAS ARGAMASSAS

As composições das argamassas, apresentadas no quadro 3, foram estudadas de modo a obter-se um traço em peso de 1:3 e uma relação de água/ligante (razão A/C) em peso igual a 0,50.

A quantidade de superplastificante indicada no quadro foi definida através do estudo da trabalhabilidade das argamassas, tendo-se procedido à medição dos diâmetros de espalhamento obtidos segundo o procedimento descrito em 10.3.1 da norma ASTM C 109/9, utilizando uma mesa de espalhamento e moldes de acordo com a ASTM 230. O valor adoptado para o diâmetro de espalhamento foi o obtido no ensaio da argamassa de controlo, tendo sido aceite uma variação de  $\pm 10$ mm.

## 3.2.3. FABRICO DAS ARGAMASSAS

No fabrico das argamassas seguiu-se, em geral, o procedimento preconizado na NP EN 196-1, misturando-se as adições com o cimento e adicionando o superplastificante directamente na água de amassadura.

Quadro 13 – Composição e diâmetro de espalhamento das argamassas.

	Argamassa de Controlo	Silica de Fumo	GWA 3h	GWA 24h	GRT 24h	BFA	GBFA 24h	DRG 24h	GP
Areia (g)	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350
Cimento (g)	450	405	405	405	405	405	405	405	405
Água (ml)	225	225	225	225	225	225	225	225	225
Adição (g)	–	45	45	45	45	45	45	45	45
Superplastificante (gotas)	–	60	–	–	–	–	–	–	–
Diâmetro de espalhamento (mm)	199±1,2	196±1,2	197±1,6	194±1,5	194±0,7	198±1,6	196±1,6	195±10	203±2,5



Fig.39 – Avaliação da trabalhabilidade de uma amassadura

Realizada a mistura dos materiais (Fig.40), a argamassa obtida foi introduzida e compactada em moldes, onde permaneceu durante um período de 24 horas. Decorrido esse tempo, para efeitos de realização do ensaio de expansão acelerado de barra de argamassa (ASTM C 1260), os provetes foram desmoldados e colocados, durante 24 horas, num recipiente, em banho-maria a 80°C, contendo 1,5l de água destilada. No caso do ensaio de resistência aos sulfatos (E 462-2004), os provetes foram colocados numa solução saturada de hidróxido de cálcio, durante um período de 28 dias.



Fig.40 – Misturador

### 3.3. ENSAIOS

#### 3.3.1. ENSAIO ACELERADO DE EXPANSÃO EM BARRA DE ARGAMASSA — ASTM C 1260

O ensaio de expansão acelerado de barra de argamassa foi realizado, essencialmente, de acordo com a metodologia estabelecida na norma ASTM C 1260-07, de modo a tornar possível a verificação da ocorrência de reacções expansivas devido à RAS pela utilização das adições, ao fim de um período de 14 dias após a desmoldagem.

##### 3.3.1.1. Procedimento experimental

Terminado o fabrico da argamassa, procedeu-se à sua colocação, em duas camadas, no molde (Fig.5) previamente limpo e pincelado com óleo descofrante, sendo cada camada compactada com o auxílio de uma barra de madeira, com especial atenção aos cantos e ao longo das arestas.

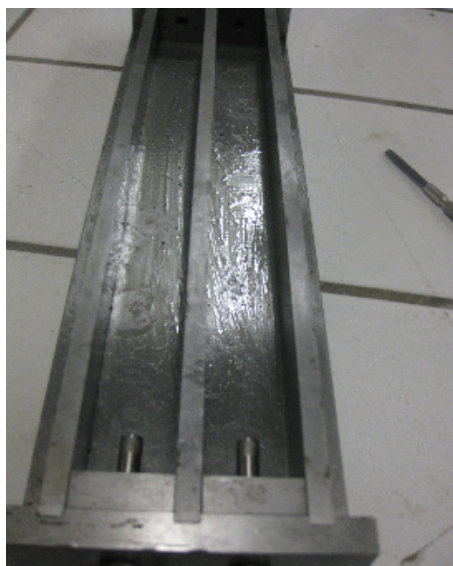


Fig.41 – Molde utilizado no ensaio ASTM C 1260

Os provetes foram conservados nos moldes por um período de  $24 \pm 2$  horas, após o qual se procedeu à sua desmoldagem com extremo cuidado e à sua identificação e numeração (Fig.42).

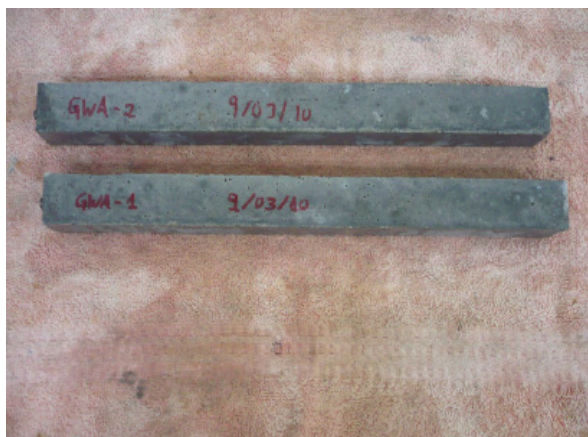


Fig.42 – Identificação e numeração dos provetes

Após uma leitura inicial do comprimento de cada provete ( $L_{seco}$ ) com um deflectómetro digital (Fig.43), foram colocados num contentor com 1,5 l de água destilada, à temperatura ambiente, de modo a permanecerem totalmente imersos, e posteriormente colocados em banho-maria a  $80 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  (Fig.44) durante 24h. Para maximizar o contacto da água com a superfície dos provetes, recorreu-se a grelhas que foram colocados no fundo do contentor.



Fig.43 – Leitura do comprimento dos provetes



Fig.44 – Banho-maria a  $80 \text{ }^\circ\text{C}$

Findo esse período, os provetes foram removidos da água, secos com um pano, sobretudo os pernos, e efectuou-se de imediato (tempo indicado na norma:  $15 \pm 5$  segundos) a leitura do seu comprimento inicial ( $L_0$ ) com o recurso ao deflectómetro, de modo a evitar que os provetes arrefeçam e se contraíam.

Em seguida, os provetes foram depositados num contentor contendo uma solução de hidróxido de sódio (NaOH), que foi colocado igualmente em banho-maria a  $80\text{ }^\circ\text{C}$ , tendo-se efectuado leituras diárias ( $LP_t$ ) durante um período de 14 dias em solução alcalina.

Para evitar erros de leitura do aparelho em resultado das altas temperaturas dos provetes, foram sempre efectuadas calibrações através do padrão de aço de invar antes da leitura de cada provete.

### 3.3.1.2. Resultados dos ensaios

As leituras dos comprimentos de cada provete, durante os 14 dias estabelecidos para a duração dos ensaios, permitiram calcular a expansão diária de cada uma das argamassas ao longo desse período de tempo, através da equação a seguir representada.

$$Exp(\%) = \frac{LP_t - L_0}{250} \times 100 \quad (1)$$

$LP_t$  – leitura diária ( $t=1,2,\dots, 14$  dias) expressa em milímetros.

$L_0$  – leitura zero expressa em milímetros.

Os resultados da expansão diária das argamassas, apresentados na figura 45, foram interpretados tendo em atenção o que está especificado em estudos publicados relativamente a esta matéria, designadamente:

- As expansões inferiores a 0,10 %, obtidas no 16º dia, representam um comportamento inócuo, considerando-se a combinação cimento-agregado como não reactiva.
- As expansões superiores a 0,20 %, obtidas no 16º dia, representam uma grande possibilidade de ocorrência de reacções expansivas, considerando-se a combinação cimento-agregado reactiva.
- As expansões compreendidas entre 0,10 % e 0,20%, não são conclusivas, embora se considere a combinação cimento-agregado potencialmente reactiva, sugerindo-se que sejam efectuados novos ensaios.

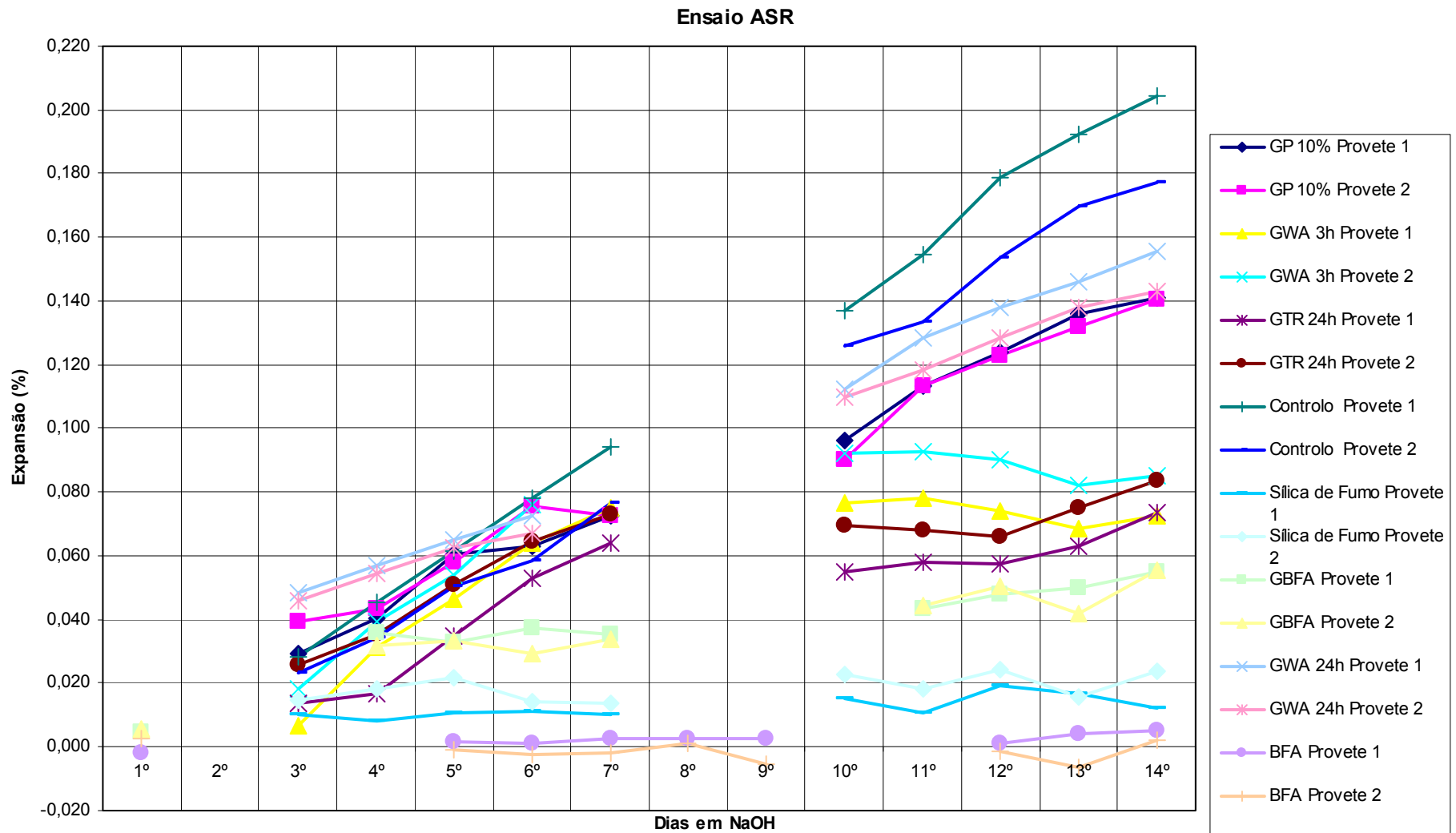


Fig.45 – Resultados do ensaio ASTM C 1260

### 3.3.2. ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO ATAQUE POR SULFATOS — E 462-2004

O ensaio de resistência ao ataque por sulfatos seguiu a metodologia estabelecida na Especificação LNEC E 462:2004 para a determinação da resistência ao ataque de uma solução de sulfato de sódio. Contudo, foi necessário reduzir o período de duração do ensaio, tal como está preconizado na Especificação, de 26 semanas para o prazo disponível para a realização do presente programa experimental, e, conseqüentemente, extrapolar os resultados obtidos para o fim daquele período.

