U.PORTO

FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

ESTUDO DA VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIAS DE ACIARIA (ASIC) EM BETÃO DENSO

ALEXANDRE EMANUEL LEITÃO E PACHECO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM MATERIAIS E PROCESSOS DE CONSTRUÇÃO

Orientador: Luís Filipe Pereira Juvandes

Co-Orientador: Ana Maria Proença Queirós

FEVEREIRO DE 2012

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2011/2012

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

http://www.fe.up.pt

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2011/2012 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2012*.

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.

A meus Pais

Alexandre e Nilza

"O mais incompreensível sobre o mundo é que seja compreensível"

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

A moldagem do conhecimento de cada pessoa é feita na partilha de experiências, momentos, valores, ideias e amizade. É impossível aguçar o nosso engenho isolado no mundo, e é deste modo, que quero exprimir com a maior gratidão, a todos o que ajudaram na realização deste trabalho.

Ao meu orientador, professor Luís Filipe Pereira Juvandes, por ter sido mais que um simples professor, por ter sido um bom amigo, conselheiro e detentor de uma vasta paciência e conhecimento durante todo este processo.

Á professora Ana Maria Proença, que sem o seu profundo conhecimento na área de betões, tal trabalho não teria sido possível realizar.

Apresento o meu reconhecimento às empresas HARSCO Metals CTS e à Siderurgia Nacional SA da Maia pela cedência do material ASIC e elementos bibliográficos.

Aos funcionários do Laboratório de Ensaios de Materiais de Construção (LEMC) expresso a minha gratidão, nomeadamente, á Engenheira Patrícia Pereira pelo máximo rigor e dedicação e aos técnicos Cecília, Irene, Manuel, Gil, Fernando e à Paula e pela vasta paciência e óptimos momentos partilhados.

Ao Professor Arlindo Begonha pelas conversas inspiradoras e da grande amizade partilhada.

À minha família, que possuíram toda a paciência e entendimento nas horas mais difíceis deste trabalho, em especial á minha Mãe e irmãos, Catarina, Pedro, Natacha, Ricardo e Tatiana. Com todo o amor um muito "Obrigado".

Deixo este destaque a ti meu Querido Pai, que mesmo estando fisicamente ausente, espero que possuas o maior orgulho em mim como tiveste em vida.

Á minha companheira e querida Tânia, que transbordou-me de avisos, conselhos e amor, a Ti um sincero e profundo "Obrigado".

RESUMO

Esta dissertação pretende ser um contributo para o estudo da viabilidade da utilização de escórias de aciaria processadas como Agregado Siderúrgico Inerte para Construção (ASIC) em estruturas de betão denso.

O consumo excessivo de recursos naturais, é cada vez mais motivo de preocupação ambiental a nível mundial. Deste modo, são necessários e valorizáveis estudos que colaborem no conhecimento e desenvolvimento de materiais alternativos.

Este trabalho foi assim desenvolvido com o propósito de avaliar a capacidade do ASIC poder vir a substituir os agregados naturais. Para tal caracterizou-se o mesmo quanto às suas propriedades geométricas, físicas, mecânicas e químicas, através de ensaios laboratoriais.

As escórias de aciaria são um resíduo inevitável do processo de produção do aço. Como tal, a valorização deste material como agregado em misturas betuminosas, para além de potenciar a preservação dos materiais naturais, reduz as quantidades de resíduos a depositar em aterro, bem como cria um novo e importante mercado nacional.

Dos estudos realizados conclui-se a viabilidade de aplicação de ASIC em estruturas onde o peso específico tem um grande peso no desempenho destas.

Palavras-chave: escórias de aciaria, Agregado Siderúrgico Inerte para Construção (ASIC), betão denso, caracterização experimental do material.

ABSTRACT

This dissertation intends to contribute to the study of the feasibility of using steel slag aggregate processed as Inert Steel Construction (ASIC) in dense concrete structures Excessive consumption of natural resources is increasing environmental concern worldwide. Thus, studies are needed and recoverable to collaborate in knowledge and development of alternative materials.

This work was thus developed in order to evaluate the ability of ASIC being able to replace natural aggregates. To this end it was characterized as to their geometrical properties, physical, mechanical and chemical, through laboratory testing.

The steel slag is a residue of the inevitable process of steel production. As such, the valuation of this material as aggregate in asphalt, other than promoting the preservation of natural materials, reduce the quantities of waste to be deposited in landfills, and creates an important new market. Of the studies we conclude the feasibility of application of ASIC in structures where the specific weight weighs heavily on the performance of these.

Keywords: steel slag, aggregate Inert Steel Construction, heavy-weight concrete, experimental characterization of the material

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS i
RESUMO iii
ABSTRACT iv

1. INTRODUÇÃO 1
1.1. ENQUADRAMENTO 1
1.2. OBJECTIVOS E METODOLOGIA 1
1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO 2

2. BETÃO DENSO 3
2.1. INTRODUÇÃO 3
2.2. AGREGADOS PARA O BETÃO DENSO 5
2.3. ESCÓRIAS DE ACIARIA 7
2.3.1. ASPECTOS GERAIS 7
2.3.2. Produção 7
2.3.3. Características Químicas 11
2.4. POSSÍVEIS CASOS DE APLICAÇÃO 12

3. CARACTERIZAÇÃO DO ASIC 19
3.1. INTRODUÇÃO 19
3.2. REQUISITOS PARA AGREGADOS 20
3.3. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA 21
3.3.1. Análise Granulométrica 21
3.3.2. Índice de Forma 25
3.3.3. Índice de Achatamento 26
3.4. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA 26
3.4.1. Massa Volúmica e Absorção de Água 25
3.4.2. Baridade e Volumes de Vazios 30
3.4.3. Resistência á Fragmentação pelo Método de *Los Angeles* 31

3.4.4. Resistência ao Esmagamento 32
3.5. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA 34
3.5.1. Teor de Sulfatos Solúveis em Ácido 34
3.5.2. Teor de Cloretos 35
3.5.3. Teor de Enxofre Total 36
3.5.4. Reactividade Alcalis-Silica 37
3.6. COMPILAÇÃO DE RESULTADOS 40

4. CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO COM ASIC 43
4.1. INTRODUÇÃO 43
4.2. MATERIAIS CONSTITUINTES DO BETÃO 44
4.2.1. Cimento 44
4.2.2. Cinzas Volantes 44
4.2.3. Areia fina 44
4.2.4. ASIC 45
4.2.5. Adjuvantes 45
4.2.6. Composição do betão 45
4.3. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO FRESCO 49
4.3.1. Grau de Compatibilidade 49
4.3.2. Massa Volúmica 50
4.3.3. Teor de Ar 51
4.4. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO ENDURECIDO 52
4.4.1. Resistência à compressão 52
4.4.2. Resistência à Tracção por Compressão Diametral 55
4.4.3. Resistência à Flexão 57
4.4.4. Retracção por Secagem 58
4.4.5. Absorção de Água por Capilaridade 60
4.4.6. Absorção de Água por Imersão á Pressão Atmosférica 64
4.4.7. Profundidade da penetração da Água sob pressão 65
4.4.8. Permeabilidade ao Oxigénio 67
4.4.9. Massa volúmica 67
4.5. COMPILAÇÃO DE RESULTADOS 68

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS 71

5.1. INTRODUÇÃO 71

5.2. CARACTERIZAÇÃO DO ASIC 71

5.3. CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO FRESCO 76

5.4. CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO ENDURECIDO 76

5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS 80

6. Conclusões 83

6.1. SÍNTESE 83

6.2. CONSIDERAÇÕES GERAIS 83

6.3. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS 85

7. Bibliografia 87

Anexos A.1

ANEXO A – FICHA TÉCNICA DO CIMENTO CEM I 42,5 R A.3

ANEXO B – CINZAS VOLANTES – CERTIFICADO DE CONFORMIDADE CE A.7

ANEXO C – FICHA TÉCNICA DO ADJUVANTE A.11

ANEXO D – CERTIFICADO DO AGREGADO SIDERÚRGICO INERTE PARA CONSTRUÇÃO (ASIC) A.21

ANEXO E – NEWSLETTER DE HARSCO METALS CTS A.25

ANEXO F – RESULTADOS QUÍMICOS DO ASIC – ANÁLISE QUANTITATIVA A.35

ANEXO G – RESULTADOS QUÍMICOS DO ASIC – IDENTIFICAÇÃO MINERALÓGICA POR DIFRACÇÃO DE RAIO X A.39

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Proporções de agregados consumidos na Europa (adaptado de UEPG, 2009)…….2

Figura 2.2 - Barite…….5

Figura 2.3- Magnetite……...6

Figura 2.4- Hematite……...6

Figura 2.5 - Representação esquemática dos diferentes processos de produção de aço em aciaria (Masuero, 2004)……..…..8

Figura 2.6 - Sistema arco-eléctrico (Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010)…….….8

Figura 2.7 - Aglomerado de sucata ferrosa, instalações da SN da Maia……..9

Figura 2.8 – Arrefecimento da escória ao ar……...11

Figura 2.9 – Barragem de gravidade Coulee Dam (Estados Unidos)…….……13

Figura 2.10 – Barragem de gravidade em Touvedo (região de Lima)…….……..13

Figura 2.11 – Esquema base de um muro de gravidade……14

Figura 2.12 – Exemplo de um muro de gravidade (Universidade do Rio de Janeiro, 2010)…….15

Figura 2.13 – Desenho técnico da secção transversal de um perfil New Jersey (*US Federal Highway Administration)* ……..15

Figura 2.14 - Perfil New Jersey……...…...15

Figura 2.15 – Subpressões devido a níveis freáticos com cota superior ao ensoleiramento geral…..…16

Figura 2.16 – Exemplo de parede em sala de raio-x……..…16

Figura 2.17 – Protecção costeira do porto de Porto Santo com 4 mil cubos antifer……..…….17

Figura 3.1 – Escória de forno eléctrico em estudo – ASIC……....20

Figura 3.2 – Peneiros normalizados……21

Figura 3.3 – Método de esquartelamento (ASIC fino) e Esquartelador (ASIC grosso)…….23

Figura 3.4 – Curva Granulométrica ASIC fino (fracção 0/4)……...……..24

Figura 3.5 – Curva granulométrica ASIC grosso (fracção 4/8)……..24

Figura 3.6 – Curva granulométrica ASIC grosso (fracção 8/16)……..……..25

Figura 3.7 – Curva granulométrica ASIC grosso (fracção 16/32)…….….25

Figura 3.8 – Exemplo de um picnómetro…….……..27

Figura 3.9 – Molde troncocónico metálico……29

Figura 3.10 – Agregado deformado após o apiloamento……29

Figura 3.11 – Máquina de Los Angeles…….……31

Figura 3.12 – Compactação do material…….32

Figura 3.13 – Recipiente metálico com camadas compactadas……..…32
Figura 3.14 – Aplicação gradual da força no provete……..…….....33
Figura 3.15 – Provetes moldados …….……..…38
Figura 3.15 – Provetes moldados …….……..…38
Figura 3.16 – Aparelho de medição …….……..…….....39
Figura 3.17 – Hidróxido de sódio …….……..…….....39
Figura 4.1 Análise granulométrica da areia fina ……..……42
Figura 4.2 – ASIC…….44
Figura 4.3 – Areia fina…….…44
Figura 4.4 – Cimento…….44
Figura 4.5 – Cinzas volantes…….…….44
Figura 4.6 – Adjuvante…….…….44
Figura 4.7 – Mistura dos materiais…….45
Figura 4.8 – Moldagem de provetes…….…….45
Figura 4.9 – Provetes moldados…….46
Figura 4.10 – Ensaio de grau de compactabilidade……..……47
Figura 4.11 – Manómetro……..49
Figura 4.12 – Ensaio de avaliação do teor de ar…….50
Figura 4.13 – Ensaio à compressão até á rotura do provete aos 7 dias…….51
Figura 4.14 – Evolução da resistência média à compressão do betão ao longo de 90 dias …….53
Figura 4.15 – Provete cilíndrico com o posicionador…….…..…54
Figura 4.16 – Aspecto do ensaio de flexão em 4 pontos …….....….55
Figura 4.17 - Rotura do provete prismático no ensaio à flexão…..……..55
Figura 4.18 – Representação gráfica do ensaio da retracção para os diferentes provetes……..57
Figura 4.19 – Representação gráfica dos resultados da absorção de água por capilaridade com 28 e 61 dias…….60
Figura 4.20 – Coeficientes de absorção de água por capilaridade …….61
Figura 4.21 – Ensaio de penetração de água sobre pressão……63
Figura 4.22– Profundidades de penetração de água observadas……..……...64

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Intervalo das composições químicas das escórias de aciaria geradas nos diferentes processos [Machado, 2000] 12

Quadro 3.1 - Requisitos/Propriedades dos agregados para betões de ligantes hidráulicos 20

Quadro 3.2 - Abertura dos peneiros para especificar as dimensões do agregado 22

Quadro 3.3 - Quantidades dos provetes de ensaio para agregados de densidade corrente. 22

Quadro 3.4 - Quantidades dos provetes de ensaio após conversão 23

Quadro 3.5 - Massa mínima dos provetes elementares (método do picnómetro) 27

Quadro 3.6 - Quantidades por fracção de agregado ASIC 27

Quadro 3.7 - Resumo de valores obtidos no ensaio de massa volúmica 29

Quadro 3.8 - Resultados do ensaio de absorção de água 30

Quadro 3.9 – Resultados do ensaio da determinação da baridade e da percentagem de vazios 31

Quadro 3.10 – Valores registados e resistências ao esmagamento do ASIC 33

Quadro 3.11 – Composição das argamassas para realização do ensaio alcalis-silica (A/C = 0,47) 37

Quadro 3.12 – Composição das argamassas para realização do ensaio alcalis-silica (A/C = 0,52) 38

Quadro 3.13 – Resultados do ensaio alcalis-silica com argamassas de ASIC 39

Quadro 3.14 – Resultados dos ensaios de caracterização física, geométrica, mecânica e química 40

Quadro 4.1 – Composição do betão 43

Quadro 4.2 – Programa experimental para a caracterização do betão fresco 45

Quadro 4.3 – Programa experimental para a caracterização do betão endurecido 46

Quadro 4.4 – Grau de compactabilidade do betão 48

Quadro 4.5 – Resultados dos valores do ensaio de determinação da massa volúmica 48

Quadro 4.6 – Resultados do ensaio de resistência à compressão a 1 dia 51

Quadro 4.7 – Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 7 dias 52

Quadro 4.8 – Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias 56

Quadro 4.9 – Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 61 dias 56

Quadro 4.10 – Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 90 dias (cilindros) 56

Quadro 4.11 – Resultados do ensaio à tracção por compressão diametral aos 28 dias 54

Quadro 4.12 – Resultados do ensaio à tracção por compressão diametral aos 61 dias 54

Quadro 4.13 – Resultados do ensaio à flexão aos 28 dias. 56

Quadro 4.14 – Resultados do ensaio à flexão aos 61 dias 56

Quadro 4.15 – Resultados do ensaio de retracção 57

Quadro 4.16 – Absorção de água por capilaridade em provetes com 28 dias 59
Quadro 4.17 – Absorção de água por capilaridade em provetes com 61 dias 59
Quadro 4.18 – Coeficientes de absorção “S” em provetes com 28 e 61 dias..... 61
Quadro 4.19 – Altura de água por capilaridade em provetes com 28 dias 61
Quadro 4.20 – Altura de água por capilaridade em provetes com 61 dias 62
Quadro 4.21 - Absorção de água por imersão atmosférica em provetes com 28 dias 63
Quadro 4.22 – Absorção de água por imersão atmosférica em provetes com 61 dias 63
Quadro 4.23 – Profundidades de penetração média e máximas da água sob pressão com 28 dias .. 64
Quadro 4.24 - Profundidades de penetração média e máximas da água sob pressão com 61 dias ... 64
Quadro 4.25 – Resultado ensaio à permeabilidade ao oxigénio aos 56 dias 65
Quadro 4.26 – Resultados dos valores do ensaio de determinação da massa volúmica 66
Quadro 4.27 – Resultados dos ensaios de caracterização do betão com ASIC 67

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Notações Escalares Latinas (Maiúsculas):

A_i – Valor de absorção de água por imersão à pressão atmosférica (%)

E_{ci} – Modulo de elasticidade em compressão (MPa)

FI – Índice de achatamento

LA – Coeficiente de *Los Angeles*

SI – Indicie de forma

S… - Coeficiente de absorção de água por capilaridade

V – Volume (m^3)

WA_{24} – Absorção de água, após 24h de imersão (%)

DP – Desvio padrão

C – Grau de compactabilidade

Formulas químicas:

C – Carbono

C_3A – Aluminato tricálcico

$CaCO_3$ - Calcite

CaO – Óxido de Cálcio

$Ca(OH_2)$ – Hidróxido de cálcio

$CaSO_4$ – Sulfato de cálcio

FeO – Óxido de ferro

MgO – Óxido de magnésio

BaSO4 – Barite

Fe3O4 – Magnetite

Fe2O3 - Hematite

Notações Escalares Latinas (Minúsculas):

$f_{c,cubo}$ – Resistência à compressão em cubos (MPa)

f^{cil}_{c}– Resistência à compressão em cilindro (MPa)

f_{cm}– Resistência à compressão média em cubos (MPa)

f^{cil}_{cm}, – Resistência à compressão média em cilindros (MPa)

f_{ck} – Resistência característica à compressão (MPa)

f_{ct} – Resistência à tracção (MPa)

$f_{ct,sp}$ – Resistência à tracção por compressão diametral (MPa)

$f_{ctm,sp}$ – Resistência média à tracção por compressão diametral (MPa)

f_{cf} – Resistência à flexão (MPa)

f_{cfm} – Resistência à flexão média (MPa)

f_{ctk} – Resistência característica à tracção (MPa)

C – Teor de cloretos

S – Teor de enxofre total

Notações Escalares Gregas:

ε – *Extensão*

f – Tensão (MPa)

v – Percentagem de vazios (%)

ρ_a – Massa volúmica do material impermeável das partículas (Mg/m^3)

ρ_{rd} – Massa volúmica das partículas secas em estufa (Mg/m^3)

ρ_{ssd} – Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca (Mg/m^3)

ρ_b – Baridade (Mg/m^3)

Abreviaturas:

ASIC – Agregado Siderúrgico Inerte para Construção

ASTM – American Society for testing and materials

BOF – Basic Oxygen Furtunace

CEM - Cimento

EAF – Electric Arc Furnace

EN – European standards

LD – Linz-Donawitz

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

LEMC – Laboratório de Ensaios de Materiais de Construção

NP – Norma Portuguesa

OH – Siemens-Martin

SAMARIS – Sustainable and advanced Materiais for Road InfraStruture

SN – Siderurgia Nacional

UE – União Europeia

UEPG – Union Européenne des Producteurs de Granulats

1
INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

O betão denso é um betão de aplicação pontual com uma massa volúmica superior a 2600 kg/m^3 após secagem em estufa (NP EN 206 -1).

Uma das características de um betão é a sua resistência mecânica. Esta propriedade deve-se em parte, ao emprego de agregados naturais devidamente introduzidos no mercado da construção através da sua prévia análise.

No betão, os agregados definem-se como o seu "esqueleto", ocupando cerca de 70 a 80% do seu volume. Os agregados são na sua maioria de origem natural, levantando sérias questões para uma sociedade do século XXI.

Segundo a European Aggregates Association (UPEG, 2011) foram produzidos só na Europa, 3 biliões de toneladas de agregados. Tal exploração de recursos naturais provocará, a médio e longo prazo, uma debilidade ambiental comprometendo o ecossistema para as gerações futuras.

Aliado a estas preocupações, surgem, em vários sectores das indústrias, políticas ambientais que promovem a reutilização ou o uso de subprodutos proveniente das mesmas. É neste contexto que surge a hipótese da utilização, na construção civil, de um subproduto da produção do aço, a escória de aciaria denominado por Agregado Siderúrgico Inerte para Construção (ASIC).

Devido à escassez de conhecimento sobre este material, este mereceu um estudo mais aprofundado de forma a enriquecer e a determinar as suas potencialidades no campo da construção civil.

A disponibilidade deste material em grande quantidade proveniente da Siderurgia Nacional da Maia, associado à escassez de conhecimento, fez com que existisse uma forte motivação para a elaboração deste trabalho.

1.2. OBJECTIVOS E METODOLOGIA

O principal objectivo deste trabalho consiste no estudo da viabilidade da aplicação do ASIC em betões densos de ligantes hidráulicos.

Para tal, foi efectuada uma pesquisa bibliográfica de forma a saber as principais características, de modo a determinar a sua possível aplicação em betões densos.

Foram efectuados ensaios para avaliar as propriedades geométricas, físicas e químicas do ASIC. Sendo também produzido um betão contendo uma percentagem elevada de ASIC de forma a avaliar o seu desempenho.

Com este trabalho pretende-se contribuir para uma nova visão sobre o uso de um novo agregado denso, após secagem em estufa com massa volúmica superior a 3000 kg/m^3 (NP EN 206 – 1) na execução de betões de elevada densidade.

1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A presente tese é constituída por 6 capítulos: no Capítulo 1 e 2 encontra-se uma abordagem teórica, e nos capítulos 3 a 6 apresentam-se os resultados obtidos nas experiências de laboratório e a respectiva análise.

No capítulo 1 faz-se um enquadramento superficial da tese justificando o tema a desenvolver, bem como a indicação da estrutura da presente dissertação.

No capítulo 2 é apresentada uma pesquisa bibliográfica do consumo mundial a nível de agregados naturais, a importância dos agregados num betão e a explicação dos procedimentos que levam à produção das escórias de aciaria. Por último são referenciados possíveis casos de aplicação para o material em estudo.

No capítulo 3, designado por "Caracterização do ASIC", caracteriza-se laboratorialmente o ASIC de forma a verificar a viabilidade deste material na produção de betões densos de ligantes hidráulicos.

No capítulo 4, designado por "Caracterização do betão com ASIC", é efectuada uma composição de betão denso com ASIC e procede-se á caracterização do betão fresco e endurecido como está estipulado a nível normativo. Como ultimo passo efectuam-se ensaios de durabilidade para caracterizar este betão a longo prazo.

No capítulo 5, designado por "Análise de resultados", são analisados todos os dados obtidos experimentalmente.

No capítulo 6 designado por "Conclusões", são efectuadas conclusões sobre este material tendo em conta os resultados obtidos e a sugestão para desenvolvimentos futuros.

2
BETÃO DENSO

2.1. INTRODUÇÃO

Desde sempre que o Homem sentiu necessidade de se proteger contra as agressividades da natureza, e de viver com o máximo conforto possível. Este iniciou a procura deste desejo através do refúgio em grutas ou cavernas naturais, decoradas e modificadas para retirar o máximo proveito destas habitações primitivas. Entretanto o Homem evolui biologicamente, adquirindo capacidades mentais e intuitivas superiores às dos seus antepassados, possuindo o desejo de construções com maior eficiência e conforto. Assim eis que surgem novos materiais na sua versão mais rudimentar – o betão.

Na sua fórmula actual, o betão é constituído por uma mistura devidamente proporcionada de agregados, de água, de um ligante hidráulico, e eventualmente adjuvantes.

O ligante hidráulico, tem como objectivo a produção de uma matriz cimentícia de forma a unir todos os componentes constituintes do betão.

Os adjuvantes consistem num material adicionado durante o processo de mistura do betão, em pequenas quantidades em relação à massa de cimento, para modificar propriedades do betão fresco ou endurecido.

Relativamente aos agregados, podem ser classificados como o "esqueleto" do betão sendo responsável, na sua grande percentagem, pelas características mecânicas que a estrutura de betão possuirá.

Segundo estudos recentes, estima-se que foram produzidos numa escala mundial 15,6 biliões de toneladas de betão em 1997 (Vanderley, 2002), denotando-se um consumo de agregados colossal à escala global com tendência a crescer.

De acordo com a European Aggregates Association (UPEG, 2011), foram produzidos só na Europa 3 biliões de toneladas de agregados. Na definição de agregados encontram-se os de origem natural obtidos por britagem, constituindo os principais materiais usados na construção de habitações, vias de comunicação, edifícios públicos, entre outros. Segundo a mesma fonte, em Portugal são consumidos 4,7 toneladas/habitante, levantando questões a níveis económicos e ambientais.

Analisando o diagrama da Figura 2.1, que mostra a distribuição do consumo de agregados na Europa, apercebemo-nos que os de origem natural são os mais consumidos. Tais números criam desafios para uma sociedade do século XXI a níveis económicos, político-sociais e acima de tudo ambientais.

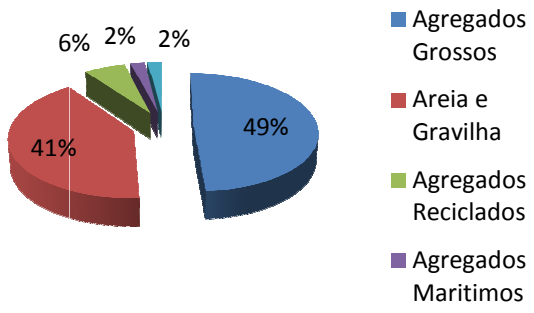


Fig. 2.1 – Proporções de agregados consumidos na Europa (adaptado de UEPG, 2009)

Uma vez que os agregados são extraídos de pedreiras que possuiem um stock limitado, como qualquer recurso natural, o que provoca uma nova abertura de pedreiras promovendo uma desvalorização a nível ambiental.

Assim, com a implementação generalizada de novas políticas ambientais no campo da construção civil, surgiram conceitos de reutilização de subprodutos derivados de vários tipos de indústrias.

Define-se como subproduto, uma matéria que provém da produção de uma outra com valor comercial.

Qualquer entidade construtora, face à actual crise financeira mundial, enfrenta inúmeros desafios e obstáculos para poder exercer a sua actividade. Para tal, a indústria da construção civil tem que investir em novas soluções construtivas mais sustentáveis e económicas.

O agregado em estudo, o Agregado Siderúrgico Inerte para Construção (ASIC) (HARSCO, 2011), surge com base nestas políticas, de reutilização de um subproduto, uma vez que o principal produtor deste agregado se encontra geograficamente próximo, na Industria Siderúrgica da Maia e as quantidades produzidas deste agregado são bastante elevadas.

Através deste estudo que é uma continuação do trabalho iniciado por Telma Ramos em o "Estudo da viabilidade da substituição do agregado natural por agregado siderúrgico inerte para construção (ASIC) em betão" pretende-se potenciar e reforçar o uso deste agregado como substituto do agregado natural na produção de betões densos de ligantes hidráulicos.

Em tempos foi estudada a aplicação deste agregado, no entanto denotou-se problemas a nível ambiental devido à sua composição química, algo que, com o passar das décadas foi sendo corrigido, como irá ser verificado neste estudo.

No presente trabalho, procurou-se dar um contributo positivo no uso de um material alternativo ao agregado natural, a escória de aciaria de forno eléctrico, um subproduto da indústria nacional.

Um betão denso define-se como sendo um betão com massa volúmica superior a 2600 kg/m^3, após secagem em estufa (NP EN 206 -1 (2007)). Para ser validado como um betão, este tem que respeitar determinadas características, que serão enunciadas mais à frente neste trabalho.

Para o enriquecimento desta tese, foi efectuada uma pesquisa bibliográfica relativamente a estudos sobre este agregado, de obras realizadas com este tipo de betão e de agregados densos para betão denso e respectivas especificações.

2.2. AGREGADOS PARA O BETÃO DENSO

O agregado é o principal responsável pelas resistências mecânicas numa peça estrutural de betão armado. Neste estudo designa-se como agregado denso, um material cuja massa volúmica após secagem em estufa é igual ou superior a 3000 kg/m^3 (NP EN 206 -1 (2007)). Actualmente, na execução de betões densos, usam-se agregados na sua grande maioria da família do ferro tais como hematite, magnetite, barite, e limonite. No entanto, com o passar das décadas, a dificuldade de obter esses agregados tem sido cada vez maior, dada a qualidade mínima requerida para serem usados em betão (H. Takeshi, 2010).

A nível nacional os agregados densos mais empregues são actualmente a barite, a magnetite e a hematite.

A barite ($BaSO_4$) ou sulfato de bário cristaliza no sistema ortorrômbico, geralmente sob a forma de cristais tabulares (Figura 2.2). O seu peso específico é elevado (4500 kg/m^3) e a dureza na escala de Mohs varia entre 3 e 3,5. O brilho é vítreo ou nacarado, sendo incolor, branco ou exibindo tons claros de cinzento, azul e amarelo (Klein e Dutrow, 2007). O seu nome, barite, tem origem do grego "barus" que significa pesado.

As finalidades deste minério na construção podem ser variadas, desde da exploração de gás natural até à blindagem de radiações em alvenarias (United States Geological Survey – USGS).

De acordo com Hanor. J. (2010), os principais produtores de barite localizam-se: na china (3.600 mil Ton.), nos Estados Unidos (670 mil Ton.), em Marrocos, no Irão (250 mil Ton.), na Turquia (150 mil Ton.) e no Cazaquistão (100 mil Ton.).

Através de um estudo realizado pela Escola Superior Agrária de Castelo Branco, a nível de produção nacional, a barite era extraída em Segura no concelho de Idanha-a-Nova. Porém, na década de 70, a extracção foi interrompida, provocando uma escassez deste agregado, implicando custos superiores, nomeadamente de importação, em casos de obras que exijam este tipo de agregados.



Fig. 2.2 - Barite

A magnetite (Fe3O4) cristaliza no sistema no sistema cúbico, geralmente sob a forma de cristais octaédricos (Figura 2.3) ou massas granulares. O peso específico é elevado, de 5018 kg/m^3, a dureza encontra-se na escala de Mohs igual a 6, o brilho é metálico e a cor de riscas negras e é fortemente magnética. O seu nome advém da região onde antigamente era extraída, na região de Magnésia na Grécia (Klein e Dutrow, 2007).

Os maiores depósitos deste mineral situam-se na Suécia, Noruega, Estados Unidos e na Rússia (USGS).

Através de consulta de empresas do ramo de engenharia civil o seu uso na construção deve ser muito ponderado, uma vez que possui elevados níveis de magnetismo.



Fig. 2.3 - Magnetite

A hematite (Fe_2O_3) (Figura 2.4), é um dos minerais mais comuns, cristaliza no sistema trigonal apresentando-se geralmente sob a forma terrosa, mas também em cristais romboédricos. Possui um brilho metálico a baço, uma dureza na escala de Mohs de 5,5 a 6,5, uma densidade que varia entre 4900 e 5300 kg/m^3 e cores negra, cinzenta-aço ou vermelha (Klein e Dutrow, 2007).

Os maiores depósitos de hematite situam-se em locais de água parada ou próximos de fontes de água mineral quente.

Este material sendo um dos minerais mais puros em ferro é consequentemente um dos mais caros (USGS).



Fig. 2.4 - Hematite

Devido aos problemas mencionados anteriormente, a nível de custos, a nível prático e a nível ambiental, teve-se como objectivo recorrer a materiais alternativos (agregados) para a produção de betão denso de forma a minimizar os problemas enunciados.

Foi neste pressuposto que o agregado em estudo o ASIC foi analisado e estudado.

2.3. ESCÓRIAS DE ACIARIA

2.3.1. ASPECTOS GERAIS

Os resíduos siderúrgicos denominados de escórias, possuem diferentes denominações e características consoante o modo de produção da qual foram geradas (Machado, 2000). De modo a perceber a origem deste material, descrever-se-á resumidamente, neste subcapítulo, o modo de produção da escoria em estudo.

Na produção do aço existem diferentes modos de fabrico bem como tipos de escórias associados a cada um.

A produção do aço pode ser dividida em dois grandes grupos: siderurgia integrada e semi-integrada. A principal diferença destes dois grupos é a matéria-prima usada, no primeiro o aço provêm de minérios, no segundo provêm da fusão de sucatas.

No grupo de siderurgia integrada, o sistema na produção do aço é o alto-forno no qual as escórias produzidas por este sistema se classificam por: escórias de alto-forno granuladas, escórias de alto-forno resfriada ao ar e a escória de alto-forno expandida ou peletizada.

No grupo da siderurgia semi-integrada, o sistema aplicado é o do forno eléctrico, no qual a escória produzida se classifica por: escória de aciaria negra e escória de aciaria branca, sendo a negra um subproduto e a branca um resíduo, isto é, a primeira possui valor comercial e prático, enquanto a segunda não possui qualquer viabilidade devido aos altos teores de cal nela contida.

O agregado em estudo, o ASIC, provêm do sistema de arco eléctrico, cujo processo de produção irá ser explicado mais adiante.

2.3.2. PRODUÇÃO

Os diferentes processos utilizados na produção, ou refino, do aço influenciam a composição química e as demais propriedades físico-químicas da escória (Machado, 2000).

Basicamente, existem três processos de produção de aço que dão origem a escórias de aciaria, caracterizados pelo emprego de diferentes fornos de refino: o Siemens-Martin (OH), o convertedor a oxigénio (BOF, BOP ou LD) e o forno de arco-eléctrico (EAF) (Machado, 2000).

Actualmente, os dois processos mais significativos são os dois últimos, utilizando-se convertedores a oxigénio ou fornos de arco-eléctricos. Na Figura 2.5 encontra-se uma representação esquemática da produção do aço, com as respectivas etapas de geração de escórias, para o convertedor de oxigénio e para o forno eléctrico.



Fig. 2.5 - Representação esquemática dos diferentes processos de produção de aço em aciaria (Masuero, 2004)

Neste trabalho irá ser focado apenas o processo de produção da escória proveniente do forno arco-eléctrico, uma vez que é desse processo que o material em estudo provém.