#### 3.3.2.1. Procedimento experimental

Para a realização do ensaio, procedeu-se à montagem do molde (Fig 46) com 6 compartimentos, de modo a tornar possível a preparação, em simultâneo, de 6 provetes de 20 mm × 20 mm de secção transversal e 160 mm de comprimento. Cada um dos compartimentos tem orifícios nas duas extremidades que seguram os pernos de aço inoxidável, que ficam embebidos na argamassa dos provetes, para serem utilizados na leitura dos comprimentos a efectuar durante o período de ensaio. Para proteger os pequenos parafusos que seguravam os pernos e assim evitar que a argamassa entrasse nos orifícios dos parafusos e impedisse a sua remoção durante a desmoldagem, foi necessário colocar fita isolante nos bordos do molde, como se pode observar na figura 46.



Fig.46 – Molde do ensaio de resistência ao ataque por sulfatos

Para a execução de 6 barras de argamassa (Fig.47) por amassadura foram utilizados 405 g de cimento, 45 g de adições e 1 350 g de areia normalizada, aos quais foi adicionado 225 ml de água.



Fig.47 – 6 provetes de 20 mm × 20 mm × 160 mm

Imediatamente após a preparação da argamassa, cada um dos seis compartimentos do molde, que estava fixo firmemente ao compactador (Fig.48), foi preenchido com duas camadas, até se atingir um nível de 5 mm acima do topo do molde, distribuídas uniformemente com uma vareta de vidro, dando especial atenção ao espaço debaixo dos pernos, para não deixar vazios nesta zona, compactando-se de seguida com 10 pancadas. Em seguida, o molde foi levantado cuidadosamente do compactador, para rasar e alisar as superfícies da argamassa com uma régua metálica. Finalmente, o molde foi rotulado para posterior identificação dos provetes. Após um período de 24 horas, desmoldaram-se e numeraram-se sequencialmente os provetes. Durante a desmoldagem, partiu-se acidentalmente um provete de BFA.



Fig.48 – Compactação no ensaio de resistência ao ataque por sulfatos

Imediatamente após a desmoldagem, os provetes foram conservados horizontalmente sobre uma grelha (Fig.49), separados entre si, num recipiente com uma capacidade de 2,5l, contendo uma solução saturada de hidróxido de cálcio. Os recipientes foram mantidos fechados durante 28 dias à temperatura ambiente.



Fig.49 – Conservação dos provetes no ensaio de resistência ao ataque por sulfatos

No final deste período, removeu-se da solução um provete de cada vez, limpou-se os pernos com o auxílio de um pano húmido e fez-se a leitura zero ( $L_0$ ) de cada um com o recurso a um deflectómetro, devidamente calibrado com um padrão de aço invar. Terminadas as medições, colocou-se de imediato

os provetes 1, 3 e 5 num recipiente contendo uma solução de hidróxido de cálcio e os provetes 2, 4 e 6 numa solução de sulfato de sódio. De 2 em 2 semanas, procedeu-se a uma nova leitura dos provetes e à renovação da solução de sulfato de sódio.

### 3.3.2.2. Resultados dos ensaios

As leituras dos comprimentos dos provetes imersos nas soluções de sulfato de sódio e de hidróxido de cálcio durante o período estabelecido para a duração dos ensaios irão permitir calcular a expansão de cada uma das argamassas ao fim do tempo  $t$  ( $t = 2, 4, 6, 8, \dots, 26$  semanas), através da equação a seguir representada.

$$Exp(\%) = \frac{(LP_t - Ll_t) - L_0}{1600} \quad (2)$$

$LP_t$  – leitura dos provetes após os períodos de armazenamento (em microns).

$Ll_t$  – leitura média do padrão de Invar (em microns).

$L_0$  – leitura zero (em microns).

Os resultados serão interpretados tendo em atenção que as argamassas que tenham expansões não superiores a 0,1 % serão consideradas resistentes ao ataque por sulfatos, tal como está especificado em estudos publicados relativamente a esta matéria.

# 4

## CONCLUSÕES

### 4.1. INTRODUÇÃO

No presente capítulo, pretende-se avaliar o comportamento das várias adições incorporadas em argamassa de cimento Portland, quando submetidas à reacção álcalis-silica (RAS) e ao ataque externo por sulfatos (ESA), através do ensaio acelerado em barra de argamassa (ASTM 1260-07) e do ensaio de resistência ao ataque por sulfatos (LNEC E 462:2004), respectivamente, com o objectivo de tirar conclusões sobre a possibilidade de as utilizar em situações de obra e assim contribuir para a sua valorização no âmbito da sustentabilidade na construção.

### 4.2. MATERIAIS ESTUDADOS

O programa experimental envolveu o estudo de adições provenientes de resíduos industriais, designadamente, cinzas de fundo de biomassa florestal (GWA), com 3 e 24 horas de moagem, grits (GRT), cinzas volantes de biomassa (BFA), cinzas volantes de biomassa moídas (GBFA), sílica de fumo (SF) e pó de vidro (GP), cujas características são apresentadas nos Quadros 14.1 e 14.2.

Por forma a estabelecer padrões de análise do comportamento das adições, efectuou-se o ensaio de dois tipos de provetes de controlo, uns fabricados com 100% de cimento e outros, com função de padrão somente para o ensaio à reacção álcalis-silica, com substituição parcial do cimento por sílica de fumo, tendo em atenção que esta adição pode mitigar a RAS, de acordo com estudos efectuados recentemente.

Para a realização dos ensaios programados no âmbito do estudo, procedeu-se à realização de argamassas de cimento Portland com a substituição de 10% do cimento previsto na composição da argamassa de controlo por cada uma das adições.

Quadro 14.1 – Principais características das adições utilizadas.

Características	Cinzas volantes de biomassa não moídas (BFA)	Cinzas volantes de biomassa moídas (GBFA)	Cinzas de fundo de biomassa (GWA 3h)	Cinzas de fundo de biomassa (GWA 24h)	Grits (GRT)	Pó de vidro (GP)	Silica de fumo (SF)	Cimento (CEM I) 42,5R	
<b>Morfologia das partículas</b>	Partículas de maior dimensão com uma configuração irregular e diversificada.	Configuração irregular e diversificada.	Menor número de partículas médias, em comparação com as de maior e menores dimensões.	Menor número de partículas médias, em comparação com as de maior e menores dimensões.	Partículas com uma forma irregular e diversificada.	—	Partículas muito finas.	—	
<b>Granulometria</b>	d(10%)	7,16 µm	1,80 µm	2,90 µm	1,12 µm	3,08 µm	1,78 µm	—	1,50 µm
	d(50%)	28,97 µm	16,71 µm	32,92 µm	6,72 µm	18,01 µm	10,19 µm	—	11,63 µm
	d(90%)	210,77 µm	93,13 µm	95,15 µm	27,55 µm	95,92 µm	34,11 µm	—	33,93 µm
	< 75 µm	44%	88%	84%	100%	68%	100%	100%	100%
<b>Superfície específica de acordo com a granulometria a laser (m<sup>2</sup>/g)</b>	0,55	1,27	0,80	2,0	1,0	1,33	—	1,63	

Quadro 14.2 – Principais características das adições utilizadas.

Características	Cinzas volantes de biomassa não moídas (BFA)	Cinzas volantes de biomassa moídas (GBFA)	Cinzas de fundo de biomassa (GWA 3h)	Cinzas de fundo de biomassa (GWA 24h)	Grits (GRT)	Pó de vidro (GP)	Silica de fumo (SF)	Cimento (CEM I) 42,5R
<b>Óxidos predominantes (segundo NP EN 196-2)</b>	SiO <sub>2</sub> – 18%	SiO <sub>2</sub> – 18%	SiO <sub>2</sub> – 69,5%	SiO <sub>2</sub> – 69,5%	SiO <sub>2</sub> – 0,4%	SiO <sub>2</sub> – 70%	Essencialmente óxido de silício.	SiO <sub>2</sub> – 20,4%
	K <sub>2</sub> O – 6,8%	K <sub>2</sub> O – 6,8%	K <sub>2</sub> O – 3,6%	K <sub>2</sub> O – 3,6%	K <sub>2</sub> O – 0,1%	K <sub>2</sub> O – 0,4%		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – 4,8%
	Na <sub>2</sub> O – 2,5%	Na <sub>2</sub> O – 2,5%	Na <sub>2</sub> O – 1,4%	Na <sub>2</sub> O – 1,4%	Na <sub>2</sub> O – 3%	Na <sub>2</sub> O – 17%		Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – 3,2%
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – 2,1%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – 2,1%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – 4,2%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – 4,2%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – <1 <sup>lq</sup>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – 0,7%		CaO – 62,2%
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – 1,8%	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – 1,8%	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – 2%	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – 2%	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – 0,1%	CaO – 8,7%		MgO – 1,9%
	CaO – 32%	CaO – 32%	CaO – 8,1%	CaO – 8,1%	CaO – 56%	MgO – 3,7%		SO <sub>3</sub> – 3,4 %
	MgO – 5,5%	MgO – 5,5%	MnO – 0,2%	MnO – 0,2%	MgO – 0,5%	SO <sub>3</sub> – <0,05 <sup>lq</sup>		Cl – 0,01%
	SO <sub>3</sub> – 2,6%	SO <sub>3</sub> – 2,6%			SO <sub>3</sub> – 2,6%	Cl – <0,005 <sup>lq</sup>		Cal livre – 0,98%
	Cl – 3%	Cl – 3%			Cl – 3%			
	MnO – 0,8%	MnO – 0,8%			MnO – 0%			
				SO <sub>3</sub> – 0,31%				
				Cl – 0,15%				
<b>Análise Mineralógica</b>	Calcite – 60%	Calcite – 60%	—	—	Calcite – 92%	—	—	—
	Quartzo – 21%	Quartzo – 21%	—	—	—	—	—	—
<b>Álcalis equivalente (Na<sub>2</sub>O)<sub>e</sub> = 0,658 × %K<sub>2</sub>O + %Na<sub>2</sub>O</b>	7	7	3,8	3,8	3,1	17,3	—	—
<b>Presença de matéria amorfa</b>	Não	Não	Não	Não	—	Sim	Sim	—

### 4.3. ENSAIOS REALIZADOS

A avaliação do comportamento das adições relativamente à reacção álcalis-silica foi efectuada através da realização do ensaio de expansão acelerado da barra de argamassa, durante um período de 14 dias após a desmoldagem, de acordo com a metodologia estabelecida na norma ASTM C 1260-07. Para este efeito, fabricaram-se dois provetes em argamassa com cada uma das adições, que foram colocados num recipiente contendo uma solução de hidróxido de sódio a uma temperatura de 80°C, após 24 horas de cura em água a 80°C. A evolução do comportamento dos provetes foi obtida a partir da leitura inicial dos seus comprimentos após desmoldagem e das leituras diárias durante o referido período de 14 dias, que terminaram com uma leitura final.

Para avaliação do ataque clássico por sulfatos, foram realizados ensaios nos termos da metodologia estabelecida na Especificação LNEC E 462:2004, tendo-se fabricado seis provetes de argamassa com cada uma das adições. Após desmoldagem, os provetes foram colocados num recipiente contendo uma solução saturada de hidróxido de cálcio durante um período de 28 dias à temperatura ambiente, findo o qual foram removidos da solução para se efectuar uma leitura inicial dos seus comprimentos. De seguida, os provetes com os números 1, 3 e 5 foram colocados num recipiente contendo uma solução de hidróxido de cálcio, enquanto que os provetes 2, 4 e 6 são colocados numa solução de sulfato de sódio, tendo-se efectuado leituras dos comprimentos dos provetes de duas em duas semanas.

### 4.4. RESULTADOS OBTIDOS

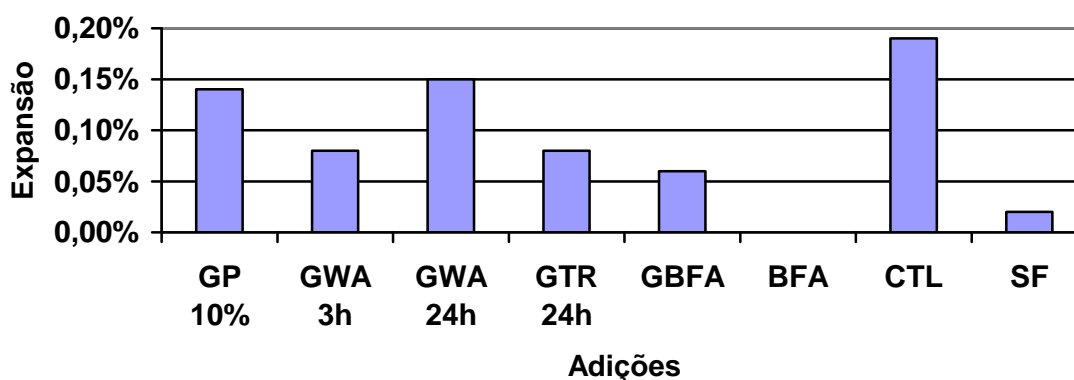
#### 4.4.1. ENSAIO ACELERADO DE EXPANSÃO EM BARRA DE ARGAMASSA – ASTM C 1260 - 07

Os resultados, expressos em percentagem, do ensaio de expansão acelerado da barra de argamassa são apresentados no quadro 15.

Quadro 15 – Resultados do ensaio ASTM C 1260-07.

14 Dias em NaOH	GP 10%	GWA 3h	GWA 24h	GRT 24h	GBFA	BFA	Controlo	Sílica de Fumo
Expansão (%)	0,14	0,08	0,15	0,08	0,06	0,00	0,19	0,02

#### Ensaio ASTM 1260-07



#### 4.4.2. ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO ATAQUE POR SULFATOS – E 461-2004

Os resultados, expressos em percentagem, do ensaio de resistência ao ataque por sulfatos são apresentados no quadro 16.

Quadro 16 – Resultados do ensaio E 461-2004.

Data		GP 10%	GWA 3h	GWA 24h	GRT	BFA	GBFA 24h	Controlo	Silica de Fumo
Expansão (%)	2 semanas	0,015	0,022	0,014	-0,034	0,023	0,002	0,005	0,005
	4 semanas	0,015	0,026	0,032	-0,011	0,005	0,022	0,003	0,008
	6 semanas	0,000	0,034	0,021	-0,002	-0,034	0,027	0,026	—
	8 semanas	—	0,014	0,030	-0,018	—	0,053	0,010	—

#### 4.5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

##### 4.5.1. ENSAIO ACELERADO DE EXPANSÃO EM BARRA DE ARGAMASSA – ASTM C 1260 - 07

Numa primeira análise dos resultados finais da expansão das argamassas ensaiadas, foi tido em atenção os critérios estabelecidos para avaliar a reactividade de agregado, a seguir discriminados de acordo com a ASTM 1260 e a especificação do LNEC E461:

- As expansões inferiores a 0,10 %, obtidas no 14º dia, representam um comportamento inócuo, considerando-se a combinação cimento-agregado como não reactiva (agregado da Classe I).
- As expansões superiores a 0,20 %, obtidas no 14º dia, representam uma grande possibilidade de ocorrência de reacções expansivas, considerando-se a combinação cimento-agregado reactiva (agregado da Classe III) e sendo necessário tomar medidas preventivas de acordo com a especificação LNEC E461, para utilização em betão.
- As expansões compreendidas entre 0,10 % e 0,20%, não são conclusivas, embora se considere a combinação cimento-agregado potencialmente reactiva (agregado da Classe II), sugerindo-se que sejam efectuadas novos ensaios e sendo necessário tomar medidas preventivas de acordo com a especificação LNEC E461, para utilização em betão.

Conclui-se então que como a expansão se verificou ser de 0,19% para a combinação areia CEN e cimento CEM I 42,5R utilizados, a areia em causa seria da Classe II, muito próximo do limiar correspondente à classe III.

Na tentativa de encontrar uma resposta para este resultado inesperado, procedeu-se à comparação entre a metodologia seguida na realização dos ensaios e a estabelecido na norma ASTM C 1260 – 07, tendo-se verificado que as diferenças estavam na granulometria da areia normalizada CEN e na razão A/C utilizadas nos ensaios.

Comparando a curva granulométrica da areia CEN e da amostra de agregados prevista na norma, verifica-se que a primeira é sempre mais fina, o que leva a uma relação superfície/volume maior e, consequentemente, a uma maior quantidade de sílica disponível para a reacção álcalis-silica, provocando expansões superiores.

Por outro lado, a diferença existente entre razão A/C de 0,50 adoptada no ensaio e o valor estabelecido na norma (0,47) não ajuda a explicar o problema, até porque os resultados apresentados na literatura relativamente ao efeito da razão A/C no desenvolvimento da RAS não são consensuais. Alguns autores sugerem que o aumento do teor de água provoca uma diminuição da RAS, já que a

concentração em álcalis na solução dos poros é reduzida, podendo no entanto esta ser agravada se ocorrer exsudação, para além do aumento da porosidade poder servir com “vaso expansivo” para os produtos da reacção entretanto produzidos (Gillot, 1975; Bérubé and Fournier, 1993).

Em resumo, o facto de a granulometria e a razão A/C utilizadas terem sido ligeiramente diferentes das preconizadas na norma, não justifica um valor tão elevado para a expansão da combinação cimento-agregado utilizada, concluindo-se que a areia CEN será de facto potencialmente reactiva, tendo que se comprovar esse facto com recurso a uma análise petrográfica.

Numa segunda análise dos resultados e partindo da premissa de que a areia CEN é potencialmente reactiva, verifica-se que todas as argamassas incorporando as adições objecto de estudo, apresentam um comportamento melhor à reacção álcalis-silica do que a argamassa de cimento de Portland, mas apenas as de cinzas volantes de biomassa (BFA) apresentam um desempenho superior à de sílica de fumo (SF).

O desempenho das restantes pode distribuir-se por dois outros grupos, em que o que tem melhor comportamento é constituído pelas adições GBFA, GRT e GWA 3h, com expansões da ordem dos 0,06/0,08 %, e pelas adições GP (10%) e GWA 24h, com expansões da ordem dos 0,14/0,15 %.

No Quadro 17 apresentam-se as adições por ordem decrescente de resultados da expansão e algumas das suas principais características.

Quadro 17 – Adições por ordem decrescente de resultados da expansão.

Adição	Exp.(%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Partículas > 75 µm	Na <sub>2</sub> O <sub>eq.</sub>
GWA 24h	0.15	70	0	4
GP	0.14	70	0	17
GWA 3h	0.08	70	26	4
GRT	0.08	0	32	3
GBFA	0.06	18	22	7
SF	0.02	100	0	-
BFA	0	18	56	3

Das análises por difracção de raio X das várias adições, observou-se que apenas as amostras de pó de vidro (GP) e de sílica de fumo (SF) apresentam sílica amorfa na sua composição, embora se saiba que quando, por exemplo, materiais siliciosos são muito moídos podem apresentar alguma reactividade pozolânica.

Com base na bibliografia e experiência de outros autores (Hobbs, 1988; Foradaba, 2005) a RAS é tanto mais intensa quanto mais fino é o agregado, considerando-se que a partir de 75 µm a reacção não apresenta grandes expansões (Mehta, 1986; Foradaba, 2005), sendo mitigada quando se utiliza, por exemplo, sílica de fumo (SF). De facto a sílica de fumo, se bem dispersa no betão, reage com os álcalis disponíveis impedindo o ataque aos agregados de sílica reactiva, contribuindo para além disso para uma redução da permeabilidade, com uma menor quantidade de água disponível, sendo que estes dois factores contribuem para reduzir a reacção álcalis-silica no betão com sílica de fumo. Na realidade desde 1979 que todo o betão na Islândia é produzido com cerca de 7% de sílica de fumo, uma medida que, juntamente com outras melhorias nos procedimentos de construção, permite acabar

com os graves problemas verificados anteriormente relacionados com a ocorrência da RAS (Fidjestol; Lewis, 1998).

Considerando o referido anteriormente, isto é, que a sílica reactiva mais fina que 75 µm não contribui para a RAS, o que se confirmou para a argamassa SF, seria previsível que para os pares de materiais com a mesma composição, as adições mais finas fossem mais resistentes à RAS mas verificou-se precisamente o contrário (GWA 24h e GP). No caso da adição GWA 24h, o valor obtido foi cerca do dobro da expansão de GWA 3h e no caso da GBFA obteve-se uma expansão (0,06%) muito maior do que a de BFA (0%).