O processo de produção do aço em forno de arco eléctrico consiste na fusão de sucata de aço, gerada por um arco eléctrico, formado entre o aço e os eléctrodos de grafita ou carvão amorfo (Raposo, 2005). Na Figura 2.6 está representado o sistema arco-eléctrico de maneira resumida.

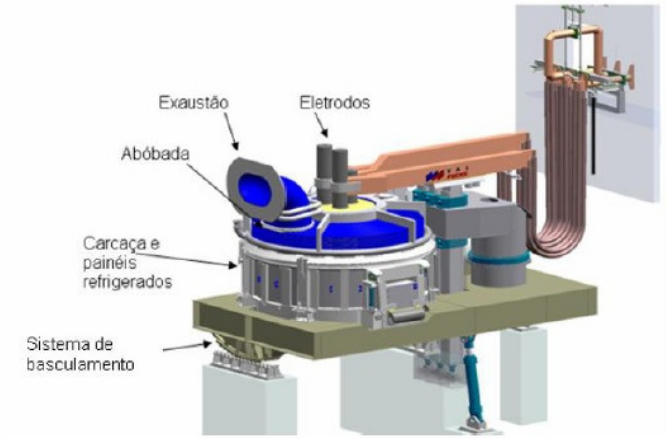


Fig. 2.6 – Sistema arco-eléctrico (Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010)

A sucata metálica, matéria-prima deste processo, pode ser de toda a natureza, como por exemplo chapas de automóveis, chapas defeituosas produzidas na própria siderurgia, etc.

Na Figura 2.7, observa-se um aglomerado de sucata ferrosa nas instalações de SN da Maia.



Fig. 2.7 – Aglomerado de sucata ferrosa, instalações da SN da Maia

O processo de produção em forno de arco eléctrico compreende duas fases: a fase da fusão e a fase da afinação.

Na fase de fusão, além de se utilizar a sucata ferrosa, adiciona-se igualmente outros componentes ao forno-eléctrico, dando assim origem à formação da escória negra. O principal componente a adicionar à sucata ferrosa é a cal.

A fase da afinação é composta por três etapas: a primeira correspondente ao período de oxidação, a segunda ao da redução e a ultima ao ajuste final da composição.

No período de oxidação, injecta-se oxigénio para eliminar os elementos indesejáveis do banho, como o silício, o manganês, o fósforo, entre outros; dá-se a formação de óxidos que passam à escória, queima-se o carbono que é eliminado sob a forma gasosa e produz-se a fervura do banho.

No final da fase de oxidação, a escória que flutua sobre o aço líquido é retirada cuidadosamente sendo vazada em fosso de escória.

A redução, segunda etapa da fase de afinação, tem por finalidade obter um metal de baixo conteúdo em oxigénio e eliminar a maior parte do enxofre. Para tal, é adicionada cal, que actua como dessulfurante, baixando o ponto de fusão da escória, e alguns elementos desoxidantes para fixar o oxigénio. Esta etapa dá origem a um novo tipo de escória, uma escória dessulfurante e desoxidante, denominada por escória branca.

No caso do forno eléctrico, de onde provem o material em estudo, o mesmo admite que as escórias sejam reincorporadas no processo, sendo assim novamente introduzidas no forno eléctrico, o que possibilita uma diminuição do consumo de cal.

Por último, realiza-se o afino final da composição, onde são ajustadas as componentes do banho, adicionando-se os elementos químicos que se deseja incorporar no aço para lhe dar propriedades especiais. Entre eles estão, por exemplo, o crómio, o níquel, o molibdénio, o vanádio, o titânio, entre outros. Após junção, espera-se que as adições se dissolvam e se uniformize a composição do banho.

Em termos médios, por cada tonelada de aço líquido são geradas 110 a 150 kg de escórias negras e 20 a 30 kg de escórias brancas (Roque et tal., 2006).

Ao longo deste trabalho, quando não se fizer qualquer distinção entre escórias de aciaria EAF brancas e negras, estar-se-á a referir às escórias utilizadas na actividade experimental, as escórias de aciaria EAF negras.

Os três processos de refino acima descritos têm em comum o objectivo de remoção do carbono (*C*), do manganês *(Mn*), do fósforo (*P*) e do silício (*Si*) até se atingir os teores exigidos para cada aplicação. Nesses processos, o oxigénio funciona como agente oxidante, e a cal/óxido de cálcio (*CaO*) como elemento escorificante no fluxo de refino. Tanto o processo OH como o LD geram escórias oxidantes, o processo EAF forma os dois tipos de escória: oxidante e redutora. As duas categorias, oxidante e redutora diferem das características da atmosfera do forno durante o refino. A escória oxidante é produzida pela injecção do oxigénio no aço fundido para a oxidação do *C*, *Si* e *P*.

A redutora é gerada após o vazamento da oxidada, pela adição de CaO e de fluorite/fluoreto de cálcio (CaF_2), para promover a dessulfuração do aço líquido e a adição de elementos de liga. (Machado, 2000).

As escórias, tal e qual saem do forno eléctrico, são apenas uma mescla de restos de aço com matérias inorgânicas sem condições de utilização directa em qualquer aplicação conhecida. As escórias redutoras previamente tratadas permitem obter o material em estudo nesta dissertação: o Agregado Siderúrgico Inerte para a Construção (ASIC).

O processamento das escórias negras em ASIC, passa por várias etapas, entre as quais, arrefecimentos primários e secundários, eliminação das componentes metálicas, fragmentação, crivagem e neutralização da cal livre de modo a eliminar a possibilidade de expansão após a aplicação em obra.

Nas duas siderurgias a operar em Portugal (Maia e Seixal), o processo de valorização das escórias compreende três fases. As fases que a seguir se descrevem apenas dizem respeito às escórias negras, já que as escórias brancas, por apresentarem teores muito elevados de cal, não são valorizáveis para aplicação na construção civil.

Numa primeira fase, denominada por escoamento e arrefecimento da escória, a escória depositada no fosso é transferida para uma zona impermeabilizada, onde se procede ao seu arrefecimento por jacto de água, transportando-se de seguida por camião para uma zona de armazenamento.

Na zona de arrefecimento primário das escórias, no caso das siderurgias a operar em Portugal, existe também uma bacia de retenção impermeabilizada, para reter as partículas de granulometria mais fina que a água possa arrastar.

Na zona de armazenamento/arrefecimento completa-se o arrefecimento da escória, podendo utilizar-se água de modo a acelerar o arrefecimento, ou aguardar o tempo necessário para o arrefecimento ao ar (Figura 2.8). O resíduo resultante designa-se por escória não processada.



Fig. 2.8 – Arrefecimento da escória ao ar.

Na segunda fase, denominada por separação da componente metálica, é realizada a fragmentação da escória com extracção simultânea de grande parte dos componentes metálicos.

Nas siderurgias a operar em Portugal, esta separação é efectuada com recurso a meios de manipulação mecânica, no entanto esta separação pode ser também efectuada usando um electroíman.

Após remoção das partes metálicas de grandes dimensões, realiza-se, em tambores magnéticos, a separação das partes metálicas e não metálica do restante material. Obtêm-se, assim, a parte metálica restante que se destina à reutilização na produção do aço.

Por último, numa terceira fase, realizam-se finalmente as acções necessárias à valorização da parte não metálica, a produção do Agregado Siderúrgico Inerte para Construção (ASIC).

Esta fase é constituída por quatro etapas. Numa primeira etapa realiza-se a separação por peneiração em fracções granulométricas adequadas às diversas aplicações.

Numa segunda etapa ocorre a refragmentação mecânica, com eventual moagem, para produzir maior percentagem de finos, e assim obter granulometrias mais finas.

A terceira etapa consiste na eliminação das aparas metálicas de menores dimensões que não tenham sido eliminadas nas fases anteriores, através da passagem com prato magnético e reprocessamento, passando novamente o material no rolo magnético.

Por último, numa quarta etapa armazena-se a escória ao ar livre para se dar a maturação por hidratação ao ar livre, no tempo necessário à neutralização da cal livre remanescente.

2.3.3. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

A composição química das escórias de aciaria é influenciada pelo tipo de sucata usada para a produção do aço.

Quimicamente a escória é constituída essencialmente por compostos de ferro, magnésio, alumínio e algum composto de silicato de cálcio que em conjunto, perfazem cerca de 95% da composição, sendo a contribuição de outros elementos pouco significativas.

O projecto de SAMARIS (2006) constata a dificuldade de definir um processo de fabrico de escórias que resultem numa composição química constante.

Deste modo, podendo as escórias de aciaria ser obtidas através de diferentes processos, e mesmo apresentar algumas variáveis para o mesmo processo, a composição química apresenta assim uma extrema variabilidade de fonte para fonte.

Tal facto foi constatado durante a pesquisa bibliográfica para a elaboração deste trabalho, optando-se por referir um exemplo de Machado (2000) no Quadro 2.1. explicitando o intervalo da composição química típica das escórias geradas pelos dois principais tipos de produção do aço.

Quadro 2.1 - Intervalo das composições químicas das escórias de aciaria geradas nos diferentes processos [Machado, 2000]

Processo	Tipo de escórias	Fe (total)	Fe^{2+}	CaO (total)	CaO (livre)	SiO_2	MgO	MnO	P_2O_5
Conversor LD	Oxidante	14,0 26,0	8,4 15,6	40,0 50,0	0,0 7,0	9,0 16,0	1,0 9,6	3,0 8,0	0,0 5,0
Forno eléctrico	Oxidante	15,0 17,0	9,8 15,7	28,0 40,0	1,4	12,0 26,0	6,4 18,0	3,0 9,3	0,7
	Redutora	0,0 1,5	Nd	47,5 51,0	Nd	19,7 27,0	7,0 15,0	1,0 2,0	-

Os ensaios destinados a caracterizar quimicamente o material em estudo foram efectuados com base na norma NP EN 1744 - 1 (2010), "Ensaios para a determinação das propriedades químicas dos agregados – Parte 1: Análise química".

Os resultados desta análise estão presentes no Capitulo 3.

2.4. POSSÍVEIS CASOS DE APLICAÇÃO

Tal como qualquer material em estudo, o seu principal objectivo é a sua aplicabilidade.

Através da consulta de empresas no ramo da engenharia civil, foi transmitido que os betões densos embora sejam soluções pontuais revelam alguns aspectos negativos. O seu preço ronda os 500 a 700 €/m^3 enquanto um betão corrente possui um custo de 60 a 70 €/m^3. A elevada massa volúmica leva a um desgaste acelerado de todos os equipamentos envolvidos na produção, no transporte e na colocação.

O aspecto económico é uma das mais-valias para o recurso alternativo ao ASIC, não excluindo a componente ambiental.

Deste modo tendo em vista as características do ASIC, foram identificadas as principais aplicações a nível de engenharia que possivelmente serão as mais indicadas ou as mais eficientes para este material em estudo.

As aplicações aqui referidas são um ponto de partida, o que obrigará no futuro a estudos mais detalhados de viabilidade da aplicação da escória em construção, recaindo em situações onde o peso da estrutura é uma das componentes essenciais da estrutura na sua função e desempenho, tais como por exemplo, as barragens de gravidade, os muros de gravidade, os antifer, os perfis New Jersey, os ensoleiramentos gerais, o isolamento de radiações, os edifícios de segurança e os *bunkers*.

2.4.1. BARRAGENS DE GRAVIDADE

As barragens de gravidade convencionais (Figura 2.9) são estruturas construídas transversalmente aos vales e utilizadas essencialmente para o armazenamento de água e aproveitamentos hidro-eléctricos.



Fig. 2.9 – Barragem de gravidade Coulee Dam (Estados Unidos)

As barragens de gravidade são classificadas como "sólidas" ou "ocas" e são geralmente construídas em betão ou alvenaria. Quando são ocas, o núcleo da barragem é dividido por zonas, uma vez que depende dos materiais disponíveis localmente, das condições da fundação e dos atributos dos materiais.

Em Portugal, existe uma quantidade significativa de barragens gravíticas, podendo no futuro ser um campo possível de aplicação do material em estudo.

De acordo com a listagem de barragens nacionais do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), estão registadas no nosso país 21 barragens de gravidade, todas construídas em betão convencional.

O uso do ASIC poderá reflectir-se neste tipo de obras a nível económico, pelo facto do seu peso específico ser superior aos agregados normais podendo conduzir à construção de barragens menos espessas.

Na Figura 2.10 encontra-se um tipo de barragem gravítica em Portugal na região de Lima.



Fig. 2.10 – Barragem de gravidade em Touvedo (região de Lima)

2.4.2. MUROS DE GRAVIDADE

Muros são estruturas corridas de contenção de parede vertical ou quase vertical, apoiadas numa fundação rasa ou profunda. Podem ser constituídos por alvenaria (tijolos ou pedras) ou em betão (simples ou armado).

Estes muros de contenção podem ser de vários tipos: de gravidade, de flexão e de contrafortes.

O ASIC poderá ser usado na construção de muros de gravidade como se especifica mais adiante.

Na Figura 2.11 está representado o esquema base de um muro de gravidade.



Fig. 2.11 – Esquema base de um muro de gravidade

Os muros de gravidade são geralmente económicos apenas quando a sua altura não ultrapassa os 4 metros. Este muro consiste numa estrutura construída com blocos de betão de várias dimensões ou na betonagem como peça estrutural única. Devido à impermeabilidade deste muro é necessário um sistema adequado de drenagem.

A secção transversal é normalmente trapezoidal com a largura da base a rondar os 50% da altura do muro. Tal como as barragens, o desempenho do muro consiste em resistir ao impulso das terras através da actuação de uma estabilizadora provocada pelo peso significativo do muro.

Mais uma vez o material em estudo o ASIC, enquadra-se perfeitamente nestas condições não só devido ao seu elevado peso especifico, mas devido igualmente à sua possível economia na execução deste tipo de projectos uma vez que, com este material, é possível conceber muros com o mesmo peso de muros com betões correntes mas com valores de volume inferiores.

Na Figura 2.12 surge um exemplo de um muro de gravidade no Brasil.

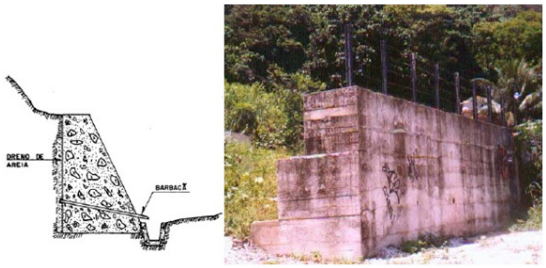


Fig. 2.12 – Exemplo de um muro de gravidade (Universidade do Rio de Janeiro, 2010)

2.4.3. PERFIS NEW JERSEY

Os perfis New Jersey são usados para fazer a separação das faixas de tráfego. São concebidos para minimizar, quanto possível, os danos ao veículo na situação de embate, prevenir o choque frontal com veículos em sentido contrário e o deflectir os veículos em caso de choque com estes perfis. Actualmente estes perfis são usados em situações de protecção anti-terrorismo e na protecção de áreas pedestres em que se realizam manutenções nas vias de comunicação.

A principal característica física deste tipo de perfis consiste num ângulo pré definido na base, de forma a minimizar os danos do veículo. Assim, a roda do veículo contacta em primeiro lugar com o perfil e não a carroçaria do mesmo, minimizando os efeitos da colisão.

A nível de especificações devem possuir uma boa resistência ao impacto e peso suficientes para que não sejam facilmente deslocados.

O ASIC ao possuir boas características requeridas para este tipo de perfis a nível de resistências mecânicas será um material indicado para a produção deste tipo de barreiras.

Este material confere ao perfil um maior peso e igualmente uma boa resistência ao impacto como se verificará experimentalmente no Capitulo 3.

Nas Figuras 2.13 e 2.14, está representado um projecto exemplo de um perfil New Jersey com respectivas armaduras e uma ilustração tridimensional do mesmo.

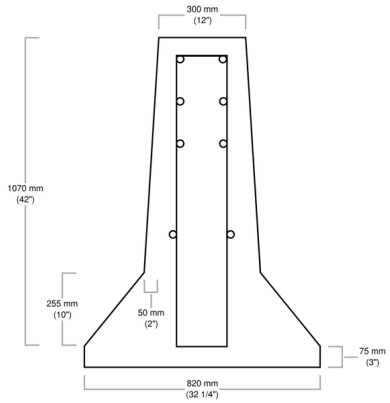


Fig. 2.13 – Desenho técnico da secção transversal de um perfil New Jersey (US Federal Highway Administration)

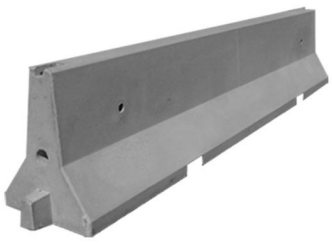


Fig. 2.14 - Perfil New Jersey

2.4.4. ENSOLEIRAMENTOS GERAIS

Os ensoleiramentos gerais consistem em lajes de espessura significativa de betão armado de modo a constituir uma fundação contínua, em solos de características brandas.

De acordo com o Eurocódigo 7 sobre "Dimensionamento Geotécnico" estas lajes têm que possuir a menor espessura possível de forma a não introduzir peso excessivo no solo.

Os ensoleiramento gerais por vezes enfrentam alguns desafios técnicos, onde o nível freático é elevado provocando na base destes subpressões, como é caso de exemplo, algumas estações do Metro do Porto ou edifícios tradicionais.

O valor elevado do peso específico do material em estudo pode ajudar os ensoleiramentos a oporem-se aos efeitos das subpressões na base como está esquematizado na Figura 2.15.

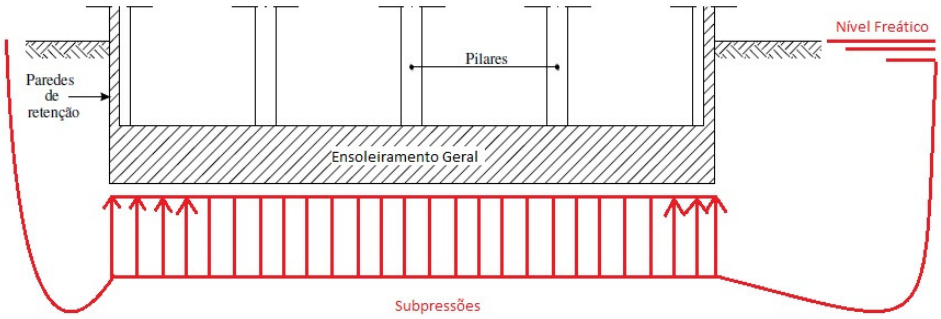


Fig. 2.15 – Subpressões devido a níveis freáticos com cota superior ao ensoleiramento geral

2.4.5. ISOLAMENTO DE RADIAÇÕES

Na concepção de salas onde exista a necessidade de blindagem de radiações (Figura 2.16), em qualquer hospital obriga a existirem barreiras construtivas que proteja o ambiente em redor das radiações provocadas pelos aparelhos usados nos mesmos.

Estas paredes em betão são usualmente fabricadas recorrendo a materiais densos como a barite. No entanto, como já se observou neste capítulo, este tipo de agregado tem desvantagens a nível económico.

Nestas circunstâncias o ASIC pode satisfazer a exigência de blindagem radioactiva e a exigência económica na construção



Fig. 2.16 – Exemplo de parede em sala de raio-x.

2.4.6. ANTIFER

A protecção da orla marítima sempre foi uma grande preocupação a nível das populações. Até à data eram usados blocos de pedra para conter a força do mar e o avanço deste para as zonas costeiras. No entanto, estes blocos de pedra natural não possuem formas padronizadas não permitindo, assim, um melhor arranjo entre elas, fazendo com que num curto espaço de tempo a força do mar vença estas barreiras artificiais.

Assim como estas pedras poderiam sofrer um arrastamento até grandes distâncias, foram concebidos blocos maciços em betão de elevado peso e de geometria padronizada e com um custo mais reduzido, o antifer.

Estes blocos são utilizados para dissipação da energia das ondas em molhes de portos do mar, onde estes são colocados de maneira regular entre si de forma a obter-se uma barreira única contra as marés.

Através destes factores, ao executar-se um antifer com ASIC é possível obter, não só um elemento com peso superior a um antifer em betão convencional, mas igualmente uma boa resistência ao impacto das ondas.

Na Figura 2.17 surge um exemplo de protecção costeira em Porto Santo com 4 mil cubos de antifer.



Fig. 2.17 – Protecção costeira do porto de Porto Santo com 4 mil cubos antifer

3
CARACTERIZAÇÃO DO ASIC

3.1. INTRODUÇÃO

Com o presente trabalho pretende-se estudar a viabilidade do uso do ASIC como agregado para betões densos, pelo que foi efectuada uma caracterização física, mecânica e química deste material.

Existem requisitos normativos para um agregado, porque o seu tipo influencia fortemente o desempenho do betão na sua função, quer a nível de resistência, durabilidade e segurança.

A nível físico, é importante o agregado possuir uma granulometria e uma forma adequadas, uma vez que vai influenciar os níveis de trabalhabilidade, durabilidade e desempenho.

A noção de granulometria está fortemente relacionada com a noção de compactabilidade. É desejável que qualquer agregado possua uma granulometria o mais extensa possível para que no acto de amassadura, este se "funda" com a pasta do cimento de forma a tornar a peça estrutural no mais compacta possível.

Em termos mecânicos, é importante averiguar o valor da resistência do agregado de forma a prever, uma vez que o agregado é um dos agentes de resistência, as suas solicitações limite.

A nível químico, é necessário conhecer o tipo mineralógico dos constituintes dos agregados de forma a prever se estes terão, no futuro, reacções adversas comprometendo a durabilidade e, até mesmo, a segurança da estrutura.

Como o ASIC é um subproduto industrial, a sua aplicação na substituição do agregado natural para a confecção de betão de ligantes hidráulicos impõe o cumprimento de vários requisitos especificados em normas nacionais e europeias.

Para tal, a actual legislação obriga ao cumprimento da norma NP EN 12620 (2010) e a especificação LNEC E 467 (2006) que estabelecem requisitos mínimos para o uso de agregados em Portugal.

O presente trabalho enquadra-se num estudo mais alargado, iniciado na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto que produziu um documento intitulado de "Estudo da viabilidade da substituição do agregado natural por Agregado Siderúrgico Inerte para Construção (ASIC) em betão" (Ramos, 2011).

Por estes motivos, ao longo do trabalho e sempre que se achou adequado, foram usados os resultados da publicação de Ramos quer como dados, quer como informação comparativa com os resultados obtidos no presente trabalho. Na generalidade, o programa experimental foi desenvolvido no Laboratório de Ensaio de Materiais de Construção da FEUP (LEMC) e o material ASIC usado foi obtido de uma série de produção da Siderurgia Nacional da Maia (SN MAIA, 2009) (Anexo D), gentilmente oferecida pela empresa HARSCO Metals CTS, Lda (HARSCO, 2011) (Anexo E).

3.2. REQUISITOS PARA AGREGADOS

Na comunidade europeia há normas que especificam as propriedades dos agregados para serem utilizados em betão, sobretudo os que possuam uma massa volúmica após secagem em estufa superior a 2,00 Mg/m^3. Em Portugal, os agregados para serem aceites têm que obedecer às duas normas em vigor actualmente, a norma NP EN 12620 (2010) – "Agregados para betão" e à norma LNEC E 467 (2006) – "Guia para a utilização de agregados em betões de ligantes hidráulicos".

Foi com base nesta normas, que o estudo da viabilidade do ASIC (Figura 3.1) como agregado de betão de ligantes hidráulicos foi analisado e estudado no presente trabalho.

No quadro 3.1 resumem-se os principais requisitos mínimos que o agregado tem de obedecer para serem usados em betões de ligantes hidráulicos.



Fig. 3.1 – Escória de forno eléctrico em estudo – ASIC

Quadro 3.1 – Requisitos/Propriedades dos agregados para betões de ligantes hidráulicos (NP EN 467, 2006 e NP EN 12620 (2010))

Propriedades	Norma de ensaio	Requisito de Conformidade
Índice de forma	NP EN 933 - 4	A declarar
Índice de achatamento	NP EN 933 - 3	FI_{50} (≤ 50%)
Massa volúmica das partículas	NP EN 1097 - 6	A declarar
Absorção de água	NP EN 1097 - 6	≤ 5%
Baridade e volume de vazios	NP EN 1097 - 3	A declarar (Mg/m^3)
Resistência á fragmentação do agregado grosso pelo Ensaio de *Los Angeles*	NP EN 1097 - 2	≤ LA_{50} (50%)
Resistência ao esmagamento	NP 1039	≤ 45%
Teor de sulfatos solúveis	NP EN 1744 – 1	AS ≤ 1,0%
Teor de cloretos	NP EN 1744 – 1	A declarar (%)
Teor de enxofre total	NP EN 1744 - 1	S ≤ 2,0% s/pirrutite S ≤ 1,0% c/pirrutite
Reacções Álcalis-Sílica	ASTM C1260 - 07	A declarar (%)

3.3. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA

3.3.1. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

A distribuição granulométrica dos agregados é uma das principais características, com bastante influência no comportamento dos betões de ligantes hidráulicos. Esta característica do agregado é determinante em todas as propriedades, tais como a estabilidade, a durabilidade e a permeabilidade, incluído as propriedades que dependem da quantidade de água de amassadura, tais como a compacidade e trabalhabilidade, tendo ainda grande influência no ângulo de atrito interno (Bernucci et tal., 2008).

A compacidade explica-se no modo como as partículas se arrumam, enquanto trabalhabilidade é a maior ou menor facilidade com que o betão é amassado, transportado, compactado e acabado e a menor ou maior facilidade de segregação durante essas operações.

A análise granulométrica do agregado em estudo foi efectuada de acordo com a norma NP EN 933 – 1 (2000) "Ensaios das propriedades geométricas dos agregados, Parte 1: Análise granulométrica – Método da peneiração", no qual se definem métodos para quantificar e distribuir o material pelo tamanho das partículas.

As dimensões das partículas foram separadas utilizando a abertura de peneiros normalizados pela série europeia (Figura 3.2) que compreende a série base, a serie base mais série 1, ou série base mais série 2.

As aberturas dos peneiros das respectivas séries estão expostas no Quadro 3.2.

De acordo com a norma NP EN 12620 (2010), não é permitida a combinação de aberturas de peneiros da série 1 e da série 2 no processo de peneiração do material.



Fig. 3.2 – Peneiros normalizados

Quadro 3.2 – Abertura dos peneiros para especificar as dimensões do agregado (NP EN 12620 (2010))

Série base (mm)	Série base mais série 1 (mm)	Série base mais série 2 (mm)
0	0	0
1	1	1
2	2	2
4	4	4
-	5,6(5)	-
-	-	6,3(6)
8	8	8
-	-	10
-	11,2(11)	-
-	-	12,5 (12)
-	-	14
16	16	16
-	-	20
-	22,4	-
31,5(32)	31,5(32)	31,5(32)
-	-	40
-	45	-
63	63	63

Nota: Os valores entre parêntesis podem ser utilizados como descrições simplificadas das dimensões dos agregados

Visando boa trabalhabilidade, maior compacidade e maior qualidade possível para o betão denso, o ASIC foi dividido em quatro fracções.

A fracção mais pequena denominou-se de ASIC fino: uma fracção de 0 a 4 mm, e as restantes fracções denominadas de ASIC grosso, sendo constituído por: uma fracção de 4 a 8 mm, uma fracção de 8 a 16 mm e finalmente uma fracção de 16 a 32 mm.

Como o ASIC disponível no LEMC possuía muito pouca quantidade de granulometria fina (0 a 4 mm), foi usado uma areia fina, para colmatar a falta de agregado fino necessário para a futura amassadura do betão.

Para a realização deste ensaio, procedeu-se á recolha de amostras representativas do ASIC armazenado no LEMC, através das quantidades estabelecida nas especificações da norma NP EN 933 – 1 (2000) (Quadro 3.3)

Quadro 3.3 – Quantidades dos provetes de ensaio para agregados de densidade corrente.

Máxima dimensão D (mm)	Massa do provete (mínimo) kg
63	40
32	10
16	2,6
8	0,6
≤ 4	0,2

No entanto, estas quantidades especificadas na norma NP EN 933 – 1 (2000), referem-se a agregados onde a densidade está compreendida entre 2000 kg/m^3 e 3000 kg/m^3, assim sabendo que a densidade

do ASIC no estudo anterior realizado por Ramos, a densidade do ASIC era de 3580 kg/m^3, efectuou-se a conversão dos valores do Quadro 3.3, para a real densidade do ASIC presente no Quadro 3.4.

Quadro 3.4 – Quantidades dos provetes de ensaio após conversão.

Máxima dimensão D (mm)	Massa do provete (mínimo) kg
63	54
32	13,5
16	3,5
8	0,81
≤ 4	0,27

Tendo estes valores em conta, finalmente foram retiradas amostras representativas de cada fracção de modo a dar uma representação da amostra total do ASIC.

Para isso, a redução da amostra foi efectuada através do processo de esquartelamento (Figura 3.3), segundo as especificações da norma NP EN 932 – 2 (2002) "Ensaios das propriedades gerais dos agregados, Parte 2: Métodos de redução de amostras laboratoriais", de modo a obter as massas, M_1.

Assim foram obtidas para cada fracção as respectivas massas:

- Fracção 16/32: M_1 = 13.545 gramas
- Fracção 8/16: M_1= 4.060 gramas
- Fracção 4/8: M_1= 1.145 gramas
- Fracção 0/4: M_1 = 345 gramas

Após obtidas as massas de cada fracção, foram secas em estufa a (110±5) ºC até massa constante, M_2.

Uma vez que o material contém uma fraca quantidade de partículas finas a peneiração foi feito a seco.



Fig. 3.3 – Método de esquartelamento (ASIC fino) e Esquartelador (ASIC grosso)

Após a secagem de cada fracção, estas foram peneiradas em duas combinações possíveis de peneiros apresentados anteriormente no Quadro 3.2: na série base mais série 1 e série base mais série 2 (Quadro 3.2).

Regista-se as quantidades de material retido em cada peneiro, originando as respectivas curvas granulométricas (Figura 3.4, 3.5, 3.6 e 3.7) de cada fracção. No entanto, a peneiração das fracções nas combinações: série base mais série 1 e série base mais série 2 apresentaram entre si, uma diferença pouco significativa de material retido nos peneiros. Assim sendo então apenas apresentadas as curvas granulométricas da série base mais série 1.

É de salientar que a variação entre o somatório das massas retidas em cada peneiro e do material fino e da massa M_2, deve ser inferior a 1% de modo a que não haja perda significativa de material e que possa ser válido este ensaio.