A quantidade de Na<sub>2</sub>O equivalente também não parece explicar os resultados da expansão, como se pode observar no quadro 17. De facto partindo do pressuposto que a sílica reactiva mais fina que 75 µm (proveniente da adição) não contribui para a RAS e portanto a única sílica reactiva presente será a da areia CEN, seria de esperar que quanto maior a quantidade de Na<sub>2</sub>O equivalente, maior seria a expansão, o que não acontece, como se pode observar no Quadro 17.

Assim, e não encontrando uma explicação plausível para a relação entre os resultados obtidos, poderá colocar-se a possibilidade de que as partículas ao serem moídas desvendem zonas heterogéneas em termos de composição química (à semelhança do clínquer; Neville, 1995) e que assim possam contribuir umas vezes mais e outras menos para a RAS.

Finalmente, como conclusão geral salienta-se o facto de qualquer das adições ensaiadas, substituindo 10% do cimento Portland, terem contribuído para uma diminuição da expansão resultante da RAS.

#### 4.5.2. ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO ATAQUE POR SULFATOS – E 461-2004

O ensaio de resistência ao ataque por sulfatos apenas permitiu obter as leituras iniciais, pelo que ainda não se dispõe de uma série de resultados suficientemente longa para que seja possível retirar conclusões. Nestas circunstâncias, aguardar-se-á o desenvolvimento do ensaio, previsto para um prazo de 14 semanas após a desmoldagem dos provetes, para reunir toda a informação necessária para concluir o programa experimental.

#### 4.6. BIBLIOGRAFIA

- Barreto Santos, M., Brito, J., *O panorama nacional das reacções álcalis-silica*. 2008.
- Braga Reis, M., Santos Silva, A., *The importance of scanning electron microscopy and x-ray in the diagnosis of the causes of concrete deterioration*. Proceedings of the 5<sup>th</sup> Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials, Leuven, Belgium, 1995.
- Collepari, M. *A state-of-art review on delayed ettringite attack on concrete*. Cement and Concrete Composite, 2003.
- Diamond, S., *“Delayed Ettringite Formation – Process and Problems”*, Cement and Concrete Composites, 1996.
- Divet, L. *Les reactions sulfatiques internes au béton : contribution à l'étude des mécanisme de la formation différée de l'ettringite*, Études et recherches des Laboratoire des Ponts et Chaussées, OA n° 40, 2002.
- Gonçalves Fernandes, M. I., *Caracterização petrográfica, química e física de agregados graníticos em betões*. Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, 2005.
- Hoobs, D. W., *Alkali-silica reaction in concrete*. Thomas Telford Ltd., Londres, 1988.
- Fragata A., Rosário Veiga, M., Velosa, A. L., Ferreira, V. M., *Incorporação de resíduos de vidro em argamassas de revestimento*. LNEC, 2002.
- Fu, Y; Ding, J. Deaudoin, J.J. *Expansion of Portland cement mortar due to internal attack*. Cement and Concrete Research, 1997.
- Neville, A. M., *Properties of concrete*. Longman, England, 1995.
- ASTM C 1260-07 – *Standard test method for potencial alkali reactivity of aggregates (mortar-bar method)*. 2007.
- Especificação E 461 – *Betões. Metodologias para prevenir reacções internas*. 2007.
- Especificação E 462 – *Cimentos. Resistência dos cimentos ao ataque por sulfatos*. 2004.
- Neville A., *The confused world of sulfate attack on concrete*. Cement and Concrete Research, 2004.
- NP EN 196-1 – *Método de ensaio de cimentos. Parte 1: Determinação das resistências mecânicas*. 2006.
- NP EN 197-1 – *Cimento. Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes*. 2001.
- NP EN 206-1 – *Betão. Parte 1: Desempenho, especificação, produção e conformidade*. 2007.
- NP EN 13263-1 – *Sílica de fumo para betão. Parte 1: Definições, requisitos e critérios de conformidade*. 2009.
- Recommendations for preventing disorders due to delayed ettringite formation*. Études et recherches des Laboratoire des Ponts et Chaussées, OA n° 40, 2002.
- Santhanam, M., Cohen, M.D., Olek, J. *Sulfate attack research – whither now?*. Cement and Concrete Research, 2001.
- Santhanam, M., Cohen, M.D., Olek, J. *Mechanism of Sulfate attack: a fresh look*. Cement and Concrete Research, 2001.

Santos Silva, A., *Degradação do betão por reacções álcalis-silica*. LNEC, Porto, 2006.

Santos Silva, A., *Reacções expansivas internas no betão. Prevenção mitigação dos seus efeitos*. LNEC, Porto, 2005-2008.

Santos Silva, A., *Reacções expansivas no betão*. Seminário: Materiais em ambiente marítimo, 22 e 23 de Outubro de 2007, Funchal, Portugal, LNEC.

Sousa Coutinho, J., Garcia M. L., *Investigação inicial de resíduos da indústria da pasta de papel*. Congresso de Inovação na Construção Sustentável, 2008.

Sousa Coutinho, J., Garcia M. L., *Resíduo Termoeléctrico em betão*. Encontro nacional de Betão Estrutural, 5, 6 e 7 de Novembro de 2008, Guimarães, Portugal.

Sousa Coutinho, J., Garcia M. L., *Investigação inicial das cinzas do electrofiltro*. II Jornada Luso-Brasileira de Ensino e Tecnologia em Engenharia, 2009.


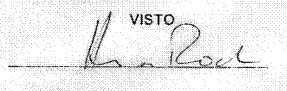
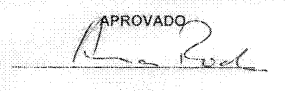
Sousa Coutinho, J., *Materiais de Construção 2: 1ª Parte – Ligantes e caldas*. FEUP, Porto, 2002.

Taylor, H.F.W., Famy, C., Scrivener, K.L. *Delayed Ettringite Formation*. Cement and Concrete Research, 2001.

Wikipedia, Kraft Process. [http://en.wikipedia.org/wiki/Kraft\\_process](http://en.wikipedia.org/wiki/Kraft_process).

## **Anexos**

A1 – Ficha técnica do cimento

	<b>RESULTADOS DO AUTOCONTROLO VALORES MÉDIOS</b>																																																																																				
FÁBRICA: MACEIRA	BOLETIM Nº 11 DATA: 09.01.2009																																																																																				
<b>REFERÊNCIA: Cimento * CEM I 42,5 R</b> <b>Resultados Referentes a NOVEMBRO</b>																																																																																					
<b>ENSAIOS MECÂNICOS [NP EN 196-1]</b> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th rowspan="3">IDADE</th> <th colspan="4">RESISTÊNCIAS ( MPa )</th> </tr> <tr> <th colspan="2">FLEXÃO</th> <th colspan="2">COMPRESSÃO</th> </tr> <tr> <th>MENSAL</th> <th>ANUAL</th> <th>MENSAL</th> <th>ANUAL</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2 dias</td> <td>5,9</td> <td>5,8</td> <td>32,7</td> <td>31,3</td> </tr> <tr> <td>7 dias</td> <td>7,5</td> <td>7,5</td> <td>44,8</td> <td>44,3</td> </tr> <tr> <td>28 dias</td> <td>8,8</td> <td>8,7</td> <td>55,1</td> <td>55,4</td> </tr> </tbody> </table>	IDADE	RESISTÊNCIAS ( MPa )				FLEXÃO		COMPRESSÃO		MENSAL	ANUAL	MENSAL	ANUAL	2 dias	5,9	5,8	32,7	31,3	7 dias	7,5	7,5	44,8	44,3	28 dias	8,8	8,7	55,1	55,4	<b>ANÁLISE QUÍMICA</b> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th colspan="2"></th> <th>MENSAL</th> <th>ANUAL</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PERDA AO FOGO</td> <td>% P.F</td> <td>2,61</td> <td>2,43</td> </tr> <tr> <td>RESÍDUO INSOLÚVEL</td> <td>% R.I</td> <td>1,33</td> <td>1,32</td> </tr> <tr> <td>ÓXIDO DE SILÍCIO</td> <td>% SiO<sub>2</sub></td> <td>20,36</td> <td>20,39</td> </tr> <tr> <td>ÓXIDO DE ALUMÍNIO</td> <td>% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></td> <td>5,10</td> <td>4,76</td> </tr> <tr> <td>ÓXIDO DE FERRO</td> <td>% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></td> <td>3,12</td> <td>3,15</td> </tr> <tr> <td>ÓXIDO DE CÁLCIO</td> <td>% CaO</td> <td>62,72</td> <td>62,17</td> </tr> <tr> <td>ÓXIDO DE MAGNÉSIO</td> <td>% MgO</td> <td>1,81</td> <td>1,90</td> </tr> <tr> <td>SULFATOS</td> <td>% SO<sub>3</sub></td> <td>3,44</td> <td>3,44</td> </tr> <tr> <td>ÓXIDO DE POTÁSSIO</td> <td>% K<sub>2</sub>O</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>ÓXIDO DE SÓDIO</td> <td>% Na<sub>2</sub>O</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>CLORETOS</td> <td>% Cl</td> <td>0,0120</td> <td>0,0137</td> </tr> <tr> <td>CAL LIVRE</td> <td>%</td> <td>1,62</td> <td>0,98</td> </tr> <tr> <td>N/D ( não Deseados )</td> <td>%</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			MENSAL	ANUAL	PERDA AO FOGO	% P.F	2,61	2,43	RESÍDUO INSOLÚVEL	% R.I	1,33	1,32	ÓXIDO DE SILÍCIO	% SiO <sub>2</sub>	20,36	20,39	ÓXIDO DE ALUMÍNIO	% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,10	4,76	ÓXIDO DE FERRO	% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,12	3,15	ÓXIDO DE CÁLCIO	% CaO	62,72	62,17	ÓXIDO DE MAGNÉSIO	% MgO	1,81	1,90	SULFATOS	% SO <sub>3</sub>	3,44	3,44	ÓXIDO DE POTÁSSIO	% K <sub>2</sub> O			ÓXIDO DE SÓDIO	% Na <sub>2</sub> O			CLORETOS	% Cl	0,0120	0,0137	CAL LIVRE	%	1,62	0,98	N/D ( não Deseados )	%		
IDADE		RESISTÊNCIAS ( MPa )																																																																																			
		FLEXÃO		COMPRESSÃO																																																																																	
	MENSAL	ANUAL	MENSAL	ANUAL																																																																																	
2 dias	5,9	5,8	32,7	31,3																																																																																	
7 dias	7,5	7,5	44,8	44,3																																																																																	
28 dias	8,8	8,7	55,1	55,4																																																																																	
		MENSAL	ANUAL																																																																																		
PERDA AO FOGO	% P.F	2,61	2,43																																																																																		
RESÍDUO INSOLÚVEL	% R.I	1,33	1,32																																																																																		
ÓXIDO DE SILÍCIO	% SiO <sub>2</sub>	20,36	20,39																																																																																		
ÓXIDO DE ALUMÍNIO	% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,10	4,76																																																																																		
ÓXIDO DE FERRO	% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,12	3,15																																																																																		
ÓXIDO DE CÁLCIO	% CaO	62,72	62,17																																																																																		
ÓXIDO DE MAGNÉSIO	% MgO	1,81	1,90																																																																																		
SULFATOS	% SO <sub>3</sub>	3,44	3,44																																																																																		
ÓXIDO DE POTÁSSIO	% K <sub>2</sub> O																																																																																				
ÓXIDO DE SÓDIO	% Na <sub>2</sub> O																																																																																				
CLORETOS	% Cl	0,0120	0,0137																																																																																		
CAL LIVRE	%	1,62	0,98																																																																																		
N/D ( não Deseados )	%																																																																																				
<b>ENSAIOS FÍSICOS</b> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th colspan="2"></th> <th>MENSAL</th> <th>ANUAL</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2">Peso Específico ( g/cm<sup>3</sup> )</td> <td>3,14</td> <td>3,15</td> </tr> <tr> <td rowspan="4">Resíduo de Peneiração (%)</td> <td>90 µm</td> <td>0,06</td> <td>0,17</td> </tr> <tr> <td>63 µm</td> <td>0,20</td> <td>0,62</td> </tr> <tr> <td>45 µm</td> <td>1,75</td> <td>2,28</td> </tr> <tr> <td>32 µm</td> <td>5,40</td> <td>7,50</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Superfície Específica de Blaine ( cm<sup>2</sup> /g ) [NP EN 196-6]</td> <td>3928</td> <td>3884</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Água na Pasta Normal ( % ) [NP EN 196-3]</td> <td>29,8</td> <td>29,6</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Tempo de Presa (min) [NP EN 196-3]</td> <td>Início</td> <td>151</td> <td>162</td> </tr> <tr> <td>Fim</td> <td>198</td> <td>217</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Expansibilidade ( mm ) [NP EN 196-3]</td> <td>1,19</td> <td>1,18</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Índice de Brancura ( 0 a 100 )</td> <td>29,66</td> <td>29,49</td> </tr> </tbody> </table>			MENSAL	ANUAL	Peso Específico ( g/cm <sup>3</sup> )		3,14	3,15	Resíduo de Peneiração (%)	90 µm	0,06	0,17	63 µm	0,20	0,62	45 µm	1,75	2,28	32 µm	5,40	7,50	Superfície Específica de Blaine ( cm <sup>2</sup> /g ) [NP EN 196-6]		3928	3884	Água na Pasta Normal ( % ) [NP EN 196-3]		29,8	29,6	Tempo de Presa (min) [NP EN 196-3]	Início	151	162	Fim	198	217	Expansibilidade ( mm ) [NP EN 196-3]		1,19	1,18	Índice de Brancura ( 0 a 100 )		29,66	29,49																																									
		MENSAL	ANUAL																																																																																		
Peso Específico ( g/cm <sup>3</sup> )		3,14	3,15																																																																																		
Resíduo de Peneiração (%)	90 µm	0,06	0,17																																																																																		
	63 µm	0,20	0,62																																																																																		
	45 µm	1,75	2,28																																																																																		
	32 µm	5,40	7,50																																																																																		
Superfície Específica de Blaine ( cm <sup>2</sup> /g ) [NP EN 196-6]		3928	3884																																																																																		
Água na Pasta Normal ( % ) [NP EN 196-3]		29,8	29,6																																																																																		
Tempo de Presa (min) [NP EN 196-3]	Início	151	162																																																																																		
	Fim	198	217																																																																																		
Expansibilidade ( mm ) [NP EN 196-3]		1,19	1,18																																																																																		
Índice de Brancura ( 0 a 100 )		29,66	29,49																																																																																		
OBSERVAÇÕES:																																																																																					
ANUAL - Valor médio dos últimos 12 meses NOTA: todos os parâmetros são determinados por métodos internos com excepção dos que indicam a [norma aplicada]																																																																																					
VISTO 	APROVADO 																																																																																				

## A2 – Ficha técnica do superplastificante para betão

Construction

**Ficha de Produto**  
Edição de Novembro 2007  
Nº de identificação: 1.26 FC  
Versão nº 1  
Sika® ViscoCrete® 3008

**Sika® ViscoCrete® 3008**

## Superplastificante para betão

<b>Descrição do produto</b>	Sika® ViscoCrete® 3008 é um superplastificante da terceira geração para betão e argamassa. Cumpre os requisitos da Norma NP EN 934-2: T3.1/3.2 como forte redutor de água ou superplastificante.
<b>Utilizações</b>	Sika® ViscoCrete® 3008 permite obter uma muito forte plastificação aliado a uma excelente manutenção de consistência.  Sika® ViscoCrete® 3008 é especialmente adequado para os seguintes casos: <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Betão com forte plastificação.</li> <li>■ Betão com transporte longo e betonagens demoradas.</li> <li>■ Betão com 20% ou mais de redução de água de amassadura.</li> <li>■ Betão muito plástico, fluido ou mesmo autocompactável com resistências finais melhoradas e com menor custo.</li> <li>■ Betão de classe de resistência média e alta, com qualquer consistência, nos quais se pretenda obter uma economia grande de cimento.</li> </ul>
<b>Características / Vantagens</b>	Sika® ViscoCrete® 3008 actua sobre as partículas do cimento por dois mecanismos principais: adsorção superficial e efeito espacial. Ambos concorrem para um efeito dispersante intenso, permitindo uma elevada redução da água de amassadura e/ou um aumento marcado da trabalhabilidade.  As propriedades do betão com Sika® ViscoCrete® 3008 são: <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Uma excelente manutenção de consistência, que pode atingir as 3 - 4 horas a 20 °C, dependendo do tipo de cimento, da consistência inicial e da dosagem de adjuvante.</li> <li>■ Um nível de redução de água muito elevado, podendo atingir 20% a 30% conforme a dosagem e a composição; daí resultam betões com forte aumento de resistências mecânicas, de compactidade elevada e de permeabilidade muito baixa.</li> <li>■ Um efeito plastificante intenso, permitindo obter, mesmo com forte redução de água, consistências favoráveis para uma colocação fácil.</li> <li>■ Um comportamento mais favorável quanto à retração e fluência.</li> <li>■ Sika® ViscoCrete® 3008 é isento de cloretos ou quaisquer outros ingredientes corrosivos para as armaduras, podendo ser usado sem restrições em betão armado e betão pré-esforçado.</li> </ul>
<b>Certificados / Boletins de ensaio</b>	Conforme as especificações da norma NP EN 934-2:T3.1/3.2.
<b>Dados do produto</b>	
<b>Aspecto / Cor</b>	Líquido castanho claro; são possíveis pequenas diferenças de tom, sem influência sobre o desempenho do adjuvante.
<b>Fornecimento</b>	214 kg (200 litros), 1.070 kg (1 m <sup>3</sup> ) e granel.
<b>Armazenagem e conservação</b>	O produto deve estar armazenado nas embalagens de origem não encetadas e não deterioradas, ao abrigo da radiação do sol e da geada, a temperaturas entre +5 °C e +35 °C. Conserva-se 1 ano após a data de fabrico.



**Dados técnicos**

<b>Base química</b>	Solução aquosa de policarboxilatos modificados.
---------------------	---

<b>Massa volúmica (23 ± 2 °C)</b>	1,07 ± 0,02 kg/dm <sup>3</sup> .
---------------------------------------	----------------------------------

<b>pH (23 ± 2 °C)</b>	5,5 ± 1,0.
-----------------------	------------

<b>Teor de sólidos</b>	26,5 ± 1,3%.
------------------------	--------------

<b>Teor em iões cloreto</b>	< 0,1%.
-----------------------------	---------

**Informação sobre o sistema****Pormenores de aplicação**

<b>Consumo/ Dosagem</b>	Conforme o objectivo pretendido, recomenda-se partir das seguintes dosagens: <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Dosagem corrente: 0,5% a 1,5% do peso do cimento.</li> <li>■ Dosagens especiais: 1,5% a 2,0% do peso do cimento.</li> </ul>
-------------------------	--

**Instruções de aplicação**

<b>Mistura</b>	<p>Se for possível, deverá preparar-se o betão com apenas cerca de <math>\frac{2}{3}</math> da água prevista e adicionar então o adjuvante misturando energeticamente cerca de 1 minuto/m<sup>3</sup>; 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 homogênea.</p> <p>É importante garantir um tempo mínimo de 1,5 a 2 minutos de amassadura, para obter o efeito pleno do adjuvante.</p> <p>Nunca adicionar o adjuvante ao cimento ou agregados, em seco (redução de eficácia).</p> <p>É possível a adição na autobetoneira desde que seja garantida a uniformidade do betão.</p> <p>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.</p>
----------------	---

<b>Aplicação</b>	Sika® ViscoCrete® 3008 permite o fabrico de betão de qualidade, daí que devam ser cumpridas as regras de boa prática para o fabrico, a betonagem e a cura do betão.
------------------	---

<b>Compatibilidade</b>	<p>Sika® ViscoCrete® 3008 pode ser combinado com diversos produtos Sika:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Sika® Rapid 1.</li> <li>■ SikaCrete®.</li> <li>■ Sika® FerroGard® 901.</li> </ul> <p>Recomenda-se sempre a realização de ensaios prévios.</p>
------------------------	---

Construction

<b>Limpeza de ferramentas</b>	Com água.
<b>Importante</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Dosagens superiores ao indicado podem conduzir a retardamento da presa do cimento.</li> <li>■ Recomenda-se a realização de ensaios prévios para se encontrar a dosagem óptima do adjuvante e sempre que se altere a composição do betão.</li> <li>■ Com geada intensa o adjuvante pode gelar, porém uma vez descongelado lentamente, agitado cuidadosamente e verificada a homogeneidade, poderá voltar a empregar-se.</li> <li>■ Para qualquer esclarecimento consultar o Departamento Técnico Sika.</li> </ul>
<b>Nota</b>	Todos os dados técnicos referidos nesta Ficha de Produto são baseados em ensaios laboratoriais. Ensaios realizados noutras condições para determinação das mesmas características podem dar resultados diferentes devido a circunstâncias que estão fora do nosso controlo.
<b>Risco e segurança</b>	
<b>Medidas de segurança</b>	Mercadoria não perigosa para transporte. Este produto não está classificado de acordo com a legislação da UE. Para mais informações consultar a Ficha de Dados de Segurança do produto e o respectivo rótulo.

*"O produto está seguro na C<sup>o</sup> Seguros XL Insurance Switzerland (Apólice n<sup>o</sup> CH00003018LI05A), 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 pedida.