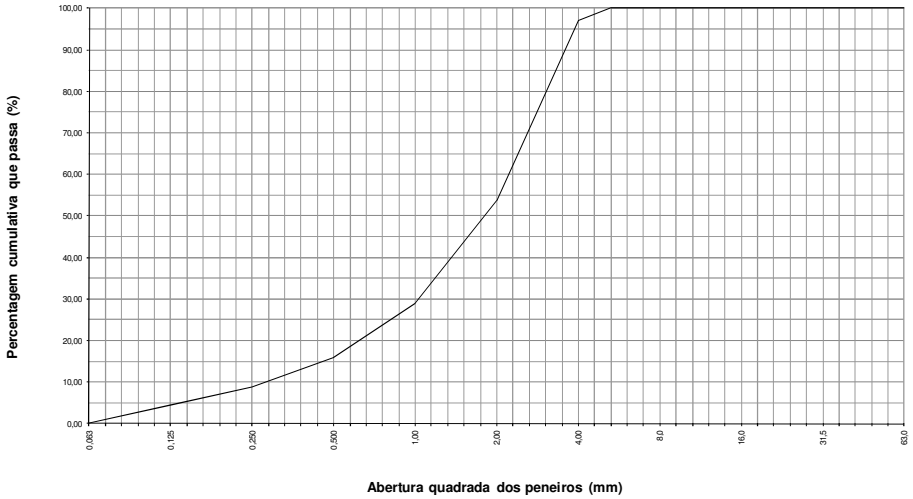


Fig. 3.4 – Curva Granulométrica ASIC fino (fracção 0/4)

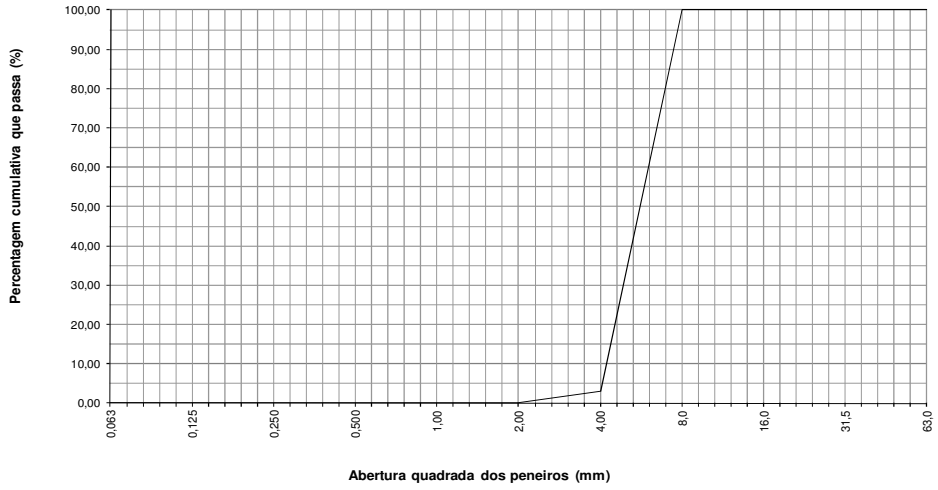


Fig. 3.5 – Curva granulométrica ASIC grosso (fracção 4/8)

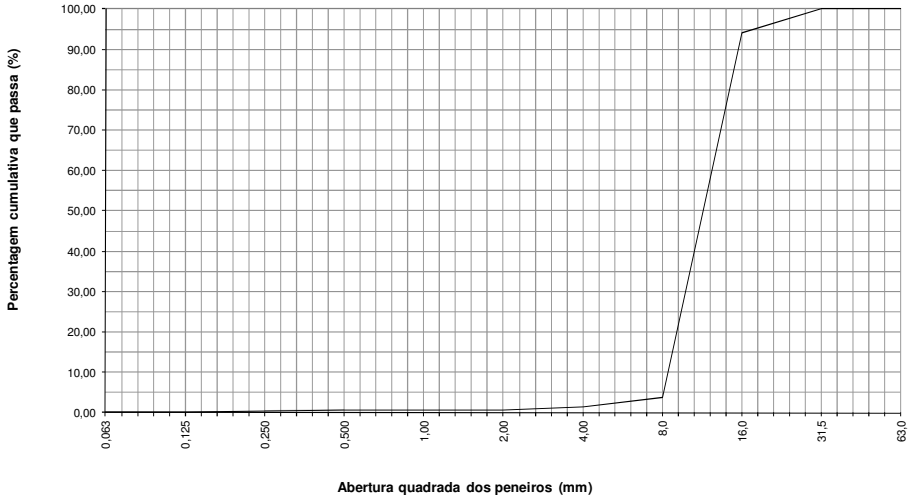


Fig. 3.6 – Curva granulométrica ASIC grosso (fracção 8/16)

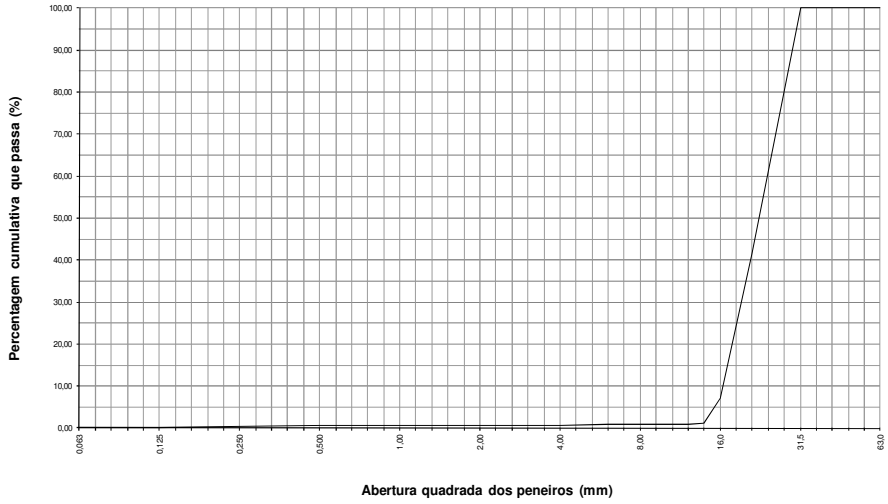


Fig. 3.7 – Curva granulométrica ASIC grosso (fracção 16/32)

3.2.2. ÍNDICE DE FORMA

A forma das partículas do agregado afecta o comportamento do betão, porque interfere na trabalhabilidade, na compacidade, no ângulo de atrito interno, na energia de compactação entre outros, isto, é nas propriedades que dependem da quantidade de água de amassadura (Coutinho, 1999).

O formato das partículas deve ser aproximadamente a mais cúbica possível, tentando evitar ao máximo o uso de formas laminares uma vez que podem ser prejudiciais na interligação dos componentes no interior do betão, originando fracas ligações.

Por isso, quanto mais cúbicas ou arredondas forem as partículas, maior é o arranjo destas no interior do betão logo maior a interligação dos grãos compactados.

O índice de forma é avaliado por um ensaio que relaciona o conceito de comprimento com a espessura das partículas constituintes do material. Este ensaio rege-se pelas especificações da norma NP EN 933

– 4 (2002) "Ensaios das propriedades geométricas dos agregados, Parte 4: Determinação da forma das partículas – Índice de forma".

Pelo que foi referido atrás, a propósito do estudo em desenvolvimento na Feup, a determinação do índice de forma do material usado no trabalho foi assumido igual ao avaliado por Ramos, porque o ASIC é da mesma série de produção da Harsco. O índice de forma é de Sl = 0,4% (Ramos, 2011), o que significa estar na categoria Sl_{15} ($Sl \leq 15\%$).

3.2.3. ÍNDICE DE ACHATAMENTO

Este índice é muito semelhante ao do índice de forma e também caracteriza a forma das partículas. O ensaio segue as especificações da norma NP EN 933 - 3 (2002) "Ensaios para determinação das propriedades geométricas dos agregados, Parte 3: Determinação da forma das partículas – Índice de achatamento"

Pelos motivos expostos na secção 3.2.1 anterior neste trabalho assumiu-se que o índice de achatamento com o valor de Fl = 2% (Ramos, 2011), o que significa estar na categoria Fl_{15} ($Fl \leq 15\%$).

3.4. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA

3.4.1. MASSA VOLÚMICA E ABSORÇÃO DE ÁGUA

A massa volúmica define-se como sendo o quociente entre a massa e o volume do material, indicando a quantidade de material existente por unidade de volume.

Relativamente à absorção de água de um agregado, esta é importante uma vez que um elevado nível de absorção desta pelo agregado, poderá trazer um impacto negativo a níveis de durabilidade e mecânicos.

Os ensaios para determinação destas duas características, foram baseados nas especificações da norma NP EN 1097 – 6 (2003), "Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados, Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água".

A massa é determinada a partir da pesagem do provete com as partículas saturadas com superfície seca e a partir de uma outra pesagem do mesmo provete, após secagem em estufa. Por sua vez, o volume é determinado pela massa de água deslocada, podendo ser determinado ou por redução da massa no método do cesto de rede metálica, ou por pesagens no método do picnómetro. Sendo assim, aplicou-se o método do picnómetro para as partículas de agregado de dimensão entre 0,063 mm e 31,5 mm.

Antes de iniciar o ensaio, foi necessária a obtenção de uma amostragem do agregado de acordo com a norma NP EN 932 – 2 (2002).

As massas mínimas exigidas na norma NP EN 1097 – 6 (2003), de acordo com a dimensão do agregado, são as indicadas no Quadro 3.5.

Através do processo de esquartelamento, obtiveram-se, para as diferentes fracções, as massas expostas no Quadro 3.6.

Quadro 3.5 – Massa mínima dos provetes elementares (método do picnómetro)

Dimensão máxima (mm)	Massa mínima do provete (kg)
31,5	5
16	2
8	1
4 (ou menor)	1

Quadro 3.6 – Quantidades por fracção de agregado ASIC

Fracção do agregado	Quantidade adquirida (g)
16/32	5056,0
8/16	2179,6
4/8	1110,8
0/4	1470,5

Para a determinação da massa volúmica do ASIC de dimensões entre 4 a 32 mm, primeiramente é realizada a lavagem do material sobre o peneiro de 4 mm de modo a remover as partículas mais finas e sobre o peneiro de 31,5 mm, de modo a eliminar as partículas mais grossas, mas que no caso em questão não existiam.

Deixou-se escorrer a amostra, imergiu-se o material no picnómetro (Figura3.8) com água a (22±3) °C e eliminou-se o ar ocluso, fazendo rodar e agitando o picnómetro em posição inclinada. De seguida, e de acordo com a norma, é colocado o picnómetro em banho-maria a (23±3) °C, durante (24±0,5) h. Por razões de logística do laboratório, introduziu-se o picnómetro numa câmara de cura a 22 °C, com uma humidade relativa de 100±5°C, durante 24 horas, alcançando o mesmo efeito. No fim do referido período, o picnómetro foi retirado da estufa e removeu-se todo o ar ocluído de modo idêntico ao já descrito anteriormente.

Posteriormente, fez-se transbordar o picnómetro por adição de água colocou-se a tampa sem deixar ar no picnómetro, limpando-se por fora e registou-se a massa, denominada de M2 e a temperatura da água.



Fig. 3.8 – Exemplo de um picnómetro.

O agregado foi removido do picnómetro, voltando a encher-se de água e colocou-se a tampa como anteriormente, limpou-se o picnómetro por fora, registou-se o seu peso (M3) e a temperatura da água. Segundo a norma, a diferença de temperatura da água dentro do picnómetro nas duas pesagens não deverá exceder os 2 °C.

Depois de retirado do picnómetro, o agregado é escorrido para cima de um pano seco, secando-se cuidadosamente a sua superfície até desaparecerem as películas de água da superfície, mas encontrando-se o agregado com um aspecto húmido. É registado o valor de M1, sendo de seguida colocado numa estufa ventilada à temperatura de (110±5) °C, até massa constante (M4).

Com o valor das massas M1, M2, M3, M4, calculam-se as massas volúmicas das partículas (ρa, ρrd e ρssd), em Mg/m3, através das equações seguintes:

Massa volúmica do material impermeável das partículas (ρa):

$$\rho_a = \frac{M_4}{[M_4-(M_2-M_3)]/\rho_w} \quad (3.1)$$

Massa volúmica das partículas secas em estufa (ρ_{rd}):

$$\rho_{rd} = \frac{M_4}{[M_1-(M_2-M_3)]/\rho_w} \quad (3.2)$$

Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca (ρ_{ssd}):

$$\rho_{ssd} = \frac{M_1}{[M_1-(M_2-M_3)]/\rho_w} \quad (3.3)$$

Para as partículas de ASIC entre 0,063mm e 4 mm a iniciou-se o ensaio realizando uma lavagem da amostra sobre o peneiro de 4 mm e sobre o de 0,063 mm, de modo a rejeitar as partículas mais finas e rejeitando as partículas retidas no peneiro de 4mm.

As pesagens M_2 e M_3 foram realizadas do mesmo modo que para o ASIC de dimensões entre 4 e 32 mm.

Após o agregado de ASIC ser retirado do picnómetro, é espalhado de forma uniforme na base do tabuleiro, deixando-se arrefecer à temperatura ambiente. Vai-se remexendo em intervalos de tempo frequentes, de modo a assegurar uma secagem homogénea, até não ser visível humidade superficial e as partículas do agregado não aderirem umas às outras.

Para se avaliar se o estado da superfície seca foi atingido, é utilizado um molde troncocónico de metal, com a maior abertura virada para baixo, sobre a base do tabuleiro (Figura 3.9). Este molde é cheio livremente e apiloado com 25 pancadas sobre a abertura do molde. Tal processo é realizado até que o cone de agregado se deforme quando desmoldado (Figura 3.10).



Fig. 3.9 – Molde troncocónico metálico



Fig. 3.10 – Agregado deformado após o apiloamento

Os resultados obtidos da determinação da massa volúmica estão expostos no Quadro 3.7.

Quadro 3.7 – Resumo de valores obtidos no ensaio de massa volúmica

Fracção (mm)	M_1 (gr)	M_2 (gr)	M_3 (gr)	M_4 (gr)	ρ_a (Mg/m^3)	ρ_{rd} (Mg/m^3)	ρ_{ssd} (Mg/m^3)
16/32	5127,7	10350,8	6786,9	5010,0	3,45	3,19	3,27
8/16	2200,0	8184,4	6653,4	2140,0	3,50	3,19	3,28
4/8	1124,4	7506,3	6720,1	1092,8	3,55	3,22	3,31
0/4	1481,0	7812,9	6740,2	1461,8	3,77	3,59	3,64

A determinação da quantidade de água de um agregado é de extrema importância, uma vez que quanto maior for a porosidade deste material, maior vai ser a absorção de água.

A determinação do valor da absorção de água, é realizada de acordo com as especificações da norma NP EN 1097 – 6 (2006), já utilizada na avaliação da massa volúmica.

De acordo com a especificação do LNEC E 467 "Guia para utilização de agregados em betões hidráulicos", o valor limite de absorção de água é de 5%.

O valor da absorção de água (WA_{24}), após a imersão durante 24 h, é calculado a partir do valor de M_1 e M_4 já anteriormente determinados, pela equação seguinte:

$$WA_{24} = \frac{100 \times (M_1 - M_4)}{M_1} \ (\%) \tag{3.4}$$

Os resultados para o material em estudo são apresentados no Quadro 3.8.

Quadro 3.8 – Resultados do ensaio de absorção de água

Fracção (mm)	WA_{24} (%)
16/32	2,34
8/16	2,80
4/8	2,89
0/4	1,31

3.4.2. BARIDADE E VOLUME DE VAZIOS

A baridade de um agregado define-se como sendo a razão entre a massa seca por unidade de volume do agregado contido num recipiente.

Esse volume é aparente, porque inclui o volume das partículas e o volume de vazios entre estas e as paredes do recipiente.

A baridade depende de inúmeros factores tais como a granulometria do agregado, o arranjo das partículas, da forma e da angulosidade.

Para a determinação destas características, foi realizado o ensaio de acordo com a norma NP EN 1097 – 3 (2002). "Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados, Parte 3: Determinação da baridade e do volume de vazios"

O ensaio é realizado num contentor cilíndrico estanque, em aço inoxidável, no qual se faz o registo das massas do recipiente vazio e cheio com o agregado em estudo e através de fórmulas presente na norma, retira-se os valores da baridade e do volume de vazios.

A baridade é determinada através da seguinte expressão:

$$\rho_b = \frac{m_2 - m_1}{V} \tag{3.5}$$

Sendo "ρ_b" a baridade em megagramas por metro cúbico, "m_2" é a massa do recipiente e do provete elementar em quilogramas, "m_1" é a massa do recipiente vazio em quilogramas e "V" é a capacidade do recipiente em litros.

A percentagem do volume de vazios (em %) é calculada pela seguinte equação:

$$v = \frac{\rho_{rd} - \rho_b}{\rho_{rd}} \times 100 \quad (3.6)$$

Sendo "ρ_{rd}" é a massa volúmica do agregado seco em estufa previamente determinada na secção 3.4.1.

O Quadro 3.9 expõe os resultados do ensaio da determinação da baridade e da percentagem de vazios.

Quadro 3.9 – Resultados do ensaio da determinação da baridade e da percentagem de vazios

Fracção	M_1 (kg)	M_2 (kg)	Volume (l)	ρ_{rd} (Mg/m^3)	ρ_b (Mg/m^3)	v (%)
16/32	5,802	21,330	10	3,19	1,55	51,4
8/16	6,239	15,449	5	3,19	1,84	42,3
4/8	3,920	9,098	3	3,22	1,73	46,3
0/4	2,894	4,669	1	3,59	1,76	50,9

3.4.3. RESISTÊNCIA À FRAGMENTAÇÃO PELO MÉTODO DE *LOS ANGELES*

Uma das principais características mecânicas que um agregado deve possuir é uma boa resistência á fragmentação, porque são indicativos da boa qualidade e de boa resistência de um agregado. Estes devem ser resistentes ao choque, ser inalteráveis e possuírem boa resistência á abrasão.

A análise da resistência à fragmentação foi determinada pelo ensaio de *Los Angeles*, tendo como base a especificação da norma NP EN 1097 – 2 (2002) "Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados, Parte 2 – Método para a determinação da resistência à fragmentação".

O ensaio de *Los Angeles*, é realizado num equipamento constituído por um cilindro de chapa de aço, fechado nas extremidades, com um diâmetro e comprimento interiores de cerca de 711±5 mm e 508±5 m, respectivamente. O tambor realiza um movimento rotacional em torno de um eixo horizontal. O equipamento encontra-se representado na Figura 3.11 a). A rotação é imposta por um motor, sendo a sua velocidade de 31 a 33rotações por minuto. Para simular a carga abrasiva, são utilizadas 11 esferas de aço (Figura 3.11 b)), que perfazem uma massa total compreendida de entre 4690 g e 4860 g.



a) Máquina de Los Angeles b) Esferas de aço para o ensaio de Los Angeles

Fig. 3.11 – Máquina de *Los Angeles*

Pelo facto de este ensaio já ter sido realizado por Ramos para o mesmo material e no âmbito do estudo em curso na Feup sobre a reutilização do ASIC, assumiu-se o valor obtido nesse documento que foi de LA = 25%, classe LA_{25} (Ramos, 2011).

3.4.4. RESISTÊNCIA AO ESMAGAMENTO

De modo a avaliar a capacidade resistente das rochas originárias dos agregados, quando não é possível ensaiar directamente essas mesmas rochas, utiliza-se o ensaio de esmagamento dos agregados, que é um ensaio de compressão confinada.

O ensaio de resistência ao esmagamento é realizado de acordo com a norma nacional NP 1039 (1974), "Inertes para argamassas e betões – Determinação da resistência ao esmagamento".

A amostra é constituída por uma quantidade de agregado suficiente que permita ensaiar dois provetes para se obter o valor médio da resistência.

A amostra secou-se numa estufa a 105 °C – 110 ° C durante 4 horas, e deixa-se arrefecer até à temperatura ambiente e peneira-se nos peneiros de 12,5 mm e de 9,5 mm de abertura.

Enche-se o material no recipiente metálico previamente pesado (M_1) com três camadas aproximadamente iguais do material retido no peneiro de 9,5 mm de abertura e passado no peneiro de 12,5 mm. Cada camada é compactada com 25 pancadas através de um varão de compactação (Figura 3.12), distribuídas uniformemente, devendo o varão penetrar perpendicularmente através da camada sem bater no fundo do recipiente ou penetrar nas camadas já compactadas. Nivela-se o material pelo plano da boca do recipiente (Figura 3.13) pesando o recipiente cheio (M_2).



Fig. 3.12 – Compactação do material



Fig. 3.13 – Recipiente metálico com camadas compactadas

Como última fase do ensaio, assenta-se uma manga cilíndrica do esmagador na chapa de base e transfere-se para ela o material que constitui o provete, compactando-o como atrás indicado para o enchimento do recipiente. Nivela-se a superfície do material e coloca-se um êmbolo sobre este.

Coloca-se o conjunto entre os pratos da máquina de ensaio e aplicam-se forças, gradualmente crescentes a velocidade tanto o quanto possível constante, com um ritmo tal que se atinja 40 tf em 10 minutos (Figura 3.14), após o que se descarrega.



Fig. 3.14 – Aplicação gradual da força no provete

Seguidamente retira-se o êmbolo e peneirou-se todo o material no peneiro de 2,36 mm de abertura até que não passasse qualquer quantidade significativa em 1 minuto de peneiração. Pesa-se o material que passou no peneiro (M_3).

Todo este processo é repetido para o segundo provete.

O cálculo do valor da resistência ao esmagamento e dada pela equação expressa:

$$R = \frac{M_3}{M_2 - M_1} \times 100 \tag{3.7}$$

A resisência ao esmagamento da amostra é dada pela média dos valores obtidos para os dois provetes.

No Quadro 3.10 são apresentados todos os valores registados das pesagens bem como das respectivas resistências ao esmagamento do ASIC.

Quadro 3.10 – Valores registados e resistências ao esmagamento do ASIC

Provete	M_1 (kg)	M_2 (kg)	M_3 (kg)	*R (%)*	*R* (média) (%)
1	3,033	6,406	0,6529	19,37	20,46
2	3,033	6,343	0,713	21,55	
					DP 1,09

Deste quadro obtém-se que o valor médio da resistencia ao esmagamento do ASIC é de aproximadamente 20,5±1,09% e que está em conformmidade com a limitação imposta pela especificação do LNEC E 468 (2006) "Guia para para a utilização de agregados em betões de ligantes hidráulicos".

Esta limita o resultado do ensaio de esmagamento para agregados grossos a um valor inferior a 45%.

3.5. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

Um material para ser considerado agregado para betão de ligantes hidráulicos deve cumprir vários requisitos para além dos já expostos neste trabalho como os granulométricos, os físicos e os mecânicos. O material deve cumprir também requisitos químicos que visam a compactabilidade entre materiais e a durabilidade no tempo (ver Quadro 3.1).

Em consequência dos recursos disponíveis e dos objectivos base do laboratório LEMC da Feup, os ensaios químicos impostos pela norma foram realizados no Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro (CTVC) de Coimbra.

3.5.1. TEOR DE SULFATOS SOLÚVEIS EM ÁCIDO

O teor de sulfatos do agregado em estudo foi analisado porque um elevado teor de cloretos pode por em causa a durabilidade e qualidade do betão. Os sulfatos podem reagir com o aluminato tricálcico, causando expansões, fissurações e descamação do betão.

A determinação do teor de sulfatos fez-se através do ensaio normalizado seguindo as especificações da norma NP EN 1744 - 1 (2010), "Ensaios para a determinação das propriedades químicas dos agregados – Parte 1: Análise química".

O ensaio consiste em retirar uma amostragem do agregado em estudo e triturar. Posteriormente, reduz-se a amostra de modo a obter um peso de aproximadamente 20 gramas, para que possa passar por um peneiro de ensaio de 0,125 mm, e deste recolhe-se 2 grama.

Desta quantidade de material, retirar 0,1 mg (M_6) e coloca-se o material numa proveta de 250 ml, e adiciona-se 90 ml de água fria. Agitando vigorosamente, adiciona-se 10 ml de ácido clorídrico concentrado. Aquecer a solução lentamente e fraccionar os sólidos com a ponta de uma vareta de vidro para misturar. Deixar a solução purificar durante 15 minutos a uma temperatura ligeiramente abaixo do ponto de ebulição.

Filtrar os resíduos através de um papel de filtro médio para uma proveta de 400 ml e lavar exaustivamente com água quente. Verificar os elementos obtidos da filtragem quanto à ausência de iões cloreto, através do ensaio de nitrato de prata.

Ajustar o volume até cerca de 250 ml e, se necessário, acidificar através de ácido clorídrico até obter uma coloração vermelha no indicador vermelho de metilo.

Levar a ferver e deixar em ebulição durante 5 minutos. Verificar se a solução está límpida. Caso não esteja, reiniciar o ensaio utilizando uma nova amostra para ensaio. Ao mesmo tempo que se agita vigorosamente a solução mantida no ponto de ebulição, gotejar 10 ml de solução de cloreto de bário aquecida imediatamente antes do ponto de ebulição.

Deixa-se purificar, filtrar e inflamar o precipitado de sulfato de bário. Pesar e calcular a massa do precipitado M_7.

O cálculo do teor de sulfato solúvel em ácido é efectuado através da seguinte equação:

$$Teor\ de\ sulfato = \frac{M_7}{M_6} \times 34,30\ (em\ \%) \tag{3.8}$$

O limite normativo para o teor de sulfatos solúveis em ácido para escórias arrefecidas ao ar é de 1,0%.

Como foi referido atrás, o teor de sulfatos do ASIC foi avaliado pela CTVC cujo relatório está incluído no Anexo F.

Este valor é de 0,08%, muito inferior ao valor imposto pela norma.

3.5.2. TEOR DE CLORETOS

Quando inserido num betão de boa qualidade, com componentes devidamente estudados e execução correcta, o aço encontra-se protegido dos agentes agressivos do meio ambiente. Neste caso o betão constitui uma barreira física á penetração destes agentes, e apresenta uma composição de poros que origina a formação de uma película protectora que impede a ocorrência de corrosão. Esta película passiva forma-se devido á elevada alcalinidade da água existente nos poros do betão, conferida principalmente pela dissolução de hidróxido do cálcio resultante da hidratação do cimento.

Este mecanismo de protecção perde a sua eficácia quando a película é destruída quer pela diminuição do pH existente nos poros do betão, quer devido a uma concentração de cloretos acima do teor crítico, dando-se início á corrosão do aço.

Esta concentração pode ocorrer devido á exposição do betão a elementos agressivos, tais como os ambientes marítimos, ou devido á utilização, durante o fabrico do betão, de componentes com elevada concentração de cloretos. É o caso de areias marinhas mal lavadas ou com teor em água do mar significativo.

Para determinar este teor, foi realizado o ensaio com as especificações da norma NP EN 1744 - 1 (2010), "Ensaios para a determinação das propriedades químicas dos agregados – Parte 1: Análise química".

O ensaio inicia-se por recolher uma amostragem do material com posterior secagem em estufa a (110$\pm$ 5) ºC até massa constante.

Peneira-se a amostra através de um peneiro de 16 mm e tritura-se quaisquer partículas sobredimensionadas de modo a que passem no peneiro, mas evitando trituração excessiva.

Introduz-se o material em dois balões de plástico, vidro ou metal com capacidade para 5 litros. Pesa-se cada um dos balões com o material e regista-se as suas massas.

Seguidamente, adiciona-se a cada balão uma massa de água idêntica á massa da amostra para ensaio e agita-se continuamente o balão por 60 minutos.

Depois, filtra-se os extractos através de papéis de filtro de grau médio secos até obter provetas limpas e secas, pelo menos, 100 ml de solução filtrada límpida.

Transfere-se esta solução para um balão de 250 ml e adiciona-se 5 ml de ácido nítrico ao conteúdo do balão, seguido da solução de nitrato de prata de uma bureta até que todo o cloreto tenha sido precipitado, juntando depois o excesso.

Regista-se o volume total (V_5) de solução de nitrato de prata adicionada. Adiciona-se, em seguida,

2 ml de trimetilhexano, coloca-se o bujão e agita-se vigorosamente o balão até coagular o precipitado.

Por fim, alivia-se cuidadosamente o bujão, evitando perdas de solução, lava-se com água e recolhe-se os elementos obtidos da filtragem na solução.

Posteriormente, adiciona-se 5ml da solução indicadora de sulfato de amónio e ferro, seguida da solução padronizada de tiocianato por meio de uma bureta até que ocorra a primeira alteração de cor permanente. Esta poderá situar-se entre a opalescência branca e o castanho claro e a solução apresente a mesma intensidade cromática utilizada para a padronização prevista.

O ensaio termina com o registo do volume (V_6) de solução de tiocianato adicionada.

O cálculo do teor de cloretos, *C*, do agregado é adquirido pela seguinte equação em percentagem:

$$C = 0{,}003546W\{10 \times c_t \times V_6\} \quad (3.9)$$

Onde c_t corresponde à concentração da solução padronizada de tiocianato (em moles por litro) e W, corresponde a 1000g/massa do agregado em gramas.

Como foi referido atrás, o teor de cloretos do ASIC foi avaliado pela CTVC cujo relatório está incluído no Anexo F.

O valor de teor de cloretos obtido foi de 0,0014%.

3.5.3. TEOR DE ENXOFRE TOTAL

A determinação do teor de enxofre total foi determinado pelo ensaio especificado na norma NP EN 1744 - 1 (2010), "Ensaios para a determinação das propriedades químicas dos agregados – Parte 1: Análise química".

De acordo com o ensaio é retirada uma amostra de 1 grama do material em estudo, colocando 1 mg (m_4) num balão de Erlenmeyer de boca larga em cujo gargalo foi introduzido um funil de pé curto. Adiciona-se ao balão 3 ml de água e 1 ml de bromo e agita-se suavemente durante 1 minuto de forma a evitar a formação indevida de grânulos e depois adiciona-se lentamente através dum funil, 15ml de ácido nítrico concentrado sem enxofre. Deixa-se a mistura em purificação durante 1 hora num banho de vapor e fracciona-se o gel periodicamente com uma vareta de vidro plana, deixando-a dentro do frasco para este mesmo fim. Adiciona-se 30 ml de água e leva-se a ferver lentamente numa placa de aquecimento ate cessar i desenvolvimento de fumos castanho denso. Adiciona-se 5 ml de ácido clorídrico concentrado e 10 ml de água e reduzir a solução levando-a a ferver até se obter uma quantidade reduzida. Transferir o conteúdo do balão para uma proveta de 250 ml e lava-se o frasco até o volume total da proveta se aproximadamente de 100 ml.

Seguidamente, adiciona-se um pouco de pasta de papel de filtro e leva-se o conteúdo da proveta quase ao ponto de ebulição.

Torna-se, em seguida, a solução alcalina juntando-lhe amoníaco. Deixa-se ferver e filtra-se a solução.

Na mesma sequência do processo anterior, neste ferve-se, precipita-se, filtra-se e lava-se eliminando o precipitado. Acidifica-se os filtrados juntamente com os elementos obtidos da filtragem. Leva-se a ferver deixando em ebulição. Deixa-se purificar, filtra-se e inflama-se o precipitado de sulfato de Bari.

Por fim, calcula-se a massa do precipitado m_5.

O cálculo do teor de enxofre total do agregado, expresso como *S*, é determinado através da seguinte expressão:

$$S = \frac{m_5}{m_4} \times 13{,}74\ (em\ \%) \qquad (3.10)$$

Onde "m_5" corresponde à massa do precipitado em gramas, e "m_4" corresponde à massa da toma analítica para ensaio em gramas.

Por regra geral, o valor limite para o enxofre total é de 2,0%. Contudo a norma indica, que na presença de pirrutite na amostra este limite diminui para 1,0%, acontecimento que se verificou nesta análise, através do espectrómetro por difracção de raio x.

Para o caso do material em estudo no trabalho, este ensaio foi solicitado à CTVC. Na amostra representativa do ASIC enviada (na ordem dos 3 kg) o teor de enxofre total foi de 0,05% (Anexo F). O relatório com o espectrómetro e a análise química estão incluídos no Anexo G.

3.5.4. REACTIVIDADE ÁLCALIS-SÍLICA

A reactividade alcalis-silica é uma reacção química, que ocorre entre a sílica reactiva existente no agregado e os hidróxidos alcalinos, presentes principalmente, no cimento ou na água da amassadura.

Esta reacção pode provocar a formação de um gel higroscópio expansivo, que absorve água e se expande, exercendo pressões internas no betão.

Nesse sentido, realizou-se o ensaio para a verificação destas reacções na fracção 0/4,75 mm do ASIC, seguindo-se o procedimento especificado na norma ASTM C 1260 – 07 (2008) "Standart test method for potencial reactivity of agregates (Mortar-bar method).

Embora a norma exija quantidades de material para ser produzidos 3 provetes com uma razão de A/C = 0,47, foram amassados mais 3 provetes (6 no total) com uma razão A/C = 0,52 com o objectivo de averiguar se estas reacções se dariam de maneira mais agressiva havendo mais água na composição.

Apesar de a norma indicar, apenas, na composição da argamassa para estudo o cimento, o agregado e a água, foram adicionadas à matriz cinzas volantes (na ordem de 30% do ligante hidráulico) de modo a verificar a reactividade da argamassa resultante, em conformidade com a composição do betão definido no estudo deste trabalho.

As composições das duas argamassas estão descritas nos Quadros 3.11 e 3.12, embora estas tenham sofrido uma ligeira modificação porque a norma específica quantidades para material com uma densidade corrente, daí ter sido efectuado uma correcção nas quantidades.

Quadro 3.11 – Composição das argamassas para realização do ensaio alcalis-silica (A/C = 0,47)

Constituintes		Quantidades (g)
Cimento		424,91
Cinzas volantes		182,11
Água		285,29
Agregado	4,75/2,36 mm	136,6
	2,36/1,18 mm	341,5
	1,18/0,600 mm	341,5
	0,600/0,300 mm	341,5
	0,300/0,150 mm	204,9

Quadro 3.12 – Composição das argamassas para realização do ensaio alcalis-silica (A/C = 0,52)

Constituintes		Quantidades (g)
Cimento		424,91
Cinzas volantes		182,11
Água		315,69
Agregado	4,75/2,36 mm	136,6
	2,36/1,18 mm	341,5
	1,18/0,600 mm	341,5
	0,600/0,300 mm	341,5
	0,300/0,150 mm	204,9

Foram moldados 3 provetes (Figura 3.15) para cada composição. Após 24 horas, foram desmoldados e devidamente identificados.

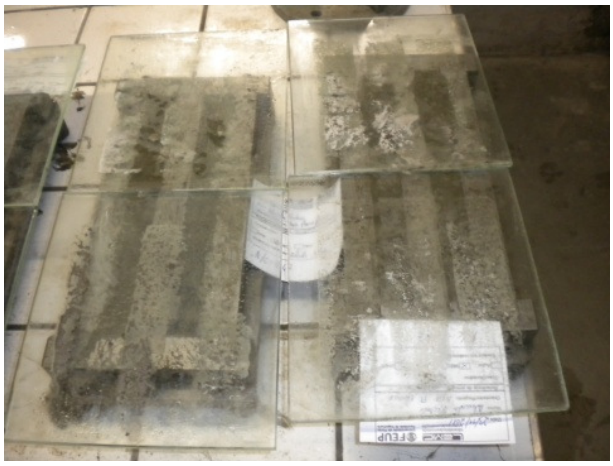


Fig. 3.15 – Provetes moldados (6 no total)

De seguida, 3 provetes de cada composição foram colocados em recipientes separados e identificados, cada um contendo água a 80±2 ºC, de modo a ficarem totalmente submersos, e armazenados em estufa à mesma temperatura durante 24 horas.

Após este período e da calibração do aparelho de medida (Figura 3.16), cada provete é retirado da estufa e regista-se a sua primeira leitura. Esta leitura denomina-se de leitura zero.

Após a medição, os provetes são colocados num recipiente com solução normalizada de hidróxido de cálcio (Figura 3.17) a 80±2 ºC, ficando totalmente submersos e armazenados novamente em estufa.

As leituras seguintes são realizadas periodicamente do mesmo modo. Após catorze dias da leitura zero, aproximadamente à mesma hora do dia, é realizada obrigatoriamente uma leitura, devendo existir pelo menos uma por semana nesse período.



Fig. 3.16 – Aparelho de medição



Fig. 3.17– Hidróxido de sódio (NaOH)

As extensões são calculadas pelo quociente entre a diferença entre o tempo (t_i), a leitura zero e o comprimento de medida.

Se a extensão obtida após catorze dias da leitura zero for inferior a 0,1% considera-se que não existe reactividade alcalis-silica. Se a extensão for superior a 0,2% são considerados agregados com reactividade alcalis-silica. Caso a extensão tenha valores entre 0,1% e 0,2% os agregados são classificados como potencialmente reactivos e as leituras estendem-se até aos 28 dias (ASTM C 1260 – 07 (2008)).

Na Quadro 3.13 são apresentados os resultados do ensaio de alcalis-silica das argamassas com ASIC para as duas composições.

Quadro 3.13 – Resultados do ensaio alcalis-silica com argamassas de ASIC

Tempo (dias)	Extensão (%)	
	A/C = 0,42	A/C = 0,52
4	0,020	0,020
8	0,025	0,030
11	0,030	0,030
16	0,030	0,040

Segundo a especificação LNEC E 461 (2007) "Betões – Metodologias para prevenir reacções expansivas internas", a avaliação da classificação de reactividade dos agregados é feita de acordo com o esquema ilustrado na Figura 3.18. Comparando os resultados obtidos no Quadro 3.13 com a metodologia indicada na E 461 o material agregado pode ser classificado como "agregado não reactivo – Classe I".

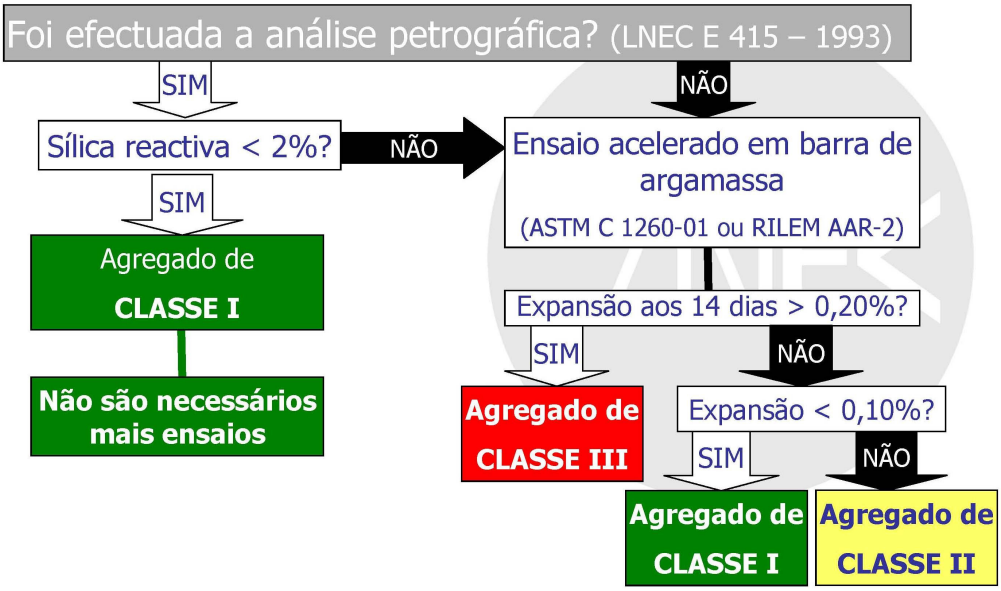


Fig. 3.18 – Metodologia para avaliação dos agregados (LNEC E 461).

3.6. COMPILAÇÃO DE RESULTADOS

Ao longo deste capítulo foi estudado o agregado ASIC sob os pontos de vista da caracterização geométrica, física, mecânica e química.

No Quadro 3.14 expõem-se os resultados finais obtidos nos vários ensaios.

De acordo com a especificação do LNEC E 467 (2006) – "Guia para a utilização de agregados em betões de ligantes hidráulicos", e a norma NP EN 12620 (2010) – "Agregados para betão", o ASIC em estudo cumpre todos os requisitos necessários para que seja viável a sua aplicação como substituição do agregado natural em betões de ligantes hidráulicos. Este facto já tinha sido referido no trabalho anterior de Ramos (2011) e no documento de CVR 257 (2005) do LNEC.

Quadro 3.14 – Resultados dos ensaios de caracterização física, geométrica, mecânica e química

Propriedades	Sigla	Norma	Material	Resultados	Requisitos
Caracterização geométrica					
Análise granulométrica		NP EN 933 - 1	ASIC fino	0/4 mm	A declarar
			ASIC grosso	4/32 mm	
Índice de forma	SI	NP EN 933 - 4	ASIC	SI_{15} (0,4%)	A declarar
Índice de achatamento	FI	NP EN 933 - 3	ASIC	FI_{15} (2%)	FI_{50} (≤ 50%)
Caracterização física e mecânica					
Massa volúmica do material impermeável das partículas	ρ_a	NP EN 1097 - 6	ASIC 0/4	3,77 Mg/m^3	A declarar
			ASIC 4/8	3,55 Mg/m^3	
			ASIC 8/16	3,50 Mg/m^3	
			ASIC 16/32	3,45 Mg/m^3	
Massa volúmica das partículas secas em estufa	ρ_{rd}	NP EN 1097 - 6	ASIC 0/4	3,59 Mg/m^3	A declarar
			ASIC 4/8	3,22 Mg/m^3	
			ASIC 8/16	3,19 Mg/m^3	
			ASIC 16/32	3,19 Mg/m^3	
Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca	ρ_{ssd}	NP EN 1097 - 6	ASIC 0/4	3,64 Mg/m^3	A declarar
			ASIC 4/8	3,31 Mg/m^3	
			ASIC 8/16	3,28 Mg/m^3	
			ASIC 16/32	3,27 Mg/m^3	
Absorção de água (em percentagem da massa seca)	WA_{24}	NP EN 1097 - 6	ASIC 0/4	1,31 %	≤ 5%
			ASIC 4/8	2,89 %	
			ASIC 8/16	2,80 %	
			ASIC 16/32	2,34 %	
Baridade	ρ_b	NP EN 1097 - 3	ASIC 0/4	1,76 Mg/m^3	A declarar
			ASIC 4/8	1,73 Mg/m^3	
			ASIC 8/16	1,84 Mg/m^3	
			ASIC 16/32	1,55 Mg/m^3	
Percentagem de vazios	v	NP EN 1097 - 3	ASIC 0/4	50,9 %	A declarar
			ASIC 4/8	46,3 %	
			ASIC 8/16	42,3 %	
			ASIC 16/32	51,4 %	
Resistência à fragmentação de *Los Angeles*	LA	NP EN 1097 - 2	ASIC	25 %	LA_{50} (50%)
Resistência ao esmagamento	R	NP 1039	ASIC	20,46 ± 1,09 %	≤ 45%
Caracterização Química					
Teor de sulfatos solúveis em ácido	-	NP EN 1744 - 1	ASIC	0,08 %	AS ≤ 1,0 %
Teor de cloretos	*C*	NP EN 1744 - 1	ASIC	0,0014 %	A declarar
Teor de enxofre total	S	NP EN 1744 - 1	ASIC	0,05%	S ≤ 1,0% c/pirrutite
Reactividade Alcalis-Silica	-	ASTM C 1260 - 7	ASIC	Classe I[1]	A declarar

[1] – Para verificar a reactividade alcalis-silica deveria ter-se usado exclusivamente cimento como indicado na norma. No entanto, este ensaio foi efectuado através do recurso a cinzas volantes (30% do ligante hidráulico) uma vez que é o existente na composição do betão em estudo.

4
CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO COM ASIC

4.1. INTRODUÇÃO

Um dos factores que mais influência o comportamento do betão, quer na fase fresca quer na fase endurecida, é a composição dos seus vários componentes na mistura.

Cada betão deve ser concebido tendo em conta questões de resistência, de trabalhabilidade, para o ambiente no qual vai ser aplicado, e para os possíveis agentes agressivos a que ficará sujeito no seu tempo de vida.

Assim, após caracterização do principal agregado, o ASIC, a incluir no betão que se propõe estudar neste trabalho, compreende-se ser fundamental a preparação, a avaliação e a análise de resultados das principais propriedades a exigir a um betão denso com ASIC.

Essas propriedades devem cumprir os requisitos exigidos pelas normas para betões de ligantes hidráulicos e passam pela identificação das especificações dos materiais a usar na composição, pela caracterização do betão enquanto massa fresca, pela avaliação das propriedades físicas e mecânicas do betão endurecido e, por fim, pela realização de ensaios de controlo antecipados da durabilidade e espectável para o betão no futuro.

Para esse efeito, este capítulo expõe o programa experimental desenvolvido no decurso desta tese para ir ao encontro dos objectivos expostos acima. Foi concebida uma composição de betão denso, foram moldados provetes, foram executados ensaios normalizados no betão fresco e no betão endurecido e avaliadas propriedades em idades diferentes do betão. Estes aspectos são descritos nos vários items a descrever de seguida.

As principais propriedades em análise são a massa volúmica, as resistências mecânicas, em principal foco, resistência à compressão, resistência à tracção e a resistência à flexão, a absorção de água por capilaridade e por imersão atmosférica, a penetração de água sobre pressão e propriedades de durabilidade nomeadamente o ensaio de retracção por secagem.

Todo o programa experimental foi estruturado e realizado no Laboratório de Ensaios de Materiais de Construção (LEMC) da Feup.

4.2. MATERIAIS CONSTITUINTES DO BETÃO

Para o fabrico do betão denso em estudo, o ASIC embora sendo o constituinte principal, necessita de outros constituintes de forma a produzir-se uma peça estrutural singular.

Para o fabrico do betão denso fez-se recurso a outros materiais, nomeadamente a um ligante hidráulico – o cimento, a uma areia fina, uma adição de cinzas volantes e a um adjuvante.

Todos estes materiais devidamente proporcionados e misturados, levaram à produção do betão denso em estudo.

Nas secções seguintes, expõem-se os materiais constituintes do betão e as suas principais características

4.2.1. CIMENTO

O ligante hidráulico usado no trabalho foi o cimento CEM I 42,5 R. Este tipo de cimento é produzido de forma a cumprir a norma NP EN 197 – 1 (2001) "Cimentos. Parte 1: Composição, especificação e critério de conformidade para cimentos correntes", sendo constituído por 95% de clinquer e até 5% de adições minoritárias.

Este cimento tem uma resistência característica mínima à compressão aos 28 dias de 42,5 Mpa, de endurecimento rápido (R) e com massa volúmica de 3,15 Mg/m^3 (CIMPOR, 2011).

No Anexo A inclui-se a ficha técnica deste produto (CIMPOR, 2011).

4.2.2. CINZAS VOLANTES

De modo a melhorar a durabilidade requerida, usou-se como parcial substituto cinzas volantes. Estas cinzas caracterizam como sendo um subproduto das centrais termoeléctricas e que, ao longo dos tempos, têm vindo a ser usada na indústria do betão como um parcial substituto do cimento e consequentemente, um redutor de custos.

As cinzas volantes usadas no presente trabalho têm origem em Compostilla – Espanha.

Este constituinte de acordo com a marcação CE, certificado de conformidade em Anexo B (AENOR, 2007), possui uma massa volúmica de 2,42 Mg/m^3.

4.2.3. AREIA FINA

Como no presente estudo detectou-se que o ASIC não possuía material fino suficiente para as composições requeridas do betão, foi usado em substituição uma areia natural. Caracteriza-se como sendo uma areia de decomposição de rochas, com massa volúmica das partículas impermeáveis de 2,66, de massa volúmica das partículas saturadas com a superfície seca de 2,64, de massa volúmica de partículas secas em estufa de 2,63 e com uma absorção de água de 0,4% (resultados provenientes de estudos anteriores no LEMC). A análise Granulométrica da areia fina encontra-se na Figura 4.1.

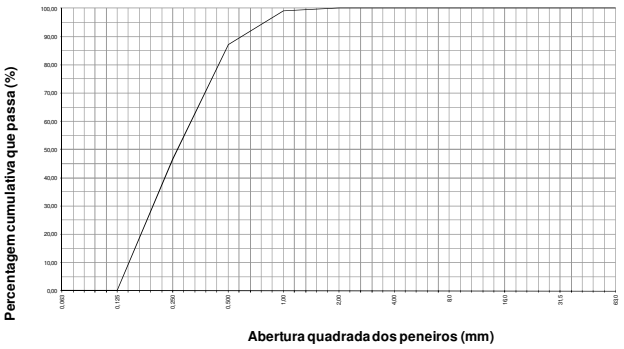


Fig. 4.1 – Análise granulométrica da areia fina

4.2.4. ASIC

Este material foi usado como agregado cuja sua caracterização foi descrito no Capitulo 3.

4.2.5. ADJUVANTES

Adjuvantes são substâncias químicas que são adicionadas ao betão em pequenas quantidades durante o processo de mistura, com o objectivo de modificar certas propriedades como por exemplo a trabalhabilidade, o tempo de presa, etc.

Na amassadura foi aplicado um superplastificante de referência TECHNIFLOW 91 (2010) e cuja função foi a de conceder uma maior trabalhabilidade ao betão. A ficha técnica do adjuvante encontra-se em Anexo C.

4.2.6. COMPOSIÇÃO DO BETÃO

Todo o programa experimental foi estruturado e realizado no Laboratório de Ensaios de Materiais de Construção (LEMC) da Feup. Em termos logísticos, devido a condicionante de capacidade da misturadora, foram realizadas 2 amassaduras, denominadas A e B, cuja composição é a mesma.

O Quadro 4.1 apresenta a composição do betão em kg/m^3 estabelecido para a produção de cada amassadura A e B.

Quadro 4.1 – Composição do betão para agregados secos

Materiais	Quantidade (kg/m^3)
16/32	720
8/16	485
4/8	240
0/4	485
Areia Natural	320
Cimento	310
Cinzas volantes	140
Água total	164
Adjuvantes	3,89
Total	2867,8

Após definida a composição do betão, procedeu-se à mistura de cada amassadura com as quantidades já referidas.

Nas Figuras 4.2, 4.3, 4. 4 e 4.5 e 4.6 estão presentes os materiais constituintes do betão devidamente pesados antes da amassadura.



Fig. 4.2 - ASIC



Fig. 4.3 – Areia fina



Fig. 4.4 - Cimento



Fig. 4.5 – Cinzas volantes



Fig. 4.6 - Adjuvante

De seguida procedeu-se à mistura de todos os materiais (Figura 4.7) e posteriormente à respectiva moldagem dos provetes, como está presente na Figura 4.8.



Fig. 4.7 – Mistura dos materiais



Fig. 4.8 – Moldagem de provetes

As amassaduras realizadas neste trabalho tiveram como base um programa experimental estruturado para avaliar as principais propriedades do betão denso com a composição descrita anteriormente.

Para o efeito, foi definido um programa experimental para a caracterização do betão fresco (Quadro 4.2) e outro para a caracterização do betão endurecido (Quadro 4.3).

Quadro 4.2 – Programa experimental para a caracterização do betão fresco

Ensaio	Idade (dias)	Provetes			
		Tipo	Produzido[1]	Data de fabrico	Ensaiado[1]
Grau de compactabilidade	0	NP EN 12350 – 4	1 A	9/11/11	1 A
Massa volúmica	0	NP EN 12350 – 6	1 A	9/11/11	1 A
Teor de ar	0	NP EN 12350 – 7	1 A	9/11/11	1 A

[1] – A: amassadura A.

Quadro 4.3 – Programa experimental para a caracterização do betão endurecido

Ensaio	Idade (dias)	Provetes			
		Tipo (cm)	Produzidos [1]	Data de fabrico	Ensaiados [1]
Compressão	1	Cubos 15x15x15	1 A + 2 B	9/11/11	1 A + 2 B
	7		2 A + 1 B		2 A + 1 B
	28		2 A + 1 B		2 A+ 1 B
	61		2 A + 1 B		2 A + 1 B
	90 [3]		1 A + 2 B		1 A + 2 B
Compressão diametral	28	Cilindros ø15 e h=30	2 A + 2 B	9/11/11	1 A + 1 B
	61				1 A + 1 B
Flexão	28	Prismas 15x15x60	4 A + 2 B	9/11/11	2 A + 1 B
	61				2 A + 1 B
Retracção por secagem	28	Prismas 10x10x50	1 A + 2 B	9/11/11	1 A + 2 B
Absorção de água por capilaridade	28	Cilindros ø15 e h=30	2 A + 2 B	9/11/11	1 A + 1 B
	61				1 A + 1 B
Absor. Água por imersão à pressão atmosférica	28 [2]	Cubos 15x15x15	2 A + 2 B	9/11/11	1 A + 1 B
	61				1 A + 1 B
Pen. Água sob pressão	28	Cubos 15x15x15	2 A + 2 B	9/11/11	1 A + 1 B
	61				1 A + 1 B
Permeabilidade ao oxigénio	56	Cilindros ø15 e h=30	1 A	9/11/11	1 A
Massa volúmica [2]	28	Cubos 15x15x15	1 A + 1 B	9/11/11	1 A + 1 B

[1] – A: amassadura A; B: amassadura B
[2] – Foram usados os provetes da absorção de água por imersão à pressão atmosférica para avaliar a massa volúmica.
[3] – Por lapso do LEMC estes provetes foram ensaiados aos 28 dias.

Na figura 4.9 ilustra-se o aspecto final dos provetes moldados para a campanha experimental. Estes são deixados numa área protegida ao abrigo de qualquer perturbação exterior durante 24 horas, de forma a efectuar a desmoldagem e a conservar estes provetes numa câmara de cura.

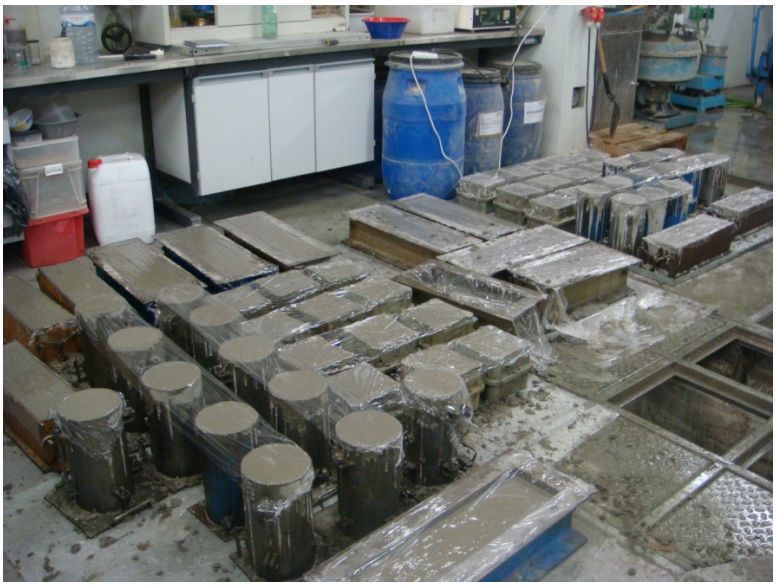


Fig. 4.9 – Provetes moldados

4.3. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO FRESCO

4.3.1. GRAU DE COMPACTABILIDADE

Para averiguar a maior ou menor facilidade da compactação de um betão fresco, determina-se o grau de compactabilidade, através do ensaio especificado na norma NP EN 12350 – 4 (2009) "Ensaios para betão fresco. Parte 4 – Determinação do grau de compactabilidade".

Este ensaio consiste na colocação do betão fresco num recipiente metálico com ajuda de uma colher, com precaução de modo a evitar qualquer compactação acidental. Assim que o recipiente tiver cheio, a superfície é alisada ao nível do bordo superior do recipiente. O betão é, então, compactado por vibração (Figura 4.10), sendo o grau de compactabilidade medido pela distância entre o nível da superfície do betão compactado e o nível do recipiente.



Fig. 4.10 – Ensaio de grau de compactabilidade

O grau de compactabilidade (C) é calculado a partir da altura interior do recipiente (h_1), e da média de 4 leituras das distâncias entre a superfície do betão compactado e a superfície do bordo superior do recipiente (S), medidos junto às arestas deste, através da expressão seguinte:

$$C = \frac{h_1}{(h_1 - S)} \tag{4.1}$$

No Quadro 4.4 expõem-se os valores das leituras e o respectivo grau de compactação da amostra

Quadro 4.4 – Grau de compactabilidade do betão

Distâncias (mm)	*S* (mm)	H_1 (mm)	*C*
111,00	112,75 (CV = 2,27)	400	1,39
115,00			
115,00			
110,00			

Da análise do Quadro conclui-se que o grau de compacidade do betão está dentro dos limites sugeridos pela norma NP EN 12350-4 (2009) que são entre 1,04 e 1,46, e enquadra-se na classe de compactação C_1)

4.3.2. MASSA VOLÚMICA

A massa volúmica do betão fresco reflecte a massa volúmica de cada um dos seus componentes (com particular ênfase dos agregados, por representarem a maior parte do seu volume) e o grau de compactação (Brito, 2005)

A determinação da massa volúmica do betão fresco é realizada conforme a norma NP EN 12350 – 6 (2009), "Ensaios para betão fresco, Parte 6: Massa volúmica".

Depois do recipiente ter sido calibrado, este é pesado e regista-se a sua massa (m_1). Posteriormente, o betão é colocado nesse recipiente, no mínimo em duas camadas e é compactado numa mesa vibratória, o tempo mínimo necessário para atingir a completa compactação.

Uma vez compactada, a camada superior deve ser nivelada com a ajuda de uma rasoira, ao nível da parte superior do recipiente e enxuga-se bem o exterior do recipiente. De seguida, pesa-se o recipiente e o seu conteúdo e regista-se a massa (m_2).

A massa volúmica (ρ) é calculada pela razão entre a massa da amostra e o volume do recipiente que a contém (V), expressa pela equação seguinte:

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{V} \qquad 4.2)$$

No Quadro 4.5 estão expostos os resultados do ensaio da determinação da massa volúmica.

Quadro 4.5 – Resultados dos valores do ensaio de determinação da massa volúmica

Referência	M_1 (kg)	M_2 (kg)	V (m^3)	ρ (kg/m^3)
Amassadura A	3,970	27,166	0,008091	2867

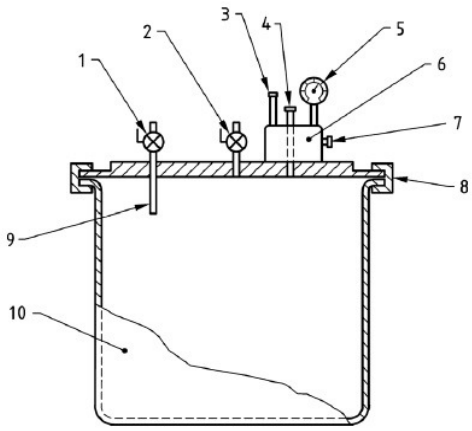
Com este procedimento obteve-se para a massa volúmica do betão fresco com ASIC o valor de 2867 kg/m^3, confirmando a massa volúmica implícita na composição do betão.

4.3.3. TEOR DE AR

A determinação do volume de ar no betão fresco tem como objectivo o de determinar a quantidade de ar presente na amassadura, cujo valor é um indicativo da moldabilidade do betão fresco.

O ensaio para a determinação do teor de ar baseia-se nas especificações da norma NP EN 12350 – 7 (2009), "Ensaios do betão fresco, Parte 7: Determinação do teor de ar. Métodos pressiométricos.

No programa experimental em curso no LEMC utilizou-se o método do manómetro ilustrado na Figura 4.11.



Legenda:

1 Válvula A
2 Válvula B
3 Bomba
4 Válvula principal
5 Manómetro
6 Câmara de ar
7 Válvula de purga de ar
8 Dispositivo de fixação
9 Tubo para verificação da calibração
10 Recipiente

Fig. 4.11 - Manómetro

O betão fresco é colocado num recipiente de forma a remover, tanto quanto possível, o ar incluído, e compactado usando uma mesa vibratória de forma a não provocar segregação ou exsudação excessivas

Coloca-se a tampa sobre o recipiente e fixam-se os grampos (Figura 4.12 a). Fecha-se a válvula de ar principal e abre-se a válvula A e B. Com a seringa, injecta-se água pela válvula A ou B, até que esta saia pela outra válvula. Fecha-se a válvula de purga de ar na câmara de ar e injecta-se o ar para o seu interior até que o ponteiro do traço manómetro alcance o traço inicial. Após esperar alguns, segundos para o ar comprimido arrefecer, até à temperatura ambiente, estabiliza-se no manómetro o ponteiro no traço de pressão inicial injectando ou extraindo ar, conforme a situação desejável.

Finalmente, fecham-se as válvulas A e B e abre-se a válvula de ar principal.

No ponteiro do manómetro lê-se o valor indicado no mostrador, que representa a percentagem aparente de ar (A_1), que foi de valor 2,20% (Figura 4.12 b).

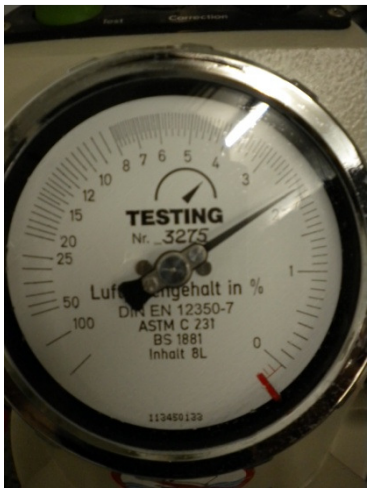
O teor de ar do betão fresco (A_c) é assim determinado através da seguinte equação:

$$A_C = A_1 - G \tag{4.3}$$

onde (G) é o factor de correcção dos agregados, embora a norma indique que para agregados densos este valor deve ser desprezado.



a) Aspecto geral do manómetro



b) Leitura do teor de ar

Fig. 4.12 – Ensaio de avaliação do teor de ar

No final do ensaio obteve-se o valor do teor de ar para o betão fresco com ASIC de 2,20%.

4.4. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO ENDURECIDO

4.4.1. ENSAIOS DE COMPRESSÃO

Num projecto de estruturas de betão armado e/ou pré-esforçado a classe de resistência é definida pela classe de exposição ambiental e pela capacidade de resistência que é exigida na estrutura. Conforme os esforços esperados para os elementos estruturais (lajes, pilares, vigas, etc.), assim se restringe a classe do betão ao valor da sua resistência à compressão.

Esta propriedade é medida através de ensaios de compressão axial, quer em provetes cúbicos de 15 cm de aresta ($f_{c,\ cubos}$) quer em provetes cilíndricos de 15/30 cm (diâmetro/altura) ($f_{c,\ cil}$), para 28 dias de idade do betão. Por vezes pode ser útil estimar ou avaliar a resistência a compressão a idade diferentes dos 28 dias (menores ou superiores) no sentido de obter-se a curva de endurecimento/cura do betão ou por outros motivos específicos como para reforço de estruturas em idades avançadas.

Os provetes são preparados de acordo com a norma NP EN 12390 – 2 (2009), "Ensaios do betão endurecido, Parte 2: Execução e cura dos provetes para ensaios de resistência mecânica". O ensaio de compressão foi realizado com base na norma NP EN 12390 - 3 (2009), "Ensaios para betão endurecido, Parte 3: Resistência á compressão de ensaio".

Para classificação do betão a níveis de tensão de rotura iremos usar as tensões de rotura aos 28 dias (idade de referencia). De acordo com o programa experimental foram moldados provetes de forma cúbica e foram ensaiados para idades diferentes da de referência, nomeadamente, para 1 dia, 7 dias, 28 dias, 61 dias e 90 dias com o objectivo de estudar a progressão da resistência à compressão ($f_{c,\ j}$) ao longo do processo de cura dos provetes.

No ensaio à compressão o provete cúbico é colocado cuidadosamente na máquina de ensaio, de forma a que a face superior e inferior estejam paralelas aos pratos do equipamento no qual vai ser aplicado as forças de compressão. Posteriormente, inicia-se o ensaio aplicando uma carga crescente num intervalo de 0,2 MPa/s a 1,0 MPa/s, a velocidade constante até à rotura (Figura 4.13).



Fig. 4.13 – Ensaio à compressão até á rotura do provete aos 7 dias.

A resistência à compressão a "j" dias ($f_{c,j}$) será dada pela razão entre a força máxima (de rotura) (F) registada no ensaio nessa data e da área da secção transversal do provete (A) na qual a força foi aplicada.

$$f_{c,j} = \frac{F}{A} \tag{4.3}$$

Nos Quadros 4.6 a 4.9, resumem-se os valores da tensão de rotura à compressão aos "j" dias dos ensaios bem como os respectivos valores médios. Embora programado e executados os provetes para a realização dos ensaios de compressão aos 90 dias, por percalço do laboratório LEMC estes foram ensaiados aos 28 dias, razão pela qual surgem 6 provetes no Quadro 4.8.

Quadro 4.6 – Resultados do ensaio de resistência à compressão a 1 dia

Referência	Cubos (cm)	Massa (kg)	Idade dos provetes (dias)	Carga de rotura (kN)	$f_{c,1}$ (MPa)
Amassadura B	15x15x15	9,658	1	1109	49,0
Amassadura A	15x15x15	9,903	1	1131	49,5
Amassadura B	15x15x15	9,882	1	1149	50,0
				$f_{cm,1}$	49,5
				DP	0,50

Quadro 4.7 – Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 7 dias

Referência	Cubos (cm)	Massa (kg)	Idade dos provetes (dias)	Carga de rotura (kN)	$f_{c,7}$ (MPa)
Amassadura A	15x15x15	9,778	7	1468	64,5
Amassadura A	15x15x15	9,865	7	1520	66,0
Amassadura B	15x15x15	9,771	7	1502	65,5
				$f_{cm,7}$	65,3
				DP	0,76

Quadro 4.8 – Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias

Referência	Cubos (cm)	Massa (kg)	Idade dos provetes (dias)	Carga de rotura (kN)	$f_{c,28}$ (MPa)
Amassadura A	15x15x15	9,856	28	1850	81,0
Amassadura A	15x15x15	9,893	28	1676	75,5
Amassadura B	15x15x15	9,688	28	1818	81,0
Amassadura B	15x15x15	9,678	28	1843	81,5
Amassadura A	15x15x15	9,923	28	1804	78,5
Amassadura B	15x15x15	9,721	28	1870	82,5
				$f_{cm,28}$	80,0
				DP	2,57

Quadro 4.9 – Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 61 dias

Referência	Cubos (cm)	Massa (kg)	Idade dos provetes (dias)	Carga de rotura (kN)	$f_{c,61}$ (MPa)
Amassadura A	15x15x15	9,859	61	2030	89,5
Amassadura A	15x15x15	9,791	61	2023	88,0
Amassadura B	15x15x15	9,713	61	1932	84,5
				$f_{cm,61}$	87,3
				DP	2,57

Apesar do percalço descrito atrás relativo aos provetes destinados ao ensaio aos 90 dias, com as devidas limitações, decidiu-se aproveitar os 4 cilindros do ensaio de absorção de água por capilaridade (28 e 61 dias) para realizar a caracterização aos 90 dias. O valor médio da resistência do betão à compressão aos 90 dias ($f_{cm,90}$) estimou-se a partir do correspondente em provetes cilíndricos ($f^{cil}_{cm,90}$) através da relação de classes de resistência entre provetes cilíndricos e cúbicos para betão pesado indicados no Quadro 7 da norma NP EN 206 – 1 (2007). O resultado deste ensaio está descrito no Quadro 4.10.

Quadro 4.10 – Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 90 dias (cilindros)

Referência	Dimensões (cm)	Massa (kg)	Idade dos provetes (dias)	Carga de rotura (kN)	$f^{cil}_{c,90}$ (MPa)
Amassadura A	ø15 e h=30	15,288	90	1688,7	95,5
Amassadura B	ø15 e h=30	15,337	90	1636,0	92,5
Amassadura A	ø15 e h=30	15,395	90	1475,2	83,5
Amassadura B	ø15 e h=30	15,343	90	1673,9	94,5
				$f^{cil}_{cm,90}$	91,5
				DP	5,4
				$f_{cm,90}$	106,5

Na Figura 4.14 representa-se a curva de evolução gráfica da resistência à compressão do betão até aos 90 dias (limite do trabalho) de todos os ensaios e respectivos valores médios. A partir dos 61 dias, a curva é a tracejado porque desvia-se do andamento regular da curva de resistência média pelo facto de se tratar de um valor estimado a partir de provetes já ensaiados na determinação de absorção de água por capilaridade. Aparte deste pormenor, a evolução da resistência entre os 61 e 28 dias é regular e cerca de 1,09.

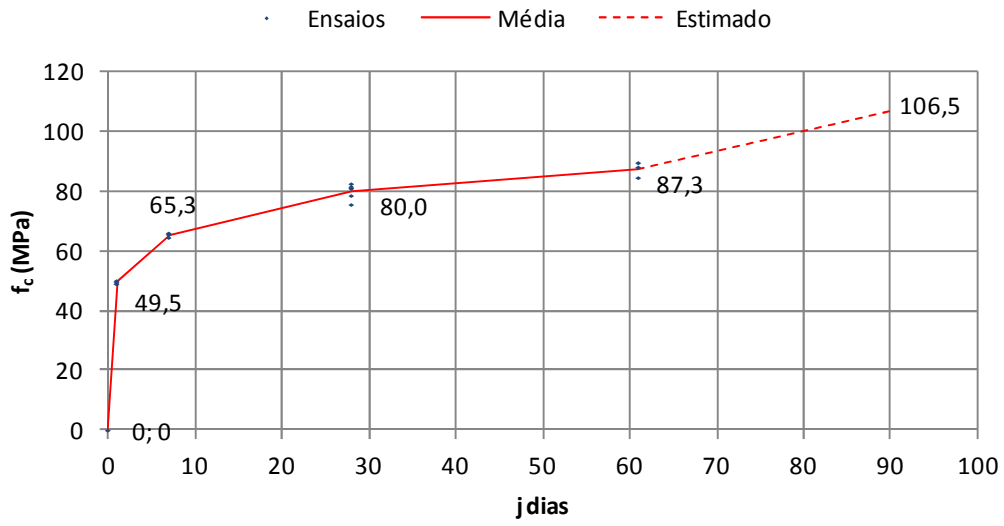


Fig. 4.14 – Evolução da resistência média à compressão do betão ao longo de 90 dias

4.4.2. ENSAIOS À TRACÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

A resistência à tracção de um betão é um parâmetro que se reflecte sobretudo na avaliação da resposta de uma estrutura aos estados limites de utilização.