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



A3 – Ficha técnica da sílica de fumo.



*soluciones constructivas*

# Sprayset SF

## Humo de sílice para hormigón proyectado

### Usos

Sprayset SF es adecuado para incrementar las resistencias mecánicas del hormigón proyectado, aportando una tixotropía que hace posible su aplicación en capas gruesas.

### Ventajas

- Aumenta la cohesión del hormigón fresco.
- Sprayset SF aporta tixotropía a los hormigones proyectados tanto por vía seca como húmeda.
- Reduce la permeabilidad del hormigón proyectado aumentando la durabilidad del mismo.
- Proporciona una excelente resistencia a los ciclos hielo-deshielo.
- Aumenta la resistencia del hormigón a los ataques de diferentes agentes químicos.
- Permite la reducción de cemento en hormigón de iguales características.

### Descripción

Sprayset SF es una adición a base de humo de sílice para añadir a las mezclas en seco de áridos y cemento para gunita y hormigón proyectado.

### Dosificación óptima

La dosificación óptima de Sprayset SF para lograr requerimientos específicos, debe determinarse mediante ensayos, empleando los materiales y condiciones con que se trabajará en la práctica.

Un punto de partida para tales ensayos es emplear una dosificación de 4 a 6 Kg de Sprayset SF por 100 Kg de cemento.

### Propiedades

<b>Apariencia:</b>	Polvo gris muy fino
<b>Contenido en cloruros:</b>	Exento

### Modo de empleo

#### Compatibilidad

Sprayset SF es compatible con otros aditivos de Fosroc Euco y con todo tipo de cemento Portland ordinario.

#### Mezcla

Sprayset SF se añade a la mezcla seca de cemento-áridos de forma que quede uniformemente distribuido dentro de la misma. Nunca se añadirá a la mezcla húmeda. En algunos casos, es necesario aumentar el tiempo de mezcla.

#### Curado

Se debe proteger el hormigón fresco contra una desecación a corta edad con un agente de curado, Concure.

#### Limpieza y eliminación

Los derrames de Sprayset SF deben absorberse con arena o tierra y ser transferidos a unos contenedores apropiados. Los restos de producto deben ser chorreados con gran cantidad de agua. La eliminación del producto y del envasado es responsabilidad del usuario final.

### Envasado

<b>Sprayset SF:</b>	Saco 20 kg
---------------------	------------

### Almacenamiento

Sprayset SF tiene un periodo de almacenamiento de 12 meses, siempre que se mantenga a una temperatura entre 2 y 40°C.

### Precauciones

#### Seguridad e higiene

Sprayset SF no debe ser ingerido o puesto en contacto con piel y ojos. Llevar puestos guantes protectores, gafas y mascarilla. En caso de contacto con los ojos eliminar inmediatamente con mucho agua y acudir al médico. Si se ingiere, buscar atención médica inmediata. No inducir al vómito.

Para más información, consultar la hoja de seguridad de este producto.

#### Fuego

Sprayset SF no es inflamable.

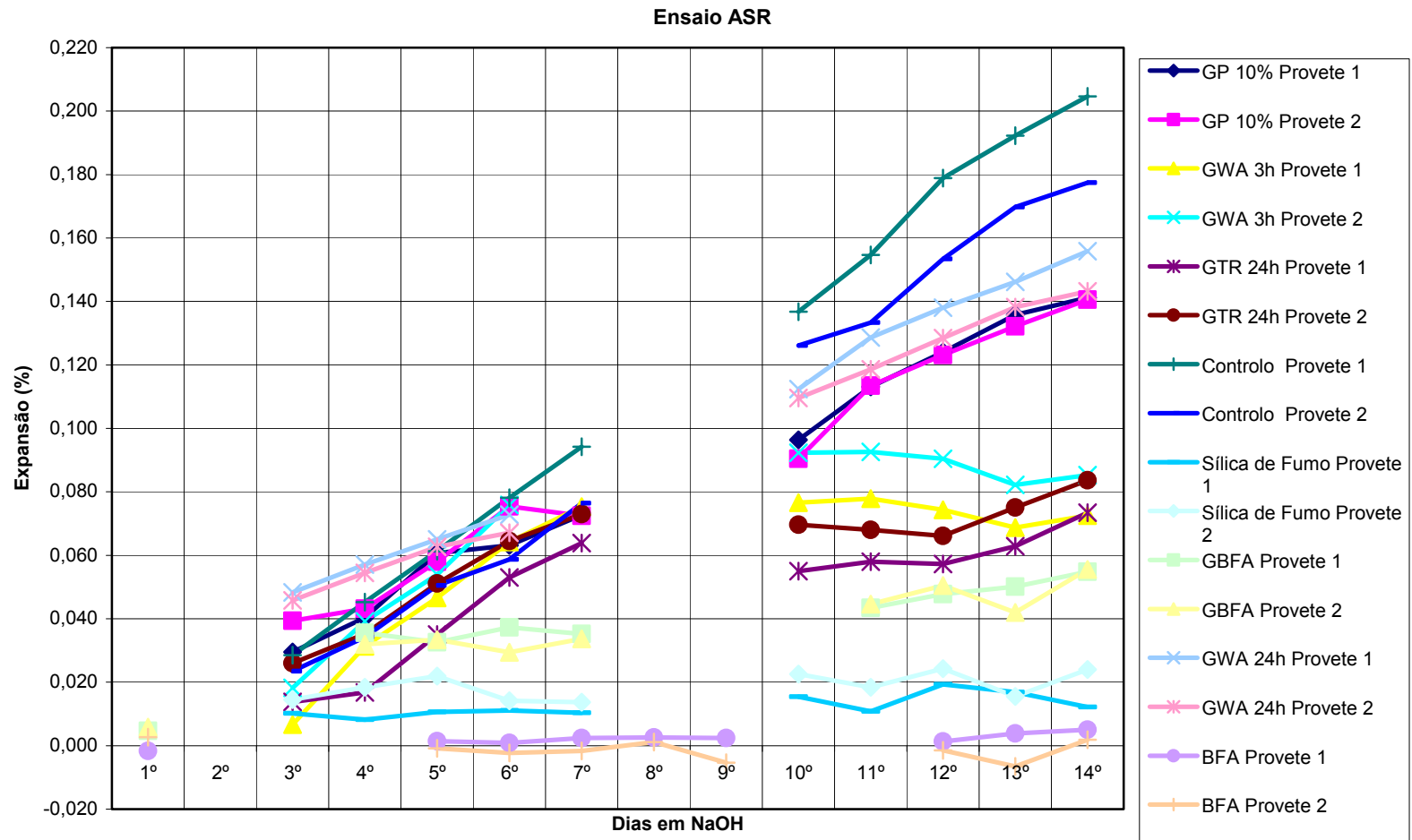
A4 – Valores obtidos do ensaio acelerado de expansão em barra de argamassa (ASTM C 1260).

Dias em NaOH	GP 10%		GWA 3h		GTR 24h		Controlo		Sílica de Fumo		GBFA		GWA 24h		BFA	
	Provete 1	Provete 2	Provete 1	Provete 2	Provete 1	Provete 2	Provete 1	Provete 2	Provete 1	Provete 2	Provete 1	Provete 2	Provete 1	Provete 2	Provete 1	Provete 2
1º											0,005	0,006			-0,002	0,003
2º																
3º	0,030	0,039	0,007	0,018	0,014	0,026	0,029	0,023	0,010	0,015			0,048	0,046		
4º	0,040	0,043	0,031	0,039	0,017	0,035	0,045	0,034	0,008	0,018	0,036	0,032	0,057	0,055		
5º	0,061	0,058	0,047	0,054	0,035	0,051	0,061	0,050	0,011	0,022	0,033	0,033	0,065	0,063	0,001	-0,001
6º	0,063	0,075	0,064	0,076	0,053	0,064	0,078	0,059	0,011	0,014	0,037	0,029	0,073	0,067	0,001	-0,002
7º	0,073	0,072	0,075		0,064	0,073	0,094	0,076	0,010	0,014	0,035	0,034			0,002	-0,002
8º															0,003	0,001
9º															0,002	-0,005
10º	0,096	0,090	0,077	0,092	0,055	0,070	0,137	0,126	0,015	0,023			0,112	0,110		
11º	0,113	0,114	0,078	0,093	0,058	0,068	0,155	0,133	0,011	0,018	0,043	0,045	0,129	0,119		
12º	0,124	0,123	0,074	0,090	0,057	0,066	0,179	0,153	0,019	0,024	0,048	0,050	0,138	0,129	0,001	-0,002
13º	0,136	0,132	0,069	0,082	0,063	0,075	0,192	0,170	0,017	0,015	0,050	0,042	0,146	0,138	0,004	-0,007
14º	0,141	0,141	0,073	0,085	0,073	0,084	0,205	0,177	0,012	0,024	0,055	0,056	0,156	0,143	0,005	0,002

Legenda :

	L<10% comportamento inócuo na maioria dos casos
	L>20% potencialmente expansivos
	10%≤L≤20% necessário informação adicional
	não foram efectuadas leituras
	erro de leitura

A5 – Gráfico do ensaio acelerado de expansão em barra de argamassa (ASTM C 1260).





A7 – Análise granulométrica da amostra de BFA.



Result Analysis Report

**Sample Name:**  
Background com Ethanol - Nuno

**Sample Source & type:**

**Sample bulk lot ref:**

**SOP Name:**

**Measured by:**  
snunes

**Result Source:**  
Measurement

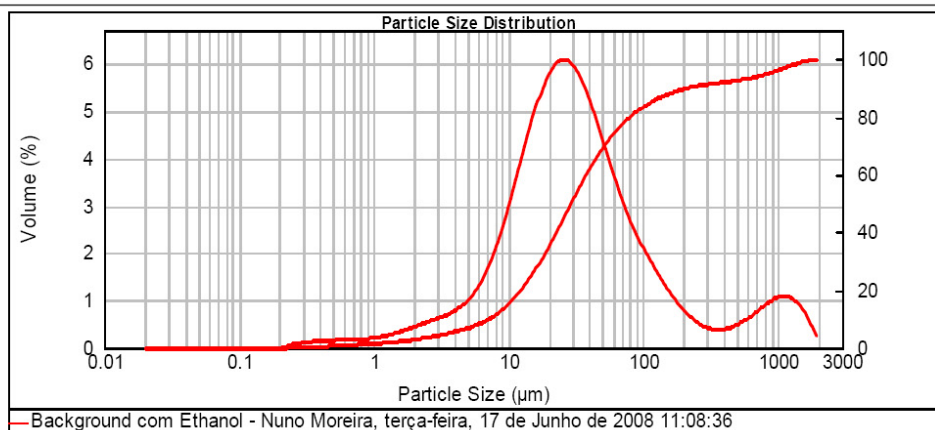
**Measured:**  
terça-feira, 17 de Junho de 2008 11:08:36

**Analysed:**  
terça-feira, 17 de Junho de 2008 11:08:37

<b>Particle Name:</b> Cement 1.0	<b>Accessory Name:</b> Hydro 2000S (A)	<b>Analysis model:</b> General purpose	<b>Sensitivity:</b> Normal
<b>Particle RI:</b> 1.680	<b>Absorption:</b> 1	<b>Size range:</b> 0.020 to 2000.000 um	<b>Obscuration:</b> 13.71 %
<b>Dispersant Name:</b> Ethanol	<b>Dispersant RI:</b> 1.360	<b>Weighted Residual:</b> 0.132 %	<b>Result Emulation:</b> Off

<b>Concentration:</b> 0.0206 %Vol	<b>Span :</b> 7.028	<b>Uniformity:</b> 3.65	<b>Result units:</b> Volume
<b>Specific Surface Area:</b> 0.545 m <sup>2</sup> /g	<b>Surface Weighted Mean D[3,2]:</b> 11.007 um	<b>Vol. Weighted Mean D[4,3]:</b> 120.491 um	

d(0.1): 7.159 um      d(0.5): 28.972 um      d(0.9): 210.767 um



Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.056	0.22	11.482	3.52	120.226	1.40	1258.925	0.90
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.26	13.183	4.11	138.038	1.16	1445.440	0.72
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.30	15.136	4.63	158.489	0.94	1659.587	0.43
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	0.36	17.378	5.07	181.970	0.75	1905.461	0.10
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	0.41	19.953	5.37	208.930	0.60	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.02	2.188	0.46	22.909	5.50	239.883	0.47	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.07	2.512	0.52	26.303	5.27	275.423	0.39	2894.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.09	2.884	0.58	30.200	4.95	316.228	0.35	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.12	3.311	0.65	34.674	4.53	363.078	0.38	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.13	3.802	0.73	39.811	4.06	416.869	0.45	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.14	4.365	0.84	45.709	3.57	478.630	0.55	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.15	5.012	1.00	52.481	3.10	549.541	0.67	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.16	5.754	1.23	60.256	2.68	630.957	0.80	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.16	6.607	1.53	69.183	2.30	724.436	0.91	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.17	7.586	1.93	79.433	1.96	831.764	0.98	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.18	8.710	2.40	91.201	1.66	954.993	0.98	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.20	10.000	2.95	104.713	1.66	1096.478	0.98		
0.105	0.00	1.096	0.20	11.482	2.95	120.226	1.66	1258.925	0.98		

Operator notes:

A8 – Análise granulométrica da amostra de GP.



MASTERSIZER



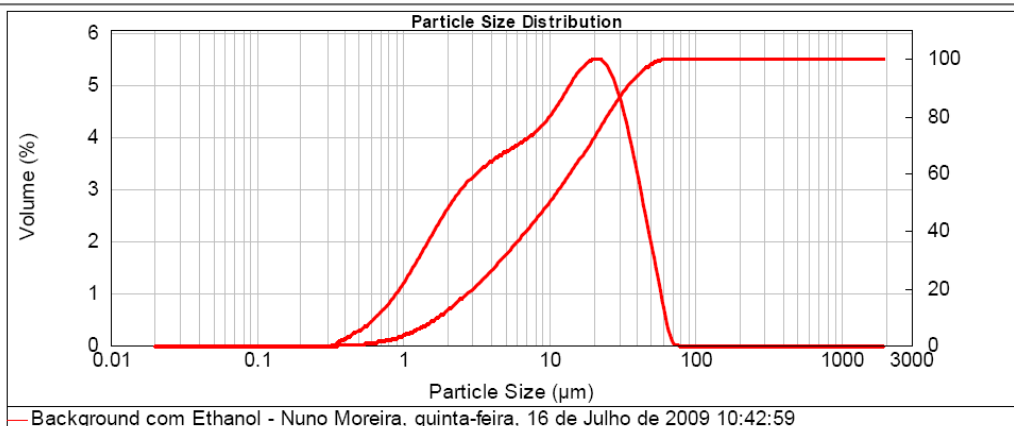
Result Analysis Report

**Sample Name:** Background com Ethanol - Nuno Moreira  
**SOP Name:** Measured: quinta-feira, 16 de Julho de 2009 10:42:59  
**Sample Source & type:** Measured by: snunes  
**Sample bulk lot ref:** Result Source: Measurement  
**Result Source:** Measurement

**Particle Name:** Cement 1.0  
**Accessory Name:** Hydro 2000S (A)  
**Analysis model:** General purpose  
**Sensitivity:** Normal  
**Particle RI:** 1.680  
**Absorption:** 1  
**Size range:** 0.020 to 2000.000 um  
**Obscuration:** 15.05 %  
**Dispersant Name:** Ethanol  
**Dispersant RI:** 1.360  
**Weighted Residual:** 0.475 %  
**Result Emulation:** Off

**Concentration:** 0.0092 %Vol  
**Span :** 3.174  
**Uniformity:** 0.998  
**Result units:** Volume  
**Specific Surface Area:** 1.33 m<sup>2</sup>/g  
**Surface Weighted Mean D[3,2]:** 4.524 um  
**Vol. Weighted Mean D[4,3]:** 14.515 um

**d(0.1): 1.776 um                      d(0.5): 10.186 um                      d(0.9): 34.108 um**



Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	1.35	11.482	4.27	120.226	0.00	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	1.61	13.183	4.52	138.038	0.00	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	1.87	15.136	4.76	158.489	0.00	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	2.13	17.378	4.93	181.970	0.00	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	2.37	19.953	4.98	208.930	0.00	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	2.59	22.909	4.86	239.883	0.00	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	2.79	26.303	4.56	275.423	0.00	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	2.96	30.200	4.06	316.228	0.00	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.01	3.311	3.09	34.674	3.41	363.078	0.00	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.10	3.802	3.21	39.811	2.67	416.869	0.00	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.18	4.365	3.31	45.709	1.91	478.630	0.00	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.28	5.012	3.40	52.481	1.17	549.541	0.00	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.39	5.754	3.49	60.256	0.37	630.957	0.00	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.53	6.607	3.59	69.183	0.01	724.436	0.00	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.69	7.586	3.71	79.433	0.00	831.764	0.00	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.89	8.710	3.85	91.201	0.00	954.993	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	1.11	10.000	4.05	104.713	0.00	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096		11.482		120.226	0.00	1258.925	0.00		

Operator notes:

A9 – Análise granulométrica da amostra de GRT.



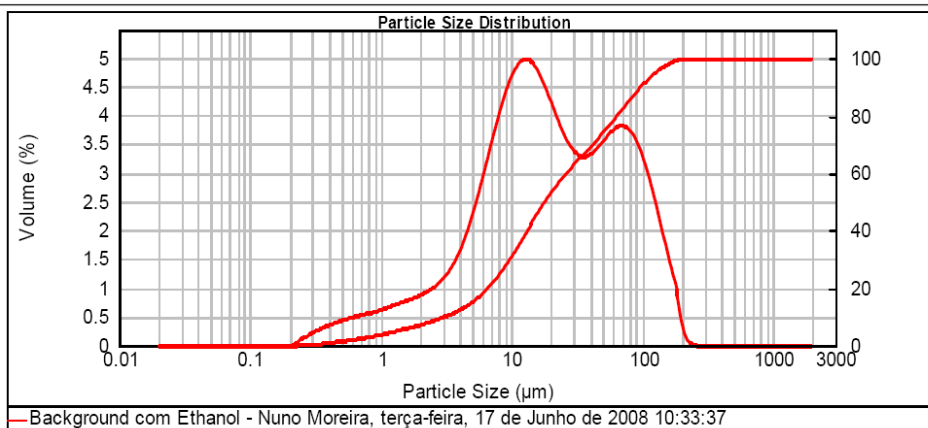
Result Analysis Report

**Sample Name:** Background com Ethanol - Nuno  
**SOP Name:**  
**Measured:** terça-feira, 17 de Junho de 2008 10:33:37  
**Sample Source & type:** snunes  
**Measured by:** snunes  
**Analysed:** terça-feira, 17 de Junho de 2008 10:33:38  
**Sample bulk lot ref:** Measurement  
**Result Source:**

**Particle Name:** Cement 1.0  
**Accessory Name:** Hydro 2000S (A)  
**Analysis model:** General purpose  
**Sensitivity:** Normal  
**Particle RI:** 1.680  
**Absorption:** 1  
**Size range:** 0.020 to 2000.000 um  
**Obscuration:** 16.57 %  
**Dispersant Name:** Ethanol  
**Dispersant RI:** 1.360  
**Weighted Residual:** 0.745 %  
**Result Emulation:** Off

**Concentration:** 0.0132 %Vol  
**Span :** 5.157  
**Uniformity:** 1.53  
**Result units:** Volume  
**Specific Surface Area:** 1.02 m<sup>2</sup>/g  
**Surface Weighted Mean D[3,2]:** 5.903 um  
**Vol. Weighted Mean D[4,3]:** 35.731 um

d(0.1): 3.081 um      d(0.5): 18.005 um      d(0.9): 95.924 um



Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	0.61	11.482	4.50	120.226	2.14	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.65	13.183	4.46	138.038	1.61	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.70	15.136	4.29	158.489	1.11	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	0.74	17.378	4.01	181.970	0.55	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	0.80	19.963	3.69	208.930	0.08	2187.752	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	0.86	22.909	3.38	239.883	0.00	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.03	2.512	0.95	26.303	3.13	275.423	0.00	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.12	2.884	1.08	30.200	2.99	316.228	0.00	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.26	3.311	1.26	34.674	2.97	363.078	0.00	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.31	3.802	1.52	39.811	3.04	416.869	0.00	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.40	4.365	1.86	45.709	3.18	478.630	0.00	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.36	5.012	2.28	52.481	3.33	549.541	0.00	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.40	5.754	2.75	60.256	3.43	630.957	0.00	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.44	6.607	3.24	69.183	3.44	724.436	0.00	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.50	7.586	3.71	79.433	3.31	831.764	0.00	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.53	8.710	4.10	91.201	3.03	954.993	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.57	10.000	4.37	104.713	2.62	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096	0.57	11.482	4.37	120.226	2.62	1258.925	0.00		

Operator notes:

A10 – Análise granulométrica da amostra de GBFA.