A resistência à tracção no betão é geralmente muito mais baixa em relação à resistência à compressão e é difícil de medir pelo facto de ter um grande campo de factores de variação. Depende do tipo de ensaio realizado, além das variações pelo tipo de agregado, do nível de resistência à compressão e da presença eventual de uma tensão de compressão transversal à tensão de tracção, aquando da realização do ensaio.

Os ensaios de determinação da resistência à tracção do betão podem ser de três tipos distintos: resistência à tracção por compressão linear; resistência à tracção por flexão; resistência à tracção axial.

A resistência à tracção do betão com ASIC foi determinada com base na norma NP EN 12390 – 6, "Ensaios do betão endurecido, Parte 6: Resistência à tracção por compressão de provetes, em provetes cilíndricos".

O provete é pesado e colocado na máquina de ensaios com recurso a um posicionador (Figura 4.15).



Fig. 4.15 – Provete cilíndrico com o posicionador

A aplicação da carga, deve ser realizada de forma contínua e a velocidade constante dentro do intervalo de 0,04 Mpa/s a 0,06 Mpa/s, até à rotura do provete.

A resistência à tracção por compressão diametral é dada pela seguinte expressão:

$$f_{ct,sp} = \frac{2 \times F}{\pi \times L \times d} \tag{4.6}$$

onde, *"F"* é a carga máxima de rotura, *"L"* é o comprimento da linha de contacto do provete e *"d"* o diâmetro da secção transversal.

Nos Quadros 4.11 e 4.12 expõem-se os resultados dos ensaios de tracção por compressão diametral, em termos de valor de ruína e valor médio, para os 28 e 61 dias de idade dos provetes.

Quadro 4.11 – Resultados do ensaio à tracção por compressão diametral aos 28 dias

Referência	Cilindros		Massa (kg)	Idade Dias	Condições de Humidade	Carga de Rotura (kN)	$f_{ct,sp,28}$ (MPa)
	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)					
Amassadura A	150	300	15,510	28	Seco	345,20	4,90
Amassadura B	150	300	15,453	28	Seco	333,00	4,70
						$f_{ctm,sp,28}$	4,80
						CV	0,14

Quadro 4.12 – Resultados do ensaio à tracção por compressão diametral aos 61 dias

Referência	Cilindros		Massa (kg)	Idade Dias	Condições de Humidade	Carga de Rotura (kN)	$f_{ct,sp,61}$ (MPa)
	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)					
Amassadura A	150	300	15,429	61	Seco	312,0	4,40
Amassadura B	150	300	15,443	61	Seco	315,4	4,45
						$f_{ctm,sp,61}$	4,43
						CV	0,03

Os valores da resistência à tracção por compressão diametral aos 28 e 61 dias são 4,80±0,14 MPa e 4,43±0,03 MPa, respectivamente. Sem justificação plausível, esta resistência viu o seu valor diminuir face ao número de provetes disponíveis na campanha experimental. Estes ensaios deverão ser repetidos em trabalhos futuros.

4.4.3. ENSAIOS À FLEXÃO

Tal como o ensaio à tracção por compressão diametral, o ensaio à flexão tem como objectivo o de determinar qual a resistência á tracção do betão por flexão, valor importante para o comportamento de elementos à flexão em estados limites últimos de utilização.

O ensaio à flexão é realizado tendo como base as especificações da norma NP EN 12390 – 5 (2009) "Ensaios do betão endurecido, Parte 5: Resistência á flexão de provetes".

O ensaio consiste em submeter os provetes prismáticos à flexão em 4 pontos como se ilustra na Figura 4.16.



Fig. 4.16 – Aspecto do ensaio de flexão em 4 pontos

As células de carga aplicam uma força, com uma velocidade constante e dentro dos limites de 0,04 MPa/s a 0,06 MPa/s, até à rotura do provete (Figura 4.17).

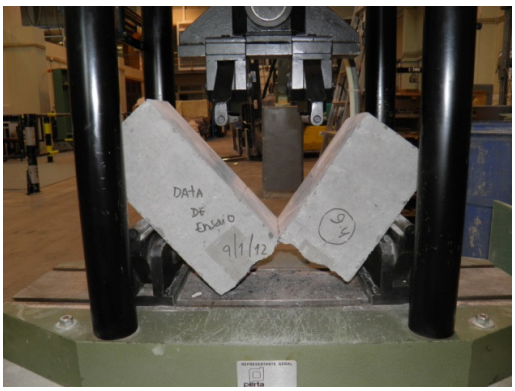


Fig. 4.17 - Rotura do provete prismático no ensaio à flexão

A resistência á flexão é avaliada através da equação seguinte:

(4.7)

$$f_{ct,fl} = \frac{F \times L}{d_1 \times d_2^2}$$

onde, "F" é a força máxima de rotura (em Newton), "L" é a distância entre os roletes inferiores (em milímetros) e "d_1" e "d_2" são as dimensões laterais do provete (em milímetros).

Nos Quadros 4.13 e 4.14 apresentam-se os resultados dos ensaios à flexão para os vários prismas avaliados aos 28 e 61 dias, respectivamente.

Quadro 4.13 – Resultados do ensaio à flexão aos 28 dias

Referência	Prismas (cm)	Massa (kg)	Idade dos provetes (dias)	Carga de rotura (kN)	$f_{ct,fl,28}$ (MPa)
Amassadura B	15x15x60	39,200	28	56,67	7,56
Amassadura A	15x15x60	39,800	28	64,69	8,63
Amassadura A	15x15x60	39,500	28	67,17	8,96
				$f_{ctm,fl,28}$	8,38
				DP	0,73

Quadro 4.14 – Resultados do ensaio à flexão aos 61 dias

Referência	Prismas (cm)	Massa (kg)	Idade dos provetes (dias)	Carga de rotura (kN)	$f_{ct,fl,61}$ (MPa)
Amassadura B	15x15x60	39,100	61	66,77	8,90
Amassadura A	15x15x60	39,500	61	67,81	9,04
Amassadura A	15x15x60	39,100	61	64,48	8,60
				$f_{ctm,fl,61}$	8,87
				DP	0,22

Os valores obtidos para a resistência à flexão aos 28 e 61 dias são 8,38±0,73 MPa e 8,87±0,22 MPa, respectivamente.

4.4.4. RETRACÇÃO POR SECAGEM

A retracção por secagem caracteriza-se como sendo a diminuição do volume da peça em betão devido à perda de humidade. É igualmente conhecida como retracção capilar, baseando-se na evaporação da água capilar e da água adsorvida pelo betão.

O ensaio de retracção foi efectuado com base na especificação do LNEC E 398 (1993), "Betões. Determinação da retracção e da expansão".

Para o efeito, foram moldados para este ensaio 3 provetes prismáticos designados por: Amassadura A n.º 1, Amassadura B n.º 2 e Amassadura B n.º 3.

Apesar de a norma indicar que o período da secagem seja de 90±1 dias, com leitura regulares, por limitação do período estimado para a conclusão do trabalho optou-se, na altura, pela leitura até aos 28

dias. Esta decisão foi baseada na hipótese permitida pela norma de que as medições podem ser feitas em outras idades intermédias. Este ensaio deverá ser repetido no futuro.

A retracção por secagem é avaliada pela expressão seguinte:

$$\varepsilon = \frac{d_f - d_i}{d_i} \tag{4.14}$$

onde, "d_i" é a distância (em milímetros) entre os dois pontos de referência no inicio do ensaio e "d_f" é a distância (em milímetros) no fim do período especificado no ensaio.

No Quadro 4.15 apresentam-se os dados obtidos pelo ensaio de retracção para o betão com ASIC e na Figura 4.18 encontra-se a representação gráfica da evolução da retracção até aos 28 dias.

Quadro 4.15 – Resultados do ensaio de retracção

Idade (dias)	Extensão de retracção (‰)		
	Amassadura A	Amassadura B (1)	Amassadura B (2)
2	0	0	0
4	0,096	0,066	0,074
7	0,098	0,086	0,100
8	0,120	0,094	0,110
9	0,200	0,098	0,180
11	0,210	0,110	0,220
13	0,230	0,128	0,220
14	0,230	0,172	0,220
16	0,370	0,288	0,240
22	0,570	0,294	0,270
28	0,570 [1]	0,282	0,270

[1] – Valor excluído no cálculo da média

ε_m (‰)	0,276
DP (‰)	0,006

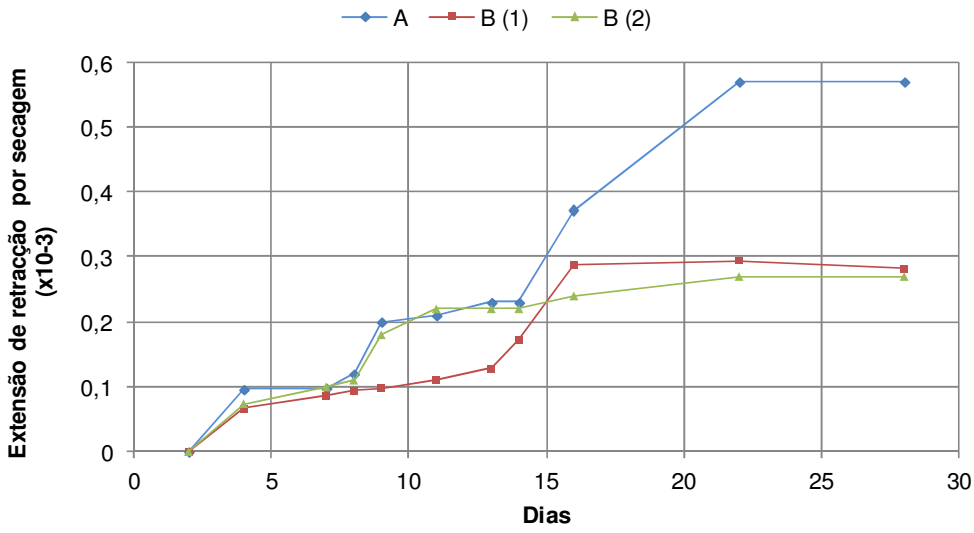


Fig. 4.18 – Representação gráfica do ensaio da retracção para os diferentes provetes

Constatou-se que, por observação dos resultados quer no Quadro 4.15 quer na Figura 4.18, o provete da amassadura A tem um desvio anormal relativo aos outros da amassadura B a partir do 15º dia. É difícil identificar a razão dessa discrepância que poderá dever-se à localização/exposição do provete na câmara de fluência e a eventuais desvios nas leituras efectuadas. Excluído esse provete, conclui-se que a extensão por retracção média do betão aos 28 dias é de $0{,}276 \times 10^{-6} \pm 0{,}006$ ‰.

4.4.5. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

A absorção de água é uma das propriedades do betão que, de certo modo, está relacionado com a sua durabilidade. Esta característica define-se como sendo a maior ou menor facilidade com que a água penetra pelos poros do betão.

O risco, para tal acontecimento é o de esta água transportar substâncias nocivas para os diferentes constituintes do betão no seu interior.

A nível físico esta absorção dá-se devido a diferença de pressão entre a superfície livre do betão e no interior dos poros capilares.

A absorção de água por capilaridade divide-se em duas fases: A primeira fase, dá-se uma absorção rápida que corresponde a entrada nos poros mais facilmente acessíveis; Na segunda fase, ocorre uma absorção mais lenta devido à entrada de água em poros de reduzida dimensão.

O ensaio para a determinação do coeficiente de absorção de água é efectuado com base na especificação do LNEC E 393 (1993) "Determinação da absorção de água por capilaridade".

Este ensaio inicia-se com a prévia moldagem de provetes cilíndricos de dimensões normalizadas e deixados em cura até a uma idade mínima de 28 dias.

Seguidamente, seca-se o provete em estufa a uma temperatura de 40±5ºC durante 14 dias. Depois, regista-se a massa do provete seco (M_0).

Colocam-se no fundo do tabuleiro suportes destinados a manter a face inferior do provete em contacto com a água.

Enche-se cuidadosamente o tabuleiro com água até que esta atinja um nível 5±1 mm, acima da face inferior do provete, cobrindo-se depois, o tabuleiro e deixa-se a água em repouso e a nível constante.

Mais tarde, faz-se o registo da massa do provete (M_i) respectivamente ao fim de tempos (t_i) iguais a 15 minutos, 30 minutos e 1, 2, 3, 6, 24 e 72 horas a contar desde do momento em que os provetes são colocado na água.

No registo das massas (M_i), faz-se também o registo da subida da altura de água no provete, através da medição em linhas pré delineadas em quatro geratrizes do provete igualmente espaçadas (h_i).

A absorção de água por capilaridade no tempo t_i, é calculada através da seguinte equação:

$$Absorção\ por\ capilaridade = \frac{M_i - M_0}{A} \tag{4.8}$$

onde, A é a área da face inferior do provete em contacto com a água (mm^2).

No Quadros 4.16 e 4.17 expõem-se os resultados do ensaio de determinação da absorção de água por capilaridade em provetes com 28 e 61 dias de idade, cuja representação gráfica está ilustrada na Figura 4.19.

Quadro 4.16 – Absorção de água por capilaridade em provetes com 28 dias

Referência	Ti (minutos / hora)	M_0 (g)	Mi (g)	Absorção de água (g/mm^2)
Amassadura A	15 min.	15412,2	15417,1	0,00027
	30 min.		15420,5	0,00047
	1 h		15421,5	0,00053
	2 h		15421,9	0,00059
	3 h		15423,9	0,00066
	6 h		15426,2	0,00079
	24 h		15434,5	0,00126
	72 h		15446,5	0,00194
Amassadura B	15 min.	15447,7	15453,8	0,00035
	30 min.		15454,9	0,00041
	1 h		15457,1	0,00053
	2 h		15457,3	0,00054
	3 h		15459,6	0,00067
	6 h		15460,1	0,00070
	24 h		15469,1	0,00121
	72 h		15480,7	0,00187

Quadro 4.17 – Absorção de água por capilaridade em provetes com 61 dias

Referência	Ti (minutos / hora)	M_0 (g)	Mi (g)	Absorção de água (g/mm^2)
Amassadura A	15 min.	15428,3	15433,6	0,00030
	30 min.		15434,7	0,00036
	1 h		15436,1	0,00044
	2 h		15437,9	0,00054
	3 h		15438,5	0,00058
	6 h		15440,3	0,00068
	24 h		15450,0	0,00123
	72 h		15453,1	0,00140
Amassadura B	15 min.	15389,3	15393,9	0,00026
	30 min.		15395,2	0,00033
	1 h		15396,7	0,00042
	2 h		15397,7	0,00048
	3 h		15398,5	0,00052
	6 h		15400,0	0,00061
	24 h		15410,7	0,00121
	72 h		15413,8	0,00139

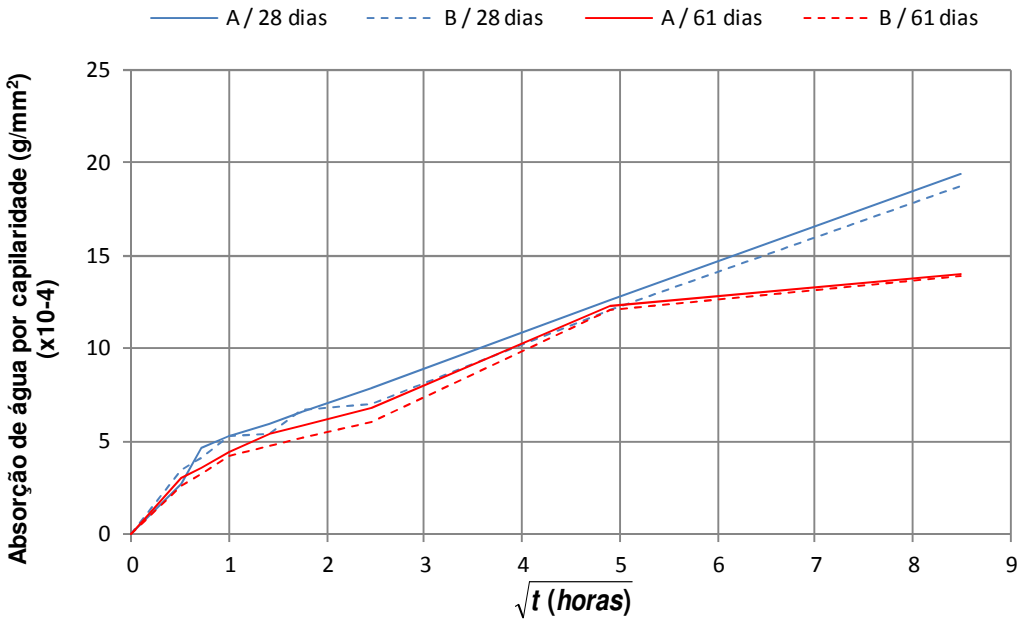
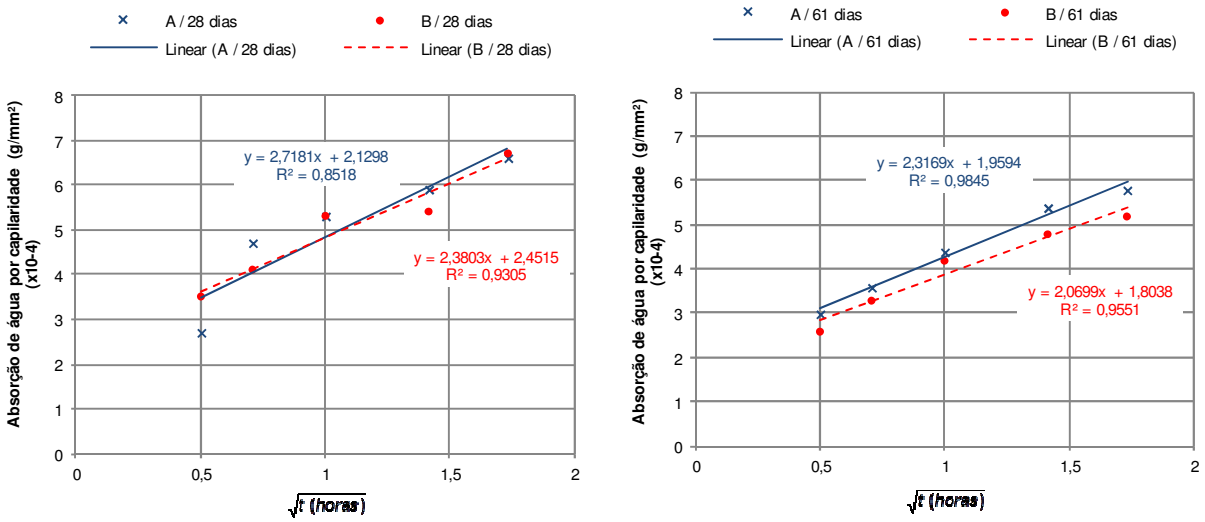


Fig. 4.19 – Representação gráfica dos resultados da absorção de água por capilaridade com 28 e 61 dias

Por observação da Figura 4.19, constata-se a existência de dois andamentos na curva de absorção do provete com 28 dias. 61 dias depois, verifica-se que a curva passa a apresentar uma nova quebra na curva de absorção às 24 horas ($\sqrt{t} = 4{,}9$), instalando três andamentos na curva. A primeira quebra dá-se ao fim de 1 hora em ambos os provetes (primeira parte da curva) e traduz o enchimento dos poros de maiores dimensões, livremente acessíveis, designado por porosidade aberta (absorção inicial). Este facto é referido também na literatura técnica (Coutinho, 1998).

Segundo o estudo de Sousa Coutinho (1998), para estudar a cinética de absorção por capilaridade tem sido habitual definir o coeficiente de absorção "*S*" que corresponde ao gradiente da curva de absorção nas primeiras 4 horas de ensaio. Partindo deste pressuposto, calcularam-se os coeficientes de absorção por aproximação de uma recta, pelo método dos mínimos quadrados, cuja inclinação corresponde ao coeficiente de absorção do provete. As Figuras 4.20 a) e b) ilustram a determinação do coeficiente de absorção por aproximação das referidas rectas e o Quadro 4.18 resume os valores dos coeficientes obtidos.

Por sua vez, nos Quadros 4.19 e 4.20 resumem-se as alturas de águas lidas nos ensaios de absorção por capilaridade para os provetes com 28 e 61 dias.



a) Provetes com 28 dias b) Provetes com 61 dias

Fig. 4.20 – Coeficientes de absorção de água por capilaridade

Quadro 4.18 – Coeficientes de absorção "*S*" em provetes com 28 e 61 dias

Referência	28 dias ($g/mm^2.h.^{-0,5}$)	61 dias ($g/mm^2.h.^{-0,5}$)
Amassadura A	$2,718x10^{-4}$	$2,317x10^{-4}$
Amassadura B	$2,380x10^{-4}$	$2,070x10^{-4}$
$S_{médio}$	$2,549x10^{-4}$	$2,193x10^{-4}$
DP	$1,690x10^{-5}$	$1,235x10^{-5}$

Quadro 4.19 – Altura de água por capilaridade em provetes com 28 dias

Referência	T_i (minutos ou horas)	Altura de água – h_i (mm)				Altura de água[1] (mm)
		Face 1	Face 2	Face 3	Face 4	
Amassadura A	15 min.	7,17	8,18	7,32	6,77	7,36
	30 min.	8,54	8,82	8,30	8,58	8,56
	1 h	8,67	9,33	7,45	8,12	8,39
	2 h	10,21	10,35	9,29	12,38	10,56
	3 h	11,25	10,93	9,20	10,87	10,56
	6 h	11,28	10,21	10,65	11,39	10,88
	24 h	10,27	8,02	7,66	4,77	7,68
	72 h	16,76	14,01	13,73	12,74	14,31
Amassadura B	15 min.	8,69	10,40	10,30	8,82	9,55
	30 min.	8,18	9,07	9,07	10,04	36,36
	1 h	9,39	7,67	9,59	10,30	9,24
	2 h	10,15	9,86	11,33	11,30	10,66
	3 h	9,39	11,45	11,60	11,52	10,99
	6 h	9,81	12,24	11,59	11,89	11,38
	24 h	11,29	10,01	10,84	11,20	10,84
	72 h	13,16	23,38	13,32	14,81	16,17

[1] -Valor médio

Quadro 4.20 – Altura de água por capilaridade em provetes com 61 dias

Referência	T_i (minutos ou horas)	Altura de água – h_i (mm)				Altura de água[1] (mm)
		Face 1	Face 2	Face 3	Face 4	
Amassadura A	15 min.	6,70	6,22	10,82	7,64	7,85
	30 min.	9,79	9,68	11,65	7,24	9,59
	1 h	8,40	10,84	13,32	7,00	9,89
	2 h	9,19	10,54	12,36	8,79	10,22
	3 h	8,93	9,54	13,03	7,84	9,84
	6 h	9,78	9,61	12,54	12,05	11,00
	24 h	9,61	9,73	11,19	9,38	9,98
	72 h	9,51	9,82	11,70	9,58	10,15
Amassadura B	15 min.	7,62	7,04	7,37	5,94	6,99
	30 min.	9,90	9,62	8,07	7,27	8,72
	1 h	8,40	9,80	7,63	7,80	8,41
	2 h	6,83	10,44	8,60	6,51	8,10
	3 h	8,50	8,93	9,70	7,61	8,69
	6 h	11,86	12,81	11,67	9,31	11,41
	24 h	9,75	9,55	12,09	9,51	10,23
	72 h	9,80	9,00	8,54	9,77	9,28

[1] -Valor médio

4.4.6. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO À PRESSÃO ATMOSFÉRICA

Para determinação do valor de absorção de água á pressão atmosférica, foi realizado o ensaio descrito na especificação do LNEC E 394 (1993), "Determinação da absorção de água por imersão. Ensaio à pressão atmosférica."

Esta medição permite indirectamente determinar a porosidade do betão em estudo.

Para o efeito, são moldados provetes cúbicos de medidas normalizadas e colocados em cura no mínimo durante 28 dias.

Após 28 dias de cura húmida, os provetes são introduzidos num recipiente, no qual se vai adicionar água sucessivamente, até ficarem totalmente submersos.

A água deve ser adicionada por etapas, em intervalos de 1 hora, a 1/3 da sua altura, 2/3 da sua altura e por fim na sua totalidade. O nível da água não deve ultrapassar 20 mm da face superior do provete imerso.

Considera-se que é alcançada uma massa constante do provete saturado, quando a diferença entre duas pesagens consecutivas, intervaladas de pelo menos 24 horas, for inferior a 0,1% da média das duas leituras. Antes de cada pesagem, o provete deve ser limpo com um pano absorvente, de modo a remover a água superficial.

Após alcançada a massa constante, o provete é pesado dentro de água, registando-se a sua massa hidrostática (M_2).

De seguida, os provetes são colocados numa estufa ventilada a 105±5°C, até obter massa constante (M_3).

O valor da absorção de água por imersão atmosférica, em percentagem é dado pela equação seguinte:

$$A_i = \frac{m_1 - m_3}{m_1 - m_2} \times 100 \quad (\%) \tag{4.9}$$

Nos Quadros 4.21 e 4.22 apresentam-se os valores obtidos do ensaio de absorção de água por imersão à pressão atmosférica, bem como, os valores médios finais para provetes com 28 e 61 dias de idade.

Quadro 4.21 - Absorção de água por imersão atmosférica em provetes com 28 dias

	Absorção de água por imersão	
Referência	Por provete (%)	Valor médio (%)
Amassadura B	9,6	10,30
Amassadura A	10,9	

Quadro 4.22 – Absorção de água por imersão atmosférica em provetes com 61 dias

	Absorção de água por imersão	
Referência	Por provete (%)	Valor médio (%)
Amassadura B	6,94	6,92
Amassadura A	6,89	

4.4.7. PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO DA ÁGUA SOB PRESSÃO

O ensaio da profundidade de penetração da água sob pressão seguiu as especificações da norma NP EN 12390 - 8 (2009), "Ensaios do betão endurecido, Parte 8: Profundidade d penetração da água sob pressão". Este ensaio permite obter uma estimativa do coeficiente de permeabilidade, segundo a lei de Darcy.

O ensaio é realizado em cubos com 28 dias, que são colocados numa estrutura de modo que a aplicação da água sob pressão fique perpendicular à superfície de enchimento. A pressão da água situa-se na ordem de 500±50 kPa, durante 72 horas (Figura 4.21).

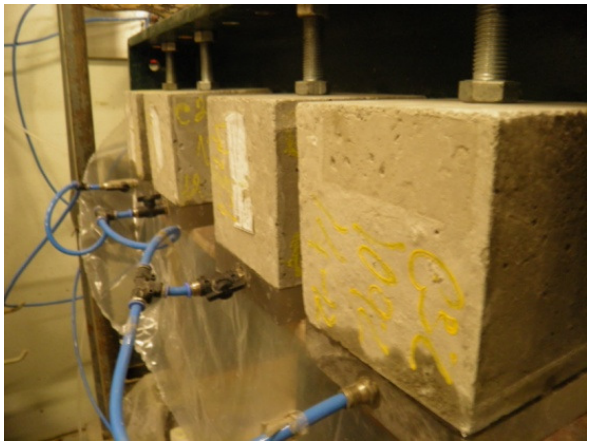


Fig. 4.21 – Ensaio de penetração da água sobre pressão

Após a realização do ensaio, o provete é aberto por compressão linear e medidas as profundidades de penetração média e máxima da água (Figuras 4.22 a, b, c, e d).

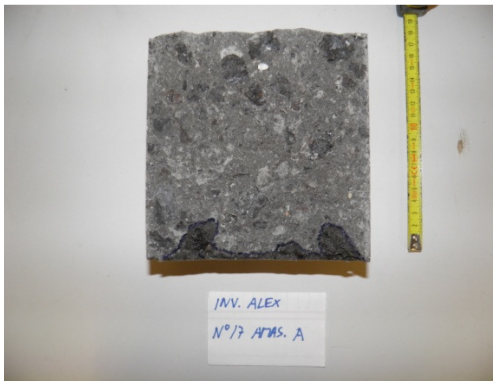
Nos Quadro 4.23 e 4.24 são apresentados os valores das profundidades de penetração média e máximas da água sob pressão dos provetes com 28 e 61 dias.

Quadro 4.23 – Profundidades de penetração média e máximas da água sob pressão com 28 dias

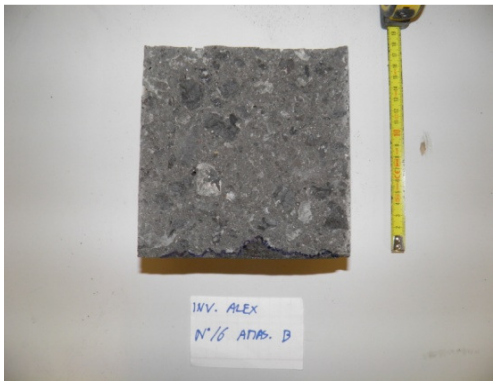
		Profundidade de penetração (mm)	
Referência		Médio	Máximo
Amassadura A		8	33
Amassadura B		5	18
	Média	6,5	25,5
	CV	1,5	7,5

Quadro 4.24 - Profundidades de penetração média e máximas da água sob pressão com 61 dias

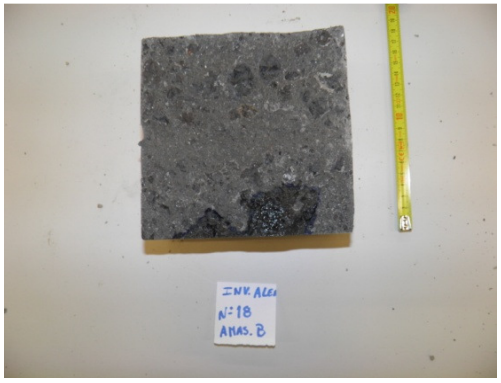
		Profundidade de penetração (mm)	
Referência		Médio	Máximo
Amassadura B (1)		20	41
Amassadura B (2)		5	25
	Média	12,5	33,0
	CV	7,5	8,0



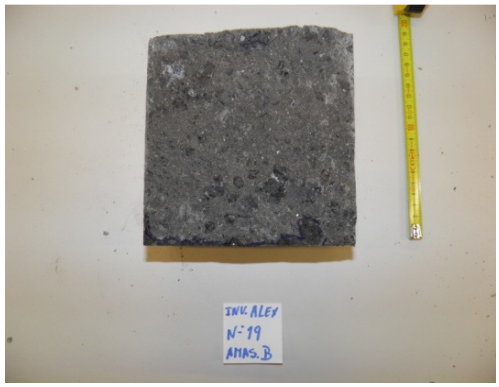
a) Amassadura A com 28 dias



b) Amassadura B com 28 dias



c) Amassadura B (1) com 61 dias



d) Amassadura B (2) com 61 dias

Fig. 4.22 – Profundidades de penetração de água observadas

4.4.8. PERMEABILIDADE AO OXIGÉNIO

Para além de haver riscos com a penetração de líquidos através dos poros do betão, afectando negativamente os seus compostos, existe uma igual preocupação para a permeabilidade do betão a substâncias no estado gasoso. A noção de permeabilidade ao oxigénio tem em especial foco o facto de um betão muito poroso, logo permeável ao oxigénio, provocar uma oxidação mais rápida e destrutiva nas armaduras inseridas no betão.

Para a determinação da permeabilidade do betão, é efectuado pelo ensaio com base na especificação do LNEC E 392 (1993), "Betões. Determinação da permeabilidade ao oxigénio."

O valor obtido da permeabilidade ao oxigénio ($K_{oxig.}$) deve estar compreendido entre esta gama de valores: 10^{-14} e 10^{-19} m^2.

Partindo de um cilindro com cura mínima de 28 dias, o ensaio inicia-se com a colocação do provete na câmara de ensaio e mede-se a pressão atmosférica.

Verifica-se se não há folgas de ar entre o provete e a cinta que o envolve e faz-se atravessar o provete para diferentes pressões de fluxo de ar.

Para cada valor de pressão, deixa-se o fluxo estabilizar entre 5 a 30 minutos. Para cada fluxo regista-se o valor Q_i.

O cálculo da permeabilidade ao oxigénio é dado pela equação seguinte:

$$K_{oxigénio} = \frac{1{,}14 \times 10^{-4} \times Q \times p_a}{(p^2 - p_a^2)} \qquad (4.10)$$

Onde, "Q" é o fluxo do fluido (em m^3s^{-1})," *p"* é a pressão absoluta do fluido à entrada do provete (Nm^{-2}) e "p_a" é a pressão atmosférica (Nm^{-2}).

No Quadro 4.25 apresenta-se os resultados do ensaio á permeabilidade ao oxigénio para o provete com 56 dias de idade.

Quadro 4.25 – Resultado ensaio à permeabilidade ao oxigénio aos 56 dias

Referência	$K_{oxigénio}$ (m^2)
Amassadura A	$1{,}7481 \times 10^{-18}$

4.4.9. MASSA VOLÚMICA

A determinação da massa volúmica do betão endurecido, segue os procedimentos de ensaio descrito na norma NP EN 12390 – 7 (2009) "Ensaios do betão endurecido, Parte 7: Massa volúmica do betão endurecido".

A realização deste ensaio impõe a execução de provetes cúbicos de dimensões 15x15x15 cm de acordo com a norma.

Para cada provete seco ao ar, faz-se o registo da respectiva massa (m).

O volume de betão é deduzido experimentalmente através da deslocação de água a partir da massa do provete na água e da massa do provete ao ar.

Para determinação da massa do provete na água, ou massa hidrostática, é determinada a massa do "gancho" no recipiente de água, registando assim a sua massa aparente (m_{st}). Coloca-se de seguida o provete no "gancho" registando o valor do conjunto ($m_{st} + m_w$) imerso em água.

Retira-se o provete da água e regista-se a massa do provete saturado ao ar (m_a).

O volume do provete será então adquirido pela seguinte expressão:

$$V = \frac{m_a - [(m_{st} + m_w) - m_{st}]}{\rho_w} \quad (4.11)$$

Sendo, "ρ_w" a massa volúmica da água em kg/m^3.

Finalmente a massa volúmica do betão endurecido é dada pela seguinte relação:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (4.12)$$

No Quadro 4.26 estão expostos os resultados do ensaio da determinação da massa volúmica.

Quadro 4.26 – Resultados dos valores do ensaio de determinação da massa volúmica

Referência	M (kg)	M_{st} (kg)	$M_{st} + M_w$ (kg)	M_a (kg)	V (m^3)	ρ (kg/m^3)	ρ médio (kg/m^3)
Amassadura A	9,678	1,8	8,2	9,681	0,003346	2892,0	2891,0
Amassadura B	9,721	1,8	8,1	9,725	0,003363	2890,5	
						DP	0,75

Com este procedimento obteve-se para a massa volúmica do betão endurecido com ASIC o valor de 2891 kg/m^3.

4.5. COMPILAÇÃO DE RESULTADOS

No presente capitulo, pretendeu-se avaliar e caracterizar o comportamento do betão fresco e endurecido com substituição do agregado natural por ASIC.

Para o efeito, foram realizados vários ensaios de caracterização do betão com ASIC, descritos ao longo do capítulo, cujos resultados são resumidos no Quadro 4.27.

Quadro 4.27 – Resultados dos ensaios de caracterização do betão com ASIC

Propriedades	Sigla	Dias	Resultado
Caracterização do betão fresco			
Grau de compactabilidade	*C*		C_1 (1,39)
Massa volúmica	ρ		2867 kg/m^3
Teor em ar	A_c		2,20 %
Caracterização do betão endurecido			
Resistência à compressão	f_{cm}	1 dia de idade	49,5±0,50 MPa
		7 dias de idade	65,3±0,76 MPa
		28 dias de idade	79,2±2,57 MPa
		61 dias de idade	87,3±2,57 MPa
		90 dias de idade[1]	106,5 MPa
Resistência à tracção por compressão diametral	$f_{ctm,sp}$	28 dias de idade	4,80±0,14 MPa
		61 dias de idade	4,43±0,03 MPa
Resistência à flexão	$f_{ctm,fl}$	28 dias de idade	8,38±0,73 MPa
		61 dias de idade	8,87±0,22 MPa
Retracção por secagem	ε	Até aos 28 dias	0,276±0,006 ‰
Absorção de água por capilaridade às 72 horas		28 dias de idade	1,87 a 1,97 x10^{-3} g/mm^2
		61 dias de idade	1,39 a 1,40 x10^{-3} g/mm^2
Coeficiente de absorção de água (0 a 4 horas)	*S*	28 dias de idade	2,549 x10^{-4}±1,690x10^{-5} (g/mm^2.h.$^{-0,5}$)
		61 dias de idade	2,193 x10^{-4}±1,235x10^{-5}(g/mm^2.h.$^{-0,5}$)
Altura de água por capilaridade às 72 horas		28 dias de idade	14,31 a 16,17 mm
		61 dias de idade	9,28 a 10,15 mm
Absorção de água por imersão atmosférica		28 dias de idade	10,3±0,65 %
		61 dias de idade	6,92±0,03 %
Profundidade de penetração da água sob pressão	Médio	28 dias de idade	6,5±1,5 mm
		61 dias de idade	12,5±7,5 mm
	Máximo	28 dias de idade	25,5±7,5 mm
		61 dias de idade	33,0±8,0 mm
Permeabilidade ao oxigénio	$K_{oxigénio}$	Aos 56 dias	1,7481x10^{-18} m^2
Massa volúmica	ρ	28 dias de idade	2891±0,75 kg/m^3

[1] – Valor estimado a partir de cilindros (ver secção 4.4.1)

5
ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo são analisados e discutidos os resultados obtidos dos ensaios realizados nos dois programas experimentais expostos nos capítulos 3 e 4.

Para que se possa concluir sobre a possibilidade de aplicação do ASIC na construção civil, sobretudo como agregado para betões de ligantes hidráulicos, neste capítulo, analisa-se a caracterização desse face aos requisitos e recomendações mínimos estabelecidos na especificação LNEC E 467 (2006), para agregados naturais e na norma NP EN 12620 (2010).

Por se tratar de um agregado proveniente de um subproduto industrial, foram realizados ensaios químicos segundo a norma NP EN 1744 – 1 (2010), numa entidade credenciada como é o CTVC, e analisados os resultados.

No que diz respeito ao betão com ASIC, foi caracterizado uma composição de betão com o objectivo de ser denso e avaliadas as principais propriedades definidas nas especificações da norma portuguesa NP EN 206-1 (2007) que estabelece, entre outros, os requisitos de classificação do betão, os requisitos de durabilidade, as classes de resistência e os requisitos de cura (NP EN 13640-1).

Devido à escassez de informação técnica sobre o tema em análise, sempre que possível e limitado ao número de ensaios realizados no período disponível para este trabalho, os resultados foram comparados com alguns trabalhos de autores para obras cujas exigências podem ser consideradas como uma referência de construção de betão armado e/ou pré-esforçado. Decidiu-se não estabelecer uma comparação directa de todos os resultados com os da publicação de Ramos (2011) porque destinado a um betão armado corrente.

5.2. CARACTERIZAÇÃO DO ASIC

A avaliação do ASIC como um agregado para betões de ligantes hidráulicos conduziu à análise de diversas propriedades, algumas obrigatórias (com requisitos mínimos) e outras facultativas dependendo da utilização pretendida para este agregado. As propriedades obrigatórias em análise foram efectuadas com base na especificação LNEC E 467 (2006) e na norma NP EN 12620 (2010) com vista a avaliar a conformidade com os requisitos mínimos.

Do trabalho de Ramos (2011) constatou-se que o ASIC é um material de granulométrica extensa e bem graduado, verificando-se, porém, alguma deficiência em partículas finas, de dimensões inferiores a 4 mm, pelo que foi necessário realizar a separação do ASIC em fracções. Assim, da análise granulométrica do agregado efectuada de acordo NP EN 933 – 1 (2000) concluindo-se ser vantajoso, para a confeção de um betão denso, a divisão do ASIC em quatro fracções a saber: fracção 0/4; fracção 4/8; fracção 8/16 e fracção 16/32.

A percentagem de finos que um material possui é importante para a trabalhabilidade do betão, pelo que, devem ser controlados de acordo o tipo desejado para a aplicação do betão. Como a fracção 0/4 é reduzida decidiu-se optar por uma areia fina complementar na composição do betão estudado no capítulo 4.

Relativamente á forma dos agregados, esta influencia fortemente a resistência do betão. Em termos regulamentares, é aconselhável a utilização de partículas o mais esféricas possível e desaconselhável o uso de partículas excessivamente lamelares ou alongadas. O uso de partículas alongadas fará com que, através da gravidade, estas se posicionem horizontalmente formando pequenas películas de água na face inferior, diminuído a aderência da matriz e provocando deficiências estruturais.

Por se tratar do mesmo material estudado por Ramos (2011), assumiu-se o índice de forma de 0,4%. No que respeita à norma NP EN 12620 (2010), este material pertence à categoria SI_{15}, a que corresponde um índice de forma máximo de 15%. Na opinião da autora, pode concluir-se que o ASIC é constituído na sua grande maioria por partículas cúbicas o que, aliado à elevada rugosidade, pode significar que o agregado tem uma boa probabilidade de vir a apresentar uma boa interligação entre os grãos, depois de compactado (Ramos, 2011).

Pelo mesmo motivo exposto no índice de forma, segundo o trabalho de Ramos (2011) o índice de achatamento do ASIC apresentou o valor de 2%, isto é, segundo a norma NP EN 12620 (2010) o material pertence à categoria FI_{15}. De acordo com os requisitos definidos na especificação do LNEC E 467 (2006), o valor limite máximo é de 50% (categoria FI_{50}). Assim, conclui-se ser viável a utilização do ASIC como agregado em betões de ligantes hidráulicos porque a categoria é inferior à exigida. A título de curiosidade, os agregados naturais apresentam um índice de achatamento, em regra, compreendido entre 7% e 25%, pelo que o ASIC apresenta um valor significativamente inferior.

Para a caracterização física e mecânica, foram realizados ensaios para a determinação da massa volúmica, da absorção de água, da baridade, da resistência à fragmentação pelo método de Los Angeles e do esmagamento.

Da pesquisa bibliográfica realizada, é espectável que as várias massas volúmicas do ASIC sejam superiores ao dos agregados correntes utilizados para betões hidráulicos, estes na ordem de 2,60 Mg/m^3.

No Quadro 5.1, resumem-se os valores da massa volúmica do material impermeável, da massa volúmica das partículas saturadas e da massa volúmica das partículas secas disponíveis no documento de Ramos (2011), incluindo o estudo realizado pelo Centro de Valorização de Resíduos (CVR 257), neste ultimo, determinadas de acordo com a norma NP 581. Estes valores são comparados com os obtidos no presente trabalho, com a ressalva de que estão em causa comparação de valores de fracções distintas.

Quadro 5.1 – Comparação das massas volúmicas

Estudos		ρ_a (Mg/m^3)	ρ_{ssd} (Mg/m^3)	ρ_{rd} (Mg/m^3)
Referência	ASIC Tipo			
Centro de Valorização de Resíduos (CVR 257) (Ramos, 2011)	ASIC	3,45	3,25	3,17
Ramos (2011)	ASIC fracção 5,5/22,4	3,58	3,44	3,39
	ASIC fracção 0,5/5,5	3,65	3,49	3,42
Pacheco (presente trabalho)	ASIC fracção 16/32	3,45	3,27	3,19
	ASIC fracção *8/16*	3,50	3,28	3,19
	ASIC fracção *4/8*	3,55	3,31	3,22
	ASIC fracção *0/4*	3,77	3,64	3,59

Em termos gerais, observa-se que os resultados médios do CVR 257 são ligeiramente abaixo dos que foram determinados no trabalho de Ramos (2011) e próximos dos valores obtidos neste trabalho para a fracção 16/32. É possível afirmar que a massa volúmica média é cerca de 1,4 vezes maior que a do agregado natural e os seus valores oscilam entre:

$$3{,}45\ \text{Mg/m}^3 \leq \text{massa volúmica do material impermeável} \leq 3{,}77\ \text{Mg/m}^3$$

$$3{,}25\ \text{Mg/m}^3 \leq \text{massa volúmica das partículas saturadas} \leq 3{,}64\ \text{Mg/m}^3$$

$$3{,}17\ \text{Mg/m}^3 \leq \text{massa volúmica das partículas secas} \leq 3{,}59\ \text{Mg/m}^3$$

No Quadro 5.2, expõem-se os valores de absorção de água para o ASIC estudado por alguns autores e comparam-se com o valor dos agregados naturais geralmente utilizados em betões de ligantes hidráulicos. Constata-se que os valores obtidos neste trabalho para a absorção de água do ASIC são superiores aos dos agregados naturais especificados por Ramos (2010), apesar da grande variabilidade de fracções em análise. De acordo com os requisitos da especificação do LNEC E 467 (2006) o valor da absorção de água deve ser inferior a 5%. Deste modo, o ASIC está apto a ser utilizado como elemento integrante do betão.

Quadro 5.2 – Comparação de valores de absorção de água

Estudos		WA_{24} (%)
Referência	Tipo	
Ramos (2011)	Agregado natural	0,3% - 0,7%
Centro de Valorização de Resíduos (CVR 257) (Ramos, 2011)	ASIC	2,59
Ramos (2011)	ASIC fracção 5,5/22,4	1,60
	ASIC fracção 0,5/5,5	1,80
Pacheco (presente trabalho)	ASIC fracção 16/32	2,34
	ASIC fracção 8/16	2,80
	ASIC fracção 4/8	2,89
	ASIC fracção 0/4	1,31

A baridade depende do valor do seu volume de vazios, quer por sua vez depende da granulometria, da forma e do arranjo das partículas. No Quadro 5.3 resumem-se os valores da baridade e da percentagem do volume de vazios obtidos no presente trabalho e no estudo desenvolvido por Ramos (2011), ambos no LEMC. Estes valores permitem afirmar que o material é classificado como extradenso.

Quadro 5.3 – Comparação de valores da baridade e da percentagem do volume de vazios

Estudos		ρ_b (Mg/m^3)	ν (%)
Referência	Tipo		
Ramos (2011)	ASIC	1,79	47,0
Pacheco (presente trabalho)	ASIC fracção 16/32	1,55	51,4
	ASIC fracção 8/16	1,84	42,3
	ASIC fracção 4/8	1,73	46,3
	ASIC fracção 0/4	1,76	50,9

Segundo Ramos (2011), a qualidade de um agregado, bem como a sua resistência, são parâmetros fundamentais para avaliar a aptidão do uso de um agregado como elemento constituinte do betão. No seu estudo, a avaliação foi realizada pelo ensaio de fragmentação na máquina de Los Angeles, através do qual é imposto ao agregado uma solicitação de choque e desgaste normalizados, obtendo-se um coeficiente Los Angeles de 25%, isto é, este material pertence à categoria LA_{25} (NP EN 12620, 2010).

Pelo facto da especificação E 467 (2006) estabelece um valor máximo limite de 50%, conclui-se que o ASIC pode ser usado como agregado em betões de ligantes hidráulicos e que se trata de um material com elevada dureza e com uma boa resistência.

Ainda segundo o trabalho de Ramos, no estudo realizado pelo CVR, o ensaio de fragmentação conduziu a um coeficiente Los Angeles de 28%, passando a material a pertencer à categoria LA_{30}. Comparando a resistência à fragmentação obtida para o ASIC com a dos agregados naturais, observa-se que o ASIC é menos resistente que o gnaisse, mas mais resistente que o granito e o calcário. Os valores da resistência à fragmentação pelo ensaio de *Los Angeles* dos agregados naturais encontram-se geralmente entre 30% a 40%.

No presente trabalho, foi avaliado a resistência ao esmagamento pela norma NP 1039 (1974) e obteve-se o valor médio da resistência de 20,46 ± 1,09 %, inferior ao valor máximo limite imposto pela especificação do LNEC E 467 (2006) de 45%. Esta conformidade aceita uma vez mais este material como um agregado.

Em termos de análise química, pode avançar-se com a constatação de que os quatro princípais requisitos químicos, indicados na norma NP EN 1744-1 (2010), foram satisfeitos para a escala de ensaios possiveis realizar no período de tempo disponivel para o desenvolvimento desta tese. Pela importância que eles se revestem, foram realizados no Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro (CTVC) de Coimbra excepto um. Infelizmente, não foi possivel encontrar outros resultados químicos fiáveis, nem da empresa fornecedora do ASIC nem de outros trabalhos, para se proceder a uma nálise comparativa.

A nivel de teor de sulfatos solúveis em ácido, por condicionantes de durabilidade e qualidade do betão, o valor alcançado nos ensaios foi de 0,08%, inferior ao imposto na norma que é de 1,0% (para escórias arrefecidas ao ar).

Quanto ao teor de cloretos, segundo o relatório da CTVC, o valor encontrado na amostra foi de 0,0014%.

O teor de enxofre total é o componente de maior preocupação porque, caso exista a presença de pirrutite, diminui drásticamente o valor máximo permitido de 0,2% para 0,1%. Segundo o relatório da CTVC, na amostra analisada foi detectada a presença de pirrutite e o teor de enxofre total foi de 0,05%, mesmo assim, inferior ao limite referido o que aceita o material como agregado.

Por último, a análise de reactividade alcalis-silica para a composição A/C = 0,47 exigida pela norma ASTC C 1260 – 07 (2008) conduziu aos resultados das extensões expostos no Quadro 3.13, do Capítulo 3. Sublinha-se, contudo, que os ensaios foram efectuados através do recurso a cinzas volantes (30% do ligante hidráulico) em conformidade com a composição do betão em estudado. Nessas condições, a análise desse quadro permite concluir que a extensão obtida após catorze dias da leitura zero é inferior a 0,1%. De acordo com a especificação LNEC 461 (2007) o material agregado é classificado como "agregado não reactivo – Classe I"

No Quadro 5.4, resume-se a análise de conformidade do ASIC pelas várias propriedades avaliadas segundo as normas. Conclui-se, que o material designado por ASIC está apto para ser usado como agregado em betões de ligantes hidráulicos.

Quadro 5.4 – Análise de conformidade para o ASIC

Propriedades	Sigla	Material	Resultados	Requisitos	Conformidade
Caracterização Geométrica					
Análise granulométrica		ASIC 0/4	0/4 mm	s/r	-
		ASIC 4/32	4/32 mm		
Índice de forma		ASIC	0,4 %	s/r	-
Índice de achatamento		ASIC	0,64 %	FI_{35} (≤35%)	OK
Caracterização Física e Mecânica					
Massa volúmica do material impermeável das partículas	ρ_a	ASIC 0/4	3,77 Mg/m^3	s/r	-
		ASIC 4/8	3,55 Mg/m^3		
		ASIC 8/16	3,50 Mg/m^3		
		ASIC 16/32	3,45 Mg/m^3		
Massa volúmica das partículas secas em estufa	ρ_{rd}	ASIC 0/4	3,59 Mg/m^3	s/r	-
		ASIC 4/8	3,22 Mg/m^3		
		ASIC 8/16	3,19 Mg/m^3		
		ASIC 16/32	3,19 Mg/m^3		
Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca	ρ_{ssd}	ASIC 0/4	3,64 Mg/m^3	s/r	-
		ASIC 4/8	3,31 Mg/m^3		
		ASIC 8/16	3,28 Mg/m^3		
		ASIC 16/32	3,27 Mg/m^3		
Absorção de água (em percentagem da massa seca)	WA_{24}	ASIC 0/4	1,31 %	≤ 5%	OK
		ASIC 4/8	2,89 %		
		ASIC 8/16	2,80 %		
		ASIC 16/32	2,34 %		
Baridade	ρ_b	ASIC 0/4	1,76 Mg/m^3	A declarar	-
		ASIC 4/8	1,73 Mg/m^3		
		ASIC 8/16	1,84 Mg/m^3		
		ASIC 16/32	1,55 Mg/m^3		
Percentagem de vazios	v	ASIC 0/4	50,9 %	s/r	-
		ASIC 4/8	46,3 %		
		ASIC 8/16	42,3 %		
		ASIC 16/32	51,4 %		
Resistência à fragmentação de *Los Angeles*	LA	ASIC	25 %	LA_{50} (50%)	OK
Resistência ao esmagamento	R	ASIC	20,46 ± 1,09 %	≤ 45%	OK
Caracterização Química					
Teor de sulfatos solúveis em ácido	-	ASIC	0,08 %	AS ≤ 1,0 %	OK
Teor de cloretos	*C*	ASIC	0,0014 %	A declarar	-
Teor de enxofre total	S	ASIC	0,05%	S ≤ 1,0% c/pirrutite	OK
Reactividade Alcalis-Silica	-	ASIC	Não reactivo	A declarar	OK

5.3. CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO FRESCO

Após a aceitação do ASIC como agregado, seguiu-se a análise de caracterização da composição de um betão com o objectivo de ter propriedades de um betão denso. Foi estudada uma composição e posteriormente avaliadas as principais propriedades do betão enquanto "fresco" e mais com consistência em fase "endurecido". Nesta secção analisam-se os resultados referentes à primeira fase.

Foi efectuado o ensaio de compactabilidade, De modo a avaliar a trabalhabilidade, a maior ou menor facilidade de compactação por vibração por se trata de um betão denso com agregados de granulometria superior à dos betões correntes, foi efectuado o ensaio de compactabilidade. O grau de compactabilidade obtido foi de 1,39 (Classe C_1), valor este dentro dos limites sugeridos pela norma NP EN 12350-4 (2009) que são entre 1,04 e 1,46. Ressalva-se que não foram efectuados os ensaios de Slump Test nem de Grau de Espalhamento porque se constatou que, de amassaduras experiencias anteriores, o betão saia e não dos moldes. Estes ensaios foram realizados no documento de Ramos (2011) e foi concluído que o betão estudado (visando um betão corrente) apresentava boa trabalhabilidade e boa consistência, estando compreendido entre um estado fluido e denso.

Tal como esperado, o betão com ASIC tem uma massa volúmica superior ao betão corrente por incorporar agregados com maior massa volúmica. Este facto é comprovado nos valores da massa volúmica do betão fresco de 2867 kg/m^3 e 2890 kg/m^3 obtidos no presente trabalho e no de Ramos, respectivamente. De acordo com os resultados obtidos o betão é classificado como um betão pesado.

Por último, foi avaliado o teor de ar do betão fresco na ordem de 2,20%.

5.4. CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO ENDURECIDO

De acordo a norma NP EN 206 – 1 (2007) e admitindo os critérios para aceitação dos ensaios iniciais (anexo A, secção A.5), o valor característico da resistência à compressão do betão é possível ser estimado com margem de segurança de pelo menos cerca de duas vezes o desvio padrão esperado, o que significa uma margem de 6 a 12 MPa:

$$f_{cm} - 12MPa \leq f_{ck} \leq f_{cm} - 6MPa$$

Assumindo este critério, o valor característico da resistência à compressão do betão aos 28 dias estimado a partir do valor médio da resistência à compressão na mesma idade está compreendido entre:

$$68MPa \leq f_{ck} \leq 74MPa$$

Admitindo as classes de resistência à compressão para betão pesado em cubos, o valor mínimo compatível com este intervalo conduz à classe de resistência C55/67 ($f_{ck} \geq 67\ MPa$).

As normas e os códigos de dimensionamento estipulam os 28 dias como a data de referência para a generalidade das propriedades mecânicas do betão. Nesse sentido e limitado ao tempo disponível do trabalho, no programa experimental referente à análise do betão endurecido foram avaliadas, para além da resistência à compressão ($f_{cm,28}$, $f_{ck,28}$), a resistência à tracção por compressão diametral ($f_{ctm,sp,28}$) e a resistência à tracção por flexão ($f_{ctm,fl,28}$). Por outro lado, partindo das expressões indicadas no Eurocódigo 2 (EC2) (NP EN 1992-1-1, 2010), estimam-se os valores aos 28 dias das resistências do betão com ASIC e o seu valor médio do módulo de elasticidade ($E_{cm,28}$). e comparam-se com os valores mínimos indicados pelo EC2 para um betão admitido ser da classe de resistência C55/67. No Quadro 5.4, expõem-se os valores da resistência à compressão ($f^{cub}_{cm,28}$, $f^{cub}_{ck,28}$), a resistência à tracção por compressão diametral ($f_{ctm,sp,28}$), a resistência à tracção por flexão ($f_{ctm,fl,28}$), a resistência à tracção simples ($f_{ctm,,28}$) e o módulo de elasticidade do betão aos 28 dias referidos à análise experimental (quando existem ensaios) e à análise via EC2 (nas hipóteses estimativa e valores mínimos da classe).

Quadro 5.4 – Propriedades do betão aos 28 dias (experimental vs EC2)

Propriedades	Experimental	Estimado EC2	Classe 55/67(EC2)
$f^{cub}_{ck,28}$ (MPa)	-	68,00 – 74,00 [1]	67,00
$f^{cub}_{cm,28}$ (MPa)	80,00	-	75,00
$f_{ctm,28}$ (MPa)	-	4,32 [2] - 4,66 [4]	4,20
$f_{ctm,sp,28}$ (MPa)	4,80	4,80 – 5,18 [2]	4,67 [2]
$f_{ctm,fl,28}$ (MPa)	8,38	6,26 – 6,76 [3]	6,09 [3]
$E_{cm,28}$ (GPa)	-	41,05 [5]	38

[1] – De acordo a norma NP EN 206 – 1 (2007);

[2] – $f_{ctm} = 0{,}9 f_{ctm,sp}$ (NP EN 1992-1-1, 2010);

[3] – $f_{ctm,fl} = \max\{(1{,}6 - h/1000) f_{ctm} ; f_{ctm}\}$ (NP EN 1992-1-1, 2010);

[4] – $f_{ctm} = 2{,}12 \ln(1 + (f_{cm}/10)) \geq C50/60$ (NP EN 1992-1-1, 2010);

[5] – $E_{cm} = 22\left(f_{cm}/10\right)^{0,3}$ (NP EN 1992-1-1, 2010);

Em qualquer das análises, os valores da resistência à tracção decrescem desde os por flexão (os mais elevados), seguido dos por compressão diametral e por último os por tracção axial. Saliente-se que os valores estimados pelo EC2 para a tracção por flexão são inferiores aos obtidos experimentalmente. Em termos gerais, comparando os valores das propriedades estimadas pelas expressões do EC2 e os valores mínimos associados à Classe 55/67, sublinha-se que estes segundos são ligeiramente inferiores aos primeiros, por isso se tratam de valores estimados para projecto, com as reservas indicadas no código.

O módulo de elasticidade do betão mede a deformação elástica que este sofre e que, directa ou indirectamente afecta a forma como as estruturas respondem às solicitações impostas, em termos de deformação que exibem e da distribuição de esforços em estruturas hiperestáticas. Devido a um percalço na programação das tarefas experimentais, não foram produzidos provetes para a avaliação do módulo de elasticidade do betão com ASIC pelo que esse valor só poderá ser considerado nesta análise através do estimado pela classe de resistência do betão ou estimado pela expressão aproximada do EC2 a partir do valor médio da resistência à compressão do betão.

Como foram avaliadas algumas propriedades mecânicas para além dos 28 dias, procurou-se analisar a evolução das mesmas após 61 e 90 dias. Esses valores foram estimados recorrendo às expressões aproximadas do EC2, transformando as resistências médias à compressão de cubos em cilindros, as resistências médias à tracção na flexão em tracção axial simples e calculadas as resistências para as datas desejadas dos ensaios. A evolução da resistência à compressão ($f^{cub}_{cm,j}$), da resistência à tracção por compressão diametral ($f_{ctm,sp,j}$) e da resistência à tracção simples ($f_{ctm,,j}$)está exposta no Quadro 5.5 e ilustrada na Figura 5.1.

Quadro 5. 5 – Propriedades do betão aos "j" dias (experimental vs EC2)

Propriedades	j = 28 dias		j = 61 dias		j = 90 dias	
	Experimental	EC2	Experimental	EC2	Experimental	EC2
$f^{cub}_{cm,j}$ (MPa)	80,0	75	87,3	84,7	106,5 [1]	86,0
$f_{ctm,sp,j}$ (MPa)	4,80	4,67	4,43	4,86	-	-
$f_{ctm,j}$ (MPa)	-	4,20	-	4,38	-	-

[1] – Valor estimado a partir de cilindros (ver secção 4.4.1)

A análise do quadro merece uma primeira observação, da ligeira redução do valor da resistência à tracção por compressão diametral entre os 28 e 61 dias, aspecto condicionado pela variabilidade dos parâmetros e pelo número reduzido de provetes de ensaio. Em termos gerais, conclui-se que as expressões do EC2 traduzem a evolução no tempo com muito boa aproximação para a resistência à tracção por compressão diametral e por defeito para a resistência à compressão. Nesta última, a diferença entre experimental vs estimativa é mais acentuada com o tempo, o que leva a afirmar que a expressão do EC não parece ser adequada para esta análise. Esta análise é feita em termos de valores médios globais, com um grande número de factores variáveis e dependentes, o que confere à análise grande variabilidade também.

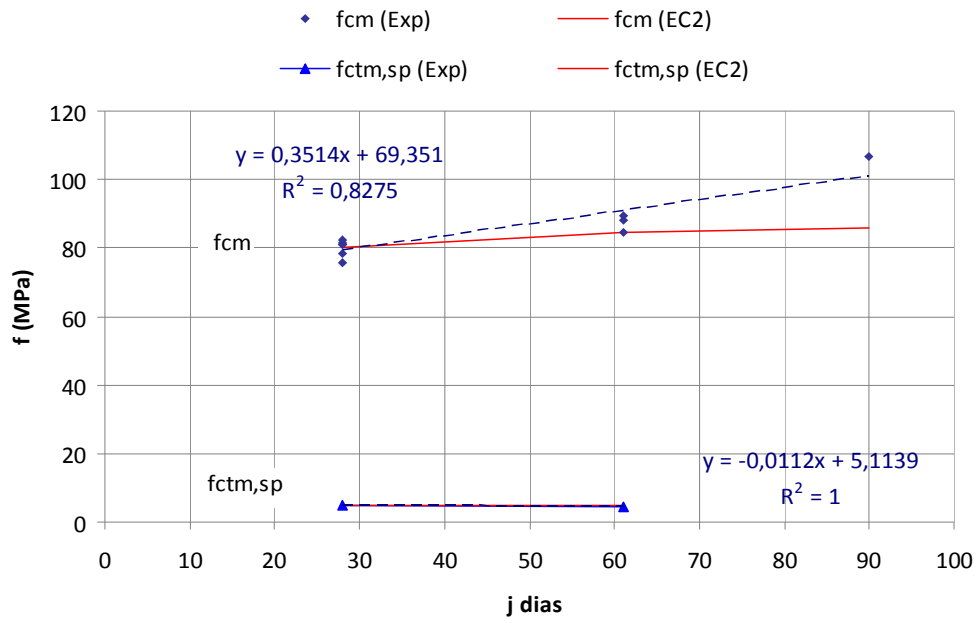


Fig. 5.1 – A evolução da resistência aos "j" dias.

A redução de volume que ocorre no betão, na ausência de tensões mecânicas e de variação de temperatura e humidade ambiente, é denominada de retracção por secagem. Quando restringidas, estas deformações conduzem ao aparecimento de padrões de tensões de tracção que costumam causar fissuração, pelo que é importante realizar a sua avaliação.

A propósito da análise da avaliação da retracção por secagem, constatou-se que, por observação dos resultados obtidos nos ensaios, um dos provetes tinha um desvio anormal relativo aos outros a partir do 15º dia. É difícil identificar a razão dessa discrepância que poderá dever-se à localização/exposição do provete na câmara de fluência e a eventuais desvios nas leituras efectuadas. Excluído esse provete, conclui-se que a extensão por retracção média do betão é de 0,276±0,006 ‰. A título de comparação, segundo Camelo (2011) na execução de barragens a EDP impõe que os valores da extensão por retracção média do betão aos 7 e 28 dias não devem exceder 0,15‰ e 0,22‰, respectivamente. Consultando o Quadro 4.15 do Capitulo 4 verifica-se que o betão em estudo satisfaz a condição aos 7 dias, mas excede moderadamente o valor aos 28 dias.

A capacidade de absorção de água do betão tem uma influência directa sobre a sua durabilidade, uma vez que esta característica determina a facilidade de entrada de agentes agressivos (cloretos, sulfatos, entre outros) no interior do betão (Ramos, 2011).

A análise das curvas de absorção de água por capilaridade até às 72h indicou a existência de dois andamentos na curva de absorção do provete com 28 dias. 61 dias depois, verificou-se que a curva passa a apresentar uma nova quebra na curva de absorção às 24 horas, instalando três andamentos na mesma. A

primeira quebra dá-se ao fim de 1 hora em ambos os provetes (primeira parte da curva) e traduz o enchimento dos poros de maiores dimensões, livremente acessíveis, designado por porosidade aberta (absorção inicial). Este facto é referido também na literatura técnica (Coutinho, 1998).

Partindo de um pressuposto de Coutinho (1998), avaliou-se o coeficiente de absorção "S" que corresponde ao gradiente das curvas de absorção nas primeiras 4 horas de ensaio. Obtiveram-se valores na ordem de $0{,}2549 \pm 1{,}690 \times 10^{-2}$ kg/m^2.h$^{-0.5}$ e de $0{,}2193 \pm 1{,}235 \times 10^{-2}$ kg/m^2.h$^{-0.5}$ para os provetes com 28 e 61 dias, respectivamente, este último menor que o primeiro o que leva a sugerir ser a absorção de água menor para betões com maior idade. A título de comparação, segundo Camelo (2011) e considerando valores medidos pela EDP em betões aplicados em barragens que demonstraram terem durabilidade adequada, é sugerido como especificação limite para coeficiente $S < 0{,}20$, para zonas medianamente exigentes. O betão com ASIC apresenta valores ligeiramente superiores a este requisito.

A nível de absorção de água por imersão à pressão atmosférica verificou-se que com a maturidade do betão ao longo do tempo a absorção de água por imersão diminuiu. Aos 61 dias de idade do betão, deu-se uma redução de cerca de 33% de massa de água comparado como valor aos 28 dias. Segundo Camelo (2011) a EDP toma como valores de referência limite para o valor da absorção de água em percentagem de 12% e 14%, consoante as estruturas se localizem em zonas de maior ou menor exigências, respectivamente. No presente trabalho foi obtido um valor médio de 10,3%, em provetes com 28 dias, o que vai ao encontro dos valores de referência da EDP.

Quanto aos ensaios de profundidade de penetração da água sob pressão realizados neste trabalho, o Quadro 5.6 reúne os valores médios e máximos observados nos provetes com 28 e 61 dia de idades. Verifica-se existir um aumento da profundidade de penetração média de cerca de 6 mm nos provetes de 61 dias comparado com os provetes aos 28 dias. Constatou-se, igualmente, que os valores máximos (picos) são da ordem de 2,5 a 3,5 vezes superiores aos valores médios.

Quadro 5.6 – Profundidades de penetração média e máximas da água sob pressão

Referência	Profundidade de penetração (mm)	
	Médio	Máximo
Provetes com 28 dias	6,5 ± 1,5	25,5 ± 7,5
Provetes com 61 dias	12,5 ± 7,5	33,0 ± 8,0

Ainda segundo o trabalho de Camelo (2011), são sugeridos os valores de referencia reportados pela Concrete Society para a penetração de água sob pressão de:

- máxima penetração de água de 35mm para estruturas de betão armado em zonas mais agressivas ou em estruturas mais susceptíveis;
- máxima penetração de água de 50 mm para estruturas de betão armado correntes;
- máxima penetração de água de 70mm para estruturas de betão sem armaduras.

Relacionado com este tema da permeabilidade, foi avaliada a permeabilidade ao oxigénio do betão com ASIC, cujo valor para um provete com 56 dias de idade foi medido de $K_{oxigénio}$ (m^2) = $0{,}17481 \times 10^{-17}$. Segundo a referência indicada por Camelo (2011) os valores limites para obras hidráulicas são: $K_{60HR} < 5 \times 10^{-17}$m^2 para zonas das estruturas não submersas e zonas com ciclos molhagem/secagem; $K_{60HR} < 10 \times 10^{-17}$m^2 para zonas das estruturas submersas. Face a estes limites, o valor obtido no betão em estudo satisfaz qualquer um dos valores declarados.

O valores da massa volúmica do betão fresco vs betão endurecido obtidos para os dois trabalhos realizados no LEMC, embora com objetivos diferentes, estão resumidos no Quadro 5.7. Tratam-se de betões com massa volúmica superior a 2750 kg/m^3 e de valores próximos entre fresco e endurecido.

Quadro 5. 7 – Análise de conformidade para o ASIC

Estudos Referência	ρ_{fresco} (kg/m^3)	$\rho_{endurecido}$ (kg/m^3)
Ramos (2011)	2890	2750
Pacheco (presente trabalho)	2867	2891

De acordo com a norma NP EN 206-1 (2007), o betão é classificado pelos valores da sua massa volúmica em três tipos distintos como se representa no Quadro 5.8. Pelo exposto anterior conclui-se que os betões com ASIC são classificados como betões pesados.

Quadro 5.8 - Classificação do betão tendo por base os valores da massa volúmica

Betão leve	Betão normal	Betão pesado
ρ (kg/m$^{3)}$	ρ (kg/m$^{3)}$	ρ (kg/m$^{3)}$
800-2000	2000 - 2600	>2600

5.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo deste capítulo, procurou-se fazer uma análise de resultados dos programas de caracterização do ASIC e de caracterização do perfil de um betão com ASIC dos quais se destacam agora as informações principais a ter presente no futuro.

O agregado ASIC foi submetido a diversos ensaios experimentais de forma a efectuar a sua caracterização geométrica, física, mecânica e química, para averiguar a sua utilização como agregado para betões de ligantes hidráulicos. Este agregado caracteriza-se como sendo um material de granulometria extensa, no entanto, denota-se uma fraca quantidade de partículas inferiores a 4 mm.

Relativamente aos índices de forma e de achatamento verifica-se, experimentalmente e visualmente, que as partículas aproximam-se da forma cúbica. Por meio dos ensaios de Los Angeles e de resistência ao esmagamento, concluiu-se que o material apresenta resistências á fragmentação e esmagamento excepcionais.

Em termos de análise química, apesar do ASIC ser de proveniência de sucata ferrosa, constatou-se que os quatro princípais requisitos químicos segundo a NP EN 1744-1 (2010) foram satisfeitos, para a escala de ensaios possiveis realizar no período de tempo disponivel para o desenvolvimento desta tese. Infelizmente, não foi possivel encontrar outros resultados químicos fiáveis, nem da empresa fornecedora do ASIC nem de outros trabalhos científicos, para se proceder a uma nálise comparativa.

O teor de sulfatos solúveis em ácido foi de 0,08%, inferior ao imposto na norma que é de 1,0% (para escórias arrefecidas ao ar). O teor de cloretos, segundo o relatório da CTVC, apresentou o valor de 0,0014%. Em termos de teor de enxofre total, igaulmente segundo o relatório da CTVC, foi detectada a alguma presença de pirrutite na amostra e o teor de enxofre total foi avaliado em 0,05%, inferior ao limite de 0,1% que condiciona a aceitabilidade do material como agregado.

O ensaio de reactividade alcalis-silica revelou que, para as condições de ensaio com o recurso a cinzas volantes (30% do ligante hidráulico) em conformidade com a composição do betão estudado, a expansão é inferior a 0,1%, obtida após catorze dias da leitura de referência. De acordo com a especificação LNEC 461 (2007) o material agregado é classificado como "agregado não reactivo – Classe I". No entanto, este resultado carece de um estudo mais dedicado e extensivo no futuro, para validar esta conclusão.

Relativamente à composição do betão, produziu-se um betão denso com ASIC. No início do trabalho, o objectivo era produzir um betão denso exclusivamente com este agregado. Todavia, a deficiência em partículas finas fez com que se tivesse que recorrer a uma areia fina natural.

Verificou-se no momento de amassadura que o agregado absorveu bastante água. No entanto, este facto não foi obstáculo para a sua trabalhabilidade e compactabilidade, tal como revelou o ensaio de compactabilidade cujos resultados se encontram dentro dos parâmetros aconselhados.

Foi efectuado a determinação do teor em ar e da sua respectiva massa volúmica, obtendo-se uma massa volúmica superior a um betão corrente e um teor em ar próximo do seu limite.

Na avaliação do comportamento do betão endurecido foram efectuados ensaios à compressão, flexão, compressão diametral, absorção de água por capilaridade, absorção de água por imersão à pressão atmosférica, profundidade da água sob pressão e a sua respectiva massa volúmica, entre outros.

Tal como esperado, o valor da massa volúmica na ordem de 2870 kg/m^3 revela que este betão enquadra-se no campo dos betões densos, reforçando os campos possíveis de aplicação referidos no Capitulo 2.

Foram obtidos experimentalmente, quando possível, valores aos 28, 61 e 90 dias para a resistência à compressão ($f_{cm,}$), a resistência à tracção por compressão diametral ($f_{ctm,sp}$) e a resistência à tracção por flexão ($f_{ctm,fl}$). A evolução de algumas destas propriedades foi comparada com os valores estimados por expressões analíticas propostas no EC2 (NP EN 1992-1-1, 2010). Em termos gerais, concluiu-se que as expressões do EC2 traduzem a evolução no tempo com muito boa aproximação para a resistência à tracção por compressão diametral e por defeito para a resistência à compressão.

Pelo facto de se ter admitido que o betão estudado poderá pertencer à classe de resistência C55/67, foi possível estimar os valores mínimos de algumas das suas propriedades úteis para projecto pelo Eurocódigo 2 (EC2), nomeadamente, os valores da resistência à compressão ($f^{cub}_{cm,28}$, $f^{cub}_{ck,28}$), a resistência à tracção por compressão diametral ($f_{ctm,sp,28}$), a resistência à tracção por flexão ($f_{ctm,fl,28}$), a resistência à tracção simples ($f_{ctm,,28}$) e o módulo de elasticidade do betão.

Foram avaliadas curvas de absorção de água por capilaridade até às 72h para provete com 28 e 61 dias, constatando-se que a primeira quebra dá-se ao fim de 1 hora, traduzindo o enchimento dos poros de maiores dimensões, livremente acessíveis, designado por porosidade aberta (absorção inicial).

A nível de absorção de água por imersão à pressão atmosférica, verificou-se que com a maturidade do betão ao longo do tempo esta propriedade diminuiu.

Nos ensaios de profundidade de penetração da água sob pressão verificou-se existir um aumento da profundidade de penetração média de cerca de 6 mm nos provetes de 61 dias comparado com os provetes aos 28 dias. Constatou-se, igualmente, que os valores máximos (picos) são da ordem de 2,5 a 3,5 vezes superiores aos valores médios.

Apesar de escassos na literatura, alguns dos parâmetros de referencia relativos à retracção por secagem, absorção de água por capilaridade, absorção de água por imersão à pressão atmosférica, profundidade de penetração da água sob pressão e permeabilidade ao oxigénio foram comparados com limites divulgados numa publicação de Camelo a respeito da experiencia da EDP na construção de barragens.

6
CONCLUSÕES

6.1. SÍNTESE

O estudo desenvolvido na presente dissertação tem como principal objectivo o estudo da viabilidade do uso de escórias de aciaria em betões de ligantes hidráulicos.

Uma vez que, as preocupações ambientais têm vindo a aumentar ao longo das gerações, provocando uma consciencialização sobre a extracção de recursos naturais, novas políticas ambientais e até mesmo novas soluções tem vindo a ganhar mais intensidade na nossa sociedade. Estas preocupações ambientais aliado á crise financeira mundial foi o ponto de partida para este estudo.

Através da legislação em vigor, o agregado ASIC foi analisado de forma a deduzir as suas principais aplicações.

Deste modo, a análise de validação deste agregado teve como base a interpretação da norma NP EN 12620 (2010) e da especificação LNEC E 467 (2006).

Procedeu-se ao levantamento do processo de fabrico deste agregado de modo a compreender a origem do material em estudo, e verificou-se que apesar de ser um subproduto da indústria do aço, este requer um tratamento antes de adquirir a sua valorização comercial.

Por ser a indústria do aço uma grande geradora de resíduos, uma solução sustentável para poupar os recursos naturais passa por recuperar e utilizar o subproduto industrial em vez de deposita-los em aterros e, de certa forma, contribuir para evitar a poluição a nível do subsolo.

Sendo assim, o ASIC é um material alvo de grandes estudos com um vasto campo de aplicações e de grande potencial.

A principal empresa na introdução deste agregado no nosso mercado é a HARSCO. Ela tem vindo a apoiar diversos os estudos e a investigação no conhecimento mais rigoroso e técnico das potencialidades do ASIC.

O betão com incorporação de ASIC foi caracterizado com o objectivo de ser um betão denso. Foram avaliadas as principais propriedades definidas nas especificações da norma portuguesa NP EN 206-1 (2007) que estabelece, entre outros, os requisitos de classificação do betão, os requisitos de durabilidade, as classes de resistência e os requisitos de cura (NP EN 13640-1).

6.2. CONSIDERAÇÕES GERAIS

O mundo da construção civil é o sector que mais materiais naturais consome e a que mais resíduos produzem.

Foi com base na ideia de introduzir um agregado alternativo ao natural, de forma a tornar a produção de betão mais sustentável e económica, que o estudo do ASIC foi efectuado.

Ao longo deste trabalho, procurou-se realizar um estudo de caracterização do ASIC e outro de caracterização do perfil de um betão com ASIC, dos quais, se destacam neste capítulo de conclusões as informações principais a ter presente no futuro.

Através dos ensaios de caracterização geométrica, física, mecânica e química, conclui-se que o ASIC é um agregado bem graduado de resistência e durezas bastante satisfatórias e quimicamente estável. Este agregado traduz-se num agregado denso, com valores de absorção de água e massa volúmica superiores aos agregados correntes. O valor da massa volúmica na ordem de 2870 kg/m^3 revela que este betão enquadra-se no campo dos betões densos, possível aplicar em campos iguais aos referidos no Capitulo 2.

Foi produzido um betão com o intuito de na sua composição contivesse a máxima quantidade possível de ASIC, embora a pouca quantidade de partículas finas deste material fez com que houvesse recurso a uma areia fina, para ter alguma trabalhabilidade no betão.

A partir dos ensaios de caracterização do betão endurecido verificou-se que as suas resistências mecânicas são bastante satisfatórias bem como as suas características físicas.

Foram obtidos experimentalmente valores aos 28, 61 e 90 dias para a resistência à compressão ($f_{cm,}$), a resistência à tracção por compressão diametral ($f_{ctm,sp}$) e a resistência à tracção por flexão ($f_{ctm,fl}$). A evolução de algumas destas propriedades foi comparada com os valores estimados por expressões analíticas propostas no EC2 (NP EN 1992-1-1, 2010). Em termos gerais, concluiu-se que as expressões do EC2 traduzem a evolução no tempo com muito boa aproximação para a resistência à tracção por compressão diametral e por defeito para a resistência à compressão.

Em termos de análise química, apesar do ASIC ser de proveniência de sucata ferrosa, constatou-se que os quatro princípais requisitos químicos segundo a NP EN 1744-1 (2010) foram satisfeitos.

O teor de sulfatos solúveis em ácido foi de 0,08%, inferior ao imposto na norma que é de 1,0% (para escórias arrefecidas ao ar). O teor de cloretos, segundo o relatório da CTVC, apresentou o valor de 0,0014%. Em termos de teor de enxofre total, igaulmente segundo o relatório da CTVC, foi detectada a alguma presença de pirrutite na amostra e o teor de enxofre total foi avaliado em 0,05%, inferior ao limite de 0,1% que condiciona a aceitabilidade do material como agregado.

O ensaio de reactividade alcalis-silica revelou que, para as condições de ensaio com o recurso a cinzas volantes (30% do ligante hidráulico) em conformidade com a composição do betão estudado, a expansão é inferior a 0,1%, obtida após catorze dias da leitura de referência. De acordo com a especificação LNEC 461 (2007) o material agregado é classificado como "agregado não reactivo – Classe I". No entanto, este resultado carece de um estudo mais dedicado e extensivo no futuro, para validar esta conclusão.

Apesar de escassos na literatura, alguns dos parâmetros de referencia relativos à retracção por secagem, absorção de água por capilaridade, absorção de água por imersão à pressão atmosférica, profundidade de penetração da água sob pressão e permeabilidade ao oxigénio foram comparados com limites divulgados numa publicação de Camelo a respeito da experiencia da EDP na construção de barragens. Em termos gerais, o betão com ASIC superou os critérios exigidos pela EDP.

Em termos finais, face ao estudo desenvolvido, à informação recolhida e ás limitações deste trabalho, tudo leva a indicar que o ASIC possa ser usado como uma alternativa aos agregados naturais na produção de betão densos de ligantes hidráulicos.

6.3. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Perante os resultados obtidos neste estudo, apontando para a hipótese de viabilizar-se o ASIC como um agregado, é importante mencionar que as conclusões enumeradas espelham as condicionantes em que os dois programas experimentais foram realizados e o perfil da composição de betão analisado.

Contudo, este estudo deve ser mais abrangente, incentivar estudos mais detalhados, ter especial atenção aos potenciais casos de aplicação na construção civil, sobretudo ter em conta factores como o local de implementação da obra e possíveis reacções adversas do ambiente que possam não ter sido avaliadas neste estudo.

A avaliação da reacção alcális-silica é outro ponto que merece maior atenção, através da realização de ensaios a longo prazo e procurando usar exclusivamente cimento como ligante hidráulico de forma a avaliar a verdadeira reactividade do agregado (de acordo com a norma).

Mercê da limitação do tempo associado aos trabalhos de MIEC, propõe-se que devam ser realizadas novas amassaduras com a mesma composição de betão mas com uma campanha de ensaios mais alargada no tempo e mais incisiva nos aspectos menos detalhados na presente dissertação, de modo a obter-se mais confiança sobre as propriedades do betão com ASIC.

Estudar com mais detalhe o problema da durabilidade de um betão com incorporação do ASIC. Analisar a resistência aos sulfatos.

Explorar outras composições do betão com diferentes proporções granulométricas do ASIC de modo a potenciar o uso em construções de betão armado correntes.

Procurar ajustar critérios de dimensionamento e de procedimentos de construção em concordância com os regulamentos específicos dos materiais e as normas de segurança da construção.

Como etapa final, procurar viabilidade deste agregado em aplicações concretas na construção civil de modo a observar a evolução da estrutura ao longo do tempo, a níveis de durabilidade, de desempenho e de resistência mecânicas. Por exemplo, concretiza a execução de Antiferes e expor as peças ao seu meio ambiente natural de modo a obter-se resposta ao comportamento do betão a curto e longo prazos.

7
BIBLIOGRAFIA

REFERÊNCIAS

AENOR (2007). *Cinzas volantes – Certificado de conformidade CE*. Doc. 0099/CPD/A95/0002, Janeiro.

Branco, C., V., T., F. (2008). *Caracterização de misturas com o uso de escórias de aciaria como agregados.* Tese de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Camelo, A. (2011).*Durabilidade e vida útil das estruturas hidráulicas de betão e de betão armado.* Artigo das 1ª jornadas de materiais de construção, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

CIMPOR (2011). *Ficha técnica do Cimento CEM I 42,5 R*. CIMPOR IND – Controlo estatístico, Junho.

Coutinho, A., S. (1988). *Fabrico e propriedades do betão.* Volume 1, LNEC, 1988.

Coutinho, M. J. A. R. S. (1998). *Melhoria da durabilidade dos betões por tratamento da cofragem.* Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

Ferreira, S. (2010). *Comportamento mecânico e ambiental de materiais granulares. Aplicação às escórias de aciaria Nacionais.* Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães.

HARSCO (2011). A.S.I.C. *Agregado Siderúrgico Inerte para Construção.* Newsletter de HARSCO Metals CTS,volume1,nº 1, janeiro.

Klein, C ; Dutrow, B. (2000). The Manual of Mineral Science. John Wiley & Sons Inc. 23rd Edition, New York.

Machado, A. (2000). *Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias.* Dept. Engª Construção Civil da Universidade de São Paulo, Tese de Mestrado em Engenharia, São Paulo.

Mesuero, A., B., Molin, D., C., C., Vilela, A., C., F. (2004). *Estabilização e viabilidade técnica da utilização de escórias de aciaria eléctrica.* Universidade Federal do Rio Grande Rio do Sul, Porto Alegre, Brasil.

Ramos, T. (2011). *Estudo da viabilidade da substituição do agregado natural por agregado siderúrgico inerte para construção (asic) em betão.* Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

Rocha, P.B. (2011), *Estudo da viabilidade da reutilização da escória do refino secundário da escoria de forno.* Tese de mestrado em engenharia civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Roque, A., J., Gomes Correira, A., Fortunato, E., Prado de Santayana, F., Castro, F., Ferreira, S. Trigo. (2006). *A geotecnia da valorização de agregados siderúrgicos inertes reciclados.* Um projecto nacional Comunicações do 12º Encontro Nacional de saneamento Básico, 16p.24 a 27 de Outubro, Cascais.

SAMARIS (2006). *Sustaineble and Advanced Materials for InfraStrutures. Delivarable D29: Guide on Techniques for recycling in paviment strutures.* European Comission 5th Framework Program.

SN MAIA (2009). *Certificado de controlo de produção na fábrica*. 1328-CPD-0122, Certif – Associação para a certificação, Fevereiro.

TECHNIFLOW 91 (2010). *TECHNIFLOW 91- Superplasticizer and concrete plasticizer*. Ficha técnica do adjuvante, Julho.

Vanderley. M.J. (2002).*A construção e o meio ambiente*. Universidade de São Paulo, Brasil.

ASTM C 1260 – 07 (2008) *Standart test method for potencial alcali reactivity of agregates (Mortar-bar method)*. ASTM, United States.

LNEC E 471 (2006) *Guia para a utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos.* Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa

LNEC E 477 (2007) *Guia para especialização do betão de ligantes hidráulicos conforme com a norma NP EN 206 - 1.* Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

LNEC E 467 (2006) *Guia pra a utilização de agregados em betões de ligantes hidráulicos.* Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

LNEC E 393 (1993) *Determinação da absorção de água por capilaridade.* Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

LNEC E 373 (1993) *Determinação de absorção de água por imersão. Ensaio à pressão atmosférica.* Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

LNEC E 398 (1993) *Determinação da retracção e da expansão.* Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

LNEC E 237 (1970) *Agregados. Ensaio de desgaste pela máquina de Los Angeles.* Especificação do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

NP 1039 (1974) *Determinação da resistência ao esmagamento.* IGPAI, Lisboa.

NP EN 12620 (2010) *Agregados para betão.* IPQ, Julho.

NP EN 1744 – 1 (2000) *Ensaios para determinação das propriedades químicas dos agregados, Parte 1:Análise química.* IPQ, Agosto.

NP EN 932 – 2 (2002) *Ensaios das propriedades gerais dos agregados, Parte 2: Método de redução de amostras laboratoriais.* IPQ, Outubro.

NP EN 933 – 1 (2000) *Ensaios das propriedades geométricas dos agregados, Parte 1: Análise granulométrica – Método de peneiração.* IPQ, Julho.

NP EN 933 – 3 (2002) *Ensaios das propriedades geométricas dos agregados, Parte 3:Determinação da forma das partículas – Índice de achatamento.* IPQ, Julho.

NP EN 933 – 4 (2002) *Ensaios das propriedades geométricas dos agregados, Parte 4:Determinação da forma das partículas – Índice de forma.* IPQ, Outubro.

NP EN 1097 – 2 (2002) *Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados, Parte 2: Método para a determinação da resistência à fragmentação*. IPQ, Julho.

NP EN 1097 – 3 (2002) *Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados, Parte 3: Método para a determinação da baridade e do volume de vazios*. IPQ, Julho.

NP EN 1097 – 4 (2003) *Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados, Parte 4: Método para a determinação da massa volúmica e da absorção de água*. IPQ, Dezembro.

NP EN 206 – 1 (2007) *Betão, Parte 1:Especificação, desempenho, produção e conformidade.* IPQ, Junho.

NP EN 12350 – 6 (2002) *Ensaios do betão fresco, Parte 6: Massa volúmica*. IPQ, Setembro.

NP EN 12350 – 4 (2002) *Ensaios do betão fresco, Parte 4: Determinação do grau de compactabilidade*. IPQ, Setembro.

NP EN 12350 – 7 (2002) *Ensaios do betão fresco, Parte 7: Determinação do teor de ar. Método pressiométricos*. IPQ, Setembro.

NP EN 12390 – 2 (2003) *Ensaios do betão endurecido, Parte 2: Execução e cura dos provetes para ensaios de resistência mecânica*. IPQ, Novembro.

NP EN 12390 – 3 (2003) *Ensaios do betão endurecido, Parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio*. IPQ, Novembro.

NP EN 12390 – 5 (2003) *Ensaios do betão endurecido, Parte 5: Resistência à flexão dos provetes*. IPQ, Novembro.

NP EN 12390 – 6 (2003) *Ensaios do betão endurecido, Parte 6: Resistência à tracção por compressão de provetes*. IPQ, Novembro

NP EN 12390 – 7 (2003) *Ensaios do betão endurecido, Parte 7: Massa volúmica do betão endurecido*. IPQ, Novembro.

NP EN 12390 – 8 (2003) *Ensaios do betão endurecido, Parte 8: Profundidade de penetração da água sob pressão*. IPQ, Novembro.

NP EN 13242 (2005) *Agregados para materiais não ligados ou tratados com ligantes hidráulicos utilizados em trabalhos de engenharia civil e na construção rodoviária*. IPQ, Agosto.

(EuroSlag, 2011). The European Slag Association

(http://www.euroslag.org/media/Position_paper_Jan_2006.pdf).2011

(Instituto Aço Brasil, 2011). Instituto Aço Brasil.

(http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/aco/siderurgia-no-mundo--introducao.asp).2011

(UEPG, 2009). UPEG, The European Aggreates Industry. Anual statistics.

(http://www.uepg.eu/index.php?pid=143) 2011.

(USGS, 2012). United States Geological Survey

(www.usgs.gov).

ANEXOS

ANEXO A

Ficha técnica do Cimento CEM I 42,5 R

CIMPOR IND

Emitido por: ATC - Área Técnico-Comercial Edição de: 2011/06/14 14:32

CONTROLO ESTATÍSTICO

Entidade de Proveniência: C.P. Souselas
Produto: CEM I 42,5 R
Variante: Todas
Entidade de Colheita: C.P. Souselas
Natureza de Colheita:
Grupo de Naturezas de Colheita: AUT - Conform. com Norma

Ensaios	Unidade	Entidade	Método	ESTATÍSTICAS de 2010/05/01 a 2011/04/30			Estatística mensal dos três últimos meses					
				N	Média	Desvio Padrão	Fev/11 Média	Fev/11 D.P.	Mar/11 Média	Mar/11 D.P.	Abr/11 Média	Abr/11 D.P.
Perda ao Fogo ≤ 5,0	%	CPS		106	1,54	0,45	1,66 (8)	0,26	1,82 (10)	0,38	1,76 (8)	0,43
Óxido de Silício	%	CPS		106	19,31	0,28	19,30 (8)	0,16	19,13 (10)	0,38	19,28 (8)	0,11
Óxido de Alumínio	%	CPS		106	4,80	0,11	4,75 (8)	0,06	4,76 (10)	0,08	4,94 (8)	0,13
Óxido de Ferro	%	CPS		106	2,80	0,08	2,78 (8)	0,02	2,78 (10)	0,07	2,84 (8)	0,03
Óxido de Cálcio Total	%	CPS		106	63,33	0,33	63,46 (8)	0,18	63,19 (10)	0,50	62,90 (8)	0,31
Óxido de Magnésio	%	CPS		106	2,43	0,07	2,42 (8)	0,02	2,43 (10)	0,08	2,41 (8)	0,04
Teor de Sulfatos (SO3) ≤ 4,0	%	CPS		106	3,21	0,16	3,16 (8)	0,13	3,32 (10)	0,13	3,02 (8)	0,15
Teor de Cloretos ≤ 0,10	%	CPS		31	0,02	0,00	0,02 (3)	0,01	0,02 (4)	0,00	0,02 (1)	*
Cal Livre	%	CPS		106	2,05	0,38	1,76 (8)	0,18	1,67 (10)	0,30	1,98 (8)	0,37
Resíduo Insolúvel ≤ 5,0	%	CPS		106	0,95	0,27	0,73 (8)	0,13	0,90 (10)	0,14	1,20 (8)	0,29
Massa Volúmica	g/cm3	CPS		106	3,15	0,02	3,15 (8)	0,01	3,14 (10)	0,01	3,15 (8)	0,03
Sup. Esp. Blaine	cm2/g	CPS		106	3253	157	3214 (8)	131	3290 (10)	167	3289 (8)	134
Granulometria 45 µm	%	CPS		106	9,5	1,5	10,0 (8)	1,4	9,9 (10)	1,1	9,4 (8)	0,9
Água de Pasta	%	CPS		106	29,0	0,4	28,7 (8)	0,3	29,0 (10)	0,2	29,2 (8)	0,7
Início de Presa ≥ 60	min	CPS		106	175	12	181 (8)	11	181 (10)	8	176 (8)	9
Fim de Presa	min	CPS		106	225	32	230 (8)	13	186 (10)	87	231 (8)	15
Expansibilidade ≤ 10	mm	CPS		106	1,3	0,4	1,1 (8)	0,4	1,2 (10)	0,2	1,2 (8)	0,3
Res.Comp.2 dias ≥ 20,0	MPa	CPS		106	34,6	1,8	35,6 (8)	1,2	36,1 (10)	0,9	33,9 (8)	1,1
Res.Comp.7 dias	MPa	CPS		106	44,8	1,7	45,8 (8)	1,1	46,0 (10)	1,4	42,7 (8)	1,3
Res.Comp.28dias ≥42,5 e ≤62,5	MPa	CPS		106	52,8	1,7	53,6 (8)	0,8	53,6 (10)	1,5	49,9 (8)	1,1

(n) Número de resultados para as estatísticas mensais

* Número de resultados insuficiente para cálculos estatísticos

ANEXO B

Cinzas volantes – Certificado de conformidade CE

AENOR Asociación Española de Normalización y Certificación

CERTIFICADO DE CONFORMIDAD CE

EC Certificate of conformity

0099/CPD/A95/0003

En virtud del Real Decreto 1630/1992, de 29 de diciembre, modificado por el Real Decreto 1328/1995, de 28 de julio, por el que se dictan disposiciones para la aplicación de la directiva 89/106/CEE del Consejo de las Comunidades Europeas, de 21 de diciembre de 1988, relativa a la aproximación de las disposiciones legales, reglamentarias y administrativas de los Estados Miembros sobre los productos de construcción, se ha verificado que el

In application of the Royal Decree 1630/1992 of 29 December 1992, as amended by Royal Decree 1328/1995 of 28 July 1995, relative to the application of the directive 89/106/EEC of the Council of European Communities of 21 December 1988 on the approximation of laws, regulations and administrative provisions of the Member States relating to the construction products (Construction Products Directive), it has been stated that the

Producto: **CENIZA VOLANTE**
Product ***FLY ASH***

Referencias: / References:

FINURA *FINENESS*		PERDIDA POR CALCINACIÓN *LOSS ON IGNITION*	DENISDAD PARTÍCULAS *PARTICLE DENSITY*
(Categoría/Category)	(Valor declarado/Declared value %)	(Categoría/ Category)	(Valor declarado/ Declared value kg/m³)
N	**15**	**B**	**2.420**

Norma: **UNE-EN 450-1:2006**
Standard

Suministrado por: **ENDESA GENERACION, S.A.**
Supplied by **AV DE LA BORBOLLA, 5 - 41004 SEVILLA (ESPAÑA)**

Fabricado en: **UPT COMPOSTILLA - CR DEL PANTANO S/N**
Manufactured in **24492 CUBILLOS DEL SIL (León - ESPAÑA)**

se somete por el fabricante a un control de producción en fábrica y al ensayo posterior de las muestras tomadas en la fábrica de acuerdo con un plan de ensayo preestablecido y que el organismo notificado AENOR ha llevado a cabo el ensayo de tipo inicial del producto, la inspección inicial de la fábrica y del control de producción en fábrica y que realiza el seguimiento periódico, la evaluación y la aprobación del control de producción en fábrica y el ensayo de las muestras tomadas en la fábrica. Este certificado indica que se han aplicado todas las disposiciones relativas a la evaluación de la conformidad descritas en el Anexo ZA de la norma mencionada arriba y que el producto cumple todos los requisitos mínimos. Este documento faculta al fabricante para fijar el marcado CE. Este certificado es válido salvo anulación o retirada por AENOR.

is submitted by the manufacturer to a factory production control and to the further testing of samples taken at the factory in accordance with a prescribed test plan and that the notified body AENOR has performed the initial type-testing of the product, the initial inspection of the factory and of the factory production control and performs the periodic surveillance, assessment and approval of the factory production control and an audit-testing of samples taken at the factory. This certificate attests that all provisions concerning the attestation of conformity described in Annex ZA of the above mentioned standard were applied and that the product fulfils all the minimum prescribed requirements. This document allows the manufacturer to affix the CE marking. This Certificate remains valid unless cancelled or withdrawn by AENOR

Fecha de concesión: **2007-01-30**
Date of first issue

Fecha de emisión: **2007-01-30**
Date of issue

AENOR Asociación Española de Normalización y Certificación
Ramón NAZ PAJARES
El Director General/General Manager

No está autorizada la reproducción parcial de este documento. *The partial reproduction of this document is not permitted.*

AENOR – Génova, 6 – 28004 MADRID – Teléfono 914 32 60 00 – Telefax 913 10 46 83

ANEXO C

Ficha técnica do adjuvante

MC-TechniFlow 91

Superplasticizer and Concrete Plasticizer

Product Properties

- Application, spreading and compacting of concrete is made easier
- Good homogeneity of the concrete due to the chemical-physical effect
- Intensive dispersion of cement paste
- Decreases the internal frictional forces within the concrete
- Free of corrosion-promoting agents
- Cost effective dosage
- Long-lasting plasticizing effect
- Slight retarding effect

Areas of Application

- Ready mixed and job-mixed concrete

Application Notes

MC-TechniFlow 91 is a concentrated superplasticizer and concrete plasticizer based on a new combination of raw material. It is designed especially for the production of ready-mixed concrete and can be used in combination with all standard cement types.

MC-TechniFlow 91 reduces the surface tension of the water. As well as having an intense dispersing effect, this results in strong plastification of the concrete, even if the amounts added are small. The aggregation of cement particles is reduced. The cement is better wetted and finely broken up. This creates easily workable concrete which requires little compaction.

Depending on the chosen type of cement, as well as on the temperature and weather conditions, there might be a retarding side effect. This can be determined with a suitability test.

Without increasing water content, it is possible to enhance the consistency by several consistency classes up to F6.

MC-TechniFlow 91 can be used in combination with other MC admixtures, please ask our concrete technology-consulting service for further information.

MC-TechniFlow 91 can be added on site.

MC-TechniFlow 91 is added to the concrete during mixing. It is most effective when added after the additional water. It is also possible to apply it with the added water. The mixing time should be long enough to allow the admixture to unfold its plasticizing effect during mixing.

Storage tanks should be cleaned regularly, to prevent the formation of sediment from inert suspended particles.

Please note the "General Information on the Use of Concrete Admixtures".

MC

Technical Data for MC-TechniFlow 91

Characteristic	Unit	Value	Comments
Density	kg/dm³	approx. 1.10	
Recommended Dosage	g	2 - 30	per kg of cement
Maximum Chloride Content	%	< 0.10	per weight
Maximum Alkali Content	%	< 3.0	per weight

Product characteristics for MC-TechniFlow 91

Type of Admixture	superplasticizer EN 934-2: T 3.1/3.2 (plasticizer EN 934-2: T 2)
Name of Admixture	MC-TechniFlow 91
Colour	brown
Consistency	liquid
Internal Production Supervision in accordance with DIN EN ISO 9001 / DIN EN 934-2/6	
Certificate or Conformity	0754-CPD-02-1065.2
Notified Authority	MPA, Karlsruhe
Colour Code	yellow/grey
Form of Delivery	230 kg barrels 1,000 kg containers tank trucks

Note: The information on this data sheet is based on our experiences and correct to the best of our knowledge. It is, however, not binding. It has to be adjusted to the individual structure, application purpose and especially to local conditions. Our data relate to the accepted engineering rules, which have to be observed during application. This provided we are liable for the correctness of the data within the scope of our terms and conditions of sale-delivery-and-service. Recommendations of our employees which differ from the data contained in our information sheets are only binding if given in written form. The accepted engineering rules must be observed at all times.

Edition 04/10. Some technical changes have been made to this print medium. Older editions are invalid and may not be used anymore. If a technically revised new edition is issued, this edition becomes invalid.

página: 1/5

Ficha de dados de segurança

Em conformidade com 1907/2006/CE, Artigo 31.º

data da impressão 02.08.2010 Revisão: 12.07.2010

1 Identificação da substância/preparação e da sociedade/empresa

· **Identificação da preparação**

· **Nome comercial:** MC-TechnlFlow 91

· **Utilização da substância / da preparação:** Aditivo de betão/argamassa

· **Fabricante/fornecedor:** MC-Bauchemie Portugal, LDA
Estrada Nacional 114, KM 2,3
Foros de Salvaterra 2120.000

Tel.: +351 263 509 080

· **Entidade para obtenção de informações adicionais:** Departamento de segurança do produto.
msds@mc-bauchemie.com

· **Informação em caso de necessidade:** Tel.: +351 918 139 095

2 Identificação dos perigos

· **designação dos riscos:** Não aplicável.

· **Avisos especiais sobre os riscos para o homem e o ambiente:** O produto não deve estar obrigatoriamente identificado com base no método de avaliação da "Directiva geral de classificação para preparações da CE" na última versão em vigor.

· **sistema de classificação:** A classificação está de acordo com as listas publicadas pela União Europeia mas foi completada com dados da literatura especializada bem como com informações dos fornecedores das matérias-primas.

· **Elementos de rotulagem do GHS:** Ficha de segurança fornecida a pedido.

3 Composição/informação sobre os componentes

· **Caracterização química**

· **Descrição:** Mistura das seguintes substâncias com aditivos não perigosos.

· **Substâncias perigosas:** não aplicável

· **avisos adicionais:** O texto das indicações de perigo aqui incluído poderá ser consultado no capítulo 16.

4 Primeiros socorros

· **indicações gerais:** Não são necessárias medidas especiais.

· **depois da inalação:** Entrada de ar fresco; em caso de queixas consultar o médico.

· **depois do contacto com a pele:** Em geral o produto não é irritante para a pele.

· **depois do contacto com os olhos:** Enxaguar os olhos durante alguns minutos sob água corrente, mantendo as pálpebras abertas.

(continuação na página 2)

Ficha de dados de segurança
Em conformidade com 1907/2006/CE, Artigo 31.º

data de impressão 02.08.2010 Revisão: 12.07.2010

Nome comercial: MC-TechniFlow 91

(continuação da página 1)

· **depois de engolir:** Se os sintomas persistirem, consultar o médico.

6 Medidas de combate a incêndios

· **Meios adequados de extinção:** CO2, pó extintor ou jacto de água. Um incêndio de grandes dimensões deve ser combatido com jacto de água ou espuma resistente ao álcool.

· **equipamento especial de protecção:** Não são necessárias medidas especiais.

6 Medidas a tomar em caso de fugas acidentais

· **Precauções individuais:** Não necessário.
· **Precauções ambientais:** Diluir em bastante água.
· **Métodos de limpeza:** Recolher com produtos que absorvam líquidos (areia, saibros, absorventes universais, serradura).
· **avisos adicionais:** Não são libertadas substâncias perigosas.

7 Manuseamento e armazenagem

· **Manuseamento:**
· **Precauções para um manuseamento seguro:** Não são necessárias medidas especiais.
· **Precauções para prevenir incêndios e explosões:** Não são necessárias medidas especiais.

· **Armazenagem:**
· **Requisitos para espaços ou contentores para armazenagem:** Sem requisitos especiais.
· **Avisos para armazenagem conjunta:** não necessário
· **Outros avisos sobre as condições de armazenagem:** nenhuns
· **Classe de armazenagem:** 10

8 Controlo da exposição/protecção pessoal

· **Indicações adicionais para concepção de instalações técnicas:** Não existem outras informações, ver ponto 7.

· **Componentes cujo valor do limite de exposição no local de trabalho deve ser monitorizado:** O produto não contém quantidades relevantes de substâncias cujo valor limite relacionado no local de trabalho tenha que ser monitorizado.
· **Indicações adicionais:** Foram utilizadas como base as listas válidas à data da elaboração.

(continuação na página 3)

página: 3/5

Ficha de dados de segurança
Em conformidade com 1907/2006/CE, Artigo 31.º

data da impressão 02.08.2010 Revisão: 12.07.2010

Nome comercial: MC-TechnilFlow 91

(continuação da página 2)

· Equipamento de protecção individual:	
· Medidas gerais de protecção e higiene:	Devem ser respeitadas as medidas de prevenção habituais para o manuseamento de produtos químicos.
· Protecção respiratória:	Não necessário.
· protecção das maos:	Não necessário.
· Material das luvas	n.n.
· Tempo de penetração no material das luvas	-
· protecção dos olhos:	Não necessário.

9 Propriedades físicas e químicas

· Informações gerais	
Forma:	líquido
Cor:	Castanho-escuro
Odor:	característico
· Mudança do estado:	
Ponto / Intervalo de fusão:	< 0°C
Ponto / Intervalo de ebulição:	100°C
· Ponto de inflamação:	não aplicável
· Auto-inflamabilidade:	O produto não é auto-inflamável.
· Perigos de explosão:	O produto não corre o risco d explosao
· Pressão de vapor em 20°C:	23 hPa
· Densidade em 20°C:	1,1 g/cm³
· Solubilidade em / miscibilidade com água:	completamente misturável

10 Estabilidade e reactividade

· Decomposição térmica / condições a evitar:	Não existe decomposição em caso de emprego correcto das regras.
· Reacções perigosas	Não se conhecem reacçoes perigosas.
· Produtos de decomposição perigosos:	Não se conhecem produtos de decomposição perigosos.

11 Informação toxicológica

· Toxicidade aguda:	
· Efeito de irritabilidade primário:	
· sobre a pele:	Não irritante.
· sobre os olhos:	nenhum efeito excitante
· sensibilização:	não é conhecida um efeito estimulante

(continuação na página 4)

Ficha de dados de segurança
Em conformidade com 1907/2006/CE, Artigo 31.º

data da impressão 02.08.2010 Revisão: 12.07.2010

Nome comercial: MC-TechniFlow 91

(continuação da página 3)

· **avisos adicionais de toxicologia:** O produto não necessita de estar obrigatoriamente identificado com base no método de avaliação da "Directiva geral de classificação para preparações da CE" na última versão em vigor Se utilizado correctamente e apenas para o fim a que se destina, o produto não causa, segundo a nossa experiência e conhecimentos, efeitos nocivos para a saúde.

12 Informação ecológica

· **Indicações gerais:** Não deixar chegar substâncias concentradas, ou seja quantidades grandes, às águas subterrâneas, aos cursos de água ou à canalização.

13 Considerações relativas à eliminação

· **Produto**
· **recomendação:** Pequenas quantidades podem ser eliminadas juntamente com o lixo doméstico.

· **Embalagens contaminadas:**
· **recomendação:** Eliminação residual conforme o regulamento dos serviços públicos.

· **meio de limpeza recomendado:** Água, eventualmente com adição de produtos de limpeza

14 Informações relativas ao transporte

· **Transporte por terra ADR/RID (transfronteiriço):**
· **Classe ADR/RID:** -

· **Transporte marítimo IMDG:**
· **Classe IMDG:** -
· **Poluente das águas:** Não

· **Transporte aéreo ICAO-TI e IATA-DGR:**
· **Classe ICAO/IATA:** -

· **UN "Model Regulation":** -

· **Transporte/outras informações:** Não constitui material perigoso em conformidade com os regulamentos acima indicados.

15 Informação sobre regulamentação

· **Rótulo de acordo com as disposições comunitárias:** Devem ser respeitadas as medidas de precaução habitualmente necessárias para a manipulação de produtos químicos.

(continuação na página 5)

Ficha de dados de segurança
Em conformidade com 1907/2006/CE, Artigo 31.º

data da impressão 02.08.2010 Revisão: 12.07.2010

Nome comercial: MC-TechnoFlow 91

(continuação da página 4)

O produto está identificado e classificado de acordo com as directivas comunitárias e com as leis nacionais aplicáveis.
Não é obrigatório identificar o produto de acordo com as directivas comunitárias e com a lei sobre substâncias perigosas.

· **Rotulagem especifica de certas preparações:** Ficha de segurança fornecida a pedido de utilizadores profissionais.

* 16 Outras informações

As informações fornecidas baseiam-se no estado actual dos nossos conhecimentos, embora não representem uma garantia das propriedades do produto e não fundamentam uma relação contratual.

· **Departamento que elaborou a ficha de segurança:** Technische Abteilung
· **Contacto** Mr. Luis Antunes
· **Abreviaturas e acrónimos:**
ADR: Accord européen sur le transport des marchandises dangereuses par Route (European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road)
RID: Règlement International concernant le transport des marchandises dangereuses par chemin de fer ((Regulations Concerning the International Transport of Dangerous Goods by Rail)
IMDG: International Maritime Code for Dangerous Goods
IATA: International Air Transport Association
IATA-DGR: Dangerous Goods Regulations by the "International Air Transport Association" (IATA)
ICAO: International Civil Aviation Organization
ICAO-TI: Technical Instructions by the "International Civil Aviation Organization" (ICAO)
GHS: Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals

· *** Dados alterados em comparação à versão anterior**

ANEXO D

Certificado do Agregado Siderúrgico Inerte para Construção (ASIC)

certif Certificado

CERTIFICADO DE CONTROLO DE PRODUÇÃO NA FÁBRICA

1328 – CPD – 0122

De acordo com a Directiva 89/106/CEE, de 21 de Dezembro de 1988, do Conselho das Comunidades Europeias, relativa à aproximação das disposições legislativas, regulamentares e administrativas dos Estados-membros no que respeita aos produtos de construção (Directiva dos Produtos de Construção – DPC), alterada pela Directiva 93/68/CEE do Conselho das Comunidades Europeias, de 22 de Julho de 1993, declara-se que o produto de construção

AGREGADOS

De acordo com a utilização prevista e características técnicas descritas em anexo.

produzido pelo fabricante

SN MAIA – Siderurgia Nacional, S.A.

S. Pedro Fins - 4425-514 MAIA

na fábrica

S. Pedro Fins - 4425-514 MAIA

é submetido pelo fabricante aos ensaios iniciais de tipo, a um controlo de produção na fábrica e a ensaios complementares de amostras colhidas na fábrica, de acordo com um plano de ensaios pré-estabelecido, e que o organismo notificado – CERTIF Associação para a Certificação de Produtos – realizou uma auditoria inicial à fábrica e ao controlo de produção, e efectua o acompanhamento continuo, a avaliação e a aprovação do controlo de produção na fábrica.
Este certificado atesta que todas as disposições relativas à comprovação da conformidade e ao desempenho do produto descritas no Anexo ZA da norma:

EN 13242:2002 e EN 13242:2002/A1:2007

foram consideradas.
Este certificado foi emitido pela primeira vez em 2009-02-09 e mantém-se válido desde que não se alterem significativamente as condições definidas na especificação técnica harmonizada ou as condições de fabrico e do controlo de produção na fábrica.

Almada, 9 de Fevereiro de 2009

Francisco Barroca
Director Geral

Este Certificado é constituído por um Anexo com 1 (uma) página.

Certif – Associação para a Certificação
Rua José Afonso, 9 F – 2810-237 Almada – Portugal – Tel.: 351. 21 258 69 40 – Fax: 351. 21 258 69 59

certif Certificado

ANEXO AO CERTIFICADO DE CONTROLO DE PRODUÇÃO NA FÁBRICA

1328 – CPD – 0122

Local de produção	S. Pedro Fins - MAIA
Tipo de agregado	Agregado Artificial (Agregado Siderúrgico Inerte)
Origem de extracção	Escória Proveniente de Forno de Arco Eléctrico (EAF)

Referência comercial	Dimensão do agregado (d/D)	EN 13242
A.S.I.C. 0/40	0/40	Agregado de Granulometria Extensa

Utilização Prevista

EN 13242	Materiais granulares tratados com ligantes hidráulicos e não ligados para estradas e outros trabalhos de engenharia civil

Almada 9 de Fevereiro de 2009

Francisco Barroca
Director Geral

Certif – Associação para a Certificação
Rua José Afonso, 9 F. - 2810-237 Almada - Portugal - Tel.: 351 21 258 69 40 - Fax: 351 21 258 69 59

ANEXO E

Newsletter de HARSCO Metals CTS

HARSCO METALS

Harsco Metals Cts

Newsletter ASIC

JANUARY 19, 2011 VOLUME 1, NUMERO 1

A.S.I.C. – AGREGADO SIDERURGICO INERTE PARA A CONSTRUÇÃO

A Harsco Metals CTS pertence ao grupo Americano HARSCO, presente em mais de 50 Países. O seu objectivo é a Reciclagem e Comercialização de escórias de Forno Eléctrico das Siderurgias em todo o mundo. Em Portugal, estamos instalados na Siderurgia Nacional da Maia e do Seixal, onde preparamos um agregado artificial denominado por A.S.I.C. – Agregado Siderúrgico Inerte para a Construção. Este agregado está certificado com a Marca CE segundo a norma EN 13242, possui Ficha Técnica, Declaração de Conformidade, assim como o parecer sobre o enquadramento do ASIC feito pelo Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, CCDRLVT, onde é atestado que o ASIC pode ser utilizado como material de construção. É ainda controlado semanalmente, por um laboratório certificado.

A Harsco está fortemente empenhada na promoção da biodiversidade e na preservação do ambiente e do património, tendo presente que a construção, conservação e operação sustentável é o seu objectivo. É por isto que acreditamos e diferenciamo-nos, através do desenvolvimento sustentável e ambiental. A Harsco vende 10 milhões de toneladas anualmente em mais de 20 países preservando assim os recursos naturais.

O ASIC pode ter várias aplicações tais como:

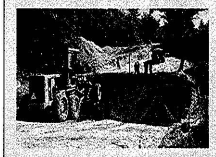
- **SOLOS COMPACTADOS**
- **BASE E SUB-BASES**
- **PARQUES DE ESTACIONAMENTO**
- **LEITO DE PAVIMENTO**
- **ATERROS**
- **JARDINS**
- **ESTÁDIOS DE FUTEBOL**

A utilização do ASIC tem as seguintes vantagens:

- Maior duração e resistência que a pedra.

Brevemente visite o Web Site:
www.asic.com.pt
Toda a informação sobre o ASIC.









- Maior resistência ao escorregamento devido às suas faces angulares.
- Depois de compactado solidifica como o Betão.
- Este tipo de Agregado é um produto de características exemplares.
- Proporciona um excelente benefício financeiro, dado o preço por tonelada ser bastante reduzido.

Estudos elaborados pelo LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, CVR – Centro de valorização de Resíduos e a UM – Universidade do Minho sendo o mesmo assinado por vários Professores Catedráticos, atestam os valores que satisfazem as especificações, que regulam as aplicações destes materiais.
As propriedades químicas, mineralógicas, geométricas, físicas e mecânicas, deduzidas dos diferentes ensaios, apresentam valores que satisfazem globalmente as especificações que regulam a aplicação dos materiais convencionais em camadas de aterro, leito de pavimento, sub-base e base de infra-estruturas viárias. Os resultados laboratoriais obtidos para o ASIC perspectivam a viabilidade da sua aplicação para os mesmos fins, tendo também em conta um teor em água óptimo de cerca de 5.0%, correspondente a uma energia de compactação pesada.

O ASIC é um produto de boas resistências à fragmentação e ao desgaste, traduzidas por um valor de Los Angeles de 23% e um valor de micro-Deval de 11%.

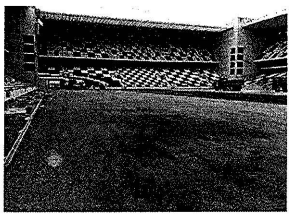
Não hesite em contactar-nos dado que o nosso produto é de grande qualidade e com preços bastante competitivos face ao mercado.

Harsco Metals Cts
Estaleiro da Siderurgia Nacional da Maia
4446-909 Ermesinde
Telefone: 229673269
Fax: 229672734
HarscoPortugal@harsco.com
www.asic.com.pt

Harsco Metals Cts
Estaleiro da Siderurgia Nacional do Seixal
2841-906 Aldeia P

Joaquim Carvalho
Telem: 91.9463432

Estádio do Bessa – Boavista



Em finais de 2009 a Global Stadium empresa responsável pela colocação do relvado sintético no Estádio do Boavista procurou no mercado um material que permitisse uma drenagem eficiente.

O material utilizado foi o ASIC pois tem baixa absorção de água, permitindo a drenagem eficiente do campo. Após a análise das amostras e testes suplementares, o ASIC foi aplicado em camadas de base e sub-base e o sintético foi colocada no topo.

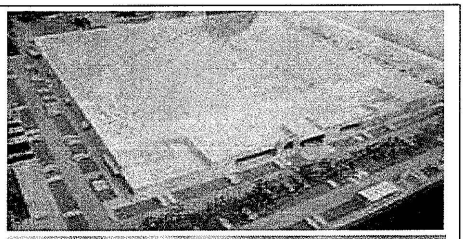
O projecto exigiu 10.000 toneladas de ASIC, incluindo o estádio principal e dois campos de treinos.

Obras em curso com utilização de ASIC:

Centro Operacional de Correios do Norte (COC-N)

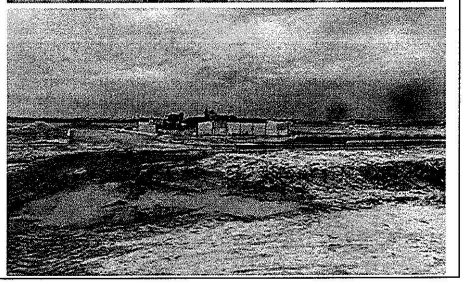
Zona Industrial da Maia

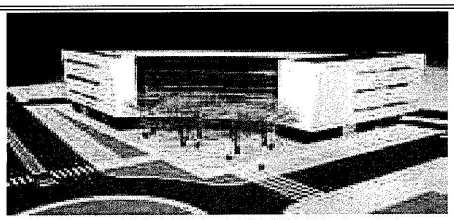
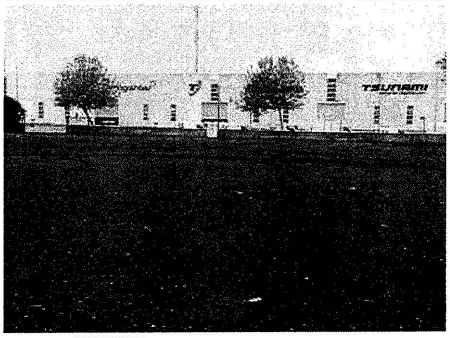
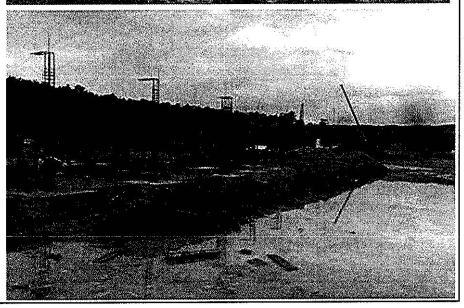
Casais



Estaleiros Centrais da Teixeira Duarte, SA

Montijo



Campus de Justiça de Valongo. Valongo	
Parque de Estacionamento da Fabrica de Computadores Magalhaes. Perafita - Matosinhos	
Centro Comercial da Sonae Barreiro DST	
AMARSUL – Valorização e Tratamento de Resíduos Sólidos da Margem Sul do Tejo. Almada Soares da Costa, SA	

Câmara Municipal de Famalicão

Famalicão

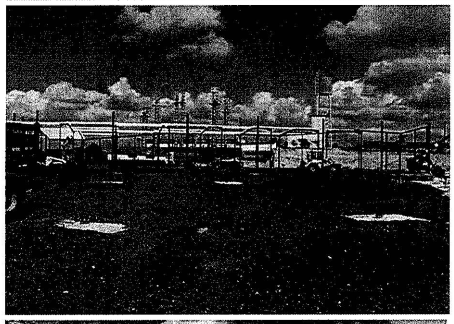
Rotunda de ligação à Variante



Zona Comercial

Casal do Marco - Seixal

Construcentro, SA



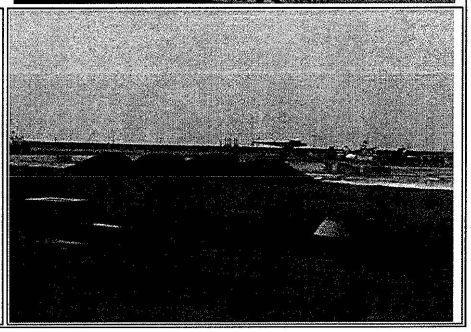
Zona Comercial

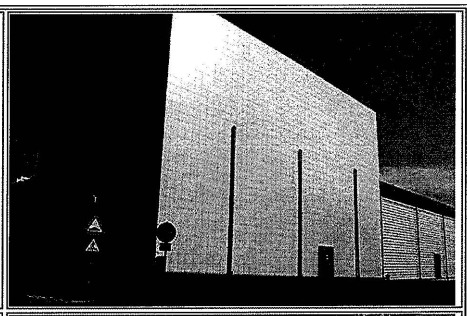
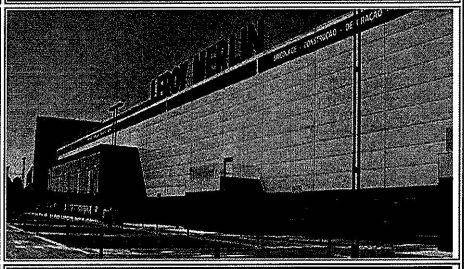
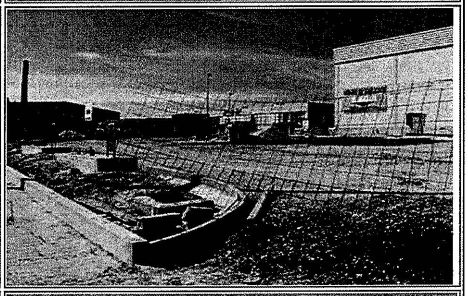
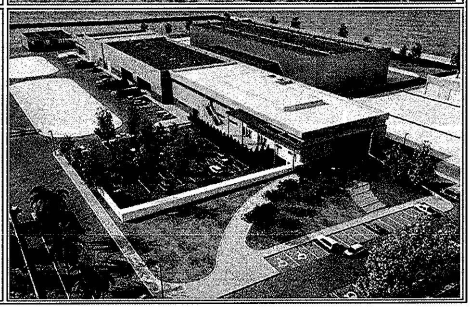
Seixal

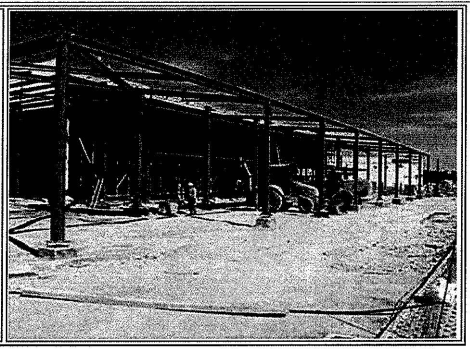


Porto de Leixões - Matosinhos

DST, SA



Staples Office Center - Sintra DST, SA	
Leroy Merlin - Maia DST, SA	
Elefante Azul - Barreiro	
Estaleiros Centrais da Teixeira Duarte Montijo	

Instalações da Salvador Caetano - Barreiro Cociga, SA	

ANEXO F

Resultados químicos do ASIC – Análise Quantitativa

CENTRO TECNOLÓGICO DA CERÂMICA E DO VIDRO
Rua Coronel Veiga Simão 3025-307 Coimbra PORTUGAL
(T) 351.239 499 200 (F) 351.239 499 204 (E) centro@ctcv.pt (W) www.ctcv.pt
contr. PT 501 632 174

CTCV

IPAC acreditação L0022 Ensaios — ilac-MRA

CTCV - Medição e Ensaio
Laboratório de Análise de Materiais

RELATÓRIO Nº 311.74/12
Refª amostra 2011.53.10351/AGR

Cliente	LEMC - LABORATÓRIO DE ENSAIO DE MAT. DE CONSTRUÇÃO	Processo nº	311.19571
Endereço	4200-465 PORTO	Data de entrada	28.12.11
Material	Agregado		
Refª cliente	ASIC01/2011	Data de execução	09 a 11.01.12

ANÁLISE QUÍMICA QUANTITATIVA

Parâmetro Analítico	Valor obtido	Unidades	Método Analítico
Sais de cloreto solúveis em água	0,0014	%	PE 311.300 Ed.02/Rev.00 - Janeiro 06
Sulfatos solúveis em ácido, SO_3	0,08	%	NP EN 1744-1:2000 (secção 12)
Enxofre total, S	0,05	%	NP EN 1744-1:2000 (secção 11)

Legenda:
L.q.: limite de quantificação

Observações :
- **Amostragem:** - Sob a responsabilidade do cliente.
- **Preparação da amostra:** - De acordo com NP EN 1744-1:2000

"PE xxx.xxx" corresponde a Procedimento Específico (Método Interno) do CTCV

Coimbra, 12 de Janeiro de 2012

O Operador Especializado — O Responsável do Laboratório

CTCV - LAM
CENTRO TECNOLÓGICO DA CERÂMICA E DO VIDRO
LAM - Laboratório de Análises de Materiais

Elvira Mateus — Alice Oliveira

Os resultados apresentados neste trabalho referem-se apenas às amostras ensaiadas. Não se assume qualquer responsabilidade relativa à exactidão da amostragem, a menos que seja efectuada sob a directa responsabilidade do CTCV. A reprodução deste trabalho é autorizada apenas na sua forma integral. Para qualquer reprodução parcial será indispensável autorização do CTCV por escrito.

ANEXO G

Resultados químicos do ASIC – Identificação Mineralógica por difracção de raio x

CENTRO TECNOLÓGICO DA CERÂMICA E DO VIDRO
Rua Coronel Veiga Simão 3025-307 Coimbra PORTUGAL
(T) 351.239 499 200 (F) 351.239 499 204 (E) centro@ctcv.pt (W) www.ctcv.pt
contr. PT 501 632 174

CTCV

IPAC acreditação L0022 Ensaios
ilac-MRA

CTCV - Medição e Ensaio
Laboratório de Análise de Materiais

RELATÓRIO Nº 311.75/12
Refª amostra 2011.53.10351/AGR

Cliente	LEMC - LABORATÓRIO DE ENSAIO DE MAT. DE CONSTRUÇÃO	Processo nº	311.19571
Endereço	4200-465 PORTO	Data de entrada	28.12.11
Material	Agregado		
Refª cliente	ASIC01/2011	Data de execução	9 a 13.01.12

IDENTIFICAÇÃO MINERALÓGICA POR DIFRACÇÃO DE RAIOS X
ANÁLISE QUALITATIVA

Fases Mineralógicas Identificadas	Fórmula Química	N.º PDF
Akermanite	$Ca_2MgSi_2O_7$	01-074-0990
Monticellite	$Ca(Mg_{0.93}Fe_{0.07})SiO_4$	01-083-1743
Magnetite	Fe_3O_4	01-075-1609
Óxido de ferro e silício	$Fe_{2.3}0Si_{0.7}0O_4$	00-052-1141
Wustite	FeO	01-089-7100

PDF : Powder Diffraction File

Em anexo segue espectro respectivo com o Nº: 11-9043

Condições instrumentais:

Difractómetro de Raios-X, marca PANalytical, modelo X'PERT-PRO
Ampola de Raios X de isoladores cerâmicos e anticátodo de Cu
Goniómetro vertical θ–2θ
Sistema de fenda de divergência programável e fenda antiscatter automática
Detector X'Celerator

Observações :

- **Amostragem:** - Executada pelo cliente
- **Preparação da amostra:** - Secagem a 40-50°C
- **Procedimento de ensaio:** - PE 311.230, Ed.03/Rev.01 - Outubro 2006

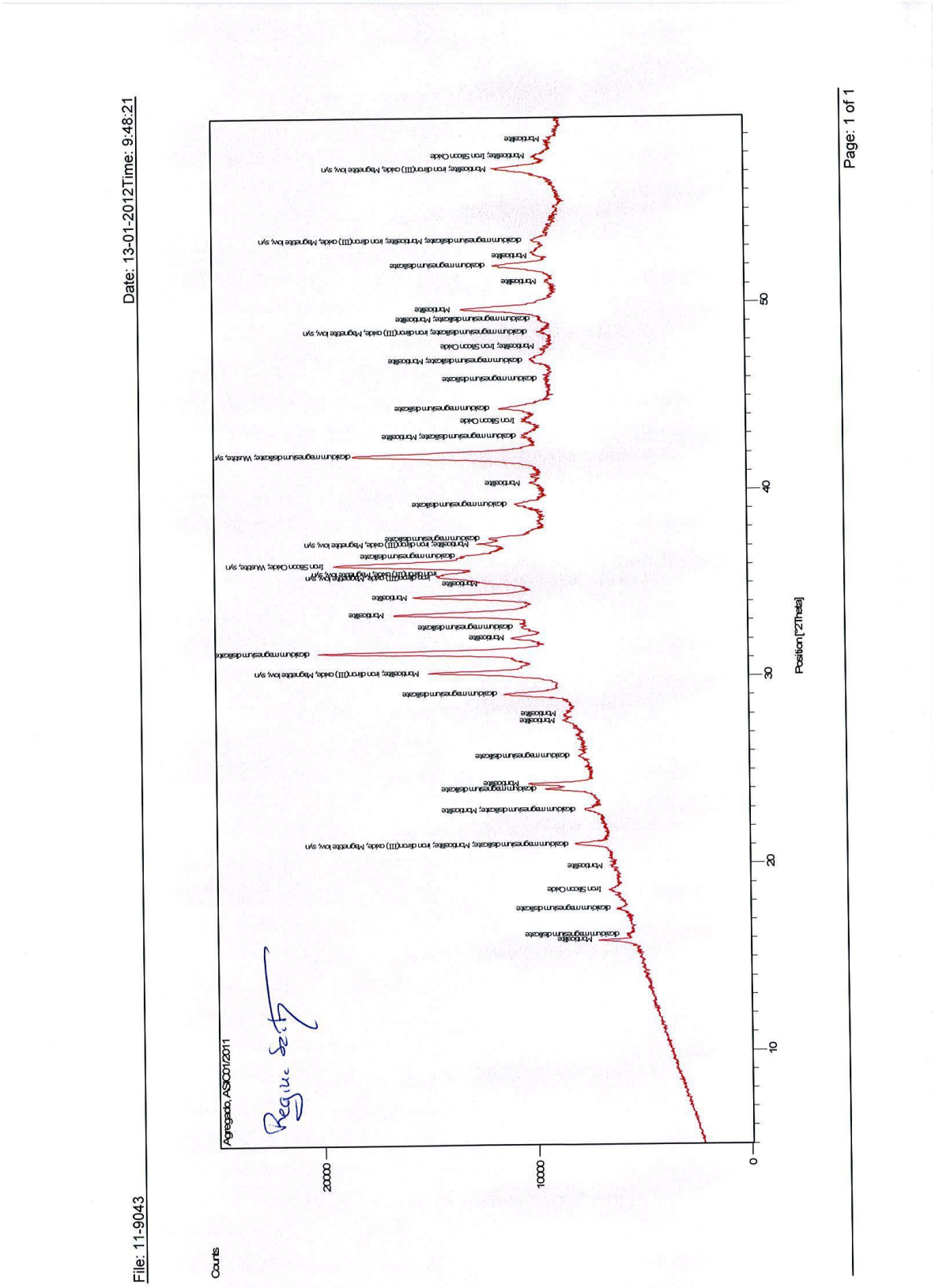
Coimbra, 13 de Janeiro de 2012

O Responsável da Área Técnica — O Responsável do Laboratório

CTCV - LAM
CENTRO TECNOLÓGICO DA CERÂMICA E DO VIDRO
LAM - Laboratório de Análises de Materiais

Regina Santos — Alice Oliveira

Os resultados apresentados neste trabalho referem-se apenas às amostras ensaiadas. Não se assume qualquer responsabilidade relativa à exactidão da amostragem, a menos que seja efectuada sob a directa responsabilidade do CTCV. A reprodução deste trabalho é autorizada apenas na sua forma integral. Para qualquer reprodução parcial será indispensável autorização do CTCV por escrito.


Date: 13-01-2012Time: 9:48:21
File: 11-9043
Agregado, ASC01/2011
Counts
20000
10000
0
10
20
30
40
50
Position [°2Theta]
Page: 1 of 1
Regina Sert