MASTERSIZER



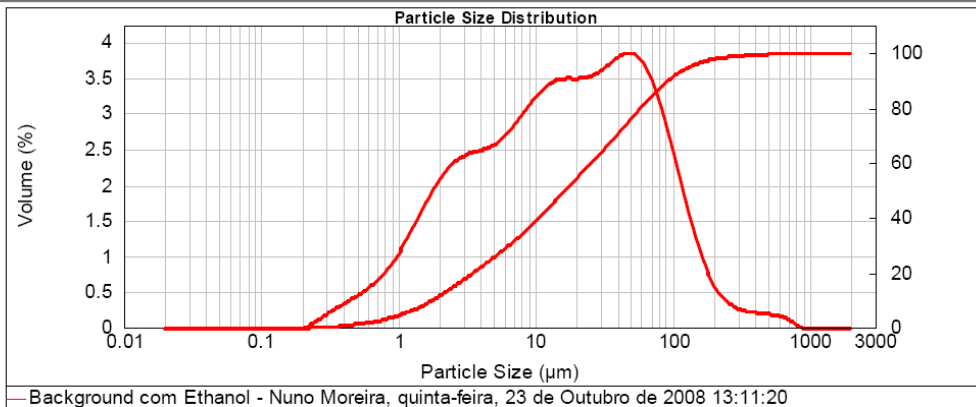
Result Analysis Report

**Sample Name:** Background com Ethanol - Nuno Moreira  
**Sample Source & type:**  
**Sample bulk lot ref:**  
**SOP Name:**  
**Measured by:** snunes  
**Result Source:** Measurement  
**Measured:** quinta-feira, 23 de Outubro de 2008 13:11:20  
**Analysed:** quinta-feira, 23 de Outubro de 2008 13:11:22

**Particle Name:** Cement 1.0  
**Particle RI:** 1.680  
**Dispersant Name:** Ethanol  
**Accessory Name:** Hydro 2000S (A)  
**Absorption:** 1  
**Dispersant RI:** 1.360  
**Analysis model:** General purpose  
**Size range:** 0.020 to 2000.000 um  
**Weighted Residual:** 0.233 %  
**Sensitivity:** Normal  
**Obscuration:** 15.37 %  
**Result Emulation:** Off

**Concentration:** 0.0097 %Vol  
**Specific Surface Area:** 1.27 m<sup>2</sup>/g  
**Span :** 5.466  
**Surface Weighted Mean D[3,2]:** 4.737 um  
**Uniformity:** 1.95  
**Vol. Weighted Mean D[4,3]:** 38.745 um  
**Result units:** Volume

**d(0.1):** 1.802 um      **d(0.5):** 16.710 um      **d(0.9):** 93.130 um



Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	1.13	11.482	3.07	120.226	1.50	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	1.32	13.183	3.12	136.038	1.13	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	1.52	15.136	3.15	158.489	0.82	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	1.71	17.378	3.15	181.970	0.59	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	1.88	19.953	3.15	206.930	0.43	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	2.02	22.909	3.17	239.883	0.32	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.02	2.512	2.12	26.303	3.21	275.423	0.25	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.09	2.884	2.18	30.200	3.28	316.228	0.20	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.16	3.311	2.22	34.674	3.37	363.078	0.22	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.22	3.802	2.25	39.811	3.44	416.869	0.20	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.29	4.365	2.25	45.709	3.44	478.630	0.18	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.35	5.012	2.28	52.481	3.47	549.541	0.17	5754.369	0.00
0.052	0.00	0.550	0.42	5.754	2.35	60.256	3.43	630.957	0.16	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.49	6.607	2.45	69.183	3.29	724.436	0.12	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.57	7.586	2.57	79.433	3.04	831.764	0.06	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.68	8.710	2.71	91.201	2.71	954.993	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.80	10.000	2.85	104.713	2.32	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096	0.95	11.482	2.97	120.226	1.90	1258.925	0.00		

Operator notes:

A11 – Análise granulométrica da amostra de GWA 3h.



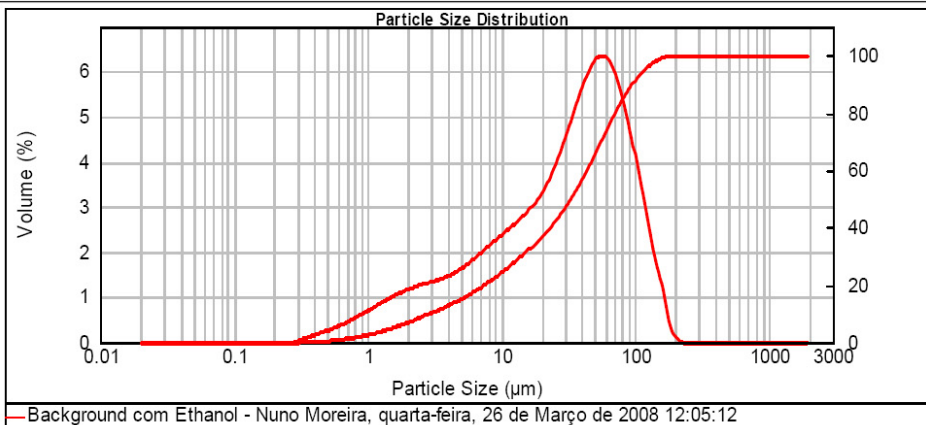
Result Analysis Report

**Sample Name:** Background com Ethanol - Nuno  
**SOP Name:**  
**Measured:** quarta-feira, 26 de Março de 2008 12:05:12  
**Sample Source & type:**  
**Measured by:** snunes  
**Analysed:** quarta-feira, 26 de Março de 2008 12:05:13  
**Sample bulk lot ref:**  
**Result Source:** Measurement

**Particle Name:** Cement 1.0  
**Accessory Name:** Hydro 2000S (A)  
**Analysis model:** General purpose  
**Sensitivity:** Normal  
**Particle RI:** 1.680  
**Absorption:** 1  
**Size range:** 0.020 to 2000.000 um  
**Obscuration:** 14.31 %  
**Dispersant Name:** Ethanol  
**Dispersant RI:** 1.360  
**Weighted Residual:** 0.265 %  
**Result Emulation:** Off

**Concentration:** 0.0144 %Vol  
**Span :** 2.802  
**Uniformity:** 0.888  
**Result units:** Volume  
**Specific Surface Area:** 0.798 m<sup>2</sup>/g  
**Surface Weighted Mean D[3,2]:** 7.516 um  
**Vol. Weighted Mean D[4,3]:** 41.892 um

d(0.1): 2.902 um                      d(0.5): 32.918 um                      d(0.9): 95.150 um



Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.095	0.74	11.482	2.34	120.226	2.14	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.84	13.183	2.49	138.038	1.42	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.92	15.136	2.65	158.489	0.69	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	1.00	17.378	2.87	181.970	0.14	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	1.07	19.953	3.14	208.930	0.00	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	1.13	22.909	3.48	239.883	0.00	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	1.18	26.303	3.90	275.423	0.00	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.01	2.884	1.22	30.200	4.37	316.228	0.00	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.08	3.311	1.28	34.674	4.86	363.078	0.00	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.14	3.802	1.35	39.811	5.29	416.869	0.00	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.19	4.365	1.43	45.709	5.61	478.630	0.00	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.25	5.012	1.54	52.481	5.74	549.541	0.00	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.32	5.754	1.66	60.256	5.62	630.957	0.00	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.39	6.607	1.80	69.183	5.25	724.436	0.00	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.47	7.586	1.94	79.433	4.65	831.764	0.00	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.56	8.710	2.07	91.201	3.87	954.993	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.65	10.000	2.21	104.713	3.01	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096		11.482		120.226		1258.925	0.00		

Operator notes:

A12 – Análise granulométrica da amostra de GWA 24h.



MASTERSIZER

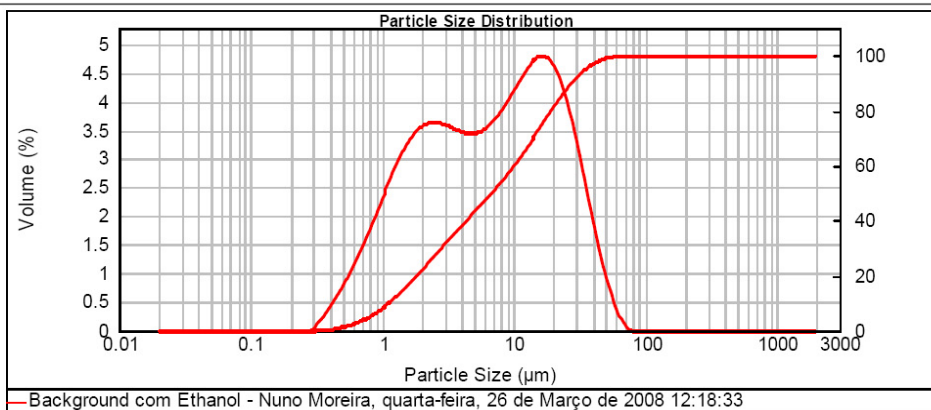


Result Analysis Report

**Sample Name:** Background com Ethanol - Nuno  
**Sample Source & type:** snunes  
**Sample bulk lot ref:**  
**SOP Name:**  
**Measured by:** Measurement  
**Measured:** quarta-feira, 26 de Março de 2008 12:18:33  
**Analysed:** quarta-feira, 26 de Março de 2008 12:18:34

**Particle Name:** Cement 1.0  
**Particle RI:** 1.680  
**Dispersant Name:** Ethanol  
**Accessory Name:** Hydro 2000S (A)  
**Absorption:** 1  
**Dispersant RI:** 1.360  
**Analysis model:** General purpose  
**Size range:** 0.020 to 2000.000 um  
**Weighted Residual:** 0.395 %  
**Sensitivity:** Normal  
**Obscuration:** 14.50 %  
**Result Emulation:** Off  
**Concentration:** 0.0056 %Vol  
**Span :** 3.935  
**Uniformity:** 1.25  
**Result units:** Volume  
**Specific Surface Area:** 2.03 m<sup>2</sup>/g  
**Surface Weighted Mean D[3,2]:** 2.960 um  
**Vol. Weighted Mean D[4,3]:** 11.080 um

d(0.1): 1.120 um      d(0.5): 6.715 um      d(0.9): 27.546 um



Background com Ethanol - Nuno Moreira, quarta-feira, 26 de Março de 2008 12:18:33

Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	2.44	11.482	4.11	120.226	0.00	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	2.71	13.183	4.26	138.038	0.00	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	2.94	15.136	4.33	158.489	0.00	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	3.12	17.378	4.28	181.970	0.00	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	3.23	19.953	4.09	208.930	0.00	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	3.28	22.909	3.74	239.883	0.00	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	3.28	26.303	3.26	275.423	0.00	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.02	2.884	3.24	30.200	2.68	316.228	0.00	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.18	3.311	3.18	34.674	2.07	363.078	0.00	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.35	3.802	3.13	39.811	1.46	416.869	0.00	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.54	4.365	3.11	45.709	0.93	478.630	0.00	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.76	5.012	3.20	52.481	0.52	549.541	0.00	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	1.00	5.754	3.33	60.256	0.20	630.957	0.00	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	1.26	6.607	3.49	69.183	0.03	724.436	0.00	7586.776	0.00
0.069	0.00	0.724	1.55	7.586	3.69	79.433	0.00	831.764	0.00	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	1.84	8.710	3.91	91.201	0.00	954.993	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.965	2.14	10.000	3.91	104.713	0.00	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096	2.44	11.482	4.11	120.226	0.00	1258.925	0.00		

Operator notes: