



**Caracterização Laboratorial de Misturas Betuminosas
com Incorporação de Agregado Siderúrgico Inerte para
Construção (ASIC)**

RICARDO MANUEL AZEVEDO ANDRADE

Licenciado em Engenharia Civil

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Civil na área de especialização de Vias de Comunicação
e Transportes

Orientador(es):

Doutora Ana Cristina Freire, Investigadora Auxiliar (LNEC)

Doutora Maria da Graça Alfaro Lopes, Prof. Coord. Principal (ISEL)

Júri:

Presidente: Doutor Luciano Alberto do Carmo Jacinto, Prof. Adjunto (ISEL)

Arguente: Doutor José Manuel Coelho das Neves, Professor Auxiliar (IST)

Orientador : Doutora Ana Cristina Freire, Investigadora Auxiliar (LNEC)

Aos meus pais,
que sempre me deram o que conseguiram
e que espero nunca ter desiludido.

À minha esposa Vera,
pelo incondicional e paciente apoio,
pelo imenso amor e
por ter feito de mim uma pessoa melhor.

Ao meu filho Afonso,
meu querido filho Afonso
a quem este trabalho roubou muitas horas
sem que ele entendesse porquê.

Às pessoas importantes na minha vida.

"A mente que se abre a uma nova ideia
jamais voltará ao seu tamanho original."

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Estas palavras de agradecimento não carregam certamente consigo o sentimento de gratidão e de prazer que eu gostaria de transmitir por todos aqueles que fizeram parte deste meu objetivo, ajudando-me a concretizá-lo, correndo ainda o risco de deixar alguém de fora, pois felizmente foram várias as vezes que tive de ir “acrescentando gente”.

Ao LNEC na pessoa do engenheiro Eduardo Fortunato, agradeço por me receber na sua prestigiada casa, o Núcleo de Infraestruturas de Transportes (NIT) e me privilegiar com a oportunidade de participar num trabalho que me deu um enorme prazer em realizar e que muito me motivou e mais me ensinou. Obrigado por tudo aquilo que colocou à minha disposição e principalmente, obrigado pela oportunidade.

Às minhas orientadoras, as engenheiras Ana Cristina Freire e Maria da Graça Lopes, pela constante disponibilidade, interesse e dedicação desde o primeiro contacto, pela proatividade, pela contagiante e enérgica vontade de “fazer” e pelos ensinamentos e rigor inculcados, demonstro o meu respeito e uma imensa e inesquecível gratidão.

Aos técnicos e colaboradores do NIT, que mais do que ninguém me ensinaram e se desdoblaram em ajudar. Ao Eduardo Coimbra, José Reimão, Rui Coelho, Fernando Calado, Nuno Nunes, Pedro Domingos, João Costa e ao Daniel Fernandes pelo tempo e disponibilidade, pelos ensinamentos e sabedoria que partilharam, pela extrema simpatia e atenção com que sempre me trataram. Cada qual na sua fase me apoiou incondicionalmente, mas todos eles em todo o processo me fizeram sentir que lá estariam se mais fosse necessário. Um tremendo obrigado a todos por tudo.

À empresa *HARSCO metals & minerals*, na pessoa do Eng^o António Cavalheiro e ao Técnico Fernando Monteiro, que cedeu todo o ASIC necessário para este estudo, diversa informação para a minha pesquisa bibliográfica e ainda me “apresentou” o ASIC e todo o seu processamento.

Ao engenheiro Henrique Miranda, que me introduziu academicamente na área da Pavimentação e pelo prazer e privilégio em ser seu aluno. Tive ainda a felicidade de o reencontrar nesta fase final, de quem tantas vezes me socorri e nunca me faltou com a sua ajuda, acrescentando sempre mais alguns ensinamentos, conselhos construtivos e uma palavra amiga.

Ao engenheiro Timothy R. Murphy, presidente da *Murphy Pavement Technology* em Chicago, por toda a informação e experiência adquirida que não hesitou em partilhar comigo, pela documentação, pelos contatos, pela prontidão e amabilidade em ajudar na minha pesquisa além-fronteiras. De tantas portas por esse mundo a que bati, o engenheiro Tim foi o único que a manteve sempre aberta e se não aproveitei mais a sua ajuda foi por culpa minha.

À minha chefe a arquiteta Florinda Lixa com quem sinto estar em grande falta, pois foram muitas as vezes em prejuízo do seu próprio serviço, que me permitiu alguma dedicação extra ao presente trabalho e ainda andar muitas vezes com a mente noutra lugar.

À minha família e em particular á minha mulher e filho, Vera e o Afonso a quem muito do tempo em família lhes foi roubado e que levava muitas vezes o meu filho a dizer, “...estás sempre a trabalhar, papá...estás sempre ai sentado...”. Especialmente à Vera que ainda não existia Afonso e já aturava este meu gosto pela “escola” e sempre, mas sempre me apoiou.

E ainda aos meus Pais que espero deixar orgulhosos.

A cada uma destas pessoas um profundo agradecimento pelo importante papel que tiveram e têm na minha vida e resultados à parte, foi sempre com um enorme prazer que desenvolvi este trabalho e que apesar das naturais adversidades, será com orgulho que olharei para trás e relembrarei todos os que fizeram parte dele...se este trabalho tivesse uma avaliação para os “bastidores”, seria nota máxima.

A ainda a todas as restantes pessoas importantes na minha vida e cujo anonimato fica apenas neste pedaço de papel, pois não serão esquecidas nunca.

RESUMO

O Agregado Siderúrgico Inerte para Construção (ASIC) é um subproduto resultante da produção de aço sendo maioritariamente encaminhado para aterros ou armazenado sem utilização prevista, criando assim graves problemas ambientais e a urgente necessidade de gestão destes resíduos.

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a aplicabilidade do ASIC em misturas betuminosas do tipo Macadame Betuminoso AC 20 (MB), para camadas de base, regularização e de ligação de infra-estruturas rodoviárias. Este estudo consiste na caracterização laboratorial do ASIC, em termos geométricos, físicos, mecânicos e ambientais, na formulação de misturas betuminosas com a incorporação de ASIC e na avaliação do seu desempenho, para posterior enquadramento com as misturas tradicionais visando a substituição dos agregados naturais.

Dos resultados obtidos no presente trabalho é possível concluir que o ASIC respeita os requisitos geométricos, físicos e mecânicos estabelecidos para os agregados naturais a incorporar misturas betuminosas. Refere-se ainda que a sua composição química não deve ser negligenciada, visto que uma maturação adequada é essencial. Quanto à formulação das misturas e à avaliação do seu desempenho, é possível concluir que apesar de não existirem normas, especificações ou processos tecnológicos especializados, os valores obtidos são genericamente promissores quando comparados com os valores de referência aplicados aos agregados naturais. Tendo em conta a abordagem inovadora do tema e as naturais limitações de uma dissertação, foi possível concluir um adequado desempenho em todos os ensaios à mistura betuminosa com incorporação de ASIC, sendo apenas de referir o resultado aceitável na deformação permanente, para camadas que são subjacentes à camada de desgaste.

Desta forma, a incorporação de ASIC em misturas betuminosas permitirá compatibilizar a sua aplicação com os princípios do desenvolvimento sustentável, reduzindo os aterros deste material e preservando o ambiente com a redução da exploração de materiais naturais, criando por outro lado um mercado potencialmente mais económico e tecnicamente vantajoso.

Palavras chave: Agregado Siderúrgico Inerte para Construção; Misturas betuminosas; Infraestruturas de transportes; Caracterização laboratorial; Estudos de formulação.

ABSTRACT

The Steel Slag Aggregate for Construction (ASIC) is a by-product of steel production that is mainly sent to landfills or stored, creating serious environmental problems and waste management issues.

This study aims to evaluate the applicability of ASIC in bituminous mixtures type AC 20 (bituminous macadam) for base and binder coarse in road infrastructures. This study consists in the ASIC laboratory characterization for assessing the geometric, physical, mechanical and environmental properties for bituminous mixtures formulation with ASIC incorporation and finally, evaluating the mixtures performance for subsequent comparison with the traditional mixtures, as an alternative for natural aggregates.

The results obtained in this study showed that the ASIC regards the geometric, physical and mechanical requirements established for natural aggregates to bituminous mixtures. The ASIC chemical composition should not be neglected, since a proper maturation is essential. As for the mixture's formulation and performance assessment, we conclude that although there are no standards specifications or technological processes specialized for ASIC applications, the results obtained are generally promising when compared with the reference values applied to natural aggregates. Given the innovative approach of the theme and the natural limitation of an academic dissertation, it was concluded that there is an appropriate performance in all tests performed to bituminous mixture incorporating ASIC, being only worth mentioning the acceptable result in permanent deformation, for layers under surface coarse.

Thus, the incorporation of ASIC in bituminous mixtures will allow matching its application with sustainable principles, preserving the environment by reducing the use of natural materials and reducing ASIC landfill field, creating on the other hand a potentially more economic and technically beneficial market.

Keywords: Steel Slag; Bituminous mixtures; Transport infrastructures; Laboratory characterization; Formulation studies.

ÍNDICE

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Capítulo 1 – INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1. Enquadramento do Tema..... | 1 |
| 1.2. Objetivo..... | 1 |
| 1.3. Estrutura Geral | 2 |
| | |
| Capítulo 2 – UTILIZAÇÃO DE ASIC EM CAMADAS BETUMINOSAS DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS | 5 |
| 2.1. Considerações Iniciais | 5 |
| 2.2. As Camadas Betuminosas e a sua Constituição | 7 |
| 2.3. Agregado Siderúrgico Inerte para Construção - ASIC..... | 10 |
| 2.3.1. Escórias de Alto-Forno..... | 10 |
| 2.3.2. Escórias de Aciaria..... | 12 |
| 2.3.3. Processamento do ASIC..... | 15 |
| 2.3.4. Caracterização Ambiental | 18 |
| 2.3.4.1. Lixiviação..... | 19 |
| 2.3.4.2. Expansibilidade | 22 |
| 2.3.5. Possíveis Tratamentos da Escória de Aciaria..... | 29 |
| 2.3.6. Possíveis Limitações Associadas à Utilização do ASIC | 31 |
| 2.3.7. Possíveis Aplicações | 34 |
| 2.3.8. Experiência Nacional e Internacional na Aplicação do ASIC | 37 |
| 2.3.9. Requisitos Normativos Aplicáveis | 44 |
| | |
| Capítulo 3 – ESTUDO EXPERIMENTAL | 51 |
| 3.1. Considerações Iniciais | 51 |
| 3.1.1. Organização do Estudo Experimental | 52 |
| 3.1.2. Recolha e Preparação das Amostras..... | 53 |
| 3.2. Caracterização Laboratorial do ASIC | 56 |
| 3.2.1. Ensaio Geométricos | 56 |
| 3.2.1.1. Análise Granulometria | 56 |
| 3.2.1.2. Índice de Achatamento..... | 60 |
| 3.2.1.3. Índice de Forma..... | 62 |
| 3.2.2. Ensaio Físicos e Mecânicos | 64 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.2.2.1. Valor do Azul de Metileno | 64 |
| 3.2.2.2. Valor do Equivalente de Areia | 66 |
| 3.2.2.3. Massa Volúmica e Absorção de Água | 68 |
| 3.2.2.4. Resistência à Fragmentação – <i>Los Angeles</i> | 71 |
| 3.2.2.5. Resistência ao Desgaste – <i>Micro-Deval</i> | 73 |
| 3.2.3. Afinidade Ligante-Agregado..... | 74 |
| 3.2.4. Estudo de Formulação – Método Marshall | 80 |
| 3.2.5. Ensaio Sobre a Mistura Betuminosa Formulada..... | 87 |
| 3.2.5.1. Avaliação da Sensibilidade à Água | 88 |
| 3.2.5.2. Resistência à Fadiga | 91 |
| 3.2.5.3. Resistência à Deformação Permanente - <i>Wheel Tracking</i> | 96 |
| 3.3. Considerações Finais | 100 |
| | |
| Capítulo 4 - CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS | 103 |
| 4.1. Conclusões Gerais | 103 |
| 4.2. Perspetivas de Desenvolvimento Futuro | 105 |
| | |
| BIBLIOGRAFIA | 107 |
| | |
| NORMAS/ESPECIFICAÇÕES | 115 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Produção mundial de aço bruto entre 1980 e 2013..... | 5 |
| Figura 2 - Estrutura dos pavimentos flexíveis..... | 8 |
| Figura 3 - Escória de alto-forno de arrefecimento lento à esquerda e de arrefecimento brusco à direita..... | 12 |
| Figura 4 - Evolução do tipo de siderurgia usada nos EUA e na UE | 13 |
| Figura 5 - Aspeto do ASIC proveniente do forno de arco elétrico..... | 14 |
| Figura 6 - <i>Box</i> de arrefecimento das escórias nas instalações da <i>HARSCO</i> na SN do Seixal | 17 |
| Figura 7 - <i>MRP (Metal Recovery Plant)</i> nas instalações da <i>HARSCO</i> na SN do Seixal.... | 17 |
| Figura 8 - Granulometrias produzidas na SN do Seixal pela empresa <i>HARSCO</i> | 18 |
| Figura 9 - Esquema do processo expansivo | 25 |
| Figura 10 - Aspeto dos provetes com compactação deficiente | 33 |
| Figura 11 - Amostra do ASIC na fração 0/40 | 54 |
| Figura 12 - Aspeto das escórias com presença de oxidação/corrosão e pedaços de ferro.. | 55 |
| Figura 13 - Composição ferrosa com potencial eletromagnético..... | 55 |
| Figura 14 - Série de peneiros e peneiração mecânica das amostras | 57 |
| Figura 15 - Amostras a analisar em laboratório | 57 |
| Figura 16 - Curva granulométrica adotada e seus componentes | 59 |
| Figura 17 - Peneiros para determinação do Índice de Achatamento | 61 |
| Figura 18 - Determinação do Índice de Forma..... | 63 |
| Figura 19 - Realização do ensaio do Azul de Metileno..... | 65 |
| Figura 20 - Ensaio Equivalente de Areia e respetivo equipamento de agitação | 67 |
| Figura 21 - Saturação das amostras nos picnómetros e utilização do método do cone..... | 69 |
| Figura 22 - Equipamento para ensaio de <i>Los Angeles</i> e as esferas de aço | 71 |
| Figura 23 - Material resultante após realização do ensaio <i>Los Angeles</i> | 72 |
| Figura 24 - Equipamento e esferas de aço para realização do ensaio <i>Micro-Deval</i> | 73 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 25 - Preparação dos provetes para o ensaio de Afinidade pelo método da Garrafa Giratória..... | 77 |
| Figura 26 - ASIC envolvido em ligante antes e depois do ensaio de Afinidade | 78 |
| Figura 27 - Compactador de impacto | 82 |
| Figura 28 - Provetes e respetivos moldes, pesagem e ensaio do provete | 84 |
| Figura 29 - Representação dos resultados pelo método <i>Marshall</i> | 84 |
| Figura 30 - Restantes resultados do ensaio <i>Marshall</i> | 86 |
| Figura 31 - Equipamento, provetes e suporte utilizados para avaliação da Sensibilidade à Água | 89 |
| Figura 32 - Exemplo do <i>output</i> de um dos provetes ensaiados | 90 |
| Figura 33 - Provede sujeito à saturação por vácuo, na prensa de ensaio e resultado final.. | 90 |
| Figura 34 - Corte da laje e o primeiro conjunto de vigas para ensaio de Resistência à Fadiga | 92 |
| Figura 35 - Equipamento para ensaio de Resistência à Fadiga | 93 |
| Figura 36 - Pormenor da viga no suporte de ensaio e do <i>output</i> da sua evolução..... | 94 |
| Figura 37 - Lei de Fadiga | 94 |
| Figura 38 - Moldagem das lajes para ensaio de <i>Wheel Tracking</i> | 97 |
| Figura 39 - Ensaio de <i>Wheel Tracking</i> e o aspeto final dos provetes..... | 97 |
| Figura 40 - Variação da deformação no ensaio de <i>Wheel Tracking</i> | 98 |

ÍNDICE DE QUADROS

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Quadro 1 - Resultados da análise da lixiviação | 20 |
| Quadro 2 - Reações de hidratação do CaO e do MgO | 23 |
| Quadro 3 - Reações dos óxidos constituintes das escórias | 24 |
| Quadro 4 - Aplicações das escórias de alto-forno e de aciaria (NSA, 2014)..... | 37 |
| Quadro 5 - Resumo das características “ótimas” da mistura betuminosa aplicada..... | 38 |
| Quadro 6 - Fusos granulométricos previsto para materiais alternativos | 45 |
| Quadro 7 - Valores limites para a utilização dos agregados siderúrgicos nos pavimentos espanhóis | 46 |
| Quadro 8 - Valores limite para a utilização dos agregados siderúrgicos nos pavimentos brasileiros | 48 |
| Quadro 9 - Valores limites para a utilização dos agregados siderúrgicos nos pavimentos japoneses..... | 49 |
| Quadro 10 - Fusos granulométrico para camadas de base e sub-base no Reino Unido | 50 |
| Quadro 11 - Organização do estudo experimental e ensaios realizados | 53 |
| Quadro 12 - Análise granulométrica do ASIC | 58 |
| Quadro 13 - Séries de peneiros para determinação do Índice de Achatamento..... | 61 |
| Quadro 14 - Resultado do ensaio do Índice de Achatamento | 62 |
| Quadro 15 - Séries de peneiros para determinação do Índice de Forma..... | 63 |
| Quadro 16 - Resultado do ensaio do Índice de Forma | 64 |
| Quadro 17 - Resultado do ensaio do Azul de Metileno | 66 |
| Quadro 18 - Resultado do ensaio do Equivalente de Areia..... | 68 |
| Quadro 19 - Resultado do ensaio da Massa Volúmica e Absorção de Água..... | 70 |
| Quadro 20 - Resultado do ensaio <i>Los Angeles</i> | 72 |
| Quadro 21 - Resultado do ensaio <i>Micro-Deval</i> | 74 |
| Quadro 22 - Análise dos métodos de ensaio para avaliação da Afinidade propostos pela norma..... | 75 |
| Quadro 23 - Resultado do ensaio de Afinidade Ligante-Agregado | 78 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Quadro 24 - Resultados do ensaio de avaliação da Sensibilidade à Água | 89 |
| Quadro 25 - Fórmulas das Lei de Fadiga da Shell (2003) e da JAE (1995) | 95 |
| Quadro 26 - Estudos comparativos de ensaios à Fadiga a misturas com e sem ASIC | 95 |
| Quadro 27 - Resultados do ensaio de <i>Wheel Tracking</i> | 98 |
| Quadro 28 - Resumo das características geométricas, físicas e mecânicas | 100 |
| Quadro 29 - Resultados obtidos dos ensaios à mistura betuminosas formulada..... | 101 |

ABREVIATURAS

ACBFS - *Air-cooled Blast Furnace Slag*

APA - *Asphalt Pavement Analyzer*

APORBET - Associação Portuguesa de Fabricantes de Misturas Betuminosas

ASIC - Agregado Siderúrgico Inerte para Construção

BBM - *Base Binder Modified*

BFS - *Blast Furnace Slag*

BOF - *Basic Oxigen Furnace*

CCDRLVT - Comissão de Coord. e Desenvolvimento Reg. de Lisboa e Vale do Tejo

CETO - Caderno de Encargos Tipo Obra (EP, SA.)

CICCOPN - Centro de Formação Profissional da Indústria da Construção Civil e Obras Públicas do Norte

CVR - Centro para a Valorização de Resíduos

EAF - *Electric Arc Furnace*

EP, SA - Estradas de Portugal, Sociedade Anónima

FAE - Forno de Arco Elétrico

FRX - Fluorescência de Raios X

FWD - *Falling Weight Deflectometer*

ITSR - *Indirect Tensile Strength Ratio*

JAE - Junta Autónoma das Estradas

LCPC - *Laboratoire Central de Ponts et Chaussées*

LD - *Linz-Donawitz*

LGMC - Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção

LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil

PRD_{AIR} - *Mean Proportional Rut Depth in air*

NSA - *National Slag Association*

OFC - *Open grade Friction Course*

OH - *Open Heart (Forno Siemens-Martin)*

PG-3 - *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes*

RAP - *Reclaimed Asphalt Pavement*

RCD - Resíduos de Construção e Demolição

RD_{AIR} - *Mean Rut Depth in air*

SMA - *Stone Mastic Asphalt*

SN - Siderurgia Nacional

UEPG - *European Aggregates Association*

UM - Universidade do Minho

VMA - Vazios na mistura de agregados

WCA - *Wearing Course Asphalt*

WTS_{AIR} - *Wheel Tracking Slope in air*

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO DO TEMA

O Agregado Siderúrgico Inerte para Construção (ASIC) é obtido a partir das escórias negras provenientes da produção de aço em Fornos de Arco Elétrico (FAE). Este material tem suscitado nas últimas décadas um grande interesse e uma aplicabilidade comprovadamente vantajosa em diversas áreas da engenharia civil.

No presente trabalho estuda-se a viabilidade de estender a sua utilização às infra-estruturas rodoviárias, nomeadamente às misturas betuminosas, assunto ainda pouco estudado a nível internacional e quase desconhecido a nível nacional.

Desta forma pretende-se promover a criação de um novo mercado para a utilização do ASIC e paralelamente dar um contributo ambiental na preservação dos materiais naturais, dando assim resposta à política comunitária na gestão de resíduos com a valorização e reutilização destes materiais, reduzindo ou eliminando os seus campos de aterro.

1.2. OBJETIVO

O objetivo do presente trabalho é contribuir para a avaliação da aplicabilidade de misturas betuminosas com incorporação de ASIC através da realização de um conjunto de ensaios laboratoriais de caracterização desse material, bem como das misturas betuminosas com a sua incorporação. As camadas betuminosas alvo serão as camadas de base, de regularização e de ligação.

Desta forma pretende-se alargar o conhecimento e a experiência na utilização do ASIC e conseqüentemente dar um contributo para a criação de especificações próprias para a sua utilização nas infra-estruturas rodoviárias

Para a concretização deste objetivo e de forma a desenvolver uma abordagem suportada, foi realizada uma vasta pesquisa e recolha bibliográfica, para estabelecer um estudo experimental que sustente a caracterização e a avaliação da viabilidade para tal aplicação.

Assim, os trabalhos a desenvolver no presente estudo consistem inicialmente na caracterização laboratorial, tendo por base os resultados da pesquisa bibliográfica realizada sobre o ASIC, nomeadamente com a determinação das suas propriedades:

- ✓ Químicas e ambientais (composição química do material e do lixiviado e expansibilidade);
- ✓ Geométricas (Análise Granulométrica, Índice de Achatamento e Índice de Forma);
- ✓ Físicas e mecânicas (Equivalente de Areia, Azul de Metileno, Massa Volúmica e Absorção de Água, Resistência à Fragmentação pelo método *Los Angeles*, Resistência ao Desgaste pelo método *Micro-Deval* e Afinidade Ligante-Agregado).

Seguidamente e com base em estudos consultados na pesquisa bibliográfica, será desenvolvida a formulação das misturas betuminosas com a incorporação do ASIC e avaliado o seu desempenho através dos seguintes ensaios:

- ✓ Avaliação da Sensibilidade à Água;
- ✓ Resistência à Fadiga;
- ✓ Resistência à Deformação Permanente.

O presente trabalho terá como referência o normativo europeu relativamente às especificações para agregados naturais, aquando da inexistência de outros documentos mais específicos.

1.3. ESTRUTURA GERAL

A estrutura e organização da presente dissertação desenvolve-se da seguinte forma.

No presente capítulo e tal como já acima descrito, apresentam-se o enquadramento e o objetivo propostos para o presente trabalho.

No capítulo 2 foi realizada a pesquisa e recolha bibliográfica relativa ao tema apresentado, no que respeita à utilização de ASIC em misturas betuminosas. O objetivo é a identificação das principais propriedades que devem ser consideradas com vista à descrição das características das misturas e respetivos valores limite, bem como de resultados obtidos em aplicações já efetuadas a nível nacional ou internacional.

Para tal foram tidos em consideração os seguintes aspetos:

- ✓ As propriedades adotadas nas atuais especificações do Caderno de Encargos Tipo Obra (CETO) das Estradas de Portugal (EP), utilizado geralmente como referência para materiais naturais em aplicações similares;
- ✓ As propriedades adotadas em especificações utilizadas noutros países para misturas betuminosas com o mesmo tipo de agregado;
- ✓ As propriedades relacionadas com o desempenho das misturas aplicadas, após entrada em serviço.

Foram ainda recolhidos todos os dados disponíveis acerca do ASIC junto da Siderurgia Nacional (SN) e da empresa *HARSCO Metals & Minerals*, dado que o material é apenas produzido e processado, respetivamente, por estas duas empresas.

No capítulo 3 foi estabelecido o estudo experimental a realizar, tendo como objetivo definir as ações a desenvolver conducentes à caracterização laboratorial de misturas betuminosas com incorporação do ASIC. O estudo experimental compreende a caracterização laboratorial de amostras do ASIC, bem como o estudo de formulação de misturas betuminosas com a sua incorporação e posterior avaliação do seu desempenho.

Assim, a caracterização laboratorial do ASIC foi efetuada mediante a realização de um conjunto de ensaios sobre as amostras recolhidas, tendo-se em atenção as propriedades referidas na NP EN 13043:2004/AC:2010. Estes ensaios incluem a determinação das propriedades geométricas, mecânicas e físicas.

Após a seleção do tipo de mistura betuminosa com incorporação de ASIC, será efetuado o estudo de formulação pelo método *Marshall* e a respetiva caracterização.

Complementarmente, sobre essa mistura betuminosa, foram realizados ensaios para avaliação do seu desempenho, nomeadamente, a avaliação da Sensibilidade à Água, da Resistência à Fadiga e da Resistência à Deformação Permanente.

No capítulo 4 e com base nos resultados obtidos do capítulo anterior, são apresentadas as conclusões sobre a caracterização do ASIC e das misturas formuladas com incorporação deste, concluindo-se da viabilidade de aplicação em camadas de base, de regularização e de ligação nos pavimentos rodoviários. São ainda apresentadas propostas de trabalhos futuros para a contínua investigação deste tema.

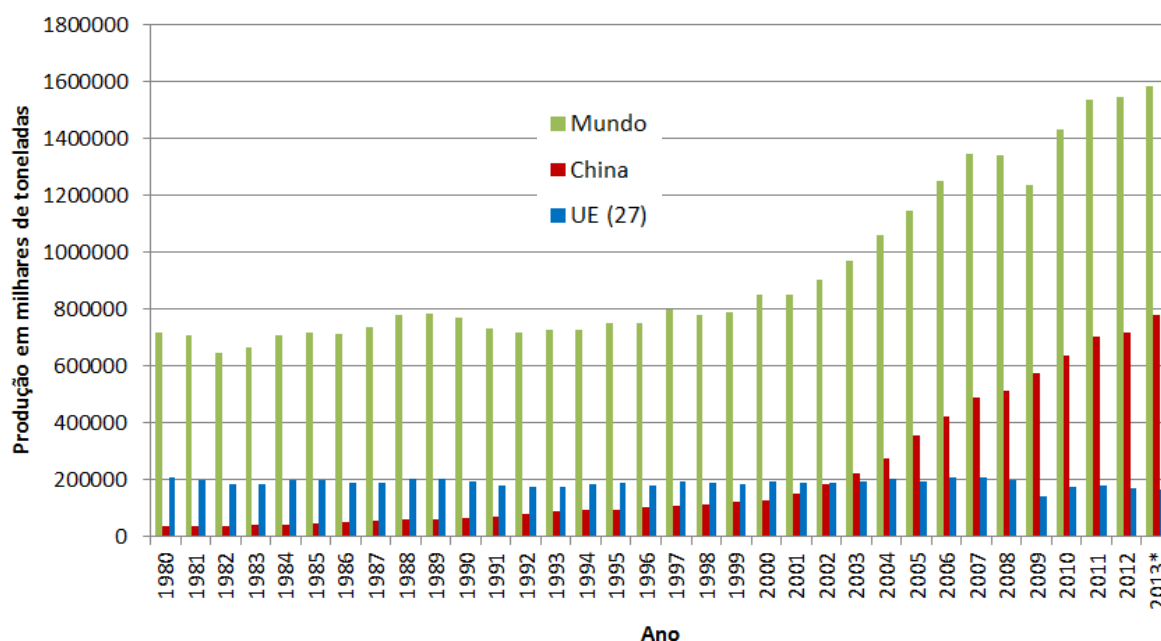
CAPÍTULO 2 – UTILIZAÇÃO DE ASIC EM CAMADAS BETUMINOSAS DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A atividade de produção de aço teve um grande crescimento nas últimas décadas e não tem em termos globais parado de aumentar, ainda que se denote na última década uma particular expansão em determinados países asiáticos, principalmente na China e Japão, mas também em países do médio oriente com o Irão e a Arábia Saudita. Contrariamente na europa, verificou-se alguma estagnação e até um retrocesso para o mesmo período em análise (*WorldSteel*, 2014).

A nível mundial a produção de aço entre 1980 e 2013 teve um aumento de mais de 220%, registando em 2013 uma produção de cerca de $1,582 \times 10^3$ milhares de toneladas. Nestes 33 anos só a China cresceu mais de 2.000% na sua produção de aço bruto, passando de 37.121 para 779.040 milhares de toneladas registadas em 2013. Este país que apenas entre 2003 e 2013 quase quadruplicou a sua produção, ultrapassou sozinha a produção de toda a união europeia, que registou em 2013 o seu segundo valor mais baixo de sempre, cerca de 165.161 milhares de toneladas (*WorldSteel*, 2014).

A Figura 1 mostra a evolução na produção mundial de aço nos últimos 33 anos.



* Países que representam cerca de 99% do total do aço bruto produzido no mundo

Figura 1 - Produção mundial de aço bruto entre 1980 e 2013 (produzido com dados da *WorldSteel* 2014)

Atualmente a China produz aproximadamente metade de todo o aço do mundo, sendo a carga tributária sobre este material uma das principais razões para este crescimento, pois apresenta o valor mais baixo de todo o mundo (GENET, 2012). Este fato proporciona a este país um fluxo de exportações elevado e conseqüentemente a redução da produção por parte dos países importadores.

Em Portugal também se verificou um aumento considerável, entre 1980 e 2013. Registou-se um crescimento que aproximadamente triplicou a produção nacional, passando de uma produção anual de cerca de 660 para cerca de 2.000 milhares de toneladas (*WorldSteel*, 2014).

Desta atividade, resultam por cada tonelada de aço líquido entre 11% e 15% de escórias negras e 2% a 3% de escórias brancas (CORREIA et al., 2006), sendo que apenas as primeiras serão âmbito de estudo no presente trabalho. Tendo em conta a impossibilidade de prevenir a produção destes resíduos é urgente a sua valorização e reutilização, dando assim resposta à política comunitária de gestão de resíduos.

Em 2002 a “produção” de escórias de aço rondava os 118 milhões de toneladas em todo o mundo e 8 anos mais tarde, esse valor cresceu para cerca de 206 milhões de toneladas. Só a China em 2010 gerava cerca de 80 milhões de toneladas (BEHNOOD & AMERI, 2012), aumentando esse valor em 2013 para cerca de 101 milhões de toneladas (*WorldSteel*, 2014).

Assim, a contínua expansão na produção de aço e o progressivo aumento dos aterros para depósito dos resíduos daí resultantes, levam ao esgotamento do espaço necessário para esse efeito e à necessidade de criação de outros, levantando graves problemas ambientais. O depósito deste material agrava estas preocupações ambientais principalmente devido à sua composição e constituição química que podem comprometer a qualidade do ar, da água ou contaminar os solos através da lixiviação, pondo em risco o ambiente e a saúde pública.

Segundo a *EUROSLAG* (2014) só a Europa produz anualmente cerca de 45 milhões de toneladas em escórias ferrosas resultantes da produção de ferro e de aço. A solução para todo este material passa pela investigação no sentido de valorizar o mesmo, sustentando a fiabilidade e o benefício na sua utilização, contribuindo assim para um mercado em crescimento, nomeadamente na substituição dos agregados naturais.

Segundo a *UEPG* (*European Aggregates Association*, 2014) foram extraídos cerca de 2,7 bilhões de toneladas de agregados em 2012, valor 28% abaixo do registado em 2007

e prevê-se ainda que em 2014 esta percentagem baixe até aos 35%, denotando assim a redução acentuada no consumo de agregados naturais (UEPG, 2014). Esta redução ainda que possa ser em parte atribuída à crise económica e à ressecação vivida na última década, é incontornável que a utilização de materiais alternativos, nomeadamente as escórias siderúrgicas, também contribui para esse fato (ALT-MAT, 2001).

No panorama europeu, a área das infraestruturas rodoviárias absorve pelo menos 10% de todos os agregados naturais extraídos e as escórias siderúrgicas vão sendo apresentadas por diversos estudos como excelente alternativa e demonstrando alguns sinais de expansão na área da pavimentação (ALT-MAT, 2001; IHOBE, 1999; SAMARIS, 2006).

O desenvolvimento e investigação na caracterização deste material com o objetivo da sua valorização, tem levado a um crescente interesse na construção criando assim um novo mercado de escoamento deste material e contribuindo ambientalmente na preservação e minimização do consumo de matérias-primas, reduzindo conseqüentemente as emissões e consumos energéticos na exploração dos mesmos (BIR, 2015).

No âmbito do presente trabalho, procura-se dar mais um contributo para a valorização e reutilização do ASIC na área da pavimentação, evitando assim que o seu destino final continue a ser maioritariamente o depósito em aterros e passe em vez disso, a ser uma solução económica, ambiental e tecnicamente competitiva.

2.2. AS CAMADAS BETUMINOSAS E A SUA CONSTITUIÇÃO

Os pavimentos das infraestruturas rodoviárias distinguem-se em três diferentes tipos, os pavimentos Flexíveis, os Semi-Rígidos e os Rígidos, sendo que em Portugal os pavimentos rodoviários são maioritariamente do tipo flexível. Independentemente do tipo de pavimento, estes são compostos pela fundação (leito do pavimento e aterro ou terreno natural) e pelo corpo do pavimento (camadas granulares e camadas ligadas por um ligante hidráulico ou betuminoso).

As camadas granulares têm basicamente uma função estrutural, cujo objetivo é a degradação das cargas atuantes, resistir às deformações permanentes e garantir uma adequada drenagem. Por sua vez, as camadas betuminosas têm uma função de regularização, comodidade e segurança, tendo uma reduzida contribuição na degradação das cargas mas são particularmente importantes na resistência á fadiga, suportando as deformações das camadas inferiores e das ações solicitantes e ainda na impermeabilização

das camadas granulares. Já as camadas ligadas por ligantes hidráulicos desempenham nos pavimentos rígidos ou semi-rígidos a componente estrutural e de regularização e ainda garantem a segurança e comodidade nos pavimentos rígidos.

O que difere os pavimentos rígidos dos flexíveis, para além dos materiais e das camadas que os constituem, é o seu comportamento estrutural e a forma como é feita a distribuição e degradação das cargas, assim como os processos que levam à rotura cada um deles.

Usualmente utilizados no nosso país, os pavimentos flexíveis apresentam na sua generalidade a estrutura representada na Figura 2.

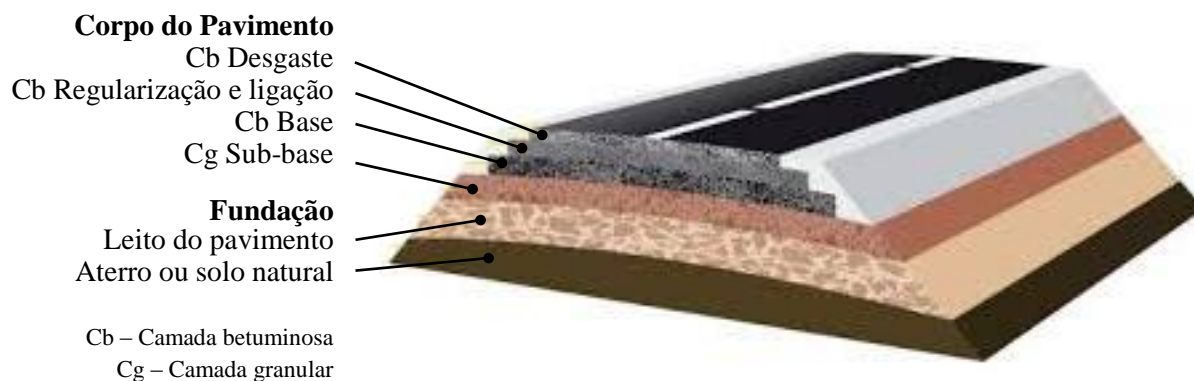


Figura 2 - Estrutura dos pavimentos flexíveis

O comportamento das camadas betuminosas está inteiramente ligado com o tipo de ligante utilizado e com a temperatura de serviço, pois a variação desta, altera o seu estado mais ou menos frágil (baixas temperaturas) potenciando o aparecimento de fendas. Para além da temperatura, as restantes condições climatéricas, o tipo de veículos, os seus rodados e a pressão dos pneumáticos e ainda o tempo de carga (velocidade dos veículos), são também fatores que condicionam o comportamento das misturas betuminosas e o seu tempo de vida (MIRANDA, 2013).

Várias são as patologias que se podem verificar nas camadas betuminosas que, são na sua generalidade devido às deformações permanentes e principalmente à fendilhação, que surge quando a mistura betuminosa vai acumulando sucessivamente micro deformações irreversíveis, reduzindo a sua resistência à fadiga (BRANCO et al., 2011).

Importa referir que as condições de fronteira entre as camadas betuminosas são extremamente importantes, pois uma efetiva continuidade entre si, permite uma melhor resistência à fadiga.

Os pavimentos flexíveis permitem uma deformabilidade elevada (250 a 500 μm) e a cada carga solicitante, verifica-se um estado de compressão na parte superior da camada betuminosa e um estado de tração na parte inferior (BRANCO et al., 2011), de maneira que o pavimento será dimensionado para garantir o maior número de ciclos possível, num compromisso entre o tempo de vida e o investimento económico para esse efeito.

Apesar da resistência à fadiga estar normalmente associada a maiores teores em betume, assim com à sua flexibilidade, estabilidade e durabilidade, o ligante em excesso poderá prejudicar a adequada ligação entre as partículas, tornando a mistura demasiado susceptível às deformações permanentes.

Assim, para além da resistência à fadiga, outras características são normalmente requeridas para as misturas betuminosas nomeadamente a estabilidade, a durabilidade, a flexibilidade, a aderência, a impermeabilidade e a trabalhabilidade (BRANCO et al., 2011). Todas estas características estão intrinsecamente ligados com a qualidade e a distribuição adequada de betume e principalmente dos agregados, como se descreverá no desenvolvimento do presente trabalho.

Relativamente aos agregados é importante destacar que estes constituem entre 90% a 95% do peso e 75% a 85% do volume nas misturas betuminosas, sendo estes normalmente de origem natural provenientes da extração de areias, de cascalheiras e da exploração de pedreiras (BRANCO, et al., 2011). Por estes apresentarem muito boas características, principalmente quando britados, são utilizados preferencialmente quer nas camadas betuminosas mas também nas camadas granulares, principalmente na camada de base.

Face a esta necessidade de material natural e à continuidade da sua exploração, é mais do que ambientalmente pertinente a sua substituição por materiais reciclados, artificiais ou alternativos.

No presente trabalho avaliam-se os agregados siderúrgicos como potencial substituto dos materiais naturais para aplicação em misturas betuminosas, promovendo uma gestão mais sustentável destes resíduos provenientes da produção de aço.

2.3. AGREGADO SIDERÚRGICO INERTE PARA CONSTRUÇÃO - ASIC

A produção de ferro e de aço geram dois tipos de escórias, as escórias de alto-forno e as escórias de aciaria, respetivamente. Estas são genericamente um coproduto resultante da separação da parte metálica contida nos minérios de ferro ou nas sucatas ferrosas, das restantes “impurezas”.

A variabilidade das características e propriedades destas escórias dependem essencialmente:

- ✓ Do tipo de forno utilizado;
- ✓ Da matéria-prima utilizada, minério ou sucata;
- ✓ Da fase de produção do ferro ou do aço em que se faz a recolha das escórias, oxidantes ou redutoras;
- ✓ Do processamento e tipo de arrefecimento dado a essas escórias;
- ✓ Das especificações pretendidas para o produto final, ou seja do ferro e do aço.

No processo de fabrico de ferro e de aço, quer na utilização dos minérios quer na utilização de sucata, quanto mais rica for a matéria-prima em ferro e menos impurezas tiver a mesma, menor a quantidade de material escorificante (normalmente cal ou calcário) necessário logo, menor quantidade de escórias serão produzidas (SAMARIS, 2006).

Nas seguintes secções serão apresentadas as escórias de alto forno e as escórias de aciaria, sendo que apenas as últimas são objeto do presente estudo, nomeadamente as provenientes de fornos de arco elétrico.

2.3.1. ESCÓRIAS DE ALTO-FORNO

Resumidamente a escória de alto-forno é resultante da produção de ferro e decorre do processo de fusão dos seus minérios nomeadamente, a Hematita preta (Fe_2O_3), a Hematita vermelha (FeO_3), a Magnetita (Fe_3O_4) e a Limonita ($\text{Fe}(\text{OH})_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$). A fusão do minério em conjunto com o coque (carbono) e com o calcário, resulta no ferro gusa com uma elevada percentagem de carbono (aproximadamente 5%) e numa escória proveniente da combinação das impurezas (o material não ferroso) com o calcário adicionado. O ferro gusa por sua vez servirá para a produção de ferro fundido ou para alimentação das aciarias na produção de aço (THOMAZ, 2012).

Estas escórias são uma combinação da sílica e da alumina (dos minérios) com o calcário adicionado, dando origem aos óxidos de sílica, de calcário, de alumina e de magnésio que, representam cerca de 95% da constituição das escórias de alto-forno (NSA, 2014).

Maioritariamente na composição química das escórias de alto-forno estão presentes os seguintes constituintes: 40,58% em CaO (óxido de cálcio ou cal), 34,50% em SiO₂ (dióxido de silício ou sílica), 8,48% em MgO (óxido de magnésio ou magnésia), 11,70% em Al₂O₃ (óxido de alumínio ou alumina), 0,82% em S (enxofre), 0,51% em FeO (óxido de ferro), 0,53% em MnO (óxido de manganésio) e 0,26% em K₂O (óxido de potássio) (SAMARIS, 2006).

As propriedades físicas da escória proveniente do alto-forno variam conforme o método de arrefecimento e o seu processamento, sendo classificadas da seguinte forma (NSA, 2014):

- ✓ Escória de alto-forno arrefecida ao ar em que, tal como nome indica, esta é arrefecida lentamente ao ar e sujeita às condições atmosféricas. Apenas na fase final do seu arrefecimento poderá ser utilizado um jacto de água para acelerar o processo. De seguida a escória é britada e crivada em diversas frações;
- ✓ Escória de alto-forno expandida é arrefecida rapidamente com quantidades de água controlada, de tal forma que a escória adquira uma estrutura celular e vesicular que lhe confere depois de “triturada” as características de um agregado leve;
- ✓ Escórias de alto-forno granuladas, sendo a escória de mais rápido arrefecimento e com elevadas quantidades de água não ocorrendo praticamente cristalização na sua estrutura. Devido a este fato, este material assume um aspeto vidrado e granular tipo “areia”.

O arrefecimento brusco confere às escórias uma estrutura pouco cristalina (sem tempo para a formação de cristais), ou seja amorfa e de reduzida resistência, reduzida densidade e elevada porosidade devido ao aprisionamento de bolhas de ar como resultado deste arrefecimento com água. Este fato garante às escórias as características cimentícias adequadas para o cimento, ou seja fica ativa (endurece) no contacto com a água. Este material é também um excelente drenante para camadas granulares inferiores, tendo como grande desvantagem a reduzida resistência à fragmentação, não devendo por isso ser aplicadas em zonas de tráfego elevado e pesado (SAMARIS, 2006).

Por outro lado o arrefecimento lento ao ar possibilita uma lenta extração do calor e dos vapores, conferindo uma elevada massa volúmica ao material, sendo a sua estrutura mais cristalina o que confere uma elevada resistência mecânica, boa estabilidade e pouca sensibilidade à água e por isso com características adequadas para o uso na pavimentação em substituição dos agregados naturais.

Na Figura 3 pode observar-se a diferença granulométrica que decorre de um arrefecimento lento e um arrefecimento brusco.



Figura 3 - Escória de alto-forno de arrefecimento lento à esquerda e de arrefecimento brusco à direita (EUROSLAG, 2014)

2.3.2. ESCÓRIAS DE ACIARIA

A produção de aço divide-se em dois tipos de siderurgia, a siderurgia integrada, onde a matéria-prima fonte de ferro é o minério natural, e a siderurgia semi-integrada onde é utilizada sucata ferrosa para fusão.

Os fornos utilizados na produção do aço são de três tipos, sendo que os dois primeiros exemplos são siderurgias integradas e o ultimo exemplo são siderurgias semi-integradas:

- ✓ Fornos *Siemens-Martin (Open Heart (OH))*;
- ✓ Fornos conversores a oxigénio, *Basic Oxygen Furnace (BOF)* ou *Linz-Donawitz (LD)*;
- ✓ Fornos de arco elétrico, *Electric Arc Furnace (EAF)*.

Segundo a *WorldSteel* (2014) a evolução mundial na produção de aço em siderurgia semi-integrada com recurso a fornos de arco elétrico (*EAF*), tem vindo a crescer significativamente, substituindo principalmente os fornos conversores a oxigénio (*BOF*) visto que a percentagem do tipo *OH* é já muito diminuta e quase inexistente.

Tal como representado na Figura 4, a UE produz cerca de 42% do aço em fornos de arco elétrico (*EAF*) e os EUA cerca de 62% (*WorldSteel*, 2014 adaptado de GENET, 2012).

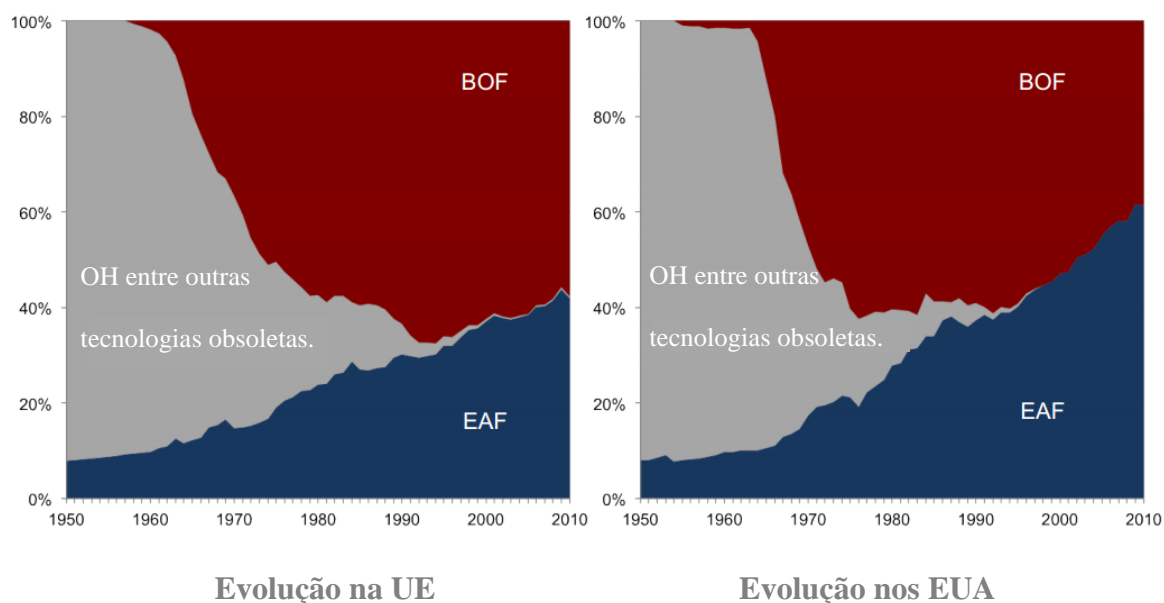


Figura 4 - Evolução do tipo de siderurgia usada nos EUA e na UE (*WorldSteel*, adaptado de GENET, 2012)

Esta substituição da siderurgia integrada (*BOF*) para a siderurgia semi-integrada (*EAF*) é justificada pela enorme vantagem económica e ambiental, dado que (*BIR*, 2015):

- ✓ Economicamente a instalação de uma nova siderurgia semi-integrada custa 4 vezes menos, a operação e manutenção anual custa menos 7%, é necessário menor investimento em substituição de peças e equipamentos e também há um menor investimento para reduzir a poluição ambiental;
- ✓ Ambientalmente apresenta também menos consumo em energia (-74%), matérias-primas (-90%) e água (-40%) e produz menos poluentes para a água (-76%) e para o ar (-86%) e ainda reduz 97% em desperdícios/resíduos da extração mineira e 58% em CO₂.

Assim, reciclar 1 tonelada de aço permite poupar 1100 kg de minério, 630 kg em carvão, 55 kg em calcário e ainda 642 kWh de energia, 287 litros em óleos, 10,9 Btu's de energia e 2,3 m³ em ocupação de depósito das sucatas (*BIR*, 2015).

A nível nacional são duas as siderurgias a operar, a Siderurgia do Seixal em Paio Pires e a Siderurgia da Maia, que são exclusivamente do tipo semi-integrada e com fornos de arco elétrico.

A particularidade deste tipo de forno traduz-se na produção de dois tipos de escória, a escória negra proveniente da fase final de oxidação e a escória branca proveniente da fase de redução, ao contrário dos fornos *OH*, *BOF* e *LD* que apenas geram escórias negras.

A escória branca é considerada um resíduo, isto porque não possui qualquer viabilidade de utilização na área da pavimentação devido aos elevados teores de cal nela contida.

Já a escória negra é considerada um subproduto dado o seu valor comercial e pela diversidade de possibilidades de utilização. Após um adequado processamento esta escória é designada e comercializada em Portugal com o nome de ASIC (*Agregado Siderúrgico Inerte para Construção*).

Este material será alvo de estudo no presente trabalho e a Figura 5, apresenta o aspeto do ASIC proveniente dos fornos de arco elétrico arrefecido ao ar.



Figura 5 – Aspeto do ASIC proveniente do forno de arco elétrico (*EUROSLAG*, 2014)

2.3.3. PROCESSAMENTO DO ASIC

Como já referido, as escórias negras resultam de um processo que consiste em retirar todas as impurezas que se encontram dissolvidas no “líquido” da fusão dos materiais ferrosos que alimentam os fornos das aciarias.

O processo de produção do aço é dividido em duas fases distintas, a fase da fusão e a fase da afinação.

Na fase da fusão, o forno é alimentado com a sucata ferrosa e são adicionados os componentes escorificantes, normalmente a cal. Esta última reage com a parte não metálica ou seja as impurezas, dando origem à formação da escória negra.

Na fase de afinação decorrem ainda 3 subfases, a oxidação, a redução e o ajuste/afinação final da composição, sendo que (ROQUE et al., 2006):

- ✓ A fase de oxidação, a primeira e mais importante fase da afinação para a criação das escórias negras, é caracterizada pela injeção de oxigénio de forma a eliminar os componentes indesejáveis no aço como o silício, o manganês e o fósforo entre outros, formando-se os respetivos óxidos que passam à escória. Esta escória em fase líquida possui uma reduzida densidade em relação ao restante banho, pelo que flutua no mesmo e permite a sua cuidadosa extração. A eliminação do carbono é feita com a fervura do banho que passa para o estado gasoso (CO₂);
- ✓ A fase de redução, tem como objetivo obter um metal de baixo conteúdo em oxigénio e eliminar a maior parte do enxofre, pelo que é adicionada mais cal. Esta irá atuar como dessulfurante, baixar o ponto de fusão da escória e de alguns elementos desoxidantes, de forma a fixar o oxigénio e produzindo assim uma nova escória, a escória branca. Estas escórias devido à sua composição rica em cal não são possíveis de utilizar em obras geotécnicas nem nas infra-estruturas rodoviárias;
- ✓ Na fase de ajuste/afinação da composição, fazem-se os ajustes dos componentes pretendidos com a adição e dissolução de ferroligas em pequenas quantidades criando assim o aço com as propriedades desejadas. Após a homogeneização desta mistura em fusão, inicia-se o processamento do material em lingotes ou barras para produção do aço nas formas pretendidas.

Os três processos de refino acima descritos têm em comum o objetivo da remoção do carbono (C), do manganês (Mn), do fósforo (P) e do silício (Si) até se atingirem os teores exigidos para cada aplicação e especificação do aço pretendido.

Nesses processos, o oxigénio injetado funciona como agente oxidante, daqui o nome de escória oxidante (negra) e a cal/óxido de cálcio (CaO) como elemento escorificante no fluxo de refino. A escória redutora (branca) é gerada após o vazamento da escória oxidada, à qual é adicionada óxido de cálcio/cal (CaO₂) e fluorite/fluoreto de cálcio (CaF₂), para promover a dessulfuração do aço líquido e a adição de elementos de liga (MACHADO, 2000).

De seguida é efetuado o processamento destes resíduos que os valorizará como ASIC, processo este que passará por três fases distintas (ROQUE et al., 2006). Este processamento é mais dirigido e vocacionado para a posterior utilização do material nas obras de engenharia civil, nos ramos da geotecnia e da pavimentação, conforme a seguir se apresenta:

- ✓ Na primeira fase dá-se o escoamento e arrefecimento da escória para uma zona impermeabilizada e de drenagem devidamente controlada, para não se perderem as partículas mais pequenas. Este arrefecimento poderá ser feito simplesmente ao ar ou através de jatos de água quer no final, quer no início do arrefecimento ou em ambos os momentos. A fase de arrefecimento é muito importante para o controlo da porosidade e da textura da escória, características que se verão mais adiante serem extremamente importante para a sua utilização. Se o arrefecimento foi muito rápido, verifica-se o aprisionamento de pequeníssimas bolhas de ar no seu interior dando-lhe uma menor densidade e conseqüentemente uma maior porosidade, caso contrário se o arrefecimento for muito lento, o material apresentará uma estrutura mais cristalina, mais resistente e com maior massa volúmica. Após esta fase a escória é codificada com “*escória não processada*” (código 10 02 02) segundo a LER (Lista Europeia de Resíduos, Portaria n.º 209/2004)). Depois do arrefecimento primário, esta é posteriormente transportada de camião para uma zona de armazenamento onde se poderá completar o seu arrefecimento, novamente com água ou apenas ao ar.

A Figura 6 demonstra uma *box* de arrefecimento nas instalações da empresa HARSCO a operar na SN do Seixal, onde se realiza o primeiro estágio de processamento da escória, através do seu arrefecimento ao ar e com rega.



Figura 6 - *Box* de arrefecimento das escórias nas instalações da *HARSCO* na SN do Seixal

- ✓ Na segunda fase do processamento das escórias é necessário proceder à remoção da componente metálica mais grosseira que possa ainda estar presente na escória. Esta remoção é feita através da britagem das escórias que deixara a descoberto os materiais metálicos maiores e cuja extração é feita por tambores magnéticos. Este material ferroso irá novamente alimentar o forno. A escória resultante desta fase está catalogada como “*resíduos do processamento de escórias*” (código 10 02 01) na LER, possuindo ainda pequenos elementos metálicos. Na Figura 7 apresenta-se o equipamento cujo ciclo permite o processamento de britagem e crivagem do ASIC.



Figura 7 - *MRP (Metal Recovery Plant)* nas instalações da *HARSCO* na SN do Seixal

- ✓ Na terceira e última fase do processamento será feita a valorização da escória, criando-se o agregado siderúrgico inerte como material de construção (ASIC). Primeiro é feita a separação granulométrica pelo método da peneiração por tipo de

aplicação e normalmente a escória apresenta uma granulometria mais grosseira, sendo que se poderá fazer nova fragmentação e/ou moagem para produzir a granulometria desejável, fazendo-se aqui também a extração dos pequenos elementos/aparas metálicas ainda presentes, novamente por magnetismo mais leve. Após esta fase, o seu armazenamento e acondicionamento devem ser feitos de forma a expor o material aos agentes atmosféricos, nomeadamente para a sua hidratação quando sob precipitação. Este procedimento é altamente recomendável por um período mínimo de 2 a 3 meses para a maior eliminação/hidratação de alguma cal livre que exista na sua composição e controlo do seu PH, fatores importantes para a estabilização expansiva do material.

Na Figura 8 apresenta-se um conjunto de fotos recolhidas nas diferentes pilhas de ASIC na SN do Seixal, onde são visíveis algumas das granulometrias possíveis.



Figura 8 - Granulometrias produzidas na SN do Seixal pela empresa *HARSCO*

2.3.4. CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL

A composição química dos agregados siderúrgicos é a característica que maiores dúvidas coloca, quando se pretende aplicar este material em pavimentos rodoviários. Apesar das suas excelentes características geométricas, físicas e mecânicas, os problemas que poderão advir da sua composição química, se esta não for tomada em devida consideração, poderão condicionar a sua utilização.

De acordo com as normas de gestão e valorização de resíduos, é necessária a avaliação da composição química dos materiais cuja experiência e utilização é diminuta. Tendo em conta este fato, a bibliografia refere dois aspetos particularmente importantes e que decorrem da sua composição rica em óxidos e em metais ferrosos, nomeadamente a lixiviação e a expansibilidade. A lixiviação prende-se essencialmente com o fator

ambiental, pois a sua composição poderá apresentar teores significativos de metais pesados que poderão contaminar os solos onde se inserem. Por outro lado, a expansibilidade é mais relevante no respeito ao desempenho da infraestrutura, pois a variação de volume não é desejável nos materiais a incorporar os pavimentos rodoviários.

Nos seguintes subcapítulos, apresenta-se a recolha bibliográfica realizada sobre cada um destes temas, para análise das metodologias a adotar de modo a viabilizar a sua utilização em misturas betuminosas.

2.3.4.1. LIXIVIAÇÃO

Como já referido anteriormente, a composição química dos agregados siderúrgicos, para além de apresentar uma grande variabilidade dos seus componentes, pode conter percentagens significativas de materiais pesados com potencial poluente para o meio ambiente e para a saúde pública.

Apesar destes agregados apresentarem boas propriedades físicas e mecânicas, a sua caracterização química e ambiental é um requisito obrigatório imposto pelas políticas comunitárias para a valorização de materiais alternativos e que deverá ser complementado com ensaios de campo (*SAMARIS*, 2006).

A avaliação das propriedades químicas dos agregados deve ser feita ao lixiviado reproduzido em laboratório pela análise do eluato (NP EN 1744-3:2005).

Num estudo desenvolvido pelo LNEC foram analisadas as escórias nacionais quanto à lixiviação pela análise do eluato de acordo com a norma DIN 38414-S4 (NP EN 1744-3:2005 ainda não se encontrava em vigor), tendo-se concluído que este material é inerte (CORREIA et al., 2010a). Embora os resultados tenham verificado alguma heterogeneidade química nas amostras analisadas, foram respeitados todos os valores previstos no anexo III do DL 152/2002 de 23 de maio.

No Quadro 1 apresentam-se os valores obtidos apenas para os elementos mais significativos das amostras com 3 e 6 meses de maturação.

Quadro 1 – Resultados da análise da lixiviação**Lixiviação - Análise do eluato [LNEC, 2005]
Proveniência SN Maia**

| Parâmetros | Média de 5 amostras | Média de 5 amostras | Limites DL 152/2002 |
|-----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | 3 meses maturação | 6 meses maturação | |
| PH | 10,3 | 10,64 | 5,5 < PH < 12 |
| Condutividade (mS/cm) | 0,118 | 0,1604 | 6 < CE < 50 |
| Cádmio (mg/L) | < 0,009 | | 0,1 |
| Cobre (mg/L) | < 0,025 | | 2 |
| Crómio total (mg/L) | < 0,05 | | 0,5 |
| Níquel (mg/L) | < 0,04 | | 0,5 |
| Chumbo (mg/L) | < 0,06 | | 0,5 |
| Zinco (mg/L) | < 0,008 | | 2 |
| Cloretos (mg/L) | < 3 | | 500 |
| Sulfatos (mg/L) | < 10 | | 500 |
| Amónio (mg/L) | < 0,13 | | 5 |

Para além dos resultados obtidos em laboratório foi ainda efetuada a monitorização ambiental através do lixiviado recolhido em dois lisímetros construídos, um na secção de referência composta com materiais naturais e outro na secção com ASIC, tendo sido alimentados maioritariamente por *joper* de água (cerca de 80%) e o restante pela precipitação. Apesar de se verificarem na secção com ASIC valores superiores aos obtidos na secção de referência, nomeadamente nos sulfatos e cloretos, todos os valores com exceção dos nitritos encontram-se abaixo do recomendado no Decreto-Lei referido, pelo que se concluiu não existir risco nem para a saúde pública nem para o meio ambiente (CORREIA et al., 2010a)).

Também ROCHA (2011), no âmbito de um estudo realizado com a utilização de escórias de aciaria provenientes de fornos conversores a oxigénio, concluiu da análise de amostras lixiviadas, a classificação deste material como inerte e não perigoso.

PASETTO e BALDO (2011) verificaram que, embora se tenham denotado algumas diferenças no que diz respeito à presença de materiais pesados em cada amostra ensaiada, uma com maior concentração de óxidos de ferro outra de óxidos de cal, e ainda significativos valores de sílica e alumina em ambos, os valores obtidos dos ensaios de lixiviação situam-se abaixo do requisito, garantindo assim a classificação de “não tóxicos, não nocivos e não perigosos”.

Também o estudo *IHOBE* (1999) concluiu que cerca de 91% de todas as escórias produzidas em Espanha são possíveis de utilizar em camadas de desgaste e cerca de 73% podem ser utilizadas em camadas de aterro, base e sub-base, sem problemas relativamente ao seu lixiviado. Este estudo indica ainda que a utilização deste material em misturas betuminosas é favorável desde que os agregados se encontrarem devidamente envolvidos pelo betume, limitando assim o acesso da água.

Em Itália estudou-se a utilização de escórias dos fornos de arco elétrico em camadas betuminosas de base, sub-base e desgaste e foi verificado que, apesar de uma composição significativamente rica em cobre, bário, alumina, ferro e magnésio, os valores do lixiviado situaram-se expressivamente abaixo dos limites previstos na legislação desse país (*Ministerial decree* 2006/186), mas que ainda assim não devem ser menosprezados (SORLINI et al., 2012).

Na Suécia foi avaliada a composição química do lixiviado recolhido de um pavimento com utilização de ASIC nas camadas granulares, após 10 anos de serviço. Foram recolhidas amostras na zona central da faixa de rodagem e na zona da berma. Comparadas entre si verificou-se que as amostras da berma apresentavam traços de lixiviação e de carbonatação e que as amostras do centro do pavimento apresentavam valores muito aproximados aos da escória no seu estado inicial antes da aplicação, ou seja não sofreu alterações após o período de serviço. Assim, os valores registados foram reduzidos e sem evidenciar reações significativas, verificando-se apenas um ligeiro abaixamento do PH (de 12 para 11,6), ou seja após 10 anos de serviço sob as severas condições climáticas deste país, não se denotam alterações significativas que evidenciem qualquer risco ambiental (SUER et al., 2009).

Apesar da maioria da bibliografia consultada classificar este material como inerte e sem potencial de contaminação dos solos, existem alguns autores que o classificam como inerte, mas com as devidas ressalvas.

Por exemplo num estudo realizado por BICALHO (et al., 2009) as escórias foram caracterizadas como não tóxicas e sem potencial de contaminação mas não totalmente inertes (NBR/10.004/04).

ROHDE (2002) realizou ensaios de lixiviação (NBR 10.005 (ABNT, 1987)) e de solubilização (NBR 10.004 (ABNT, 1987)) a agregados siderúrgicos do tipo FAE, concluindo que o material não era totalmente inerte, principalmente devido às concentrações de cádmio, chumbo, cromo e carbonato de cálcio acima do previsto.

Posteriormente adicionou 20% de cinza pesada e 3% de cal, comprovando uma melhoria nos resultados da lixiviação e da solubilização, com a classificação de “inerte”.

Também no Brasil a empresa Gerdau Cearense S.A., produtora e detentora de escórias provenientes da produção de aço no estado de São Paulo, realiza semestralmente a análise deste material para avaliar o seu potencial de contaminação do solo. Desta avaliação resulta também uma classificação idêntica à já mencionada anteriormente, classe II. Esta situação é naturalmente expectável tendo em conta que a avaliação se realiza sobre o material ainda sem o período de maturação necessário (BRANCO, 2004).

Na consulta bibliográfica realizada não foi encontrado qualquer estudo ou trabalho que inviabilizasse a utilização das escórias siderúrgicas, muito pelo contrário, a comunidade científica é clara em afirmar que mediante a adequada maturação do material a sua aplicação é segura. Eventualmente o seu tratamento quer na fase de processamento, quer na mistura com outros materiais poderá também promover a sua estabilização.

2.3.4.2. EXPANSIBILIDADE

A estabilidade volumétrica dos agregados sob ação das condições atmosféricas é um dos principais requisitos para os materiais a incorporar em pavimentos rodoviários, e a composição química do ASIC poderá comprometer essa condição devido ao elevado teor em óxidos na sua estrutura.

As excelentes características físicas e mecânicas do ASIC são apenas contrariadas pela sua composição química, principalmente constituída por silicatos de cálcio e alumínio ferrites e ainda uma elevada presença de óxidos de cálcio (CaO), magnésio (MgO), manganésio (MnO) e ferro (Fe₂O₃) que correspondem a mais de 95% da sua constituição (NSA, 2014).

Os óxidos referidos constituem um elevado potencial expansivo principalmente devido à hidratação do CaO (cal livre) e do MgO. Ainda que de uma forma menos expressiva, deve também ter-se em conta a expansão devido à oxidação e à carbonatação dos elementos ferrosos. Segundo ROHDE (2002) tais fenómenos podem aumentar até 14% do volume original do agregado, mas um período mínimo de 4 meses de maturação garante a sua estabilização minimizando este fato para valores aceitáveis.

A cal livre (CaO) é adicionada como material escorificante, ou seja irá reagir com o material não ferroso considerado impureza na composição final do aço e que, não sendo

totalmente consumida no processo de oxidação e de refino, acaba em percentagens significativas nas escórias de aciaria.

A presença do óxido de magnésio (MgO) deve-se essencialmente à utilização de cal dolomítica ($\text{CaCO}_3 \text{ Mg CO}_3$) como material protetor do revestimento refratário dos fornos das aciarias, que devido ao desgaste e degradação desse mesmo revestimento introduz esse elemento no fluxo.

Importa também referir a extrema importância para os teores de cada um destes elementos nas escórias. Para elevados teores de CaO, a expansão é mais rápida podendo demorar semanas a estabilizar, já no caso do MgO a expansão é muito mais lenta podendo durar anos (EMERY, 1984).

Assim, a utilização das escórias de aciaria nos pavimentos rodoviários sem a garantia da estabilização química das mesmas, representa um risco elevado para a durabilidade e estabilidade quer em camadas granulares, quer em misturas betuminosas e conseqüentemente no desempenho de toda a infraestrutura. Os fatores que alteram a capacidade expansiva dos agregados siderúrgicos devido aos óxidos de cal e de magnésio, dependem dos seguintes aspetos (ROHDE, 2002; BRANCO, 2004):

- ✓ A rapidez no arrefecimento, dado que a dimensão dos cristais destes óxidos que quanto mais pequenos forem (devido ao arrefecimento rápido) mais rápida será a sua hidratação e estabilização, enquanto os cristais de maiores dimensões (devido ao arrefecimento lento) necessitam de mais tempo;
- ✓ O tempo de maturação/exposição aos agentes atmosféricos e as condições das pilhas de armazenamento;
- ✓ O tipo de forno utilizado para a produção do aço.

O processo químico de expansão com maior expressão é sem dúvida a hidratação dos óxidos de cal e de magnésio, cujas reações são apresentadas no Quadro 2 e as respetivas variações de volume (MACHADO, 2000; RAPOSO, 2002).

Quadro 2 - Reações de hidratação do CaO e do MgO

| Reação | Resultado | Nome do elemento | Variação de volume ¹ |
|-----------------------------------|-------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$ | Ca(OH)_2 | Hidróxido de cálcio | 99,4% |
| $\text{MgO} + \text{H}_2\text{O}$ | Mg(OH)_2 | Hidróxido de magnésio ou brucita | 119,6% |

¹ WEST, R.C. HandBook of chemistry. 52 ed. Cleveland, 1971.

Ainda que com menor expressão o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) poderá ainda dar origem à Calcita ou Aragonita (CaCO_3) por carbonatação, verificando-se um aumento de volume de cerca de 11% (105,9% em relação ao CaO original) e de 16,7% (122,6% em relação ao CaO original), respetivamente, tal como se apresenta no Quadro 3 (RAPOSO, 2002; MACHADO, 2000).

Tendo em conta também a elevada percentagem de ferro presente na composição das escórias de aciaria, a sua exposição aos elementos atmosféricos leva também a reações que promovem a expansão do material devido à corrosão e oxidação desse ferro, de acordo com as reações também apresentadas no Quadro 3.

Quadro 3 – Reações dos óxidos constituintes das escórias

| Reação de Carbonatação | Resultado | Nome do elemento | Variação de volume¹ |
|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------|
| $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2$ | $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ | Calcita | 105,9% ² |
| | | Aragonita | 122,6% ² |
| $2 \text{CaCO}_3 + \text{Mg}^{2+}$ ⁴ | $\text{CaCO}_3 \text{ Mg CO}_3$ | Dolomita | 287,3% ² |
| Reação de Corrosão | Resultado | Nome do elemento | Variação de volume¹ |
| $\text{Fe}^{+2} + 2\text{OH}^-$ | Fe(OH)_2 | Hidróxido Ferroso | 271,7% ³ |
| $4\text{Fe(OH)}_2 + \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ | 4Fe(OH)_3 | Hidróxido Férrico | -- |
| $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$ ⁵ | FeO(OH) | Goetita | 192,0% ³ |
| Reação de Oxidação | Resultado | Nome | Variação de volume¹ |
| $\text{Fe}^0 + \frac{1}{2} \text{O}_2$ | FeO | Wustita | 77,4% ³ |
| $2\text{Fe}^0 + \frac{3}{2} \text{O}_2$ | Fe_2O_3 | Hematita | 328,7% ³ |
| $3\text{Fe}^0 + 2\text{O}_2$ | Fe_3O_4 | Magnetita | -- |

¹ WEST, R.C. HandBook of chemistry. 52 ed. Cleveland, 1971.

^{2,3} Valores referentes ao elemento base antes da reação, ou seja o CaO, e ao Fe^0 .

⁴ Fonte: <http://en.wikipedia.org/wiki/Dolomitization>

⁵ <http://www.rc.unesp.br/museudpm/banco/oxidos/goetita.html>

Outro fenómeno registado em Ontário, Canadá e referido no estudo de BRANCO (2004, citando COOMARASAMY e WALZAK, 1995), foi o fendilhamento em pavimentos betuminosos com integração de escória de aciaria cuja “responsabilidade” foi atribuída à presença de *Tufa*. A *Tufa* consiste basicamente em cálcio carbonatado, ou seja quando a escória é exposta à água e ao ar, surgem umas camadas extremamente macias e esponjosas, pontualmente nas zonas mais húmidas do agregado, capazes de reter água e impedindo uma drenagem adequada e ao mesmo tempo, permitindo um severo ciclo de

gelo e degelo que destrói a ligação das misturas com a abertura de fendas (BRANCO, 2004, citando GUPTA e KNELLER, 1993).

O estudo *SAMARIS* (2006) refere que a nível da expansibilidade a utilização do ASIC em camadas betuminosas é mais favorável do que quando usado em camadas granulares não ligadas, devido ao envolvimento dos agregados por betume limitando “o acesso” à hidratação dos óxidos existentes no material (*SAMARIS*, 2006).

Também a superfície do ASIC por ser mais rugosa e abrasiva, para além do excelente imbricamento e das suas excelentes propriedades à fricção, confere também uma boa afinidade com o betume. Esta característica permite que, com um adequado e durável envolvimento do ASIC no ligante, minimize a hidratação dos óxidos e a consequente expansão (DENIZ et al., 2009).

Para além deste fato, alguns estudos indicam que existe um valor mínimo de volume expansivo capaz de ser internamente compensado pelo próprio valor de vazios destes agregados. Face à elevada porosidade deste material, ROHDE (2002) citando DUDA (1989) e CONJEAUD (1981), afirma que teores de cal livre entre 7% e 4% não são prejudiciais à durabilidade dos pavimentos, tornando o aumento de volume aparentemente nulo.

Para além deste fato WANG et al. (2010) constatou a capacidade de absorção de parte da expansão pela porosidade do ASIC, estabelecendo mesmo uma equação que prevê o volume expansivo do ASIC, tendo por base o conhecimento adquirido nos agregados de calcário, relacionados com a expansão quer do calcário, quer da cal livre na sua constituição. Basicamente, quando se dá a expansão do calcário por hidratação, também aumentam os volumes de vazios, numa relação de 1% para 0,351% respetivamente, conforme esquematizado na Figura 9 adaptada de WANG et al. (2010).

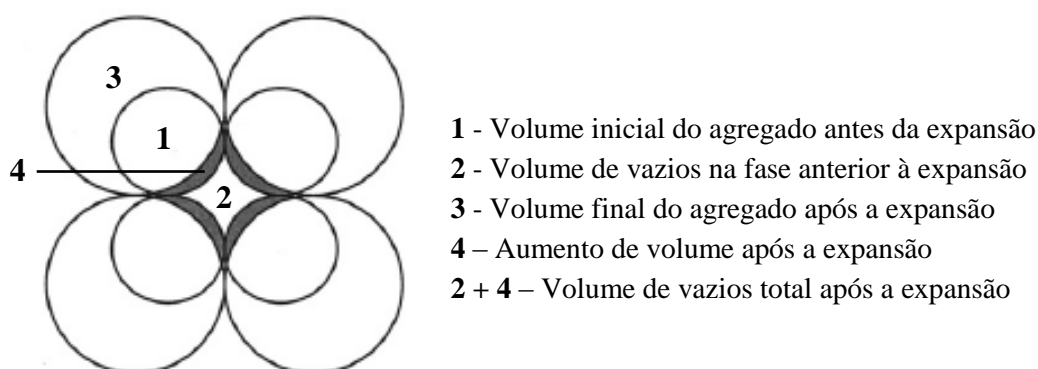


Figura 9 - Esquema do processo expansivo

Seguindo este conhecimento e sabendo que o ASIC não expande devido à hidratação do calcário mas sim da cal livre, foi testado laboratorialmente conforme preconizado pela norma ASTM D4792, a expansibilidade das escórias da fração 16/20 provenientes de fornos conversores a oxigênio (*BOF*) e os resultados compararam-se com os valores obtidos pela da fórmula desenvolvida por WANG (et al. 2010). Este estudo conclui não só da excelente correlação desta fórmula na previsão da expansibilidade após as duas primeiras semanas de hidratação (fase em que se verifica uma maior estabilização da hidratação) mas também, que na maioria dos casos em que o ASIC é aplicado em camadas de base granulares, os volumes de expansão verificados são absorvido pela porosidade do próprio material sem alteração aparente do mesmo. WANG (et al., 2010) verificou ainda que o volume de expansão poderá mudar em função da sobrecarga a que o material está sujeito, ou seja, quando aplicada uma sobrecarga que simule as condições de serviço, os valores de expansão são entre 7,7% a 10,9%, inferiores ao que se verifica sem esta sobrecarga. De anotar ainda que estas diferenças são maiores nos primeiros dias de ensaio e são menores passadas duas semanas, denotando a estabilização por hidratação ao longo desse período.

Assim, para teores de cal livre entre os 2,4% e os 3,5%, verificou-se uma expansão entre os 0,62% e os 2,55% (no caso mais desfavorável de não ter sobrecarga) e concluiu-se que para uma utilização segura em camadas de base granular, o teor de cal livre não deverá ultrapassar os 3,7% – 3,9% para que a capacidade de absorção da expansibilidade pelo seu próprio volume de vazios (cerca de 7,5%) não seja excedida. Concluiu-se ainda que os valores de expansão a muito curto prazo são quase exclusivamente influência da cal livre (WANG, et al., 2010).

Estudos laboratoriais para investigação da expansibilidade nos agregados siderúrgicos pela norma ASTM D4792, concluíram que a escória de aciaria não porosa (de arrefecimento mais lento) obteve um máximo de expansibilidade de 6,18%, maioritariamente devido à cal livre e que a escória de aciaria superficialmente porosa (arrefecimento mais rápido) obteve um máximo de 4,14%. Segundo a ASTM D2940 o limite máximo admissível para aplicação de materiais com potencial expansivo para camadas de base e sub base é de 0,5% aos 7 dias, conforme preconizado pela norma ASTM D4792.

ROHDE (2002) citando COOMARASAMY e WALZAK (1995) na sua investigação, mostrou que teores de cal livre entre 3% e 4,7% para escórias do tipo LD e

teores de CaO de 41,5% e 45,3%, apresentaram cerca de 1% de expansão quando ensaiadas pelo método da ASTM 4792/95 às 168 horas de ensaio.

Ainda em Espanha o estudo *IHOBE* (1999) conclui que cerca de 82% das escórias corresponde aos requisitos de expansibilidade e nos restantes casos a maturação mais prolongada poderá resolver esse problema. Este estudo concluiu ainda que em termos químicos e ambientais, cerca de 91% das escórias podem ser usadas na camada de desgaste, pois das 12 amostras analisadas apenas uma tinha valores de selénio acima do previsto.

Também naquele país foram avaliadas as propriedades e características das escórias negras de aciaria provenientes de arcos de forno elétrico alimentados a sucata ferrosa e apesar da sua composição química apresentar em abundância os elementos Fe, Ca, Mn, Al e Mg, a existência dos óxidos de cal e magnésio, de sulfatos e sulfuretos, são baixos o suficiente para se apontar a estabilidade volumétrica, assim como a presença de silicato de cálcio não hidratado (em particular Iarnite) que indicam baixo potencial na atividade com a presença de água. (LÚXAN et al., 2000).

Segundo um estudo realizado por BICALHO (2009), analisadas as escórias produzidas no Brasil através de raio-x, comprovou-se que as escórias provenientes dos fornos conversores a oxigénio (*BOF*), possuem maiores teores de CaO e MgO do que as provenientes dos fornos de arco elétrico (*EAF*), pelo que é expectável uma maior variação de volume no material proveniente dos fornos *BOF*.

Este estudo comparou inicialmente 3 métodos para avaliação da expansão, ASTM D4972/00 (0,5% de expansão aos 7 dias), JIS A 5015/92 (2,0% de expansão aos 10 dias) e PTM-130/78 (3,0% de expansão aos 14 dias) tendo atribuído maior fiabilidade a este último método. Estas três normas de ensaio são conceitualmente semelhantes e consistem na imersão de um provete previamente compactado em água quente e na avaliação do aumento de volume em função da variação de altura do provete. No Brasil o estudo do DNIT-PRO (Departamento Nacional de Infra-estruturas de Transportes, 1994) prevê uma expansibilidade máxima de acordo com a norma Brasileira DNER – ME 262/1994, de 3,0% aos 14 dias pelo método PTM-130/78, para aplicação das escórias de aciaria em camadas de base e sub-base granulares.

BICALHO et al. (2009) conclui então de acordo com o método PTM-13078 que, apenas as escórias do tipo *EAF* têm valores de expansão que respeitam os requisitos das

três normas referidas, obtendo valores entre 0,3% iniciais e os 0,4% aos 14 dias, muito abaixo do limite de 3,0% referido.

TAVARES (2012) preconizou o mesmo método às escórias de aciaria de fornos conversores a oxigénio do tipo *LD*, que revelou uma expansão máxima de 0,31% aos 14 dias e um PH ligeiramente elevado (12,6).

No Japão a norma JIS A-5015 de 1992, que prevê a utilização de agregados siderúrgicos na pavimentação, estabelece como limite máximo para expansibilidade o valor de 2,0% aos 10 dias (240h) e que a maturação das escórias seja superior a seis meses.

Seguindo o preconizado nesta norma japonesa, RODHE (2002) referiu que para escórias de aciaria tipo *LD* com densidade de 3,57 Mg/m³ e teores de CaO de 40,9%, apresentaram cerca de 1,5% de expansão depois de 240h e 2,0% depois de 720h (RODHE citando GUIMIERI et al. (1999)).

Na China, segundo WU et al. (2007), registaram-se valores abaixo de 1% aos 7 dias de acordo com a norma japonesa e sem aumento significativo após esse período, reforçando a estabilidade da mistura com incorporação de escória com 3 anos de maturação.

Foram também desenvolvidos testes nos EUA para conhecer o poder expansivo das escórias de aciaria (*BOF*) quando envolvidos numa mistura rígida com ligante hidráulico (argamassa de cimento). O objetivo é conhecer a força expansiva de um volume e relacionar com a força de cada partícula de escória. Foram realizados ensaios de força expansiva (com provete compactado e confinado com monitorização por células para identificar a expansão) e ensaio de rotura por autoclave. Neste caso em particular em que o confinamento da mistura é mais rígido e praticamente não admite deformações, ainda assim apenas uma das misturas apresentou sinais de degradação e destaque da camada superficial, situação que se prevê que não viria a acontecer em misturas betuminosas onde é verificado que a própria mistura absorve ligeiras expansões.

Nos 3 provetes ensaiados com cimento foi possível verificar forças expansivas de 806 N, 556 N e 1609 N, correspondendo a tensões instaladas na superfície de cada partícula de 0,54, 0,57 e 1,28 MPa respetivamente. Regista-se assim que para escórias provenientes de fornos conversores a oxigénio (*BOF*), com teores de CaO e MgO na ordem dos 35,1%-40,6% e 8,8%-11,3%, respetivamente, apesar de revelar alguma estabilidade quando utilizadas nas argamassas de cimentos, não pode deixar de ser tomado

em conta a capacidade expansiva das mesmas (WANG, 2010), mas levando a crer um comportamento mais favorável quando utilizadas em misturas betuminosas.

Em forma de conclusão ficou clara a preocupação e a necessidade de desenvolvimento de mais estudos sobre esta matéria. É importante sem dúvida o tempo de maturação ou a sua aceleração adequadamente comprovada, para estabilização química do material. É ainda compilado da bibliografia consultada um limite no teor de cal livre entre os 3% a 7% para uma utilização segura do ASIC. Apesar da capacidade do material absorver parte da sua expansão e do benefício no envolvimento dos agregados siderúrgicos em betume, o potencial expansivo deverá ser adequadamente avaliado e comprovado mediante estudos laboratoriais e o processo de produção e processamento da escória poderá e deverá passar por novas metodologias, para tornar mais eficaz e económica a eliminação natural destes óxidos.

2.3.5. POSSÍVEIS TRATAMENTOS DA ESCÓRIA DE ACIARIA

Apesar da inquestionável vantagem e da vasta aplicabilidade deste material nas diversas áreas das engenharias, a heterogeneidade dos resultados relativamente à expansibilidade das escórias siderúrgicas, cria alguma desconfiança e desconforto na sua utilização, principalmente em projetos relacionados com infra-estruturas rodoviárias, que envolvem enormes investimentos e são de grande exigência.

No caso das escórias siderúrgicas e tendo em conta a impossibilidade de generalizar resultados devido à sua heterogeneidade e à disparidade das suas características e propriedades, várias são já as abordagens para a tentativa de reduzir o seu potencial expansivo no menor espaço de tempo possível, evitando assim uma maturação prolongada.

De seguida são apresentadas algumas técnicas e métodos propostos para a estabilização química das escórias siderúrgicas.

O processo mais eficaz para promover a estabilização das escórias de aciaria, de forma a minimizar a sua capacidade expansiva devido à presença de CaO e ao MgO, é a sua exposição aos elementos atmosféricos por períodos de tempo prolongados, nunca inferiores a 3 meses. Quanto mais rigorosas forem as condições atmosféricas e a forma de armazenamento do material, mais rápida é a estabilização dos elementos químicos referidos. O inconveniente deste método prende-se com o elevado espaço necessário para um adequado acondicionamento, que deverá ficar em pilhas com peso não superior a

10.000 ton e com uma altura até 2 m, devendo ainda ser envolvida pontualmente para uma maturação mais homogênea (LIMA et al., 2000).

Apesar da simplicidade e eficácia deste método, o tempo de exposição do material deve ainda ter em conta a variabilidade das condições atmosféricas (sazonal ou clima geográfico) em conjunto com a forma, disposição e dimensão das pilhas já referidas.

Outra proposta, é a adição de um material sintético constituído por CaO, MgO, Al₂O₃ e Fe₂O₃, em percentagens específicas, no ferro líquido que vai para o conversor antes da fase de refino, substituindo assim os materiais escorificantes tradicionais com elevadores teores de CaO e MgO. Verificou-se por este método uma redução significativa de CaO de 5% a 15% para 1% a 5%, mas sem alterações nos valores médios de MgO (RODRIGUES, 2007 citando SORRENTINO, 1980).

Outra possibilidade é a redução da dimensão da cal e do calcário a adicionar, de maneira a facilitar a sua quase total dissolução por reação durante o processo de produção do aço.

RODRIGUES (2007) na sua pesquisa citou diversos autores que propuseram a mistura das escórias siderúrgicas com outros materiais, como por exemplo escórias de alto-forno bruta ou granulada (ASA, 2002), cinza volante (HEATON, 1989 e 1996) e saibro (SILVA, 1994; MENDONÇA, 2001; CONSULPAVI, 2003) garantindo não só uma maior estabilização da escória, mas também um aumento das suas propriedades mecânicas.

Um processo também já largamente comprovado é o método de arrefecimento que, quanto mais brusco for, maior a redução de elementos que promovem a expansividade do material (e dos cristais que os formam e que se hidratam mais facilmente), sendo que a imersão da escória líquida em água, promove a granulação da mesma criando uma estrutura amorfa e desorganizada, inibindo a sua expansão e aumentando a sua atividade hidráulica (NSA, 2014).

Existe ainda a possibilidade de arrefecimento ou manipulação das escórias já processadas e britadas, podendo estas ser consecutivamente molhadas com água através de spray ou com jatos de água quente e/ou com vapor, acelerando o tempo de cura e a estabilização da escória que, segundo GEYER (2001) é possível reduzir este tempo para 20 dias.

No Brasil foi também utilizada em camadas granulares uma solução adotada por SILVA (1994), que consiste na mistura de escórias sem qualquer tratamento, com uma

argila “laterítica” da região sem carácter expansivo, normalmente de dimensões inferiores à escória, cuja função é absorver a expansão das escórias e reduzir a permeabilidade do solo limitando o contacto com a água. Nestas misturas foram obtidos valores máximos de expansão de 0,5%.

Nos fornos conversores a oxigénio, existe também a possibilidade de tratar a escória ainda na fase líquida e já separada do aço líquido. O processo consiste inicialmente na injeção de oxigénio (O_2) que irá oxidar o ferro ($2FeO$) presente, dando origem ao óxido de ferro (Fe_2O_3), conforme a reação 1. Este elemento (Fe_2O_3) por sua vez é capaz de reagir com a cal livre (CaO_{livre}) e reduzindo a mesma de acordo com a reação 2. É ainda adicionada sílica (SiO_2) com a contínua injeção de oxigénio, que irá igualmente reagir com a cal livre de acordo com a equação 3. Este procedimento promove a redução da cal livre como desejável. Foram ensaiadas ambas as escórias, tratadas e não tratadas por este processo e verificou-se uma redução bastante significativa dos teores de CaO , registando-se posteriormente um aumento volumétrico abaixo de 1% (RODRIGUES, 2007 citando KUEHN et al. (2000)).



FEDETOV (1997) também citado por RODRIGUES (2007), propõem ainda a adição de alumina (Al_2O_3) no método anterior também para reduzir a cal livre, aumentando assim o teor de sílica e favorecendo não só as condições para a granulação do material como também conferindo uma maior atividade hidráulica e menor expansibilidade.

2.3.6. POSSÍVEIS LIMITAÇÕES ASSOCIADAS À UTILIZAÇÃO DO ASIC

Para além das possíveis limitações já referidas em 2.3.4 no que se refere à utilização do ASIC, é ainda importante referir os seguintes aspetos que poderão condicionar ou justificar algumas considerações na incorporação do ASIC em camadas betuminosas:

- ✓ Falta de finos;
- ✓ Tempo de maturação e armazenamento;
- ✓ Difícil compactação.
- ✓ Falta de Finos

Apesar da possibilidade das escórias siderúrgicas serem britadas ou granuladas para as dimensões pretendidas, verifica-se a falta de material abaixo dos 63 μm , que de acordo com o CETO (EP, SA, 2014) deveria ter valores na ordem dos 2% a 9% da massa do material. Verificou-se pela análise granulométrica das escórias estudadas no presente trabalho, assim como na diversa bibliografia analisada (SAMARIS, 2006; ALT-MAT, 2001; IHOBE, 1999) que, muito raramente se atinge sequer o mínimo de 2%.

Ainda assim, a redução da dimensão das partículas de um material com tão elevada rigidez e resistência à fragmentação cria alguns problemas de ordem económica, nomeadamente o desgaste e o custo de manutenção dos equipamentos para esse efeito. As partículas mais finas têm ainda uma elevada absorção de betume e uma massa volúmica mais elevada (TAVARES, 2012), aumentando assim os custos em ligante e no transporte da mistura.

A falta de finos é particularmente importante nos pavimentos rodoviários, sendo este material necessário para uma boa compacidade das misturas para melhorar a adesividade e o imbricamento das partículas e ainda para reduzir a porosidade para valores considerados aceitáveis. A ausência de uma adequada percentagem de material fino, está associada à menor recuperação das deformações que venham a ocorrer e torna ainda a compactação do material mais difícil (FERREIRA, 2010).

A falta de finos é mesmo apontada como motivo para a impossibilidade de utilização de ASIC nas camadas de pavimentação com taxas de incorporação próximas dos 100% (IHOBE, 1999), pois os valores de porosidade tendem a ser muito elevados, facilitando o envelhecimento e a degradação das misturas betuminosas por oxidação e hidratação e condicionando conseqüentemente a sua durabilidade e a eficiência na afinidade betume-agregados.

✓ Tempo de Maturação e Armazenamento

Tendo em conta a impossibilidade de prevenir a produção deste resíduo siderúrgico é importante o seu processamento e posterior valorização, mas como já referido anteriormente este material necessita de um período de maturação nunca inferior a 3 meses.

Visto que o mercado ainda está longe de conseguir absorver a totalidade das escórias e qua a indústria do aço não tem abrandado, coloca-se o problema do espaço necessário

para acondicionamento adequado de todo o material produzido. Esta situação é ainda mais grave nas escórias negras arrefecidas ao ar, que são produzidas em maior escala (10% - 15% por tonelada de aço produzido) (ROQUE, et al., 2006).

Tendo ainda em conta que o acondicionamento deste material está limitado a pilhas com uma altura máxima de 2 m e um peso inferior a 10.000 ton. (LIMA, et al., 2000), para que desta forma se obtenha um resultado homogêneo na estabilização química das escórias, serão necessárias áreas muito grandes para armazenamento deste material para além do impacto ambiental que possa daí advir.

✓ Difícil Compactação

Sendo o ASIC um material muito abrasivo, muito rugoso, de forma cúbica e com elevado ângulo de atrito interno, reduzida percentagem de finos e de absorção de água e ainda uma elevada resistência à fragmentação, fazem com que este material apresente uma difícil compactação requerendo meios bastante pesados (CORREIA, et al., 2006).

Esta situação foi já anteriormente verificada em camadas granulares (FERREIRA, 2010; ROHDE, 2002) e igualmente em misturas betuminosas (TAVARES, 2012).

Situação idêntica foi constatada no presente trabalho quando na formulação pelo método *Marshall* se verificaram alguns provetes com compactação pouco eficiente, como se pode analisar pela Figura 10, fato que também poderá ser atribuído às partículas de máxima dimensão na composição granulométrica.

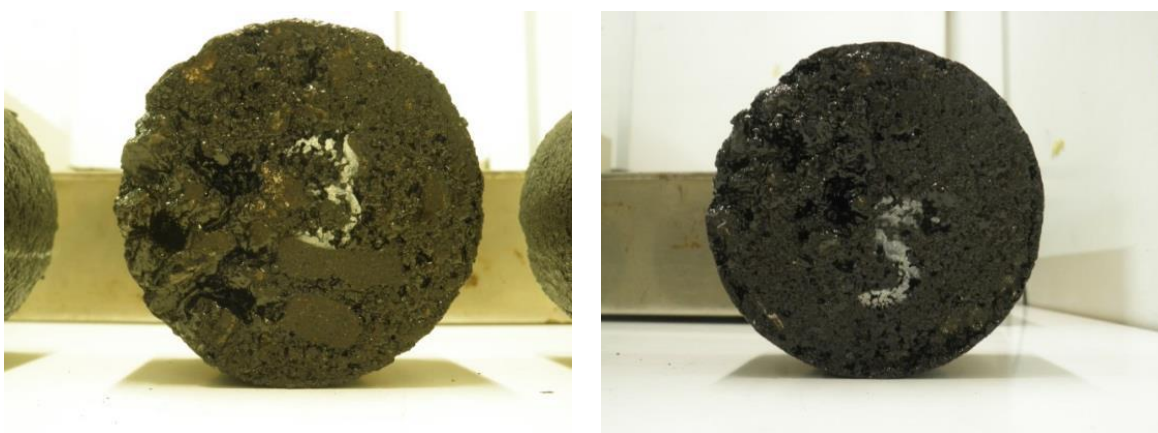


Figura 10 - Aspeto dos provetes com compactação deficiente

2.3.7. POSSÍVEIS APLICAÇÕES

Neste capítulo apresentam-se algumas das utilizações mais correntes para as escórias de aciaria. Dar-se-á a devida importância ao ASIC, mas também se farão algumas referências à utilização das escórias de alto-forno.

Para além dos aspetos económicos e ambientais já mencionados estas escórias apresentam excelentes propriedades físicas e mecânicas (*ALT-MAT*, 2001; *SAMARIS*, 2006; FERREIRA, 2010; ROQUE et al., 2006).

As escórias arrefecidas ao ar têm uma grande utilização nas obras rodoviárias e ferroviárias, devido à maior dimensão das partículas e maior estabilização química. Já as escórias arrefecidas bruscamente, possuem uma granulometria inferior e a sua composição química é bastante diferente, tendo maior utilização pelas cimenteiras, vidreiras e no betão (*EUROSLAG*, 2014; *NSA*, 2014).

A diversidade de aplicação deste material é variada e os diferentes processos de arrefecimento permitem obter diferentes granulometrias e composições químicas que se adaptam a cada tipo de utilização. De seguida serão apresentados alguns exemplos.

Uma das grandes utilizações para as escórias de aciaria nas siderurgias é exatamente para uso interno, na medida em que os elevados teores de material ferroso e de cal, propiciam a sua reutilização na alimentação dos fornos poupando na adição de cal e de sucata necessárias. A cal dolomítica é também utilizada como proteção do revestimento refratário dos fornos (ROQUE et al., 2006; BRANCO, 2004).

A área das infraestruturas rodoviárias é um dos grandes destinos das escórias de aciaria, sendo já largamente utilizada em camadas estruturais granulares, essencialmente camadas de base. As excelentes propriedades físicas e mecânicas apresentadas por este material (FERREIRA, 2010; CORREIA et al., 2006), deixam sem sombra de dúvidas uma elevada (se não superior) resistência às deformações permanentes quando comparadas com o material natural tradicional (WU, et al., 2007). A sua utilização em pavimentos é também extensível às camadas de sub-base, leito de pavimentos e aterros, mas sendo o contacto direto com o solo por vezes condicionado pelo PH elevado (8-14) (*IHOBE*, 1999), pela conseqüente alcalinidade e pela presença de materiais pesados que por lixiviação poderão ser fatores contaminantes e prejudiciais para o meio ambiente e saúde pública (ROHDE, 2002). No caso das camadas betuminosas esta matéria é ainda pouco explorada, pois os valores de expansibilidade associadas às escórias de aciaria é ainda condicionante, apesar do extremo potencial pelas suas propriedades para este tipo de aplicações.

Ainda na área das infraestruturas de transportes a sua utilização está também bastante desenvolvida nas ferrovias onde este material é um excelente substituto ao tradicional balastro de origem natural, sendo mais uma vez as características e propriedades deste material responsáveis pelo excelente desempenho na resistência às deformações (NSA, 2014; RODRIGUES, 2007).

A sua aplicação é também extensível à estabilização e contenção de solos, taludes e aterros que, devido à sua elevada resistência ao desgaste e à fragmentação, à sua forma cúbica que garante um excelente imbricamento e ao elevado ângulo de atrito, se obtém um elevado desempenho nestas aplicações (SAMARIS, 2006; RAPOSO, 2002). A sua utilização para este fim pode ser feita em elementos moldados ou pré-fabricados como blocos de gravidade, tubos, moldes inter-travados e autoportantes ou gabiões. Podem ainda ser integrados e misturados com solo natural como medida de correção à insuficiente estabilidade do mesmo (TAVARES, 2012).

A sua função de estabilização é também bastante usual em obras de engenharia hidráulica, onde a sua estabilidade, resistência à abrasão e massa volúmica, demonstram elevados desempenhos na estabilização e contenção de solos em obras marítimas ou ribeirinhas, na proteção e garantia de estabilidade de estruturas em zonas ribeirinhas ou zonas costeiras (SAMARIS, 2006), na construção de elementos pré-fabricados para dissipação da energia do mar (tipo quebra mar), na construção de fundos de rios e reforço dos seus leitos (EUROSLAG, 2014).

A sua utilização em betão como substituto parcial do agregado natural, em cerca de 20%, demonstrou um aumento da resistência, à tração, compressão e flexão, se comparados com betão sem adição de escórias (MASUERO, 2000). Este aumento generalizado da resistência, permite reduzir a utilização dos teores em cimento para obtenção dos mesmos resultados (BRANCO, 2004).

Alguns tipos de escórias, nomeadamente as provenientes de alto-forno são utilizados como matéria-prima na produção de cimento e de clínquer de cimento em substituição do calcário. Estas possuem propriedades cimentícias devido à sua constituição com silicatos dicálcico (2CaO-SiO_2) e tricálcico (3CaO-SiO_2). A sua utilização reduz diretamente as emissões em CO_2 e o consumo de energia, aumentando proporcionalmente a produção de cimento com a utilização destas escórias e melhorando as características resistentes do betão (SAMARIS, 2006). Existem mesmo estudos que defendem que uma adequada misturas de escórias do tipo *BOF* com as do tipo *EAF*, garantem não só uma

melhoria nas características cimentícias (formação de C_6AF_2) para a produção de cimento, como garantem também uma maior resistência à compressão quando substituindo o cimento Portland I (LI, et al., 2011).

As escórias de alto-forno que, devido aos elevados teores de sílica e de óxidos metálicos, são também usados na indústria de vidro e vitro cerâmicas como substituto do feldspato.

Segundo o estudo *SAMARIS* (2006), na europa, cerca de 4% das escórias processadas são usadas como fertilizantes para solos agrícolas. Esta utilização devolve alguns minerais e elementos para restabelecer o “cansaço” dos solos de cultivo, nomeadamente com a reposição de ferro, manganês, magnésio, zinco entre outros em percentagens mais reduzidas. A sua utilização tem também como finalidade a modificação do PH, sendo aplicado como super fosfatos (*SAMARIS*, 2006).

As escórias de aciaria, devido à sua composição rica em óxidos e elevadas taxas de alcalinidade, funcionam também como barreira e controlo da lixiviação de metais pesados nas zonas de aterros de resíduos, minorando a severidade química na escorrência dos mesmos para linhas de água circundantes ou para os solos. Neste campo tem tido também relativo sucesso no tratamento de descargas de águas ácidas ou com metais pesados (BEHIRY, 2012; BRANCO, 2004; *SAMARIS*, 2006).

É ainda considerada a utilização na produção de tijolos garantindo uma melhor resistência ao fogo e às altas temperaturas, apresentando também bom desempenho no isolamento (NSA, 2014; BEHIRY, 2012).

O Quadro 4 sintetiza a diversidade de utilizações das escórias de aciaria nos EUA (NSA, 2014).

Quadro 4 - Aplicações das escórias de alto-forno e de aciaria (NSA, 2014)

| ESCÓRIAS DE ALTO-FORNO | | | ESCÓRIAS DE AÇO |
|-------------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Arrefecida ao ar | Expandida | Granular | |
| Agregado para pavimentos | Agregado para alvenaria | Cimento | Agregado para pavimentos |
| Agregado para betão e alvenaria | Betão leve | Solo cimento | Enchimentos diversos/ Enrocamento/Aterro |
| Isolamento/Lã mineral | Enchimentos leves variados | Betão compactado com rolos vibratórios (tipo pavimentadora) | Matéria-prima para produção de Clínquer |
| Matéria-prima para produção de Clínquer | Isolamento | Camadas de base na Pavimentação | Agricultura/Fertilizante de solos |
| Agricultura /Fertilizante de solos | Camadas de base na Pavimentação | Agricultura/Fertilizante | Aplicações ambientais |
| Enchimentos diversos/Enrocamento / Aterro | | | Balastro ferroviário |
| Coberturas | | | Camadas de base na Pavimentação |
| Balastro ferroviário | | | Gabiões/Enrocamento |
| Produção de vidro | | | |
| Aplicações ambientais | | | |
| Gabiões/Enrocamento | | | |
| Enchimentos leves variados | | | |

2.3.8. EXPERIÊNCIA NACIONAL E INTERNACIONAL NA APLICAÇÃO DO ASIC

Em Portugal, a única aplicação conhecida de ASIC em camadas betuminosas, foi realizada em 2006 nas próprias instalações da SN do Seixal, junto ao seu edifício administrativo.

Este estudo baseou-se no método *Marshall*, de acordo com a norma NP 142 de 1968, adotando-se o fuso recomendado pela APORBET. A mistura foi composta por 73% de ASIC com granulometria 0/10, 25% de ASIC com granulometria 10/16, 2% em fíler de calcário e um betume regular de pen. 50/70. Com base nos resultados obtidos a mistura formulada é a que se apresenta no Quadro 5 (adaptado de CRUCHO, 2011).

Quadro 5 - Resumo das características “ótimas” da mistura betuminosa aplicada

| Elemento | Unidade | Valor |
|-----------------------------|-------------------|--------------|
| Betume | % | 5,3 |
| Baridade | g/cm ³ | 2,707 |
| Porosidade | % | 5,2 |
| Volume de betume | % | 13,9 |
| Força de rotura | kgf | 1500 |
| Deformação | mm | 3,7 |
| VMA | % | 19,1 |
| Grau de saturação em betume | % | 72,8 |

Esta aplicação foi realizada numa zona de acesso condicionado, pelo que não está sujeita a um tráfego muito significativo, sobretudo de veículos pesados. Ainda assim foi constatado após três anos de utilização, um perfeito estado de conservação do pavimento (CRUCHO, 2011).

Outra aplicação conhecida de ASIC em infraestruturas rodoviárias portuguesas foi descrita por FERREIRA (2010), mas apenas em camadas granulares.

Num trabalho realizado pelo CVR (Centro para a Valorização de Resíduos) com a colaboração e cooperação da UM e do LNEC, teve como objetivo estudar a viabilidade de aplicação de ASIC em camadas de base, sub-base, leito de pavimento e aterro na construção de infraestruturas rodoviárias. Deste estudo resultou uma análise laboratorial das características químicas e ambientais, geométricas e mineralógicas, mecânicas e físicas dos agregados recolhidos nas duas Siderurgias Nacionais, na Maia e no Seixal (CORREIA et al., 2005 e 2006) e posterior instrumentação e monitorização de um trecho experimental construído no itinerário EN 311 entre Fafe e Várzea Cova (CORREIA et al., 2008a), 2009 e 2010a)). Este troço foi constituído por uma secção com utilização de materiais naturais britados, servindo de referência ao estudo e por outra secção com ASIC, sendo ambas as aplicações ao nível de aterro, camadas de base e sub base do pavimento. Este troço tem sido desde então monitorizado e avaliado o seu desempenho, analisando os seus deslocamentos e deformações.

Segundo os requisitos do CETO, as propriedades índice previstas para os materiais naturais, quando aplicados em camadas de base, sub-base e leito do pavimento, foram totalmente respeitados com exceção do fuso granulométrico, mas de acordo com o desempenho verificado, tal não será necessário corrigir (CORREIA et al., 2009 e 2010a)).

Os ensaios triaxiais demonstraram um desempenho superior aos agregados naturais, mas o valor de CBR é um pouco abaixo dos valores normalmente obtidos para materiais naturais, mas ainda assim significativamente superiores aos requisitos previstos no CETO.

Da monitorização do trecho referido verificaram-se maiores assentamentos verticais ao nível da fundação na secção com ASIC na fase inicial devido à maior massa da secção com este material, ainda assim com um valor máximo absoluto registado de 1 mm. Daí em diante verificou-se uma estabilização dos assentamentos verificados na fundação para valores praticamente nulos.

Relativamente ao corpo do aterro verificou-se um assentamento duas vezes superior na camada de saibro granítico em relação ao ASIC mas com valores abaixo do milímetro, demonstrando ainda assim um melhor desempenho interno da camada constituída com ASIC.

Constatou-se ainda numa fase de elevada precipitação que surgiram novos aumentos de assentamentos em ambas as secções, denotando uma má drenagem das camadas. Daí em diante registou-se nova estabilização geral na secção de ASIC até à última recolha de dados em novembro de 2009, mas já no caso das secções de saibro granítico verificaram-se ligeiros aumentos de assentamento até à mesma data.

Os assentamentos internos foram em média maiores na secção de saibro do que na secção de ASIC, assim como se verificaram resultados mais favoráveis no ensaio com defletómetro de impacto nos troços com ASIC.

Relativamente aos resultados obtidos nos ensaios *FWD* é notório o melhor desempenho nas camadas de ASCII, principalmente quando temos cargas mais pesadas e cuja dissipação passa na sua grande maioria para as camadas inferiores, onde o ASIC tem uma resposta nitidamente superior.

Relativamente às extensões verticais de compressão verificadas no topo do leito do pavimento a melhor resposta é maioritariamente no troço ASIC+SAIBRO, sendo que parece existir uma tendência nas ultimas leituras para uma melhoria significativa do troço em ASIC, que terá de ser confirmada nas próximas leituras.

Quanto às extensões horizontais na base da camada betuminosa de regularização, os valores verificados ainda que de ordem de grandeza semelhante, são menores na secção ABGE+Saibro e maiores na secção de ASIC+Saibro.

Como resultado deste estudo, conclui-se uma melhoria significativa no comportamento das secções com a utilização do ASIC nas camadas granulares do trecho experimental, quando comparadas com a utilização de materiais naturais (CORREIA et al., 2009 e 2010a)).

A nível nacional foram ainda realizados dois estudos no IST no âmbito de duas dissertações de mestrados, onde se estudou a viabilidade das escórias de aciaria em misturas betuminosas (MARQUES, 2009) e a sua contribuição na resistência à fadiga (CRUCHO, 2011).

MARQUES verificou que o ASIC cumpre os diversos requisitos prescritos pelas especificações técnicas nacionais para os agregados naturais, ainda que os valores de absorção de água sejam relativamente próximos do limite estabelecido. A massa volúmica é mais elevada que a dos agregados naturais e na análise das misturas betuminosas do tipo macadame betuminoso AC 20 base (MB) com betume pen. 50/70, concluiu o autor que também estas apresentavam valores mais elevados de baridade, porosidade, VMA, estabilidade e deformações, quando comparadas com as misturas tradicionais. O valor obtido no ensaio de Sensibilidade à Água foi de 70%, cujo resultado foi concluído como não sendo um fator condicionante na vida útil dos pavimentos.

Foram estudadas misturas com incorporação de 20%, 35% e 45% de ASIC, sendo concluído pelo autor que a mistura com 20% era a que apresentava melhor desempenho apesar de na resistência conservada no ensaio de tração indireta a mistura com 45% apresentam os melhores resultados.

Na análise do comportamento à Fadiga CRUCHO (2011) utilizou a mistura de 20% para a realização do seu estudo embora com algumas diferenças na curva granulométrica resultante dos materiais disponíveis à data. Conforme preconizado na norma EN 12697-24 (ensaio com apoio em 4 pontos) concluiu-se um bom desempenho da mistura, mas com margem de melhoria mediante correção da formulação de modo a incorporar uma maior percentagem de finos.

A nível mundial os estudos *SAMARIS* (2006) e *ALT-MAT* (2001), apresentam um conjunto de regras, procedimentos e propostas de atuação e relatam ainda experiências de algumas aplicações ou ensaios aos agregados siderúrgicos em pavimentos rodoviários, sendo estes dois estudos de referência pela importância e cooperação entre os países e organizações envolvidas.

Conforme se pode constatar pelo trabalho desenvolvido nos dois estudos referidos, a utilização de agregados siderúrgicos ainda está muito direcionada para a substituição dos agregados naturais apenas em obras geotécnicas e na pavimentação de infra-estruturas rodoviárias em camadas granulares não ligadas, onde a aplicação deste material tem demonstrado excelentes resultados (*SAMARIS*, 2006; *ALT-MAT*, 2001). Relativamente à utilização ou estudos com incorporação de ASIC em camadas betuminosas, estes dois estudos têm uma experiência muito diminuta.

Nos dois estudos acima mencionados, existem referências a aplicações de materiais alternativos nas infraestruturas rodoviárias, nomeadamente agregados siderúrgicos, RCD, cinzas, pneus, etc. e até mesmo misturas entre alguns destes, dando-se obviamente destaque às escórias provenientes das siderurgias nos exemplos que se apresentarão de seguida.

Por exemplo, experiências documentadas no relatório do *ALT-MAT* (2001), existem aplicações destes materiais em camadas granulares nas infra-estruturas rodoviárias com resultados bastante satisfatórios em países como a Suécia, a Finlândia e o Reino Unido.

Na Suécia, em 1995, foi aplicada escória de alto-forno arrefecida ao ar como sub-base granular na reconstrução da parte da Auto Estrada E4, assim como na construção de duas novas vias. Em 1998 foram avaliadas as condições do troço reconstruído e das duas novas faixas executadas, após 3 anos sujeitos às seguintes condições de serviço:

- ✓ 15000 veículos/dia com cerca de 14% em veículos pesados;
- ✓ Precipitações entre 500 a 600 mm anuais;
- ✓ Temperaturas médias anuais de 6°C, com o inverno a apresentar temperaturas inferiores ou iguais a 0°C.

Concluindo-se que a escória aplicada respeita todos os requisitos previstos nas especificações técnicas suecas (*Swedish Road Technical Specifications - ROAD 94*) para agregados naturais, quando aplicados nas sub-bases dos pavimentos.

Confirmou-se ainda que a sua maior rigidez e maior capacidade de isolamento térmico, garantem maior resistência e durabilidade mesmo em pavimentos menos espessos, possibilitando assim uma poupança dos recursos naturais e um aumento da rigidez das camadas granulares com a idade, situação verificada nos ensaios triaxiais e com o deflectómetro de impacto (*FWD*). Este fato deve-se a uma reorganização e excelente imbricamento das partículas, assim como às suas propriedades cimentícias que garantem

uma melhor adesividade. A nível ambiental foi concluída a não perigosidade na utilização deste material e a sua total adequabilidade para camadas de sub-base granular. Observou-se apenas como aspeto menos positivo que, a utilização deste material nas camadas granulares superiores potencia a criação de gelo à superfície, principalmente no início do inverno, pelo que a sua utilização nestes moldes é desaconselhado em países com este tipo de clima mais rigoroso.

Também na Finlândia foram analisadas escórias de alto forno e mais uma vez devido à inexistência de especificações próprias, todos os ensaios reportam-se aos agregados naturais, sendo utilizado o granito como material de referência por ser do mais comum naquele país.

Os ensaios realizados revelaram uma resistência e capacidade de carga superior aos materiais tradicionais apesar de um decréscimo de 10% a 20% na sua rigidez quando submetidas à imersão em água, mas tendo em conta que é um excelente drenante e tem uma grande resistência aos ciclos de gelo e degelo, não se prevêem elevados períodos de saturação pelo que se espera um desempenho adequado mesmo nas condições atmosféricas deste país. Nos ensaios químicos e ambientais a preocupação em termos de lixiviação, deve-se à presença de sulfatos cujo teor é influenciado pela maior ou menor rapidez no seu arrefecimento na fase de processamento e que poderia apresentar elevadas concentrações deste componente. Tal não se verificou pois os valores estavam dentro dos requisitos, não suscitando qualquer preocupação a nível ambiental e de lixiviação, sendo a sua aplicabilidade quer em camadas granulares ou ligadas, aconselhável, com a exceção para as camadas de base de estradas com elevadas exigências de tráfego.

Foram ainda simuladas as condições atmosféricas do inverno finlandês em câmara climática, acelerando os ciclos de gelo e degelo com a adição das típicas soluções salinas aplicadas no inverno para avaliar os contaminantes libertados. Os valores obtidos para a lixiviação revelaram-se dentro dos limites mesmo com a adição de sal, verificando-se que neste caso apenas aumentam os valores de sódio, potássio, cálcio, magnésio e de sulfatos, não ultrapassando mesmo assim os requisitos.

No Reino Unido estudou-se a utilização de escória de aciaria em camadas granulares de sub-base, revelando que as características mecânicas apresentaram bons resultados, quer no laboratório como no local, submetendo os pavimentos com incorporação de agregados siderúrgicos ao *FWD* e ao ensaio de carga dinâmico (*ALT-MAT*, 2001).

A escória de alto-forno respeita ainda todas as especificações deste país com a exceção do fuso granulométrico em determinadas aplicações, situação facilmente contornável com a adequada recomposição antes da aplicação. A resistência ao gelo e degelo foi também positiva, concluindo-se na generalidade que poderá ser mais vantajoso e eficiente a utilização de materiais alternativos, de forma a reduzir o consumo dos agregados naturais.

Segundo as normas do Reino Unido quanto às questões ambientais, nomeadamente o relatório *CIRIA 167*, no que diz respeito as características químicas e à potencialidade de contaminação da qualidade das águas com o lixiviante, estas escórias enquadram-se na categoria II, ou seja a sua utilização terá algumas restrições, única e exclusivamente devido aos teores de Mo (Molibdênio) que ficam sensivelmente acima do requisito, todos os restantes elementos enquadram-se na categoria II do referido relatório.

No estudo *SAMARIS* (2006) são apontadas diversas aplicabilidades para o ASIC como substituto aos agregados naturais, principalmente como material granular, mas são igualmente destacadas as propriedades que fazem do ASIC um material adequado a incorporar em misturas betuminosas, nomeadamente:

- ✓ A sua forma cúbica, rugosidade e um excelente imbricamento;
- ✓ Elevada resistência ao corte e às deformações permanentes;
- ✓ Excelente abrasão, garantindo elevado atrito e resistência ao desgaste;
- ✓ Boa adesividade, devido a limpeza dos agregados;
- ✓ Elevada resistência à fragmentação, garantindo as suas propriedades geométricas e mecânicas durante o seu manuseio, antes e durante a construção;
- ✓ Melhor retenção do calor, o que garante mais tempo e trabalhabilidade na sua aplicação.

O estudo *IHOBE* (1999) evidencia as excelentes características do material, reforçando que a sua utilização em misturas betuminosas é possível desde que garantidos os pressupostos e as especificações ambientais. Este estudo destaca a sua utilização em camadas de desgaste e conclui sobre esta utilização que, as escórias de aciaria apresentam uma excelente resultado no coeficiente de polimento acelerado, uma excelente rugosidade e abrasão que garantem elevada aderência dos rodados e a garantia de boa adesividade entre o ligante e o agregado, corroborando o já anteriormente apresentado pelo estudo *SAMARIS* (2006) para a generalidade das camadas betuminosas. Da análise efetuada a um

troço de estrada com incorporação de ASIC (79,2%) em camada de desgaste, verificou-se após 10 meses de serviço, resultados bastante satisfatórios. Não se verificaram patologias como deformações, fendilhamento, degradação ou destaque da superfície ou exsudação de ligante, cumprindo todos os requisitos durante esse período.

Face ao exposto é possível afirmar que a experiência relativamente à utilização dos agregados siderúrgicos tem sido bem sucedida e que apesar de pouco desenvolvida a sua aplicação em misturas betuminosas, parecem existir indícios de um nicho de mercado por explorar com enorme potencial.

No decorrer do presente estudo são ainda abordados oportunamente alguns trabalhos mais recentes, com a aplicação destes agregados em misturas betuminosas.

2.3.9. REQUISITOS NORMATIVOS APLICÁVEIS

Os requisitos normativos aplicados à utilização de escórias siderúrgicas são ainda escassos e por vezes pouco desenvolvidos, sendo necessário recorrer maioritariamente à experiência adquirida com materiais naturais para o mesmo tipo de utilização.

Os documentos existentes aplicam-se essencialmente à utilização deste material em camadas granulares, segundo a qual já existe maior experiência, mas relativamente à sua utilização em camadas betuminosas existe alguma informação dispersa cuja compilação se procura apresentar de seguida.

Em Espanha por exemplo, é aplicado um conjunto de especificações técnicas gerais para a construção de estradas e pontes designado por *PG-3 (Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes, 2008)*. Nestes são estabelecidos os requisitos para a área da pavimentação a que os materiais tradicionais e as escória siderúrgicas devem obedecer, na execução de camadas granulares.

Assim é previsto neste documento um conjunto de características e propriedades já descritas por ROQUE et al. (2006):

- ✓ Expansibilidade inferior a 5% (EN 1744-1) às 24 h de ensaio, quando o conteúdo de óxido de magnésio for inferior ou igual a 5% (EN 196-2), ou às 168 h de ensaio quando o conteúdo de óxido de magnésio for superior a 5%;
- ✓ Equivalente de areia superior a 30%;
- ✓ Material não plástico;

- ✓ Coeficiente de *Los Angeles* (EN 1097-2) inferior a 30% ou a 35%, dependendo da categoria do tráfego pesado, admitindo-se um limite 5% superior para os agregados siderúrgicos sempre que se satisfaçam os requisitos específicos relativos à granulometria destes materiais;
- ✓ Índice de Achatamento (EN 933-3) inferior a 35%, para as diferentes frações do agregado grosseiro;
- ✓ Angulosidade das partículas (EN 933-5) de 100%, 75% ou 50%, de acordo com a categoria do tráfego pesado;
- ✓ O fuso granulométrico compreendido dentro dos fusos indicados no Quadro 6 (PG-3, 2008).

Quadro 6 - Fusos granulométricos previsto para materiais alternativos

| Tipo de Agregado* | Abertura dos peneiros em mm (EN 933-2) | | | | | | | | |
|-------------------|----------------------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 40 | 25 | 20 | 8 | 4 | 2 | 0.050 | 0.250 | 0.063 |
| | Percentagem acumulada em massa. | | | | | | | | |
| A25 | 100 | 75-100 | 65-90 | 40-63 | 26-45 | 15-32 | 7-21 | 4-16 | 0-9 |
| A20 | - | 100 | 75-100 | 45-73 | 31-54 | 20-40 | 9-24 | 5-18 | 0-9 |

*A designação do tipo do agregado faz-se em função da dimensão máxima nominal, que se define com a abertura do primeiro peneiro que retém mais de 10% em massa.

Ainda em Espanha foi elaborado pela Sociedade de Gestão Ambiental da Região Autónoma do País Basco o estudo *IHOBE* (2002), onde são definidos os critérios ambientais a serem respeitados na utilização de escórias de aciaria em camadas granulares de base e sub-base, leito de pavimento e aterros nas infraestruturas rodoviárias.

Tendo em conta a composição química e a presença de materiais pesados nestas escórias, poderá existir o risco de contaminação do solo com os consequentes prejuízos para o meio ambiente, prevê então este estudo, um risco aceitável para a utilização do ASIC, quando se verificar que a sua influência na alteração da composição e componentes do solo subjacente for inferior a 1% em 100 anos. Caso contrário será necessário avaliar o risco desse valor ser excedido em termos de saúde pública e ambiental, pelo que concluí este estudo que se poderá admitir o uso deste material mesmo excedido o valor referido, desde que dentro de determinadas percentagens por cada elemento constituinte. É ainda

referido que cerca de 73% do material gerado nas aciarias do País Basco possa ser utilizado em camadas granulares de pavimentos rodoviários, mas que deverão ainda ser realizados estudo de lixiviabilidade (EN 12457, procedimento C) devendo os resultados ser comparados com os valores limites de cada elemento químico tal como se encontram previstos na legislação espanhola e que se apresentam no Quadro 7 (IHOBE, 1999).

Quadro 7 - Valores limites para a utilização dos agregados siderúrgicos nos pavimentos espanhóis

| Elemento | Valor Limite (mg/l) |
|-----------------|----------------------------|
| Bário | 17 |
| Cádmio | 0,009 |
| Cromo | 2,6 |
| Molibdénio | 1,3 |
| Níquel | 0,8 |
| Chumbo | 0,8 |
| Selénio | 0,007 |
| Vanádio | 1,3 |
| Zinco | 1,2 |
| Fluoretos | 18 |
| Sulfatos | 377 |

No entanto a sua utilização envolvida no solo ou em contacto direto com este não é permitida dado que a maioria dos componentes excede o previsto nessa mesma legislação em termos de contaminação a longo prazo (IHOBE, 1999).

Ainda neste estudo, são estabelecidas as características que deverão apresentar as escórias siderúrgicas quer para camadas de base, sub-base e também para o leito do pavimento:

- ✓ Elevada capacidade de resistir a cargas pesadas;
- ✓ Elevada resistência mecânica e à desagregação;
- ✓ Agregados limpos, sem plasticidade ou material argiloso;
- ✓ Equivalente em Areia superior a 30;
- ✓ Material britado e com as faces fraturadas, para um bom imbricamento;
- ✓ Fuso granulométrico contínuo;
- ✓ Sem expansibilidade superior a 0,5% (ASTM -D-4792).

Quanto às camadas de desgaste refere-se a dificuldade em se conseguir utilizar 100% em escórias pela sua falta de finos, pelo que se aconselha a utilização de areia na fração 0/6. Tendo em conta os excelentes resultados no coeficiente de *Los Angeles*, no coeficiente de polimento dos agregados e na rugosidade, conclui-se existir boa adesão e atrito dos pneus ao material, logo uma adequada aplicabilidade em camadas de desgaste. É ainda reforçado neste estudo a importância no bom envolvimento dos agregados pelo ligante de forma evitar o contacto com a água e a minimizar a sua expansão (*IHOBE*, 1999).

O projeto *SAMARIS* (2006) tem como objetivo promover o crescimento competitivo que seja sustentável em termos económicos e ambientais, criando estratégias, técnicas e investindo na investigação e inovação de forma a promover o uso de materiais alternativos. Nos diversos relatórios pelos quais é distribuído este estudo, definem-se as propriedades físicas, mecânicas e ambientais a que deverão respeitar as escórias siderúrgicas do tipo *BOF* e *EAF*, assim como as possibilidades de aplicação para estes materiais nas camadas dos pavimentos, bermas e valetas. Este estudo conclui sobre uma aplicabilidade segura em todas as camadas granulares não ligadas, assim como às camadas de desgaste e de base ligadas com ligantes betuminosos.

As únicas aplicações desaconselháveis são nas camadas de leito dos pavimentos com ligante hidráulico de cimento (*SAMARIS*, 2006).

Adianta-se ainda que, a nível de expansibilidade e na utilização do ASIC em camadas betuminosas de desgaste e de base, a mesma é absorvida em parte pela elevada porosidade do ASIC ainda que existam limites estabelecidos para cada uma das camadas. Este fato justifica-se com o envolvimento do ASIC pelo betume, limitando “o acesso” a hidratação dos óxidos existentes no material (*SAMARIS*, 2006).

A nível químico é concluída a sua adequabilidade, denotando-se apenas uma alteração significativa no PH (quer no agregado quer na água lixiviada) que pode ascender a 11 e que altera a sua alcalinidade e a sua condutibilidade eléctrica, situação esta que poderá ser facilmente resolvida com uma maturação prolongada (superior a 2 ou 3 meses) ou com tratamento ácido, como por exemplo com CO_2 (*SAMARIS*, 2006).

Este estudo recomenda o seguinte:

- ✓ Teor em sulfato SO_4^{2-} solúvel inferior a 0,7% (em massa do material seco);
- ✓ Para camadas de base, o resultado do ensaio de *Los Angeles* e *Micro-Deval* deve ser inferior a 35% e 30% respetivamente e cujo somatório seja inferior a 55%;

- ✓ Para camadas de sub-base, o resultado do ensaio de *Los Angeles* e *Micro-Deval* deve ser inferior a 45% e cujo somatório seja inferior a 80%.

No Brasil, o Departamento Nacional de Estradas de Rodagem elaborou o estudo DNER (1994), onde prevê que a utilização das escórias de aciaria em pavimentação deve apresentar as características seguintes:

- ✓ Expansibilidade máxima de 3% aos 14 dias;
- ✓ Isentas de impurezas orgânicas, contaminação com escórias de alto-forno, solos e outros materiais;
- ✓ Partículas de dimensão inferior a 12,7 mm até 40% e entre 12,7 e 50,8 mm até 60% da massa total, devendo ainda obedecer à granulometria de projeto;
- ✓ Absorção de água máxima de 1% a 2%;
- ✓ Massa volúmica real de 3,0 a 3,5 g/cm³;
- ✓ Massa volúmica aparente de 1,5 a 1,7 g/cm³;
- ✓ *Los Angeles* até 25% para sub-base, base e revestimento;
- ✓ Durabilidade ao sulfato de sódio deve ser no máximo 5%, em 5 ciclos.

O referido estudo aconselha ainda que, para além da satisfação dos requisitos previstos nos cadernos de encargos, deverão ser realizados ensaios mecânicos representativos do estado do material nas condições de aplicação na obra e que em termos ambientais as escórias de aciaria respeitem os valores limites previstos para o lixiviado representados no Quadro 8.

Quadro 8 - Valores limite para a utilização dos agregados siderúrgicos nos pavimentos brasileiros

| Elemento | Valor Limite (mg/l) |
|-----------------|----------------------------|
| Bário | 100 |
| Cádmio | 0,5 |
| Cromo total | 5,0 |
| Arsénio | 5,0 |
| Chumbo | 5,0 |
| Selénio | 1,0 |
| Prata | 5,0 |
| Fluoreto | 150 |
| Mercúrio | 0,1 |

No Japão por sua vez, as normas para a utilização de agregados siderúrgicos na pavimentação estão em vigor desde 1979 pelo *Japanese Industrial Standard (JIS)* cuja norma atual é a JIS A-5015 de 1992 e que prevê os seguintes requisitos para camadas granulares (ROHDE, 2002):

- ✓ Expansibilidade máxima até 2% aos 10 dias;
- ✓ Massa específica superior a $2,45 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$;
- ✓ Massa volúmica aparente igual ou superior $1,5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$;
- ✓ Absorção de água inferior a 3%;
- ✓ Índice de abrasão inferior a 30% para uso em camadas de sub-base;
- ✓ CBR superior a 80% para uso em camadas de base e superior a 30% para uso em camadas de sub-base;
- ✓ Maturação superior ou igual a 6 meses ou quando reduzido este tempo após cura acelerada, é necessária a verificação da estabilização.

Em termos ambientais esta norma japonesa estabelece os valores limites para o lixiviado descritos no Quadro 9.

Quadro 9 - Valores limites para a utilização dos agregados siderúrgicos nos pavimentos japoneses

| Elemento | Valor Limite (mg/l) |
|-----------------|----------------------------|
| Mercúrio | 0,0005 |
| Crómio VI | 0,05 |
| Cádmio | |
| Arsénio | |
| Chumbo | 0,01 |
| Selénio | |
| Benzeno | |

No Reino Unido através da norma BS 6543:1985 são preconizados um conjunto de requisitos para o uso dos agregados siderúrgico, cujos valores limites são estabelecidos mediante a “adaptação” e experiência com os agregados naturais, não devendo ser encarados como especificação para materiais alternativos:

- ✓ A distribuição granulométrica dos agregados siderúrgicos deve obedecer aos fusos apresentados no Quadro 10;
- ✓ Os agregados siderúrgicos devem ser não plásticos (NP) para os materiais de tipo I e no caso dos materiais de tipo II, o índice de plasticidade (IP) inferior a 6;

- ✓ O resultado do ensaio sulfato de magnésio deve ser no mínimo 65% e o teor em sulfatos deve ter um valor máximo de 1,9g/l;
- ✓ Para os materiais de tipo II o valor de CBR deve ser, no mínimo de 30%.

Quadro 10 – Fuso granulométrico para camadas de base e sub-base no Reino Unido

| Tipo de Agregado | Abertura dos peneiros em mm | | | | | |
|------------------|---------------------------------|--------|--------|-------|------|-------|
| | 75 | 37,5 | 10 | 5 | 0,6 | 0,075 |
| | Percentagem acumulada em massa. | | | | | |
| Tipo I | 100 | 85-100 | 40-70 | 25-45 | 8-22 | 0-10 |
| Tipo II | 100 | 85-100 | 40-100 | 25-85 | 8-45 | 0-10 |

Em Portugal, nos cadernos de encargos das entidades responsáveis pela administração das infra-estruturas de transporte, ainda não existem especificações ou critérios técnicos que permitam avaliar a possibilidade de utilização dos agregados siderúrgicos.

É no entanto referido no CETO (EP, SA, 2014) a Norma NP 13242:2002+A1:2010 onde se estabelecem os requisitos dos agregados tradicionais e artificiais, abrangendo também os materiais reciclados ou alternativos como é o caso do ASIC e ainda a especificação do LNEC (E 474–2009), que serve de guia para a utilização de RCD em aterros e camadas de leito de pavimento nas infraestruturas de transportes, mas cuja adaptação aos agregados siderúrgicos não parece adequada.

CAPÍTULO 3 – ESTUDO EXPERIMENTAL

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo será apresentado o estudo experimental desenvolvido tendo como objetivo a avaliação da viabilidade de utilização de ASIC em misturas betuminosas.

Os documentos de referência adotados para a concretização do presente estudo experimental são os seguintes:

- ✓ Norma NP EN 13043:2004/AC:2010 - Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação, onde se estabelecem os requisitos geométricos, físicos e químicos para os agregados e para o filler a utilizar em misturas betuminosas;
- ✓ Norma NP EN 13108-1:2011 – Especificação dos materiais para misturas de betão betuminoso, onde se estabelecem as especificações dos materiais que constituem as misturas betuminosas, nomeadamente o Betão Betuminoso;
- ✓ Norma NP 13242:2002+A1:2010 - Agregados para materiais não ligados ou tratados com ligantes hidráulicos utilizados em trabalhos de engenharia civil e na construção rodoviária, onde se estabelecem os requisitos dos agregados tradicionais e artificiais, abrangendo também os materiais reciclados ou alternativos onde se enquadram os agregados siderúrgicos, objeto deste estudo;
- ✓ CETO - Caderno de Encargos Tipo de Obra das Estradas de Portugal, S.A., documento que estabelece os requisitos mínimos para os materiais a aplicar em pavimentos e define os ensaios e as condições a que estes devem ser sujeitos, para cada uma das aplicações previstas.

Todas as restantes normas e especificações que servirão para o desenvolvimento deste trabalho serão referidas quando tal se justificar.

O CETO será o documento comparativo de referência para avaliar as propriedades e características do ASIC, assim como o desempenho das misturas betuminosas com a sua incorporação. É de realçar que o CETO se aplica a materiais naturais tradicionalmente utilizados na pavimentação rodoviária e que obviamente o respeito ou superação dos requisitos aí expressos por parte dos materiais alternativos, não garantem por si só desempenho igual ou superior da mistura betuminosa com a sua incorporação.

A avaliação conjunta em laboratório e em campo é crucial, assim como urge o desenvolvimento de especificações e processos construtivos apropriados à utilização de materiais alternativos com é o caso do ASIC.

3.1.1. ORGANIZAÇÃO DO ESTUDO EXPERIMENTAL

O estudo experimental subdivide-se em quatro fases distintas:

- ✓ Caracterização geométrica do ASIC;
- ✓ Caracterização física e mecânica do ASIC;
- ✓ Formulação das misturas betuminosas com incorporação de ASIC;
- ✓ Ensaio para avaliação do desempenho das misturas betuminosas com incorporação de ASIC.

A caracterização química e ambiental do ASIC não é enquadrada na fase experimental, pois a sua sustentação foi feita apenas bibliograficamente. Realizou-se apenas uma avaliação semi quantitativa e qualitativa da sua composição química, obtida por FRX (Fluorescência de Raios X), de forma a fazer um enquadramento com a bibliografia consultada.

O CETO define um conjunto mínimo de ensaios a realizar aos agregados que venham a constituir camadas betuminosas de base, regularização e ligação nos pavimentos rodoviários, tendo estes sido realizados no presente estudo. Foram ainda realizados um conjunto de ensaios complementares.

O Quadro 11 apresenta a organização do estudo experimental, identificando os ensaios propostos pelo CETO e os restantes ensaios complementares efetuados no âmbito do presente trabalho.

Quadro 11 – Organização do estudo experimental e ensaios realizados

| Caracterização | Requisitos / Propriedades | Norma de referência | CETO |
|------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|
| Geométrica | Análise Granulométrica | NP EN 933-1:2014 | √ |
| | Índice de Achatamento | NP EN 933-3:2014 | √ |
| | Índice de Forma | EN 933-4:2008 | |
| Física e Mecânica | Azul de Metileno | EN 933-9:2009+A1:2013 | √ |
| | Equivalente de Areia | NP EN 933-8:2014 | |
| | Massa Volúmica das partículas e Absorção de Água | EN 1097-6:2013 | √ |
| | Fragmentação – <i>Los Angeles</i> | NP EN 1097-2:2011 | √ |
| | Desgaste – <i>Micro-Deval</i> | NP EN 1097-1:2012 | |
| | Afinidade Ligante-Agregados | EN 12697-11:2012 | √ |
| | | Fabricação dos moldes | EN 12697-35:2004+A1:2007 |
| Formulação da mistura | Baridade | EN 12697-6:2012 | √ |
| | Baridade Máxima Teórica | EN 12697-5:2009/AC:2012 | √ |
| | Porosidade e VMA | EN 12697-8:2003 | √ |
| | Estabilidade e Deformação | EN 12697-34:2012 | √ |
| | | Avaliação da Sensibilidade à Água | EN 12697-12:2008 |
| Ensaios à mistura | Resistência à Tração Indireta (<i>ITSR</i>) | EN 12697-23:2003 | √ |
| | Resistência à Fadiga | EN 12697-24:2012 | |
| | Resistência à Deformação Permanente | EN 12697-22:2003+A1:2007 | √ |
| | - <i>Whell Tracking</i> | | |

3.1.2. RECOLHA E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

O material utilizado no presente estudo foi disponibilizado pela empresa *HARSCO Metals & Minerals*, empresa que processa e comercializa as escórias produzidas pela Siderurgia Nacional (SN) do Seixal e da Maia.

As amostras recolhidas para este estudo são provenientes exclusivamente da SN do Seixal, resultantes da produção de aço em Forno de Arco Elétrico (FAE) alimentado com

sucata. Como já referido anteriormente, dado que deste processo resultam dois tipos de escórias, brancas e negras, para o presente trabalho apenas se utilizaram as escórias negras também designadas aqui por ASIC, pois só estas têm valorização possível no ramo da pavimentação rodoviária.

O ASIC produzido na SN do Seixal, na fração 0/40, está certificado com a Marcação CE (EN 13242:2002+A1:2007), possui Ficha Técnica e Declaração de Conformidade e é ainda atestada pela CCDRLVT a possibilidade de utilização como material de construção. Este material é controlado semanalmente por laboratórios certificados.

A Figura 11 apresenta uma amostra de ASIC com dimensão 0/40 mm



Figura 11 - Amostra do ASIC na fração 0/40

As amostras ensaiadas no presente estudo foram recolhidas no parque de armazenamento da *HARSCO* onde é efetuada a sua maturação. As recolhas foram realizadas no dia 8 de setembro e no dia 14 de outubro de 2014 e são compostas pelas frações de dimensão 0/6 mm, 6/12 mm e 12/18 mm.

As amostras encontravam-se expostas às condições atmosféricas há cerca de dois anos, em pilhas de reduzidas dimensões e sem que tenha existido reposição de material nessas pilhas. Estas condições são altamente favoráveis à maturação necessária do agregado siderúrgico, pois promove a neutralização de grande percentagem dos óxidos presentes na sua composição, reduzindo consequentemente o seu potencial expansivo.

Segundo dados fornecidos pela *HARSCO* do controlo efetuado ao material entre março e julho de 2014, este apresenta as seguintes características:

- ✓ PH entre 9,7 e 9,9;
- ✓ Todos os parâmetros analisados cumprem os limites estabelecidos no DL 183/2009 de 10 de Agosto, tabelas 2 e 3 do AnexoIV;
- ✓ Valor de expansão de 0,5% em volume, para escórias com cerca de 5,59% em óxido de magnésio (MgO) e abaixo de 0,20% em óxido de cálcio livre (CaO).

Devido à prolongada exposição às condições atmosféricas a que se encontrava o material recolhido e à sua composição ferrosa, verificou-se nas amostras a existência de alguma oxidação e carbonatação superficial dos materiais metálicos que compõem o agregado. Constatou-se ainda a existência de pequenos pedaços ferrosos que não foram extraídos na fase de processamento da escória e se encontravam ou “cravados” na sua superfície, ou parcialmente derretidos sobre esta, ou ainda soltos e misturados com os agregados conforme se pode observar na Figura 12.



Figura 12 - Aspeto das escórias com presença de oxidação/corrosão e pedaços de ferro

A elevada presença de ferro na sua composição, foi verificada pela adesão eletromagnética das partículas mais pequenas a um íman, como se demonstra na Figura 13.



Figura 13 - Composição ferrosa com potencial eletromagnético

É sem dúvida importante que o controlo da qualidade de todas as operações que envolvam o processamento do ASIC entre outras atividades da empresa *HARSCO* na SN, estejam consonantes com os valores e a gestão dos recursos ambientais. A atividade desenvolvida pela empresa *HARSCO*, para além do contributo ambiental, poderá revelar-se uma mais valia económica e técnica valiosa na substituição dos agregados naturais na área das infraestruturas rodoviárias.

3.2. CARACTERIZAÇÃO LABORATORIAL DO ASIC

Os procedimentos gerais de cada um dos ensaios serão brevemente descritos e respeitam em tudo o que seja omissos ou preconizados nas respetivas normas. Serão relatadas experiências ou situações particulares constatadas no decorrer dos trabalhos, que demonstrem comportamentos ou dificuldades inerentes à investigação e que, de uma forma crítica e construtiva contribuam para a interpretação dos resultados.

Os resultados obtidos no presente estudo serão comparados com os requisitos do CETO, com os valores de referência quer dos agregados quer das misturas betuminosas tradicionais e com resultados recolhidos da consulta bibliográfica.

3.2.1. ENSAIOS GEOMÉTRICOS

3.2.1.1. ANÁLISE GRANULOMETRIA

A determinação da granulometria foi realizada conforme preconizado na norma NP EN 933-1:2014, pelo método de peneiração mecânica com lavagem.

Consiste na lavagem da amostra de material (agregados) que após seco até massa constante é peneirado por um conjunto de peneiros de malha quadrada com aberturas consecutivamente mais reduzidas, conforme descrito na norma.

O objetivo é determinar a distribuição das partículas com base na sua dimensão e calcular a sua percentagem em peso na totalidade da amostra. De acordo com as normas NP EN 13043:2004 e NP EN 13108-1:2011, a série de peneiros utilizada no presente estudo é a “série base + série 2”, sendo esta também a recomendada no CETO (EP, SA, 2014).

A Figura 14 apresenta a série de peneiros referida e a peneiração mecânica em funcionamento com parte dessa série.

| Dimensão da malha dos peneiros (mm) |
|----------------------------------------|
| série base + série 2 |
| 63 |
| 40 |
| 31,5 |
| 20 |
| 16 |
| 14 |
| 12,5 |
| 10 |
| 8 |
| 6,3 |
| 4 |
| 2 |
| 1 |
| 0,500 |
| 0,250 |
| 0,125 |
| 0,063 |



Figura 14 – Série de peneiros e peneiração mecânica das amostras

No presente trabalho experimental são analisadas três frações de ASIC, cuja dimensão se compreende entre 0/6, 6/12 e 12/18 mm. Foi feita a análise granulométrica de cada uma destas frações, para posteriormente se calcular a sua distribuição percentual de forma a obter a curva adequada ao fuso pretendido.

A Figura 15 mostra a separação e catalogação das amostras recolhidas para o presente estudo.



Figura 15 - Amostras a analisar em laboratório

Antes de iniciar a análise granulométrica importa referir que, de acordo com norma acima mencionada, a dimensão máxima das partículas de cada fração define o valor mínimo de massa para que a amostra seja representativa. Tendo em conta que o ASIC tem uma massa volúmica bastante elevada, a massa de cada amostra foi majorada em cerca de 30% de forma a conter um maior número de partículas e garantindo assim uma melhor representatividade para este tipo de material.

O Quadro 12 apresenta os resultados da análise granulométrica efetuada às 3 frações de ASIC que irão incorporar a mistura betuminosa do tipo Macadame Betuminoso AC 20 (MB), o respetivo fuso previsto pelo CETO e a curva final adotada.

Várias combinações foram simuladas para a incorporação das três frações de ASIC em conjunto com um filer comercial de calcário, de forma a respeitar o fuso pretendido, sendo os valores finais apresentados no final do Quadro 12.

Quadro 12 – Análise granulométrica do ASIC

| Abertura dos peneiros (mm) | % Acumulada do material que passa | | | | Fuso AC 20 (MB) | Curva* adotada |
|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------|--------------|--|-----------------|----------------|
| | Fração 0/6 | Fração 6/12 | Fração 12/18 | | | |
| 31,5 | 100 | 100 | 100 | | 100 | 100 |
| 20 | 100 | 100 | 96 | | 100 - 90 | 98 |
| 16 | 100 | 100 | 61 | | - | 85 |
| 14 | 99 | 100 | 34 | | - | 75 |
| 12,5 | 99 | 100 | 12 | | 86 - 57 | 66 |
| 10 | 99 | 76 | 2 | | - | 57 |
| 8 | 99 | 54 | 1 | | - | 52 |
| 6,3 | 99 | 33 | 1 | | - | 47 |
| 4 | 87 | 12 | 0 | | 49 - 34 | 39 |
| 2 | 57 | 7 | 0 | | 41 - 26 | 28 |
| 1 | 30 | 5 | 0 | | - | 19 |
| 0,5 | 14 | 4 | 0 | | 26 - 12 | 13 |
| 0,250 | 7 | 3 | 0 | | - | 11 |
| 0,125 | 4 | 2 | 0 | | 14 - 4 | 9 |
| 0,063 | 2,2 | 1,3 | 0,2 | | 7 - 2 | 6,8 |
| Avaliação da Granulometria | | | | | | |
| | (mm) | (mm) | (mm) | | | (mm) |
| D_{max} | 16 | 12,5 | < 25 | | | < 25 |
| D₁₀ | 0,36 | 3,21 | 12,0 | | | 0,20 |
| D₃₀ | 1,0 | 5,98 | 13,73 | | | 2,42 |
| D₆₀ | 2,20 | 8,56 | 15,97 | | | 10,78 |
| Cc | 1,28 | 1,3 | 0,99 | | | 2,76 |
| Cu | 6,17 | 2,66 | 1,33 | | | 54,58 |

*32% de ASIC 0/6, 22% de ASIC 6/12, 38% de ASIC 12/18 e 8% Filer calcário

D_{max} – Dimensão máxima

D₁₀, D₃₀ e D₆₀ - diâmetro correspondente a 10%, 30% e 60%, respetivamente, do material que passa

Cc – Coeficiente de curvatura; Cu – Coeficiente de uniformidade

A Figura 16 apresenta gráficamente as curvas das 3 frações de ASIC analisadas, do fíler e ainda a curva adotada dentro dos limites estabelecidos para o fuso já referido.

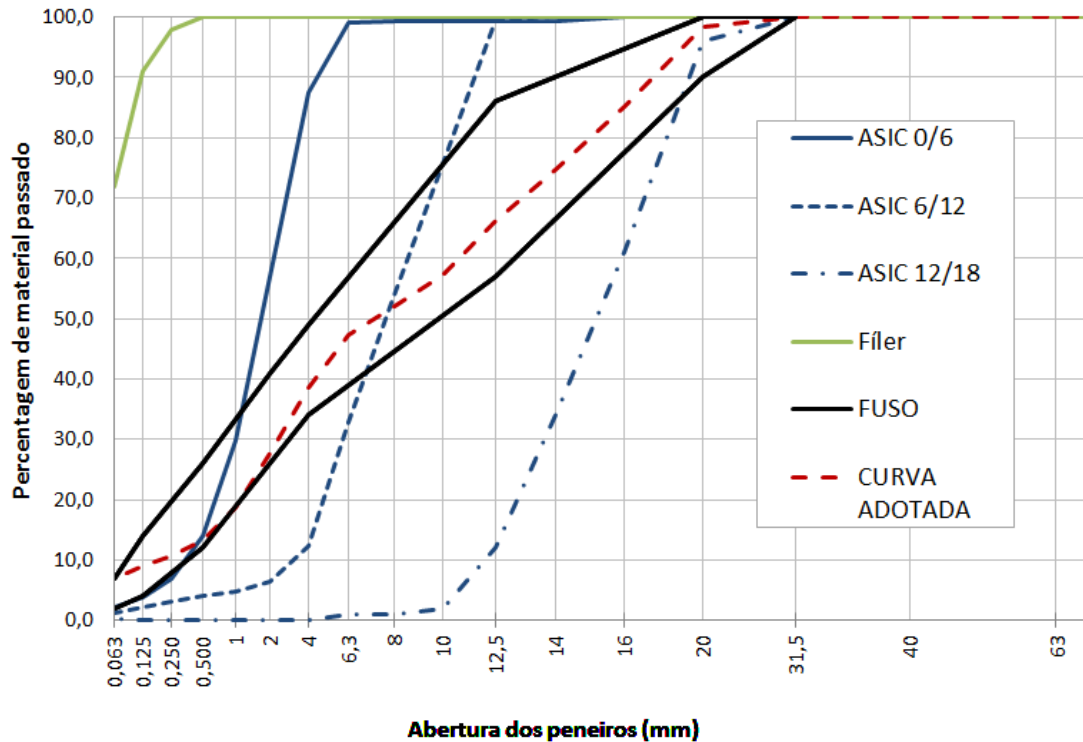


Figura 16 - Curva granulométrica adotada e seus componentes

Da análise do Quadro 12 teçem-se as seguintes considerações relativamente a cada uma das amostras de ASIC, podendo referir-se que a curva adotada respeita o fuso proposto e apresenta uma distribuição granulométrica extensa e bem graduada.

A fração 0/6, apresenta granulometria extensa e bem graduada, uma dimensão máxima de 16 mm correspondendo apenas a 0,8% da amostra analisada e 2,2% de finos (partículas abaixo dos 0,063 mm), o que se demonstra bastante favorável tendo em conta a origem deste material e quando comparado com o valor previsto no CETO para o fuso pretendido. Cerca de 96% da massa do material situa-se dentro dos limites desta fração, pelo que tem obviamente por si só, falta de material mais grosso para um macadame betuminoso. Importa apenas referir que a amostra analisada, foi recolhida dos cerca de 100 quilos de material desta fração e que tinha na sua composição, não mais de duas dezenas de pedras de dimensão entre os 12,5 e os 20 mm. Daí a dimensão máxima desta fracção que mesmo após a sua redução para amostragem, ter apresentado um D_{max} igual a 16 mm e

que se reduzia apenas a uma partícula. Se excluíssemos esta “contaminação” poderíamos afirmar que a D_{\max} seria igual a 8 mm.

A fração 6/12, apresenta uma granulometria bem graduada mas as dimensões das partículas demonstram alguma uniformidade ou seja, tem uma boa distribuição granulométrica mas num curto intervalo de dimensões das partículas, o que faz com estas sejam maioritariamente de dimensão idêntica. Esta amostra apresenta uma dimensão máxima de 12,5 mm, correspondendo a cerca de 0,4% da amostra e uma percentagem de finos abaixo dos 0,063 mm pouco expressiva, com apenas cerca de 1,3%.

A fração 12/18, análogamente à fração anterior, apresenta uma granulometria bem graduada mas com partículas de dimensões muito uniformes. Esta fração apresenta uma grande escassez de material fino abaixo dos 0,063 mm (0,2%) e tem uma dimensão máxima de partículas < 25 mm (0,4%).

É ainda importante referir que, a elevada percentagem de ASIC a utilizar neste estudo poderá conferir algumas dificuldades na formulação tradicional, como por exemplo pelo método *Marshall*, pois grande parte da literatura consultada opta por percentagens bem mais modestas (ROHDE, 2002; TAVARES, 2012; BAGAMPADDE et al., 1999; AHMEDZADE & SENGOZ, 2009; SORLINI et al., 2012), entre os 20% (MARQUES, 2009) e os 80% (WU et al., 2007), sendo o restante em material tradicional.

Por outro lado, MARQUES (2009) ressalva que a composição parcial com maiores percentagens de ASIC, poderá promover o esmagamento do material natural devido à elevada rigidez e resistência à fragmentação do agregado siderúrgico.

É ainda referido por BEHNOOD (2012) citando KANDHAL e HOFFMAN (1982), que a utilização de escórias de aciaria se deve limitar à incorporação na fração grossa ou na fração fina, nunca em ambas simultaneamente.

3.2.1.2. ÍNDICE DE ACHATAMENTO

A determinação do Índice de Achatamento foi realizada conforme preconizado na norma NP EN 933-3:2014.

Este ensaio tem como objetivo a avaliação da forma das partículas, relacionando o seu maior cumprimento com a sua espessura e verificando assim a sua forma cúbica ou lamelar e consiste basicamente em duas operações de peneiração. Primeiro, a amostra é

subdividida por uma série de peneiros de malha quadrada com as dimensões indicadas no Quadro 13, obtendo um conjunto de fração d_i/D_i . A segunda operação consiste em peneirar novamente cada uma destas frações por uma nova série de peneiros de malha horizontal ou de barras, cuja dimensão corresponde a $D_i/2$.

O Quadro 13 apresenta as duas séries de peneiros utilizadas em ambos os processos de peneiração, cujo resultado se expressa em percentagem entre a massa do material que passa nos peneiros de malha quadrada e o material que passa depois pelos peneiros de malha horizontal.

Quadro 13 - Séries de peneiros para determinação do Índice de Achatamento

| Fração granulométrica d_i/D_i Malha quadrada (mm) | Fração $D_i/2$ Malha horizontal/barras (mm) |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| 63/80 | 40 |
| 50/63 | 31,5 |
| 40/50 | 25 |
| 31,5/40 | 20 |
| 25/31,5 | 16 |
| 20/25 | 12,5 |
| 16/20 | 10 |
| 12,5/16 | 8 |
| 10/12,5 | 6,3 |
| 8/10 | 5 |
| 6,3/8 | 4 |
| 5/6,3 | 3,15 |
| 4/5 | 2,5 |

A Figura 17 apresenta os peneiros de malha quadrada e de barras utilizados no presente ensaio.



Figura 17 - Peneiros para determinação do Índice de Achatamento

Da realização deste ensaio obteve-se o Índice de Achatamento igual a 1, cuja classificação segundo a norma NP EN 13043:2004/AC:2010 para valores ≤ 10 é, FI_{10} . O Quadro 14 apresenta o resultado obtido e o requisito estabelecido no CETO.

Quadro 14 - Resultado do ensaio do Índice de Achatamento

| Índice de Achatamento | | |
|---------------------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| Norma de referência NP EN 933-3:2014 | | |
| Resultado | Categoria | Requisito do CETO |
| | NP EN 13043:2004/AC:2010 | |
| 1 | FI_{10} | FI_{30}^1 e FI_{25}^2 |

¹ Requisito para a camada de base; ² Requisito para a camada de regularização e de ligação

De acordo com a bibliografia consultada, o ASIC proveniente de fornos de arco elétrico apresenta valores de Índice de Achatamento entre os 2 (MARQUES, 2009; RAMOS, 2011), 5 (CORREIA et al., 2006), 10 (CORREIA et al., 2005) e < 15 (FERREIRA, 2010).

Pode concluir-se que o ASIC analisado apresenta excelentes valores quando comparados com os agregados de granito, que apresentam tipicamente valores ≤ 20 (FERREIRA, 2010) ou entre 7 e 25 na generalidade dos agregados naturais para pavimentação (PACHECO, 2012), garantindo assim total adequação para aplicação em misturas betuminosas como camada de base, regularização ou ligação.

3.2.1.3. ÍNDICE DE FORMA

A determinação do Índice de Forma foi realizada conforme preconizado na norma EN 933-4:2008, que ao contrário da análise do Índice de Achatamento, não é uma análise obrigatória no CETO.

Este ensaio tem como objetivo avaliar a forma das partículas que compõem a amostra, sendo este processo realizado com auxílio de uma série de peneiros de malha quadrada com dimensões entre 4 e 63 mm e ainda um paquímetro.

A Figura 18 mostra o procedimento do presente ensaio com uma partícula de ASIC e o auxílio de um paquímetro.

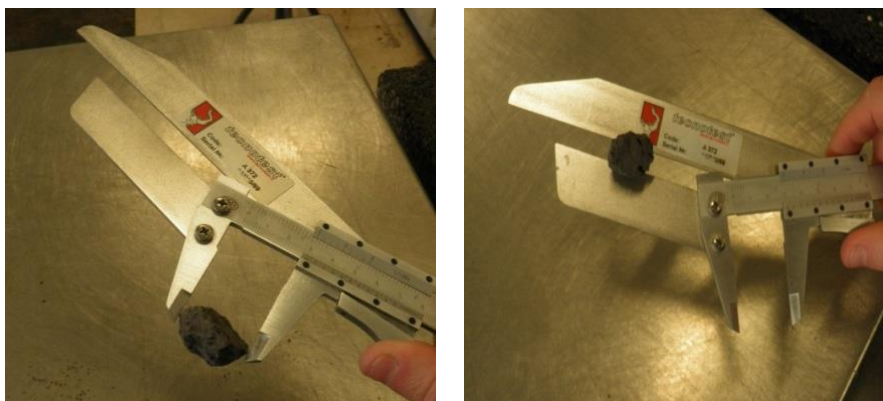


Figura 18 – Determinação do Índice de Forma

Para este ensaio é também necessário uma amostra representativa, que poderá ser reduzida conforme preconizado na norma acima referida. A dimensão da malha dos peneiros é a apresentada no Quadro 15.

Quadro 15 - Séries de peneiros para determinação do Índice de Forma

| Frações granulométricas (mm) |
|-----------------------------------------|
| 31,5 / 63 |
| 16 / 31,5 |
| 8 / 16 |
| 4 / 8 |

Posteriormente, cada uma das partículas de cada fração será medida com auxílio de um paquímetro, em que se avalia se a maior dimensão destas passa num segundo crivo com uma dimensão 3 vezes inferior à anterior. A percentagem de partículas que passarem nesse crivo são alongadas e pouco adequadas para a utilização em pavimentação, pela mesma razão justificada no ensaio anterior. As partículas que ficam retidas são consideradas de forma cúbica.

Da realização deste ensaio obteve-se o Índice de Forma igual a 0, cuja classificação segundo a norma NP EN 13043:2004/AC:2010 para valores ≤ 15 é, SI_{15} .

O Quadro 16 apresenta o resultado obtido e o requisito estabelecido no CETO, sendo expresso em porcentagem entre a massa de material de maior dimensão D_i , e a massa de material de dimensão $< D_i/3$.

Quadro 16 - Resultado do ensaio do Índice de Forma

| Índice de Forma | | |
|------------------------------------------|---------------------------------------|-------------------|
| Norma de referência EN 933-4:2008 | | |
| Resultado | Categoria NP EN 13043:2004/AC:2010 | Requisito do CETO |
| 0 | SI_{15} | Não aplicável |

Valores tão baixos como os verificados no presente trabalho, foram também registados no Brasil por RAMOS (2011), por BRANCO (2004) e por SILVA (2002) com valores de 0,4, 0,29 e 0,74 respetivamente. Neste país duas normas de referência são enunciadas para este ensaio, a norma DNER – ME 262 (1994) e a norma DNER – ES 313 (1997), sendo que apenas esta última estabelece um limite mínimo de 0,50 para os agregados grossos (BRANCO, 2004).

A nível nacional foram ainda registados valores de 1 por MARQUES (2009), 6 e 7 por CORREIA et al. (2006 e 2005) e inferiores a 15 por FERREIRA (2010).

Comparativamente com os valores típicos para agregados de granito (≤ 20) (FERREIRA, 2010), podemos concluir da total adequação do ASIC na incorporação em misturas betuminosas.

3.2.2. ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICOS

3.2.2.1. VALOR DO AZUL DE METILENO

O ensaio do Azul de Metileno foi realizado conforme preconizado na norma EN 933-9:2009+A1:2013.

O principal objetivo deste ensaio é avaliar o estado de limpeza dos agregados finos, detetando a presença de material de origem argilosa ou orgânica, que possa vir a comprometer a qualidade dos materiais e o seu bom desempenho quando em contato com a água. Este fato é particularmente importante no que diz respeito à expansão ou contração

dos materiais que venham a incorporar os pavimentos rodoviários e na eficiência do envolvimento do ligante com os agregados (BRANCO et al., 2011).

O ensaio consiste na preparação de uma solução de Azul de Metileno, que é parcialmente misturada com uma amostra de agregados de fração fina (0/2 mm). Da solução remanescente, são adicionadas porções de 5 ml à mistura. Por cada adição é depositada uma gota da suspensão sobre um filtro normalizado, até que surja uma auréola de cor azul mais claro em volta dessa gota.

Quando se verifica a formação da dita auréola, significa que o material capaz de adsorver a solução do azul já se encontra totalmente saturado da mesma.

Assim, a presença de argilas ou material orgânico num agregado resulta num grande poder de adsorção, pelo que necessitará de maiores quantidades de solução de Azul de Metileno até à formação da auréola.

A Figura 19 apresenta o equipamento para a mistura da solução com a amostra e a realização do respetivo ensaio e o resultado final obtido.

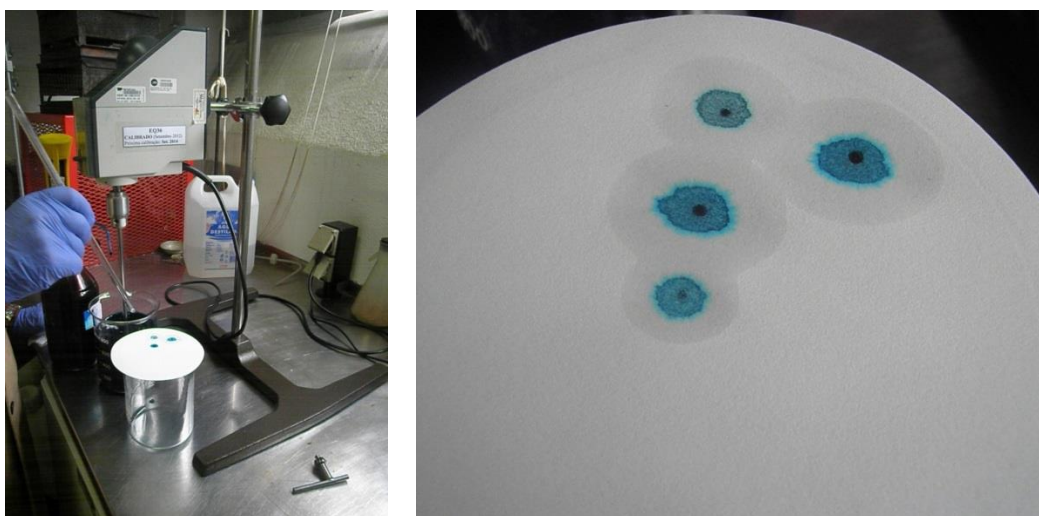


Figura 19 - Realização do ensaio do Azul de Metileno

Tendo em conta a origem do ASIC e da análise granulométrica já realizada é expectável que este material seja praticamente isento de matéria fina de origem argilosa ou orgânica que possa colocar em risco a qualidade e durabilidade dos pavimentos com a sua utilização.

Os resultados e a classificação pela norma NP EN 13043:2004/AC:2010, assim como o limite estabelecido pelo CETO, são os indicados no Quadro 17, cujo resultado é expresso em gramas de solução por quilograma de material da fração 0/2.

Quadro 17 - Resultado do ensaio do Azul de Metileno

| Azul de Metileno | | |
|--------------------------------------------------|--------------------------|-------------------------|
| Norma de referência EN 933-9:2009+A1:2013 | | |
| Resultado | Categoria | Requisito do CETO |
| | NP EN 13043:2004/AC:2010 | |
| 0,5 g/kg | <i>MB_F10</i> | <i>MB_F10</i> |

Valores igualmente reduzidos foram registados por CORREIA et al. (2006 e 2005) que obteve 0% e MARQUES (2009) e FERREIRA (2010) obtiveram 0,2g/kg.

Os agregados tradicionais utilizados em Portugal apresentam resultados no ensaio de Azul de Metileno na ordem de 0,7, 1,6 e 1,2 g/kg para o granito, calcário e gnaiss, respetivamente (MATOS, et al., 2006), levando a concluir que o ASIC apresenta valores bastante mais reduzidos que os materiais naturais, enquadrando-se perfeitamente no requisito do CETO.

3.2.2.2. VALOR DO EQUIVALENTE DE AREIA

O ensaio do Equivalente de Areia foi realizado conforme preconizado na norma NP EN 933-8:2014, não sendo requisito obrigatório estabelecido no CETO.

Este ensaio tem tal como o anterior, o objetivo de avaliar o estado de limpeza dos agregados, que conforme referido anteriormente é um fator importante para o bom desempenho dos pavimentos rodoviários.

Desta feita, este ensaio consiste em colocar a amostra do material num provete com uma solução normalizada e que é agitada durante 30 segundos. Esta agitação fará com que o material se misture com a solução e liberte as partículas mais pequenas para que estas fiquem em suspensão. Após 20 minutos é avaliada a diferença entre o material sedimentado e o material em suspensão que entretanto se precipitou. Este procedimento é feito em duplicado para que o resultado final seja uma média dos dois provetes.

Assim num material com elevada percentagem de finos a percentagem de material que se precipitará após suspensão será também elevada pelo que, caso contrário a diferença entre o material sedimentado e o material precipitado será muito reduzida.

A Figura 20 apresenta a preparação de um provete de ensaio (1), o mesmo em fase de suspensão (2) e ainda o equipamento para agitação e homogeneização do provete (3).



Figura 20 – Ensaio Equivalente de Areia e respetivo equipamento de agitação

O resultado é expresso em percentagem do material sedimentado ou precipitado na solução, o que nos dá valores elevados para um material quando este é arenoso e com reduzida percentagem de impurezas.

O presente ensaio não é um requisito CETO nem é classificado na norma NP EN 13043:2004/AC:2010, servindo neste caso para reafirmar o resultado do ensaio anterior,

comprovando o seu adequado estado de limpeza para incorporação na pavimentação rodoviária. O valor obtido foi de 87%, cujo resultado se apresenta no Quadro 18.

Quadro 18 - Resultado do ensaio do Equivalente de Areia

| Equivalente de Areia | | |
|---------------------------------------------|-----------|-----------|
| Norma de referência NP EN 933-8:2014 | | |
| Resultado | Provete 1 | Provete 2 |
| 87% | 86,5 % | 86,6 % |

No presente ensaio obteve-se um valor de 87% e apesar de não existir um requisito previsto no CETO, outros autores obtiveram valores da mesma ordem de grandeza, por exemplo CORREIA et al. (2005) e BRANCO (2004) obtiveram 100% e MARQUES (2009) obteve 78%.

Comparativamente com os valores padrão para agregados naturais que são aproximadamente 64%, 39% e 59% para o granito, calcário e gnaiss, respetivamente, o ASIC apresenta um valor claramente superior evidenciando um maior estado de limpeza (MATOS et al., 2006).

3.2.2.3. MASSA VOLÚMICA E ABSORÇÃO DE ÁGUA

O ensaio para determinação da Massa Volúmica e a Absorção de Água foi realizado conforme preconizado na norma EN 1097-6:2013.

Este ensaio tem como objetivo determinar a massa volúmica dos agregados siderúrgicos e a respetiva absorção de água capaz de ser retida pelos seus poros.

Tendo em conta que o presente estudo envolve 3 frações de ASIC, a realização deste ensaio requer a avaliação pelo método do picnómetro para as frações acima dos 4 mm e pelo método do cone para frações abaixo dos 4 mm. Foram analisadas as frações com dimensões compreendidas entre 0,063/4, 4/12 e superiores a 14 mm, de forma a verificar a variação da massa em função da dimensão das partículas, tendo em conta que o ASIC apresenta valores muito superiores aos materiais tradicionais.

A importância deste ensaio prende-se essencialmente com a elevada massa volúmica do ASIC mas também, com a porosidade e o seu efeito na absorção de água, elementos

estes essenciais para que na fase de formulação das misturas betuminosas, tenhamos dados suficientes para calcular a massa e o volume adequados, de modo a respeitar as dimensões dos provetes a moldar.

A Figura 21 apresenta a fase de saturação dos agregados com auxílio de picnómetros e o procedimento utilizado no método do cone devido à impossibilidade de secar a superfície das partículas com dimensão abaixo dos 4 mm.



Figura 21 – Saturação das amostras nos picnómetros e utilização do método do cone

O valor de absorção de água em conjunto com a sua porosidade, são fatores muito importantes também para garantir uma boa resistência aos ciclos de gelo e degelo, pelo que se determinou esta propriedade para as mesmas frações já anteriormente mencionadas.

Para além da elevada porosidade já constatada WU et al. (2007) e da sua excelente resistência à fragmentação (CORREIA et al., 2008; FERREIRA, 2010) é importante conhecer quais os valores de absorção de água de cada uma das frações de ASIC, para que este não venha a influenciar negativamente a capacidade resistente, a durabilidade e a trabalhabilidade das misturas betuminosas.

Os resultados destes ensaios são apresentados no Quadro 19.

Quadro 19 - Resultado do ensaio da Massa Volúmica e Absorção de Água

| Massa Volúmica e Absorção de Água Norma de referência EN 1097-6:2013 | | |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| Fração ensaiada (mm) | Massa volúmica das partículas secas (Mg/m³) | Absorção de água (%) |
| 0,063/4 | 3,672 | 0,5 |
| 4/12 | 3,600 | 0,9 |
| >14 | 3,569 | 0,8 |
| Categoria NP EN 13043:2004/AC:2010 | A declarar | WA ₂₄ 1 |
| Requisito do CETO | | ≤ 2 (WA ₂₄ 2) |

Como seria expectável a massa volúmica determinada para o ASIC em estudo, apresenta valores bastante superiores aos materiais tradicionais para pavimentação, que registam valores da ordem de 2,6 Mg/m³ (PACHECO, 2012; FERREIRA, 2010).

A nível nacional os elevados valores foram também constatados por diversos autores, nomeadamente por MARQUES (2009) que obteve o valor mais elevado registando 3,69 Mg/m³ e CORREIA et al. (2006) obteve o valor mais baixo de 2,94 Mg/m³.

No que diz respeito à Absorção de Água os valores obtidos ainda que bastante consistentes entre si (0,5% e 0,9%) e corroborados por PASETTO et al. (2011)(0,51% e 0,8%), são no entanto significativamente mais baixos do que o constatado na bibliografia, quando comparados com o mesmo tipo de escórias. MARQUES (2009) registou valores entre 1,6% e 1,7% e FERREIRA (2010) refere valores entre 1% a 2% e 4% para agregados siderúrgicos grossos e finos, respetivamente.

Importa referir que em termos de Absorção de Água os valores obtidos neste estudo, segundo a norma NP EN 13043:2004/AC:2010, são considerados resistentes ao gelo-degelo e superam largamente o requisito do CETO.

3.2.2.4. RESISTÊNCIA À FRAGMENTAÇÃO – *LOS ANGELES*

O ensaio da Resistência à Fragmentação pelo método de *Los Angeles* foi realizado conforme preconizado na norma NP EN 1097-2:2011.

Este ensaio permite determinar a resistência à fragmentação de um agregado, quando este é submetido a um ciclo de rotações dentro de um cilindro em chapa de aço com 11 esferas de aço. Após a realização deste ensaio, o material original de fração 10/14 mm é novamente recolhido, lavado e peneirado num peneiro com malha de 1,6 mm, correspondendo o material que passa ao que se fragmentou. A diferença verificada na massa do provete antes e depois do ensaio é o material que se fragmentou durante o mesmo.

Este ensaio é extremamente importante para os materiais que venham a incorporar qualquer pavimento rodoviário, pois têm de garantir uma resistência adequada para o tráfego em serviço, mas também na execução das misturas, na aplicação das camadas ligadas ou granulares e ainda às cargas durante a construção sem que percam as suas capacidades resistentes.

Esta propriedade garante uma estrutura e um esqueleto pétreo de elevada resistência às deformações permanentes, contribuindo para uma maior dissipação das cargas de tráfego e conseqüentemente uma maior durabilidade de toda a infraestrutura.

A Figura 22 apresenta o equipamento para a realização deste ensaio e as esferas de aço a introduzir juntamente com os agregados e que irão promover a fragmentação. Quadro 20 apresenta os resultados obtidos e o requisito estabelecido no CETO.

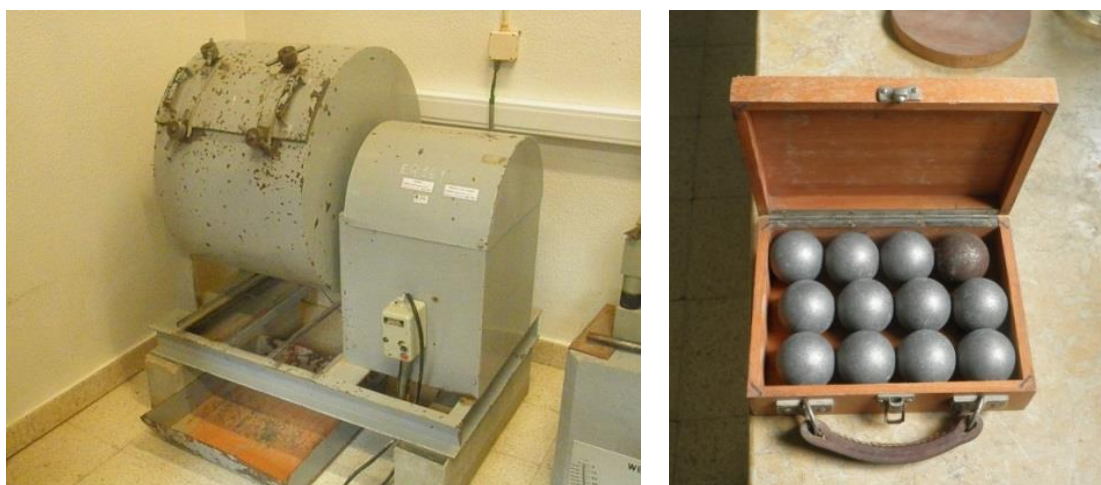


Figura 22 - Equipamento para ensaio de *Los Angeles* e as esferas de aço

Quadro 20- Resultado do ensaio *Los Angeles**Los Angeles***Norma de referência NP EN 1097-2:20111**

| Resultado do ensaio | Categoria NP EN 13043:2004/AC:2010 | Requisito do CETO |
|---------------------|---------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| 14 | <i>LA</i> ₁₅ | <i>LA</i> ₄₀ ¹ e 35% ² |

¹ Requisito para a camada de base; ² Requisito para a camada de regularização e de ligação

Resultado idêntico ao obtido no presente trabalho foi também registado por ROHDE (2002) e LIMA et al. (2000) já PASETTO et al. (2011) obteve 15% e 16%.

Alguns autores obtiveram valores ligeiramente mais elevados, como é o caso de estudo de CORREIA (et al., 2005 e 2006) que obteve 28% e 23%, FERREIRA (2010) e MARQUES (2009), 25%, tendo BRANCO (2004) obtido valores entre 20% e 25%, sendo ainda assim valores mais reduzidos do que tradicionalmente se verifica nos agregados naturais de pavimentação.

O resultado obtido demonstra uma elevada resistência do ASIC à fragmentação, superando largamente o mínimo estabelecido pelo CETO para os materiais tradicionais, que segundo MATOS (2006) apresentam usualmente valores de 32% para o granito, 34% para calcário e 20% para gnaiss. Já RODRIGUES (2007) citando GEISELER (1996), indica para o granito brasileiro valores entre 15% e 20%.

A Figura 23 apresenta o tabuleiro de fundo do equipamento com o material resultante após o ensaio e o peneiro com o qual se fará a análise do material fragmentado.



Figura 23 - Material resultante após realização do ensaio *Los Angeles*

3.2.2.5. RESISTÊNCIA AO DESGASTE – *MICRO-DEVAL*

O ensaio da Resistência ao Desgaste pelo método *Micro-Deval* foi realizado conforme preconizado na norma NP EN 1097-1:2012.

Este ensaio permite determinar a resistência ao desgaste de um agregado, quando este é submetido a um ciclo de rotações dentro de um cilindro oco em aço, em conjunto com aproximadamente 5 kg de pequenas esferas em aço e 2,5 lt de água corrente.

Após a realização deste ensaio o material é novamente recolhido, lavado e peneirado num peneiro com malha de 1,6 mm, correspondendo o material que passa ao que sofreu alterações devido ao desgaste. Tal como no ensaio anterior, a diferença verificada na massa do provete antes e depois do ensaio corresponde ao material que se desgastou durante o mesmo e cujo resultado é expresso em percentagem relativamente à massa inicial.

Este ensaio é feito com dois provetes simultaneamente, exatamente com as mesmas condições já acima referidas, sendo o resultado final a média de ambos.

Este ensaio é extremamente importante para os materiais que venham a incorporar qualquer pavimento, pelas mesmas razões mencionadas no ensaio anterior. Neste ensaio em particular pretende-se também avaliar as alterações de dimensão e da forma dos agregados, mas principalmente a sua suscetibilidade ao desgaste das suas faces e arestas.

Este fato influenciará a rugosidade natural do material e o seu angulo de atrito interno, minorando o seu imbricamento e a superfície de contato entre as partículas e reduzindo naturalmente as suas propriedades mecânicas e resistentes.

A Figura 24 apresenta à esquerda o equipamento para o presente ensaio e à direita, as esferas de aço que servirão de carga abrasiva para promover o desgaste dos agregados.



Figura 24 - Equipamento e esferas de aço para realização do ensaio *Micro-Deval*

Conforme realizado no ensaio de *Los Angeles* a obtenção do material com a dimensão necessária para a presente análise (10/14 mm) foi possível recorrendo à peneiração da fração 12/18 mm. Como também já referido, são preparados dois provetes de ensaio sendo o valor final a média dos resultados obtidos.

Quadro 21- Resultado do ensaio *Micro-Deval*

| <i>Micro-Deval</i> | | | |
|---------------------------------------|-----------|--------------------|-----------------------------|
| Norma de referência NP EN 1097-1:2012 | | | |
| Provete 1 | Provete 2 | Categoria | Requisito do CETO |
| 6,3 | 7,2 | NP EN | |
| Resultado Final | | 13043:2004/AC:2010 | |
| 7 | | $M_{DE10} (>10\%)$ | M_{DE25}^1 e M_{DE20}^2 |

¹ Requisito para a camada de base; ² Requisito para a camada de regularização e de ligação

Resultado semelhante foi obtido por CORREIA (2006) tendo registado um valor de 11, significativamente superior ao valor usual para agregados graníticos (≤ 20) (FERREIRA, 2010).

Este resultado permite concluir sobre a total adequação do ASIC como agregado para pavimentação, cumprindo largamente o requisito do CETO e cuja resistência ao desgaste é superior ao verificado nos agregados tradicionais.

3.2.3. AFINIDADE LIGANTE-AGREGADO

O ensaio de Afinidade Ligante-Agregado foi realizado conforme preconizado na norma EN 12697-11:2012, sendo um dos requisitos do CETO a declarar.

O objetivo deste ensaio é avaliar a adesividade ou afinidade entre o betume e os agregados, de forma a determinar a suscetibilidade de ocorrer o destaque da fina camada de betume que os envolve quando sujeitos à ação da água. A importância deste fator é particularmente relevante nos agregados siderúrgicos, devido à elevada presença de óxidos de cálcio e de magnésio e ao ferro na sua composição, minimizando o potencial expansivo deste material.

Ainda que as características e a qualidade do betume e dos agregados sejam importantes, estes não garantem por si só uma adequada ligação entre si. A porosidade, a elevada rugosidade e a sua composição química, quando comparado com os agregados

tradicionais, desempenham o papel ainda mais importante na garantia de uma boa adesividade (ALT-MAT, 2001).

Estudos comprovaram que uma superior adesividade entre o agregado e o betume, minimiza a degradação das misturas betuminosas por ação da humidade (BEHIRY, 2012) mas que, esta avaliação deverá ser obtida preferencialmente ou conjuntamente através do ensaio de Sensibilidade à Água e da Resistência à Tração Indireta, sendo que esta é uma abordagem mais direta e objetiva (BRANCO et al., 2011).

A norma acima referida indica três métodos diferentes para a realização deste ensaio:

- ✓ Método da Garrafa Giratória;
- ✓ Método Estático;
- ✓ Método com Água Fervente.

Em ambos os métodos o procedimento consiste em envolver em ligante uma amostra de agregado da fração 8/11,2 mm e promover o seu contacto com água, no caso dos dois primeiros métodos e com uma solução química no método com água fervente. Posteriormente é feita a avaliação e quantificação do desrevestimento de betume nos agregados.

Apesar do CETO não recomendar nenhum dos métodos em concreto, alguns aspetos devem ser ponderados antes de ser tomada uma opção, aspetos que se apresentam no Quadro 22 e que são adaptados da norma.

Quadro 22 – Análise dos métodos de ensaio para avaliação da Afinidade propostos pela norma

| Objeto | Método 1 Garrafa Giratória | Método 2 Estático | Método 3 Água fervente |
|----------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| Simplicidade | + | ++ | - |
| Rapidez de execução | - | ++ | + |
| Experiência necessária/técnicos | + | ++ | - |
| Aparatus/equipamento químico | + | ++ | - |
| Precisão dos resultados | + | - | ++ |
| Perigosidade/segurança e saúde | + | ++ | - |
| Outros | Não recomendado para materiais muito abrasivos | | |

++ Mais Favorável; + Favorável; - Desfavorável;

O método estático foi excluído pela sua excessiva simplicidade, pelos resultados pouco fidedignos e pela avaliação subjetiva. Prevê-se ainda que devido à elevada porosidade e rugosidade superficial do ASIC, este método demonstre uma reduzida influência no agregado, sem a presença de uma carga abrasiva para esse efeito.

O método com água fervente foi também excluído pela sua complexidade, pela necessidade de reagentes químicos elaborados e dispendiosos e principalmente, pela perigosidade associada ao uso desses químicos com a possibilidade de efeitos gravosos para a saúde.

Assim o procedimento de ensaio adotado foi o método da garrafa giratória, tendo apenas como aspeto negativo o fato de não ser recomendado para materiais muito abrasivos como é o caso do ASIC.

Apesar da utilização da norma EN 12697 no presente estudo, os métodos de ensaio e a sua abordagem poderiam suscitar dúvidas quanto à eficácia e rigor nos agregados siderúrgicos, mas segundo o estudo *ALT-MAT* (2001), os ensaios mecânicos tradicionalmente usados na avaliação da afinidade ligante-agregados naturais são fiáveis e válidos, mesmo quando aplicados aos agregados alternativos, pois estes não influenciam os seus resultados. O estudo referido apenas desencoraja ensaios que envolvam radiações, como por exemplo os raios x, pois a composição dos materiais alternativos neste caso em particular do ASIC, poderão ter um comportamento diferente e levar a resultados divergentes dos obtidos em agregados naturais (*ALT-MAT*, 2001).

Assim e de acordo com o preconizado pela norma EN 12697-11:2012 relativamente ao método da Garrafa Giratória, o procedimento deste ensaio consiste basicamente na preparação de 3 provetes de agregado da fração 8/11,2 mm, estes são envolvidos com betume e certifica-se que ficam totalmente cobertos antes de se deixarem a secar por um período entre 12h a 64h.

Posteriormente cada uma das amostras será colocada numa garrafa com água desmineralizada ou destilada e uma vareta de vidro fará a envolvência do agregado no decorrer do ensaio, aumentando assim a abrasão durante o movimento giratório da garrafa a velocidade controlada.

As leituras do estado de envolvência dos agregados são feitas por dois técnicos separadamente às 6h, às 18h e às 24h de ensaio, perfazendo nunca menos tempo que este último. Opcionalmente este ensaio pode ser prolongado fazendo-se novas leituras às 48h e às 72 h de ensaio.

A Figura 25 apresenta a adição de betume aos agregados (1) e estes já envolvidos (2) com auxílio da misturadora mecânica (3) e ainda o equipamento para realização do ensaio de Afinidade pelo método da Garrafa Giratória (4).

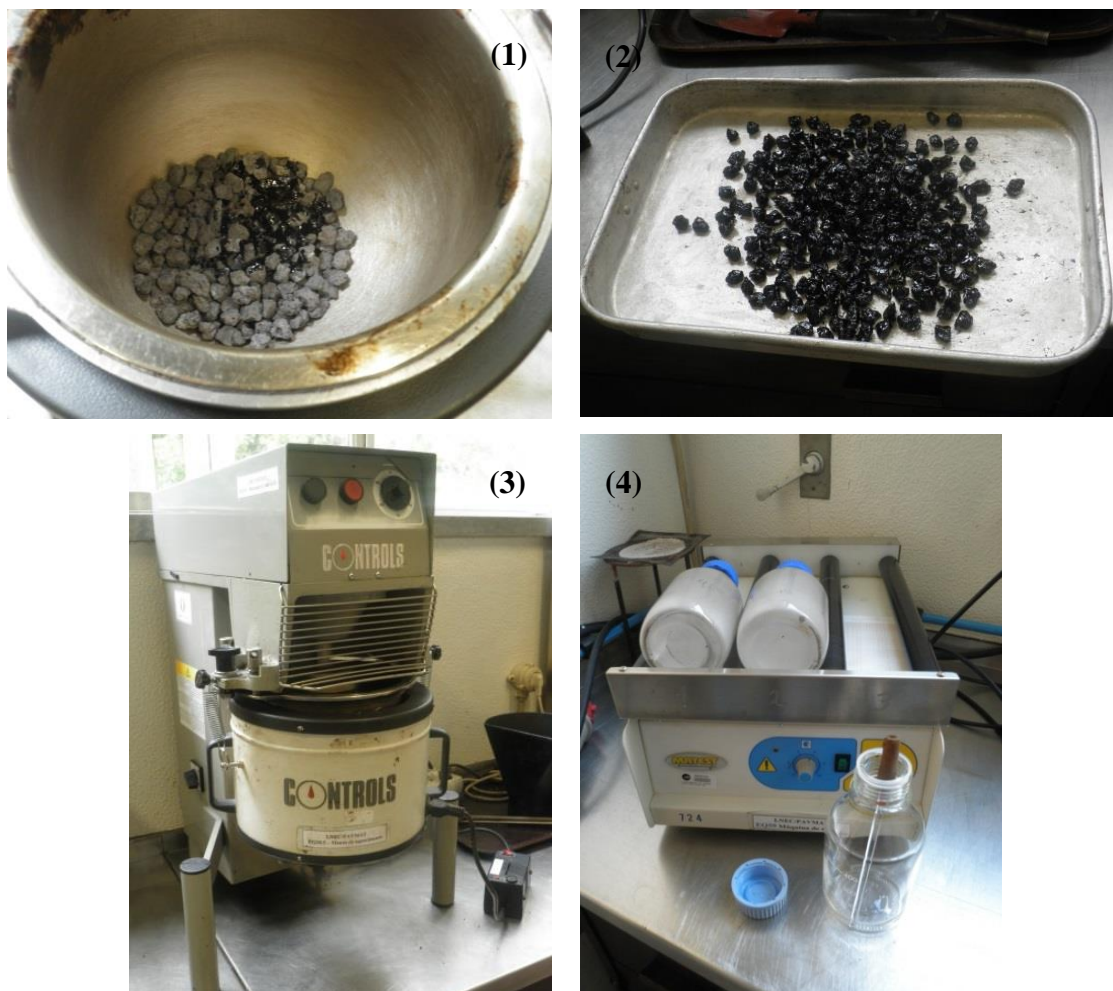


Figura 25 – Preparação dos provetes para o ensaio de Afinidade pelo método da Garrafa Giratória

Antes da realização deste ensaio importa referir que, devido à elevada massa volúmica do ASIC, foi necessário recorrer à correção da porção de betume para a mistura, conforme indicado na norma para que a amostra fosse representativa.

Algumas críticas poderão ser feitas à metodologia preconizada por esta norma após a conclusão do ensaio, na medida em que a ausência de betume que se verificou nos agregados, deve-se essencialmente à erosão e desgaste entre si, a vareta de vidro e a própria garrafa e não propriamente devido ao destaque do ligante por falta de adesão. A própria avaliação é um pouco subjetiva e meramente indicativa, de tal forma que não são fornecidos valores limite ou de referência.

O Quadro 23 apresenta os resultados obtidos nas várias leituras realizadas e o resultado final.

Quadro 23 - Resultado do ensaio de Afinidade Ligante-Agregado

| Afinidade Ligante-Agregado | | | | |
|---------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Norma de referência EN 12697-11:2012 | | | | |
| | Provete 1 | Provete 2 | Provete 3 | Resultado |
| Após 6h | 80% | 85% | 80% | 80% |
| Após 24h | 75% | 70% | 65% | 70% |
| Após 48h | 60% | 60% | 60% | 60% |

Valores médios obtidos pela avaliação de dois operadores

Apesar de este ensaio não ter um valor mínimo requerido pelo CETO e ser apenas um valor a declarar, pode concluir-se existir uma “boa” afinidade entre o ligante e os agregados.

A Figura 26 apresenta os agregados envolvidos no betume antes e após o ensaio, observando-se um destaque mais evidente nas arestas e zonas irregulares das partículas.



Figura 26 - ASIC envolvido em ligante antes e depois do ensaio de Afinidade

XIROUCHAKIS e MANOLAKKOU (2011) realizaram uma avaliação idêntica à efetuada no presente estudo, utilizando um betume de pen. 50/70, escórias do tipo FAE (forno de arco elétrico) e conforme preconizado pela norma EN 12697-11, obtiveram uma “boa afinidade” entre os materiais.

MARQUES (2009) avaliou a afinidade das escórias nacionais com um ligante normal através de dois métodos distintos, nomeadamente o método de *Riedel e Weber* e por um procedimento interno (baseado no procedimento da J.A.E. de 1953) do Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção (LGMC) do Centro de Formação Profissional da Indústria da Construção Civil e Obras Públicas do Norte (CICOPN), classificando a afinidade como “muito boa” e “aceitável”, respetivamente.

O método de *Riedel e Weber* foi também utilizado no estudo *IHOBE* (1999) para concluir que 100% das escórias negras ensaiadas, apresentam uma adesividade adequada às exigências das infraestruturas rodoviárias.

No Brasil a avaliação da adesividade do ligante ao agregado é feita de acordo com a norma DNER – ME 078/94, cujo ensaio consiste na imersão dos provetes em água destilada a 40°C por 72 horas. O ensaio é dito satisfatório quando não se verifica o desrevestimento do agregado, caso contrário é recomendada a utilização de aditivos que promovam essa adesividade como por exemplo o cimento Portland, cal hidratada ou aditivos químicos líquidos.

Assim e de acordo com a norma cima referida, BRANCO (2004) avaliou também a afinidade das escórias do tipo FAE envolvidas com um betume regular (pen.50/60), tendo verificado um ligeiro desrevestimento do agregado. Ao aplicar 1% de aditivo químico (CAP-DOP, da BR Distribuidora), concluiu uma melhoria efetiva de adesividade.

BERNUCCI (1999) tinha já anteriormente constatado que a adição de aditivos (como o cimento Portland, cal hidratada ou os aditivos químicos líquidos), melhora a adesividade e o recobrimento do agregado, por reduzir a tensão superficial entre o mesmo e o ligante.

Este fato foi igualmente corroborado por BAGAMPADDE et al. (1999) para misturas temperadas, afirmando ainda que os resultados obtidos, se devem à reação química da cal em maior presença nos agregados de calcário, com a água, o que promove a adesividade do ligante aos agregados.

Referindo-se ao calcário, estudos revelam que a sua utilização em conjunto com o ASIC, tende a melhorar a adesividade (BEHNOOD & AMERI, 2012). Estes autores concluíram ainda sobre uma melhoria nos resultados da estabilidade pelo método *Marshall* e na Resistência à Tração Indireta em misturas com ASIC e calcário (BEHNOOD & AMERI, 2012). A justificação é fornecida pela maior relação CaO/SiO₂ existente no calcário, o que favorece a afinidade entre os agregados e o betume e levando a uma melhoria nos desempenhos acima mencionados (AMERI & BEHNOOD, 2011).

WU et al. (2007) concluiu também resultados mais favoráveis, no ensaio de afinidade segundo a norma EN 12697-11, no ASIC ($\geq 95\%$) do que no basalto ($\geq 85\%$) e atribuiu este fato à maior porosidade do agregado siderúrgico, fator que indica ainda, uma maior absorção de ligante e conseqüentemente melhor resistência à fadiga. Para além da maior porosidade do ASIC, este autor verificou ainda que os poros no basalto são maioritariamente superiores a $0,1\mu\text{m}$, mas no ASIC cerca de 50% dos poros são da ordem dos $0,01\mu\text{m}$ a $0,1\mu\text{m}$.

O mesmo se verifica quando comparados o calcário e o ASIC, em que a porosidade interna e superficial são muito superiores no do agregado siderúrgico (AHMEDZADE & SENGOZ, 2009).

PASETTO e BALDO (2011) também concluíram não existir quaisquer problemas de afinidade ou de desrevestimento do agregado usando uma norma diferente, a CNR 138/92, cujos provetes são imersos em água a 25°C durante 24 horas. Os autores atribuíram ainda este fato, aos excelentes resultados que obteve nos ensaios de Polimento Acelerado e do Pêndulo Britânico, efetuados num troço de estrada com camada de desgaste em ASIC.

Em forma de conclusão é bem evidente a importância da adesividade entre o ligante e os agregados, sendo que este fator contribui grandemente para uma boa estabilidade, durabilidade e resistência das misturas betuminosas. Fica também claro que a maioria das escórias siderúrgicas apresentam propriedades e características que lhes garantem equivalente ou superior desempenho em termos de afinidade (LIKOYDIS & LIAPIS, 2011), quando comparados com os agregados tradicionais, apesar da sua incorporação em conjunto com calcário apresentar quimicamente melhores condições para uma boa adesividade (AMERI & BEHNOOD, 2011).

Pode afirmar-se com alguma segurança a viabilidade de aplicação do ASIC em misturas betuminosas no que se refere à adesividade agregado-ligante, pois o desempenho deste agregado siderúrgico parece não comprometer de forma alguma a capacidade de adesão entre o ligante e o agregado quando comparados com os materiais tradicionais.

3.2.4. ESTUDO DE FORMULAÇÃO – MÉTODO MARSHALL

Relativamente aos métodos de formulação, existem diversas abordagens adotadas ao longo da história pelas diversas administrações e organismos rodoviários. Segundo

BRANCO et al. (2011, adaptado de FRANCKEN, 1998) estas podem simplificar-se a partir de:

- ✓ Especificações;
- ✓ Métodos Empíricos;
- ✓ Métodos Analíticos;
- ✓ Métodos Volumétricos;
- ✓ Métodos Racionais.

O método tradicionalmente utilizado em Portugal é o método *Marshall* (EP, SA, 2014; NP EN 13108-20:2008) enquadrando-se nos métodos empíricos.

Os métodos empíricos surgem como um avanço natural e complementar aos métodos de definição por especificação, que apenas se baseavam na experiência obtida em obra e que resultavam em “receitas tipificadas” de utilização sem grande possibilidade de inovação (BRANCO et al., 2011).

Assim esta “nova” metodologia empírica, em particular o método *Marshall* que foi introduzida em Portugal no início dos anos 50, caracteriza-se pela sua componente experimental em laboratório. São moldados provetes de misturas betuminosas com diversas percentagens de betume, e determinadas as suas propriedades geométricas e físicas para posterior avaliação do seu desempenho quando sujeitas ao ensaio *Marshall*. O objetivo é determinar a percentagem ótima de betume para cada mistura betuminosa.

Apesar de ser bastante utilizado, este método não simula adequadamente a compactação em obra, sendo esta reconhecidamente a sua maior limitação (PIMENTEL, 2013).

No âmbito do presente estudo de formulação da mistura betuminosa com incorporação de ASIC foi utilizado o método *Marshall* (EN 12697-34:2012). Para além das normas que oportunamente serão referidas, foi tido em conta o preconizado nos seguintes documentos:

- ✓ NP EN 13108-1:2011, Misturas Betuminosas, especificações dos materiais para betão betuminoso;
- ✓ EN 13043:2002/AC, Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação;
- ✓ CETO (EP, SA, 2014).

Outros documentos serão identificados quando necessária a sua referenciação.

Face aos ensaios anteriormente realizados e às características do material, o objetivo desta formulação tem como alvo a utilização de ASIC em misturas betuminosas do tipo Macadame Betuminoso AC 20 (MB) em camadas de regularização, de base e de ligação.

O estudo passa pela definição de uma curva granulométrica que sirva o fuso pretendido (ver 3.2.1.1). De seguida são feitas várias misturas (EN 12697-35:2004+A1:2007) com diferentes percentagens de betume e moldadas (EN 12697-30:2012) de acordo com o método *Marshall*.

Importa destacar que dada a elevada massa do ASIC em comparação com os materiais tradicionais, foi necessário proceder à determinação da quantidade de material para respeitar as dimensões previstas dos provetes para este ensaio.

A compactação pelo método *Marshall* é realizada com auxílio de um compactador de impacto, conforme preconizado pela norma EN 12697-30:2012 e que se apresenta na Figura 27.

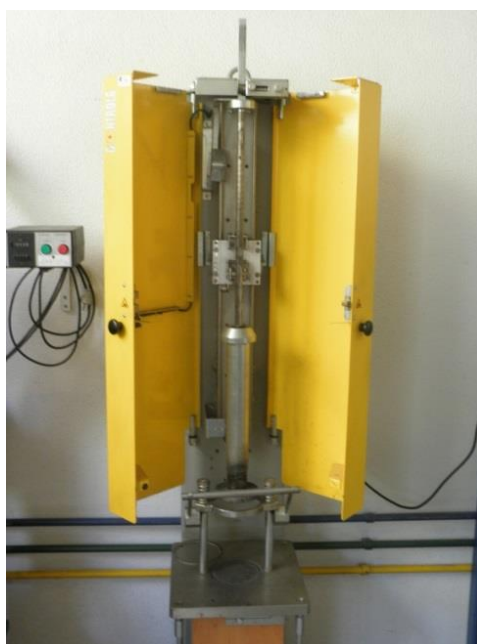


Figura 27 - Compactador de impacto

Posteriormente os provetes são curados e desmoldados, sendo determinada a Baridade Imersa (EN 12697-6:2012), a Baridade Máxima Teórica (EN 12697-5:2009/AC:2012) e a Baridade Geométrica (EN 12697-29:2002). Com estes dados calcula-

se o volume de vazios e a porosidade de cada provete, que são finalmente colocados num banho a 60°C para posterior ensaio na prensa *Marshall* (EN 12697-34:2012) com auxílio de estabilómetro.

O objetivo é determinar a resistência da mistura até à sua rotura e a respetiva deformação, sendo ainda determinado o quociente *Marshall*, que é uma razão entre a estabilidade e a deformação para cada provete.

Finalmente com a análise de um conjunto de critérios, nomeadamente a baridade, a estabilidade, a deformação e a porosidade (CETO (EP, SA, 2014)) é possível determinar a percentagem ótima de betume.

O estudo de formulação foi realizado para uma única percentagem de incorporação de ASIC (92%), de fíler de calcário (8%) e um betume normal de pavimentação com pen. 50/70 sem qualquer aditivo. Assim, foram moldados 4 provetes para cada percentagem em betume (4,0%, 4,5%, 5,0%, 5,3% e 5,5%) conforme indicado na norma NP EN 13108-1:2011.

Destaca-se apenas que a massa necessária para garantir as dimensões do provete *Marshall* após moldagem, teve de ser calculada em função das massas volúmicas do betume, do fíler e ainda do ASIC já anteriormente determinados (ver 3.2.2.3), verificando-se a necessidade de 1600 g por provete.

Na execução das misturas foram respeitadas as temperaturas e o tempo de aquecimento dos agregados, com particular cuidado para o betume (3h a 150°C). A compactação, como já referido foi feita com auxílio de um compactador de impacto com 75 pancadas em cada topo do provete.

Após compactação de cada provete e a respetiva cura, estes foram desmoldados e determinadas as Baridades, a Porosidade e o VMA conforme normas já indicadas anteriormente. Posteriormente, cada provete foi colocado num banho a 60°C por um período de tempo entre os 40 e 60 minutos, para serem submetidos ao ensaio de compressão na prensa *Marshall* com auxílio de um estabilómetro.

A Figura 28 apresenta os moldes com os respetivos provetes, a pesagem de um provete durante a determinação das baridades e o ensaio do mesmo na prensa com auxílio de um estabilómetro até se atingir a sua rotura. Deste ensaio são retirados os valores da deformação e da estabilidade.

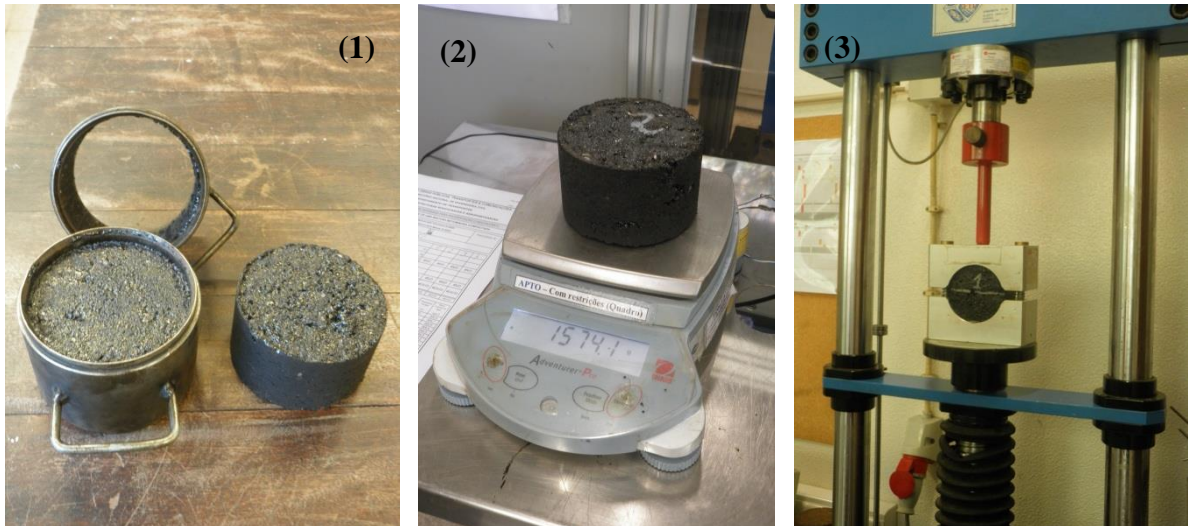


Figura 28 - Provetes e respetivos moldes (1), pesagem (2) e ensaio do provete (3)

Na Figura 29 apresentam-se os resultados médios obtidos para as quatro propriedades, com os respetivos limites, que permitem de acordo com o CETO, determinar a percentagem ótima de betume.

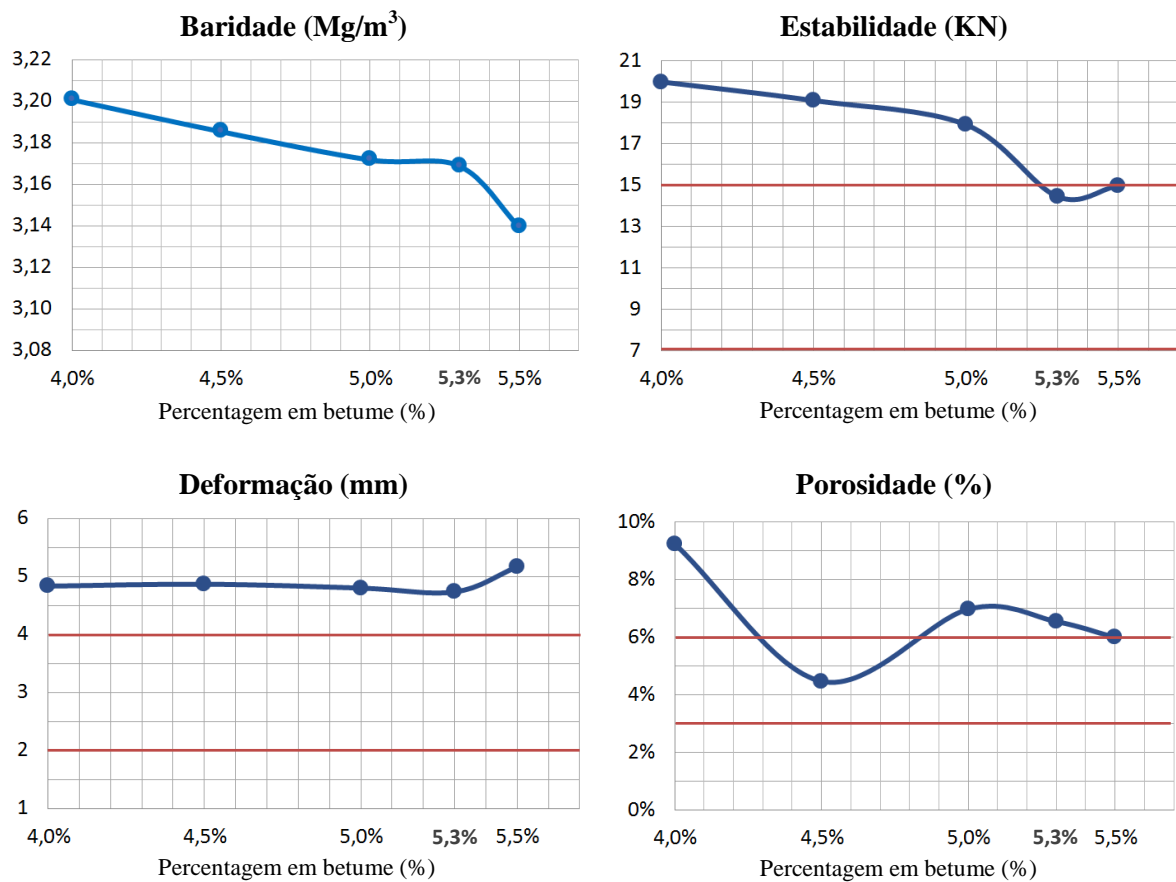


Figura 29 - Representação dos resultados pelo método *Marshall*

Para determinar a percentagem ótima de betume atendeu-se ao recomendado no CETO, tendo-se obtido o valor de 5,1%.

Importa destacar a elevada estabilidade obtida com a incorporação de ASIC na mistura betuminosa, situação já anteriormente verificada por outros autores, que concluíram variações entre os 2% a 69% acima do usualmente obtido em misturas tradicionais (PASETTO & BALDO, 2011). Relativamente à porosidade e à deformação, obtiveram-se também valores ligeiramente acima, ou no limiar dos limites estabelecidos pelo CETO. A porosidade respeita os limites de 3% a 6% para percentagens de betume entre 4,3% a 4,8% e a deformação mínima registada foi de 4,73 mm.

Tendo em conta a elevada percentagem de incorporação de ASIC e de acordo com a bibliografia consultada, seria expectável um valor elevado de betume (WU et al., 2007; HARITONOV et al., 2012; AMERI & BEHNOOD, 2011).

Também os estudos *SAMARIS* (2006) e *IHOBE* (1999), concluíram sobre a necessidade de teores de betume mais elevados aquando da incorporação de agregados siderúrgicos em misturas betuminosas.

CRUCHO (2011), MARQUES (2009) e num estudo realizado pelo LNEC para a SN (1985), foi avaliada a aplicação de ASIC nacional em camadas betuminosas, ainda que de origens diferentes (mistura de escórias do tipo FAE com convertidor a oxigénio) no caso do estudo do LNEC e em diferentes percentagens, tendo sido obtidos valores entre os 5,2% e 6,3%.

Um conjunto de outros estudos concluíram da necessidade de um maior teor em betume, por exemplo HAININ et al. (2012) para misturas betuminosas densas obtiveram valores de 5,7% e 6,7%, quando os valores de referência seriam normalmente de 4,3% e 5,0%, respetivamente.

SORLINI et al. (2012) realizaram um conjunto de ensaios onde compararam misturas betuminosas com a adição de ASIC em diferentes percentagens de incorporação (>40%) e apenas com agregados naturais, usando as mesmas percentagens de betume (>5,5%). Os resultados obtidos mostraram um desempenho idêntico ou mesmo superior com a adição de ASIC em comparação com as mesmas misturas com materiais tradicionais.

ARABANI et al. (2007) concluíram que perante uma mistura de referência com materiais naturais e com um teor de 5,1% em betume, quando substituída a fração grossa e

a fração fina com agregados siderurgicos, obtiveram valores de teor ótimo superiores, 5,5% e 5,3%, respetivamente.

Para além da maior necessidade de betume com a introdução de agregados siderurgicos, deve ainda atender-se ao fato de que o método *Marshall* poderá não ser o mais indicado para a formulação com este tipo de material, por necessitar de maior energia de compactação (LNEC, 1985; PASETTO & BALDO, 2011) e alterando consequentemente os valores obtidos principalmente na baridade, na porosidade e VMA quando comparados por exemplo com o compactador de rolo (PIMENTEL, 2013).

A Figura 30 apresenta ainda os resultados do VMA, do Quociente Marshall, da Baridade Máxima Teórica e da Saturação em Betume.

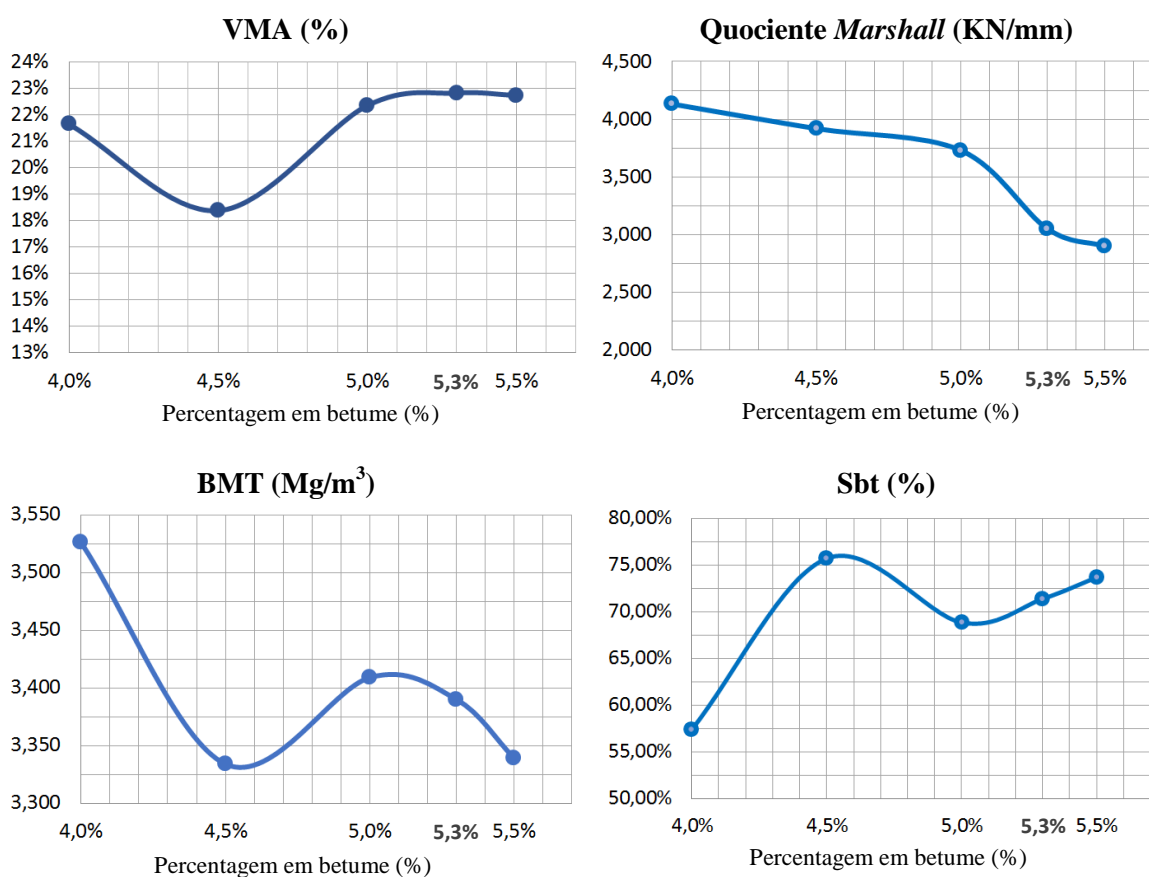


Figura 30 - Restantes resultados do ensaio *Marshall*

Pelos valores registados acima é possível verificar que o VMA é também um pouco elevado, situando-se consideravelmente acima dos 14% (valor mínimo nos requisitos no CETO), situação que, tal como já referido, pode dever-se à inadequação do método de compactação preconizado pelo método *Marshall*.

Relativamente ao grau de saturação em betume (Sbt.), embora os valores obtidos sejam relativamente bons, não são valores ótimos, pois apesar da elevada porosidade quer do agregado quer da mistura, denota que talvez o betume não tenha capacidade para penetrar nos poros de reduzida dimensão como já constatado por WU (2007).

3.2.5. ENSAIOS SOBRE A MISTURA BETUMINOSA FORMULADA

Nesta secção, apresentam-se os resultados do estudo experimental proposto para avaliação das misturas betuminosas com incorporação de ASIC e que é composto pelos seguintes ensaios:

- ✓ Sensibilidade à água;
- ✓ Resistência à Fadiga;
- ✓ Resistência à Deformação Permanente ou Ensaio de *Wheel Tracking*.

A análise do comportamento da mistura passa por comparar os resultados obtidos com os de uma mistura tradicional semelhante, ou seja um Macadame Betuminoso AC 20 (MB) com agregados naturais. Tendo em conta a vasta experiência na utilização destas misturas tradicionais, não se realizou em laboratório sua avaliação mecânica, servindo os seus valores de referência como comparação com os resultados obtidos no presente trabalho.

Procurou-se que as misturas de referência fossem tão semelhantes quanto possível com o tipo de mistura formulada com ASIC, para que os valores sejam diretamente comparáveis.

Outra avaliação pertinente seria a comparação dos resultados obtidos no presente estudo, com outros trabalhos de nível internacional, analisando misturas igualmente compostas com ASIC. Dada a elevada especificidade do que aqui foi concretizado, não existem quaisquer estudos que sejam possíveis enquadrar, pois desde a origem do ASIC (FAE), à elevada percentagem utilizada (92%), ao tipo de betume (pen. 50/70 e sem aditivos), à percentagem de betume adotado (5,1%) e ao tipo de mistura (Macadame Betuminoso AC 20), são vários os fatores que fazem desta, uma mistura única.

Assim não serão feitas análises comparativas com o presente estudo, mas apenas considerações entre os resultados de alguns estudos em que compararam as misturas convencionais com as misturas alternativas, nas condições e características aí propostas.

3.2.5.1. AVALIAÇÃO DA SENSIBILIDADE À ÁGUA

O presente ensaio foi realizado conforme preconizado na norma EN 12697-12:2008 pelo método A - Resistência à Tração Indireta.

Esta norma prevê três métodos para a realização deste ensaio, os métodos A e B onde se aplicam forças de tração e compressão, respectivamente, a um conjunto de provetes cilíndricos depois de sujeitos à ação da água em condições controladas, para posterior avaliação da sua resistência quando comparados com outro conjunto não submetido à ação da água. O método C, avalia por filtragem o material ligante destacado do agregado após imersão deste em água.

O método usado no presente estudo foi o método A, sem adição de qualquer aditivo que favoreça a adesividade do ligante.

Para a realização do presente ensaio, é necessário moldar 6 provetes de acordo com a norma EN 12697-30:2012 e que se dividem em 2 grupos, o grupo “seco” e o grupo “imerso”. Os provetes do grupo “seco” foram acondicionados ao ar a uma temperatura de 20°C. Os provetes do grupo “imerso” foram saturados por vácuo em água à temperatura de 20°C e posteriormente colocados num banho a 40°C por um período de 68 h a 72 h.

Para todos os provetes foram determinadas as baridades geométricas por imersão em água.

Ambos os conjuntos foram ensaiados à temperatura de 15°C conforme preconizado na norma EN 12697-23:2003, sendo sujeitos a uma carga perpendicular ao plano diametral do provete originando uma tensão de tração até à sua rotura.

A análise dos resultados é feita através do quociente da resistência média verificada no grupo húmido pela resistência média verificada no grupo seco. Este quociente é um indicador conhecido por “resistência conservada” e avalia a sensibilidade da mistura após ação da água.

Na Figura 31 pode observar-se o equipamento para ensaio da avaliação da Sensibilidade à Água e um dos conjuntos de provetes.



Figura 31 – Equipamento, provetes e suporte utilizados para avaliação da Sensibilidade à Água

O resultado e os dados gerais do ensaio, são apresentados no Quadro 24 e na Figura 32, sendo apresentado um exemplo de um dos gráficos/*output* do ensaio dado pelo programa de recolha de dados.

Quadro 24 - Resultados do ensaio de avaliação da Sensibilidade à Água

| Valores Médios | Unidade | Provetes Secos | Provetes Molhados |
|---------------------------|-------------------|-----------------------|--------------------------|
| Volume Geométrico | cm ³ | 499,5 | 506,6 |
| Baridade | kg/m ³ | 3169 | 3253 |
| Resistência máxima | kN | 15,467 | 14,575 |
| Tração Indireta | kPa | 1570 | 1450 |
| <i>ITSR</i> | % | | 92 |

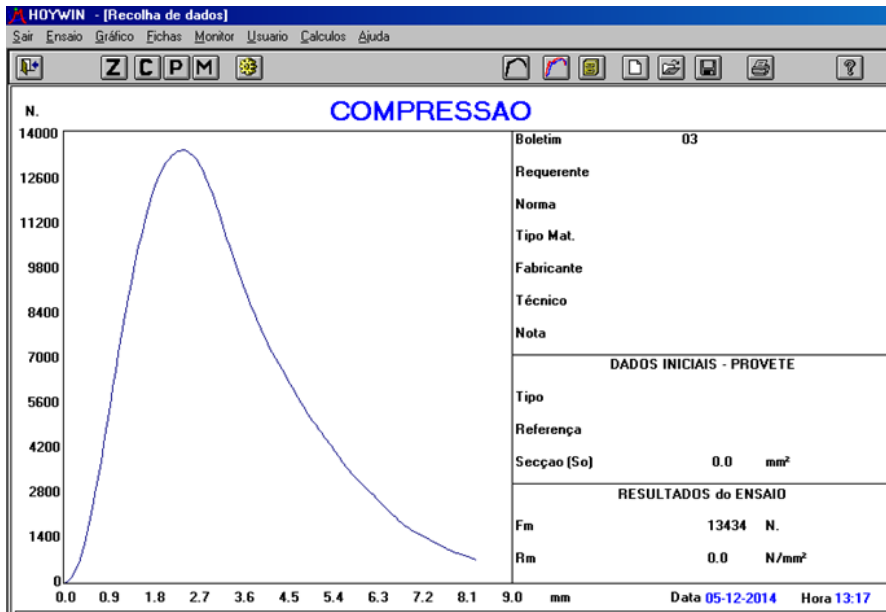


Figura 32 - Exemplo do *output* de um dos provetes ensaiados

O valor de 92% obtido, permite concluir que a mistura ensaiada apresenta um excelente resultado e uma elevada resistência à ação da água, denotando também uma boa adesividade/afinidade entre o ligante e o agregado siderúrgico.

Analisando os provetes ensaiados, a linha de rotura da totalidade das amostras pode classificar-se, conforme descrito na norma, como uma “rotura combinada”.

A Figura 33 apresenta a fase de saturação do provete em vácuo (1), depois a sua colocação na prensa de ensaio (2) e o aspeto final de um dos conjuntos após a rotura (3).

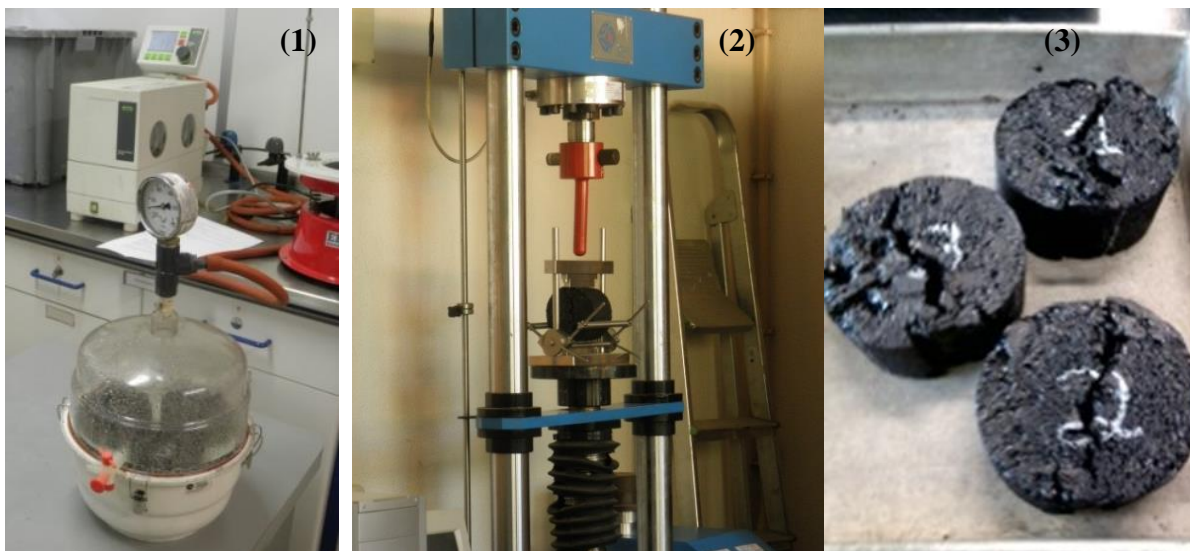


Figura 33 - Provete sujeito à saturação por vácuo, na prensa de ensaio e o resultado final

Diferentes estudos concluíram igualmente que a utilização de ASIC em diferentes tipos de misturas (*SMA*, *WCA*, *BBM* e *OFC*) e com diferentes taxas de incorporação deste agregado, apresentaram sempre melhores resultados do que as mesmas misturas com agregados naturais (PASETTO & BALDO, 2011). Estes autores incorporaram percentagens de ASIC entre 15% e 44,7% da massa total de agregados e verificaram respetivamente, resultados entre 3% e 21% mais favoráveis no ensaio de Resistência à Tração Indireta (EN 12697-23), obtendo valores entre os 82% e 89% (PASETTO & BALDO, 2011), valores consistentes com o que se obteve no presente estudo.

AHMEDZADE et al. (2009) obteve resultados igualmente favoráveis nos ensaios de Sensibilidade à água (AASHTO T 283), ao estudar por sua vez misturas betuminosas do tipo AC10 e AC5 com ASIC apenas na sua fração mais grossa, quando comparadas com as mesmas misturas compostas com agregados naturais.

BEHNOOD (et al., 2012) também conforme preconizado na norma AASTO T 283, mas neste caso avaliando misturas do tipo *SMA*, verificaram que a aplicação de ASIC é sempre notoriamente mais favorável, mas utilizado nas frações mais grossas a suscetibilidade de degradação por ação da água é ainda inferior. A título comparativo uma mistura tradicional apresentou valores de *ITSR* de 74%, pouco acima do valor limite de 70% estabelecido pela referida norma, mas a utilização de ASIC nas frações finas e grossas, apresentam valores de 78% e 84%, respetivamente (BEHNOOD & AMERI, 2012).

Atendendo os resultados obtidos no ensaio realizado, bem como os recolhidos da consulta bibliográfica, fica demonstrada uma notória mais-valia na utilização de ASIC quanto à degradação das misturas betuminosas sujeitas à ação da água, pelo que a sua fiabilidade neste aspeto deve-se em grande parte à maior rugosidade e porosidade do ASIC, que promove consequentemente uma maior adesão entre o ligante e os agregados e uma maior estabilidade.

3.2.5.2. RESISTÊNCIA À FADIGA

O presente ensaio foi realizado conforme preconizado na norma EN 12697-24:2012, Anexo D - Ensaio de Flexão em 4 pontos.

O objetivo deste ensaio é avaliar a Resistência à Fadiga das misturas betuminosas quando sujeitas a sucessivas cargas sob extensão controlada. Estas provocam deformações levando à degradação consecutiva do provete e reduzindo o seu módulo de rigidez.

De acordo com a norma, as condições de ensaio terão de respeitar os seguintes requisitos:

- ✓ Frequência da carga, entre 0 e 60 Hz (EN 12697-24:2004+A1:2007), sendo normalmente sugerido 10 Hz (NP EN 13108-20:2008) que simula uma carga de 0,018 segundos, ou seja a passagem de um veículo a 60Km/h (BARBOSA, 2012);
- ✓ Temperatura de ensaio, entre 0°C e 20°C sendo normalmente recomendado 20°C (NP EN 13108-20:2008);
- ✓ Critério de rotura, normalmente adotando-se a perda de 50% do módulo de rigidez inicial;
- ✓ Ciclos de carga, entre um mínimo de 10 mil e os 2 milhões de ciclos, podendo este último valor ser superado.

O processo inicia-se ao moldar as lajes com a mistura betuminosa pretendida e que posteriormente serão cortadas em vigas prismáticas de acordo com as dimensões previstas na norma.

A Figura 34 apresenta uma das lajes moldadas (305 x 400 x 50 mm) no processo de corte e um dos conjuntos de vigas obtidos. Antes do ensaio todas as vigas são pesadas e determinadas as respetivas baridades geométricas e também após imersão em água.



Figura 34 – Corte da laje e o primeiro conjunto de vigas para ensaio de Resistência à Fadiga

Posteriormente cada viga é ensaiada num equipamento constituído basicamente por uma câmara climatizada e um suporte para as amostras com 4 pontos de apoio, dois exteriores e dois interiores, ambos simétricos entre si. Uma carga sinusoidal vertical e perpendicular ao provete será transmitida pelos 2 apoios interiores, sendo o movimento vertical impedido pelos apoios exteriores. O movimento de rotação e translação é livre nos 4 apoios.

A Figura 35 apresenta o equipamento para a realização do ensaio de resistência à fadiga.



Figura 35 – Equipamento para ensaio de Resistência à Fadiga

O ensaio inicia-se com um primeiro conjunto de 100 ciclos de forma a estimar o módulo de rigidez inicial, módulo este que serve para estabelecer o critério de rotura e fim do ensaio.

Este ensaio simula as condições de serviço dos pavimentos sujeitos a passagens repetidas dos veículos, criando extensões de tração reversíveis (elásticas) e irreversíveis. A acumulação sucessiva destas últimas leva à abertura de fendas (BRANCO et al., 2011) acabando assim por reduzir a capacidade resistente da camada betuminosa.

É então avaliado o número admissível de passagens/ciclos até se atingir a rotura, cujo comportamento é representado por uma lei de fadiga que relaciona tensões e extensões, função do número de ciclos até à sua rotura.

Assim, na realização do presente ensaio foram aplicadas as seguintes condições de ensaio:

- ✓ Frequência de 10 Hz;
- ✓ Extensões de 250, 350 e 500 micrón;
- ✓ Critério de rotura de 50% do módulo de rigidez inicial;
- ✓ Temperatura de ensaio de 20°C.

A Figura 36 apresenta o pormenor de uma viga durante o ensaio, apoiada no suporte de 4 pontos dentro da câmara climatizada (1) e a visualização da evolução do ensaio (2).

A Figura 37 representa a Lei de Fadiga obtida no presente trabalho (ANDRADE, 2015) e as Leis de Fadiga da *Shell* (2003), da JAE (1995) e de CRUCHO (2011).



Figura 36 - Pormenor da viga no suporte de ensaio e do output da sua evolução

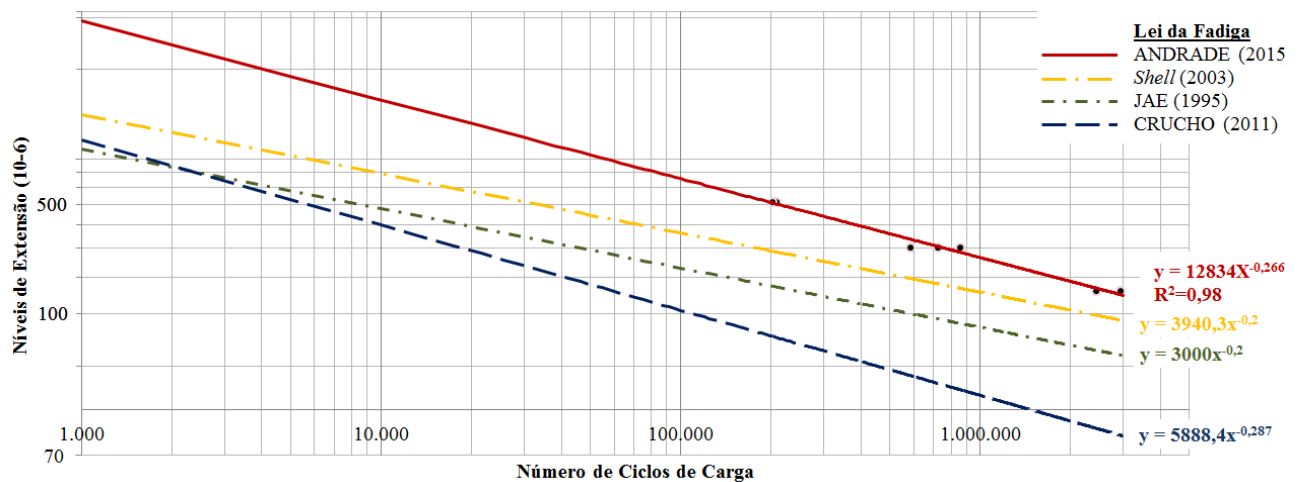


Figura 37 - Lei de Fadiga

Note-se que, relativamente à Lei da Fadiga obtida por CRUCHO (2011), este ensaiou uma mistura com a incorporação de 20% de ASIC e com uma percentagem em betume de 5,4, pelo que uma comparação direta com os resultados obtidos no presente trabalho é incorreta, devendo ser considerada apenas a título indicativo.

No Quadro 25 apresenta-se as fórmulas das Leis de Fadiga da *Shell* (2003) e da JAE (1995) e respetivos parâmetros:

Quadro 25 – Fórmulas das Lei de Fadiga da Shell (2003) e da JAE (1995)

| <i>Shell</i> (2003) | JAE (1995) |
|----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| $\epsilon t = (0,856 \times Vb + 1,08) \times Em^{-0,368} \times N^{-0,2}$ | $\epsilon t = a \times N^b$ |
| Vb = 15,81%; Em = 5.000 x 10 ⁶ Pa | a = 0,003; b = -0,2 |
| $\epsilon t = 0,0039 \times N^{-0,2}$ | $\epsilon t = 0,0030 \times N^{-0,2}$ |

Analisando então as Leis de Fadiga acima apresentadas é possível concluir sobre uma boa durabilidade da mistura betuminosa formulada no presente estudo, resultando num maior número de ciclos admissíveis para os mesmos níveis de extensão aplicados.

O Quadro 26 apresenta ainda estudos comparativos onde a coluna “com ASIC” apresenta novamente a comparação entre os resultados obtidos por CRUCHO (2011) e os resultados do presente trabalho, “ANDRADE”. Na coluna “Agregados Naturais” apresentam-se 2 estudos sem adição de ASIC de PIMENTEL (2013) e BARBOSA (2012).

Quadro 26 – Estudos comparativos de ensaios à Fadiga a misturas com e sem ASIC

| Nível de extensão (µm) | com ASIC | | Agregados Naturais | |
|------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| | MB AC 20 Base 20% ASIC (CRUCHO, 2011) | MB AC 20 Base 92% ASIC (ANDRADE, 2015) | MB AC 14 Surf (PIMENTEL, 2013) | MB AC 20 Base (BARBOSA, 2012) |
| | n.º de ciclos | | | |
| 125 | 431.331 | - | - | - |
| 150 | - | - | - | 483.608* |
| 200 | 78.883 | - | 1.020.201 | - |
| 250 | 63.674 | 2.707.000* | - | 54.447* |
| 300 | - | - | 252.358 | - |
| 350 | - | 725.167* | - | 16.514 |
| 400 | - | - | 79.393 | - |
| 500 | - | 206.860* | - | - |
| 700 | 2.372 | - | - | - |

*Valores médios

Mais uma vez deve ter-se em conta que as misturas betuminosas de cada um dos referidos estudos têm características específicas que as distinguem, sendo a comparação dos resultados apresentados indicativa, podendo no entanto concluir-se que a mistura do presente estudo apresenta uma excelente resistência à fadiga, obtendo uma Lei de Fadiga bastante consistente e com elevado número de ciclos até à rotura.

PASETTO e BALDO (2012) avaliaram a resistência à fadiga (EN 12697-24) de misturas com incorporação de 30% de ASIC, entre outras combinações com pavimento recuperado (*RAP-Reclaimed Asphalt Pavement*), concluindo que todas elas apresentaram uma considerável melhoria na resistência à fadiga em relação às misturas betuminosas tradicionais.

Já em 2011 estes mesmos autores tinham concluído existir um aumento significativo do módulo de rigidez (EN 12697-26, anexo C) entre 8% e 18%, nas misturas com utilização de ASIC e uma razoável resistência à fadiga (CNR 149/92).

3.2.5.3. RESISTÊNCIA À DEFORMAÇÃO PERMANENTE - *WHEEL TRACKING*

O ensaio de *Wheel Tracking*, também conhecido como Ensaio de Pista, foi realizado conforme preconizado na norma EN 12697-22:2003+A1:2007, cujo objetivo é avaliar a suscetibilidade das misturas betuminosas se deformarem quando carregadas e consequentemente determinar a sua resistência às deformações permanentes.

Duas lajes da mistura betuminosa formulada foram previamente moldadas e curadas e posteriormente sujeitas a sucessivas cargas com a passagem de uma roda de ensaio. As condições de ensaio, nomeadamente a carga, as rodas e a extensão do seu percurso, a temperatura do ar ou da água e o número de ciclos, são devidamente controlados conforme referido na norma.

O número mínimo de provetes a ensaiar é definido em função do tipo de dispositivo/molde escolhido. A norma prevê três tipos possíveis, podendo estes ser de dimensões pequenas, grandes ou extra grandes.

No presente trabalho usaram-se os moldes de pequenas dimensões (condicionamento ao ar) com dimensões de 305 x 305 x 50 (mm) e ensaiaram-se 2 provetes com a mistura betuminosa formulada a uma temperatura de 60°C. Na Figura 38 apresenta-se a moldagem das lajes no compactador de rolo para o ensaio de *Wheel Tracking* e o resultado das mesmas.



Figura 38 - Moldagem das lajes para ensaio de *Wheel Tracking*

Após a realização do ensaio é analisado o cavado da rodeira. Assim os valores obtidos deste ensaio são:

- ✓ Média da variação da deformação permanente ao ar – *Wheel Tracking Slope in air* (WTS_{AIR});
- ✓ Média proporcional da profundidade da rodeira nos dois provetes ensaiados – *Mean Proportional Rut Depth in air* (PRD_{AIR});
- ✓ Profundidade média da rodeira - *Mean Rut Depth in air* (RD_{AIR}).

Na Figura 39 podem observar-se os dois provetes sob ação da roda durante o ensaio e o aspeto final dos mesmos após o ensaio.



Figura 39 - Ensaio de *Wheel Tracking* e o aspeto final dos provetes

O Quadro 27 apresenta os resultados obtidos no ensaio de *Wheel Tracking* e na Figura 40 a variação da deformação em função dos ciclos de carregamento.

Quadro 27 - Resultados do ensaio de *Wheel Tracking*

| Provetes | Parâmetros | Unid. | Resultados |
|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------|-------------|
| 1 | Deformação máxima. | | 6,97 |
| 2 | Profundidade de rodeira a 10.000 ciclos | mm | 9,52 |
| Profundidade média de rodeira a 10.000 ciclos | | | 8,2 |
| 1 | Taxa de deformação entre o ciclo | mm/10 ³ ciclos | 0,18 |
| 2 | 5.000 e 10.000 | | 0,26 |
| Taxa de deformação média, WTS_{AIR} | | | 0,22 |
| 1 | Profundidade de rodeira a 10.000 ciclos | % | 13,94 |
| 2 | | | 19,00 |
| Profundidade média de rodeira, PRD_{AIR} | | | 16,5 |

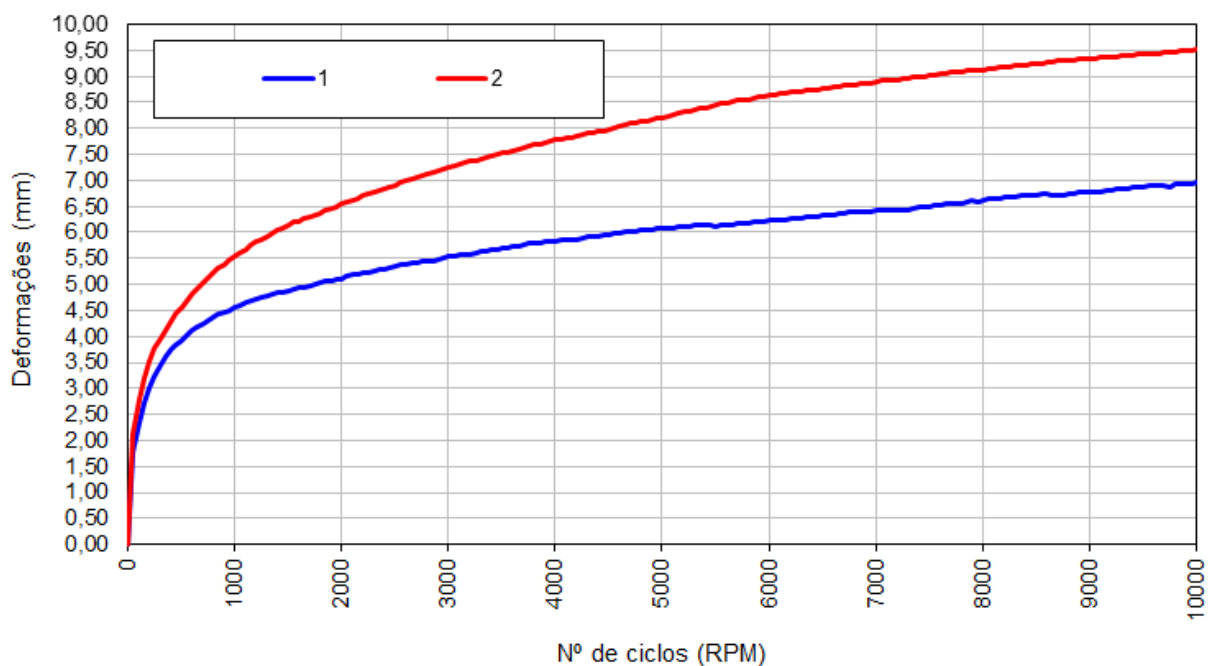


Figura 40 - Variação da deformação no ensaio de *Wheel Tracking*

Analisando os resultados obtidos observa-se alguma disparidade entre os dois provetes ensaiados pelo que a média obtida é um pouco elevada.

Apesar de não ter sido fabricada uma mistura de referência com as mesmas características da apresentada neste trabalho para uma avaliação comparativa é perceptível que a deformação registada é um pouco elevada, mas de acordo com os exemplos que abaixo se apresentam, estes parecem evidenciar que a utilização de agregados siderúrgicos em conjunto com agregados naturais aumentam a resistência às deformações permanentes.

Deve ainda lembrar-se que, uma vez que estamos perante uma mistura betuminosa a aplicar sob a camada de desgaste, este comportamento não é condicionante à sua utilização.

TAVARES (2012) incorporou agregado siderúrgico em misturas betuminosas do tipo SMA e avaliou o seu desempenho às deformações permanentes através dos simuladores de tráfego do LCPC e do APA. No simulador do LCPC verificaram-se deformações também elevadas, mas já no simulador APA os resultados obtidos estavam dentro dos limites requeridos nas normas brasileiras.

Por sua vez PASETTO (2011) conclui que, as deformações permanentes (EN 12697-25) obtidas em misturas betuminosas com ASIC denotavam melhorias significativas, entre os 10% e os 28%, quando comparadas com as mesmas misturas mas compostas por agregados naturais.

HARITONOV et al. (2012) analisaram misturas do tipo Macadame Betuminoso AC 11 com escória do tipo BOF quanto às deformações permanentes, exatamente com o mesmo método preconizado no presente trabalho (EN 12697-22), e obtiveram valores surpreendentemente favoráveis, com diferenças na ordem dos 70% em relação à mesma mistura com agregados naturais.

BEHNOOD et al. (2012) fizeram a avaliação da resistência às deformações permanentes pelo ensaio de Fluência Dinâmica, avaliando misturas do tipo SMA com utilização de ASIC e concluíram também resultados muito favoráveis em relação aos obtidos para os agregados naturais. Estes valores chegam a uma deformação 100% mais reduzida que é atribuída à utilização do ASIC, principalmente nas frações mais grossas. Este fato é atribuído à maior rugosidade e forma do ASIC, o que cria um maior imbricamento e uma melhor adesividade do ligante aos agregados, promovendo uma redução muito expressiva em relação às deformações permanentes (HAININ et al., 2012; BEHNOOD & AMERI, 2012).

3.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo avaliou a aplicabilidade de ASIC em misturas betuminosas do tipo Macadame Betuminoso AC 20 (MB), para utilização em camadas de base, regularização e ligação de infraestruturas rodoviárias. Um conjunto de ensaios foi programado para caracterização do ASIC e da mistura betuminosa com a sua incorporação. Posteriormente foi avaliado o seu desempenho.

Numa fase preliminar, este estudo consistiu na determinação das características geométricas, físicas e mecânicas do agregado siderúrgico, cujos resultados obtidos são sumarizados no Quadro 28.

Quadro 28 - Resumo das características geométricas, físicas e mecânicas

| Caracterização | Ensaio Norma de referência | Unid. | Requisito CETO | Resultados obtidos |
|-------------------|-------------------------------------------------|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| | | | Classificação segundo a NP EN 13043:2004/AC:2010 | |
| Geométrica | Análise Granulométrica NP EN 933-1:2014 | - | De acordo com o fuso do CETO para as camadas de base, regularização e ligação (ver 3.2.1.1) | |
| | Índice de Achatamento NP EN 933-3:2014 | - | $FI30^1$ e $FI25^2$ | $FI10$ |
| | Índice de Forma EN 933-4:2008 | - | na | $SI15$ |
| Física e Mecânica | Azul de Metileno EN 933-9:2009+A1:2013 | g/kg | MB_F10 | MB_F10 |
| | Equivalente de Areia NP EN 933-8:2014 | % | na | 87 |
| | Massa volúmica das partículas EN 1097-6:2013 | Mg/m^3 | a declarar | 3,672 (0/4mm) 3,600 (4/12mm) 3,569 (>14 mm) |
| | Absorção de água EN 1097-6:2013 | % | $WA_{24}2 \leq 2$ | $WA_{24}1$ 0,5 (0/4mm) 0,9 (4/12mm) 0,8 (>14 mm) |
| | Fragmentação - Los Angeles NP EN 1097-2:2011 | - | LA_{40}^1 e $35\%^2$ | LA_{15} |
| | Desgaste – Micro-Deval NP EN 1097-1:2012 | - | $M_{DE}25^1$ e $M_{DE}20^2$ | $M_{DE}10$ |
| | Afinidade Ligante-Agregados EN 12697-11:2012 | % | a declarar | 6h - 80 Após 24h - 70 48h - 60 |

¹ Requisito para a camada de base; ² Requisito para a camada de regularização e de ligação.
na – não aplicável.

Como já anteriormente justificado a percentagem ótima de betume obtido foi de 5,1%. Utilizou-se neste estudo um betume regular de pavimentação com pen. 50/70 e um fíler comercial de calcário.

Finalmente realizaram-se os seguintes ensaios para avaliação do desempenho mecânico desta mistura, sendo os respetivos resultados apresentados no Quadro 29.

Quadro 29 – Resultados obtidos dos ensaios à mistura betuminosas formulada

| Caracterização | Ensaio Norma de referência | Unid. | Requisito CETO | Resultados obtidos |
|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------|------------------------------------------|
| | | | NP EN 13043:2004/AC:2010 | |
| Ensaio à mistura | Sensibilidade à água EN 12697-12:2008 | - | A declarar | Macadame Betuminoso AC20 Método A |
| | Resistência à Tração Indireta (<i>ITSR</i>) EN 12697-23:2003 | % | A declarar | 92 |
| | Resistência à Fadiga EN 12697-24:2012 | - | na | $\epsilon t = 0,0039403 \times N^{-0,2}$ |
| | Resistência à Deformação Permanente - <i>Wheel Tracking</i> EN 12697- 22:2003+A1:2007 | WTS _{air} mm/10 ³ ciclos carga | a declarar | 0,22 |
| PRD _{air} % | | 16,5 | | |

na – não aplicável

Do estudo realizado considera-se ser viável a utilização de ASIC em misturas betuminosas do tipo macadame betuminoso AC 20 (MB) para camadas de base, de regularização e de ligação.

CAPÍTULO 4 - CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

4.1. CONCLUSÕES GERAIS

Face aos resultados obtidos conclui-se que o ASIC respeita todos os requisitos geométricos, físicos e mecânicos estabelecidos pelo CETO para incorporação em camadas betuminosas, sendo mesmo possível afirmar que nestes aspetos, apresenta resultados mais favoráveis quando comparados com os apresentados usualmente para agregados naturais.

Com as 3 frações de ASIC disponíveis e o objetivo de incorporar a maior percentagem possível deste material, respeitando ainda assim uma curva granulométrica dentro do fuso estabelecido pelo CETO. Tendo em conta a reduzida percentagem de finos apresentada por este tipo de material, foi necessário a utilização de uma percentagem significativa de fíler (8%).

Os Índices de Achatamento e de Forma demonstram que o material apresenta uma forma nitidamente cúbica, demonstrando um excelente imbricamento entre as partículas, sendo significativamente superior quando comparado com os agregados naturais.

Os resultados obtidos no ensaio do Azul Metileno e do Equivalente de Areia, apresentam também valores muito bons, denotando que estes agregados alternativos são praticamente isentos de material orgânico e/ou argilas e por isso com pouca sensibilidade à ação da água. A Massa Volúmica, como expectável, apresentou valores significativamente mais elevados que os agregados naturais, em cerca de 30%, com valores médios na ordem do $3,6 \text{ Mg/m}^3$ e uma Absorção de Água bastante reduzida, entre os 0,5% e 0,9%, um pouco abaixo do normalmente registado nos agregados naturais.

Os ensaios de Resistência à Fragmentação (*Los Angeles*) e ao Desgaste (*Micro-Deval*), apresentaram valores de 14 e 7 respetivamente, valores bastante mais baixos do que os normalmente verificados nos agregados naturais, antevendo uma excelente capacidade mecânica quando integrados em misturas betuminosas, principalmente nas deformações permanentes.

Foi também obtida uma boa Afinidade Ligante-Agregados siderúrgicos que, principalmente devido à sua forma cúbica, à porosidade e à rugosidade, garante uma elevada estabilidade nas misturas betuminosas.

Na formulação pelo método *Marshall*, cuja percentagem ótima em betume obtido foi de 5,1%, verificaram-se valores de estabilidade, baridade, deformação, porosidade, VMA e quociente *Marshall*, um pouco cima do tradicionalmente obtido em misturas tradicionais.

No caso da Estabilidade verificaram-se valores entre os 14,5 kN e os 20 kN, atribuindo-se esse fato à maior rigidez do ASIC, à sua forma cubica (garantindo um maior imbricamento) e à boa afinidade do ligante com o material. A elevada Baridade deve-se à elevada massa volúmica do ASIC e no caso da porosidade, do VMA e da deformação, considera-se que a compactação pelo método *Marshall* possa não ser a mais adequada para um material com as condições anteriormente mencionadas. Entendeu-se que a dimensão máxima dos agregados utilizados, em comparação com o tamanho dos provetes, o maior imbricamento, a maior adesividade e a elevada rigidez do ASIC, contribuíram para não se ter obtido uma boa compactação da mistura e que devido a esse fato, se tenham verificado índices de vazios que levaram a uma maior deformação quando ensaiados os provetes *Marshall*. A dificuldade de compactação tinha já sido evidenciada aquando da utilização de ASIC em camadas granulares (CORREIA, et al., 2008a)).

Na avaliação à mistura observou-se um adequado desempenho na resistência à Fadiga e na Sensibilidade à Água. No que se refere à Deformação Permanente (ensaio de *Wheel Tracking*), os resultados obtidos não comprometem a sua utilização em camadas subjacentes à camada de desgaste, ainda assim e face às deformações verificadas, entende-se que esta propriedade poderá ser alvo de uma grande melhoria, tendo em conta uma formulação mais adequada e com metodologias apropriadas a este tipo de material alternativo.

Em jeito de conclusão, podemos afirmar que existe na utilização do ASIC em camadas betuminosas um enorme potencial e que de acordo com as conclusões aqui descritas e com a contínua investigação, se encontrará um caminho vantajoso na utilização do ASIC em camada betuminosas.

Procurou-se com este trabalho dar mais um contributo para a criação de especificações próprias na aplicação deste material, com requisitos e valores limite próprios, transformando assim este “resíduo” não apenas num material de construção mas também um material especificado para ao ramo da pavimentação.

Outro contributo importante que se deve aqui referir está relacionado com as questões ambientais e de sustentabilidade, na medida em que a criação de um novo mercado para escoamento deste material, irá poupar os recursos naturais e reduzir a deposição das escórias de siderurgia em aterros e todos os problemas a isso associados.

4.2. PERSPETIVAS DE DESENVOLVIMENTO FUTURO

Na área das infraestruturas rodoviárias destacam-se a nível nacional os trabalhos desenvolvidos por MARQUES (2009) e FERREIRA (2010) na utilização de ASIC como material granular e de CRUCHO (2011) e um estudo realizado pelo LNEC (1985) para a SN, com a sua incorporação em misturas betuminosas.

Com este trabalho procurou-se dar um contributo à investigação sobre o tema e alargar a curta experiência na avaliação da aplicabilidade do ASIC em misturas betuminosas.

O presente trabalho atenta um objetivo inovador, devido à elevada percentagem na utilização de ASIC e cujos resultados no aspeto técnico, se demonstraram promissores.

Assim, um imenso trabalho de investigação fica ainda por desenvolver, recomendando-se os seguintes temas para trabalhos futuros:

- ✓ Análise mais aprofundada da composição química e das suas consequências na lixiviação e na contaminação do solo e meio ambiente, por parte das misturas betuminosas com elevada percentagem de ASIC;
- ✓ Estudo da microestrutura e macroestrutura dos agregados siderúrgicos relativamente à porosidade e a sua influência na absorção de betume, na adesividade ligante-agregados e consequentemente na formulação das misturas com ASIC;
- ✓ Estudo dos métodos de formulação e de compactação e a respetiva influência nas camadas betuminosas com incorporação de ASIC;
- ✓ Estudo da expansibilidade das misturas betuminosas com incorporação de ASIC e da influência na utilização de aditivos para essa melhoria;
- ✓ Desenvolvimento de novas percentagens de incorporação de ASIC com a mistura de materiais naturais, materiais reciclados (por exemplo RCD, RAP) ou outros materiais alternativos (por exemplo cinzas, outros tipos de escórias);
- ✓ Estudo da aplicabilidade para novos tipos de misturas betuminosas (SMA, SUPERPAV, misturas abertas ou densas) e para diferentes níveis de camada;
- ✓ Execução de um trecho experimental com a instrumentação e/ou monitorização continuada de forma a avaliar o seu desempenho quando submetido às condições reais de serviço.

BIBLIOGRAFIA

- AHMEDZADE, P. & SENGOZ, B., 2009. *Evaluation of steel slag coarse aggregate in hot mix asphalt concrete*. Turkey: Journal of hazardous materials, 2009, Vol.165(1-3), pp.300-305.
- ALT-MAT, 2001. *"Alternative materials in road construction"*. Project Founded by the European Commission under the Transport RTD Programme of the 4th Framework Programme: s.n.
- AMERI, M. & BEHNOOD, A., 2011. *Laboratory studies to investigate the porperties of CIR mixes containing steel slag as a substitute for virgin aggregates*. Tehran, Iran: onstruction and Building Materials 26(2012), pp.475-480.
- AMERI, M., HESAMI, S. & GOLI, H., 2013. *Laboratory evaluation of warm mix asphalt mixtures containig electric arc furnace (EAF) steel slag*. Tehran, Iran: Construction and Building Materials, 2013, Vol.49, pp.611-617.
- ARABANI, M. & AZARHOOSH, A., 2012. *The effect of recycled concrete aggregate and steel slag on the dynamic properties of asphalt mixtures*. Iran: Construction and Building Materials, 2012, Vol.35, pp.1-7.
- ASI, I. M., QASRAWI, H. Y. & SHALABI, F. I., 2007. *Use of steel slag aggregate in asphalt concrete mixes*. Jordânia: Canadian Journal Of Civil Engineering, 2007 Aug, Vol.34(8), pp.902-911.
- BAGAMPADDE, U., WAHHAB, H. A.-A. & AIBAN, S., 1999. *Optimization of steel slag aggregates for bituminous mixes in Saudi Arabia*. Saudi Arabia: Journal of Materials in Civil Engineering, Feb, 1999, Vol.11(1), p.30-35.
- BARBOSA, F. C. A. T., 2012. *Contribuição para o estudo do desempenhode misturas betuminosas temperadas*. Lisboa: Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em engenharia civil no IST. 136 p.
- BEHIRY, A. E. A. E.-M., 2012. *Evaluation of steel slag and crushed limestone mixtures as subbase material in flexible pavement*. Egypt: Ain Shams Engineering Journal (2013) 4, pp.43-53.
- BEHNOOD, A. & AMERI, M., 2012. *Experimental investigation of stone matrix asphalt mixtures containing steel slag*. Iran: Scientia Iranica A(2012) 19(5), pp.1214-1219.

- BICALHO, K. V., OLIVEIRA, F. U., RAPOSO, C. O. & SILVA, M. G., 2009. *Avaliação de três métodos de determinação da expansão de escórias de aciaria Brasileiras para pavimentação*. Vitória, Brasil: 10 p. Disponível em http://geomuseu.ist.utl.pt/OG2009/Documentos%20Complementares/Congresso%20Geotecnia%20%28resumos%29/Congresso_Actas%20%28D%29/Volume%203/V3-13.pdf. Acedido a 20 setembro de 2014.
- BIR, 2015. *Bureau of International Recycling 2015*. Bruxelas, Bélgica. Disponível em <http://www.bir.org/industry/stainless-steel/> Acedido a 6 de janeiro de 2015.
- BRANCO, F., PEREIRA, P. & PICADO, L., 2011. *Pavimentos Rodoviários*. Coimbra: Almedina.
- BRANCO, V. T. F. C., 2004. *Caracterização de misturas alfálticas com uso de escórias de aciaria como agregado*. Rio de Janeiro: Dissertação de pós-graduação em engenharia civil na Universidade Federal do Rio de Janeiro, 153 p.
- CORREIA, A., FERREIRA, S., ARAÚJO, N., CASTRO, F., TRIGO, L., ROQUE, A., FORTUNATO, E. & SANTAYANA, F., 2005. *Estudo de viabilidade de aplicação de agregado siderúrgico inerte para construção (ASIC) em camadas de base, sub-base, leito de pavimento e aterro*. Guimarães: Relatório Interno CVR 257/2005, 93 p.
- CORREIA, A., FERREIRA, S., ARAÚJO, N., CASTRO, F., TRIGO, L., ROQUE, A., FORTUNATO, E. & SANTAYANA, F., 2006. *Estudo de viabilidade de aplicação de agregado siderúrgico inerte para construção (ASIC) da Siderúrgia Nacional do Seixal em camadas de base, sub-base, leito de pavimento e aterro*. Guimarães: Relatório Interno CVR 24/2006, 49 p.
- CORREIA, A., FERREIRA, S., ROQUE, A. & CAVALHEIRO, A., 2008c). *Agregados siderúrgicos inertes para a construção: um novo material de construção*. Curia: Congresso de Inovação na Construção Sustentável, CINCOS'08, pp.61-71.
- CORREIA, A., ROQUE, A., MARTINS, J., CALDEIRA, L., FERREIRA, S., & FORTUNATO, E., 2008a). *Trecho experimental no itinerário EN 311 Fafe/Várzea Cova - Metodologia da construção e instrumentação*. Guimarães: Relatório interno CVR 1/2008, 16 p.

- CORREIA, A., ROQUE, A., MARTINS, J., CALDEIRA, L., FERREIRA, S., & FORTUNATO, E., 2008b). *Trecho experimental no itinerário EN 311 Fafe/Várzea Cova - Controlo da qualidade de construção*. Guimarães: Relatório interno CVR 2/2008, 208 p.
- CORREIA, A., ROQUE, A., MARTINS, J., CALDEIRA, L., FERREIRA, S., & FORTUNATO, E., 2009. *Trecho experimental no itinerário EN 311 Fafe/Várzea Cova - Observação e monitorização do comportamento mecânico e ambiental*. Guimarães: Relatório interno CVR 1/2009, 47 p.
- CORREIA, A., ROQUE, A., MARTINS, J., CALDEIRA, L., FERREIRA, S., & FORTUNATO, E., 2010a). *Trecho experimental no itinerário EN 311 Fafe/Várzea Cova - Observação e monitorização do comportamento mecânico e ambiental*. Guimarães: Relatório interno CVR 1/2010, 102 p.
- CORREIA, A., ROQUE, A., FORTUNATO, E., FERREIRA, S. & CAVALHEIRO, A., 2010b). *I&D para a valorização das escórias de aciaria de forno de arco elétrico em obras geotécnicas*. Guimarães: 12º Congresso Nacional de Geotécnia - Contribuições recentes para o projeto, a construção, a exploração e a reabilitação, pp.1973-1982.
- COUTINHO, M., 1998. *Melhoria da durabilidade dos betões por tratamento da cofragem, Tese de doutoramento*. Porto: Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em engenharia civil na FEUP, 396 p.
- CRUCHO, J. M., 2011. *Contribuição para o estudo da resistência à fadiga de misturas betuminosas com incorporação de ASIC*. Lisboa: Dissertação para a obtenção do grau de mestre em engenharia civil no IST. 135 p.
- DENIZ, D., TUTUMLUER, E. & POPOVICS, J., 2009. *Expansive characteristics of reclaimed asphalt pavement used as base materials*. Illinois: Research report ICT-09-055 from Illinois Center for Transportation, 92 p.
- DIAS, J. P. T., 2009. *Influência do envelhecimento na resistência à fadiga de misturas betuminosas*. Lisboa: Dissertação para a obtenção do grau de mestre em engenharia civil no ISEL, 89 p.
- EMERY, J., 1984. *Steel slag utilization in asphalt mixes*. Ontário, Canada: NSA, 11p. Disponível em http://www.nationalslag.org/sites/nationalslag/files/documents/nsa_186-1_steel_slag_utilization_in_asphalt_mixes.pdf. Acedido em novembro de 2014.
- EP, SA, 2014. *Caderno de Encargos Tipo Obra*. Lisboa: Estradas de Portugal, SA.

- EUROSLAG, 2014. *www.euroslag.com*. Duisburg-Rheinhausen, Alemanha: Disponível em <http://www.euroslag.com/researchlibrarydownloads/downloads/>. Acedido a 1 de dezembro de 2014.
- FERREIRA, S., CORREIA, A., ROQUE, A., CATRO, F. & CAVALHEIRO, A., 2010. *Propriedades do ASIC da siderurgia nacional e possibilidades da sua utilização em obra - Uma perspectiva geomecânica*. Guimarães: 12º Congresso Nacional de Geotecnia - Geotecnia e Desenvolvimento Sustentável, 2010, pp.2079-2088. Disponível em <https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/10907/1/Propriedades%20do%20ASIC%20da%20siderurgia%20nacional.pdf>. Acedido em 20 de dezembro de 2014.
- FERREIRA, S. M. R., 2010. *Comportamento mecânico e ambiental de materiais granulares. Aplicação às escórias de aciaria nacionais*. Braga: Dissertação para a obtenção do grau de doutorado em engenharia civil na Universidade do Minho, 330 p.
- GENET, M., 2012. *EAF and/or BF/BOF - Which route is best for Europe?*. Bélgica: Laplace Conseil, Disponível em <http://www.laplaceconseil.com/LaplaceConseil/htdocs/admin/upload/File/MarcelGenetPlatts1205.pdf>. Acedido a 4 de janeiro de 2015.
- GEYER, 2001. *Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto*. Porto Alegre, Brasil: Dissertação para a obtenção do grau de doutorado em engenharia na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 118 p.
- HAININ, R., YUSOFF, N., SABRI, F., AZIZ, A., HAMEED, A. & RESHI, W., 2012. *Steel slag as an aggregate replacement in Malaysian hot mix asphalt*. Malaysia: ISRN Civil Engineering, Vol.2012, 5 p.
- HARITONOV, V., ZAUMANIS, M., BRENCIS, G. & SMIRNOVS, J., 2012. *Performance based evaluation on the use of different waste materials in asphalt*. Latvia: SciVerse ScienceDirect (Elsevier) 48(2012), pp.154-162.
- HUANG, Y., BIRD, R. N. & HEIDRICH, O., 2007. *A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements*. United Kingdom: Resources, Conservation & Recycling, 2007, Vol.52(1), pp.58-73.
- IHOBE, 1999. *Libro blanco para la minimización de residuos y emisiones - Escorias de acería*. País Vasco: Sociedad Pública Gestión Ambiental, 131 p.

- JAE, 1995. “Manual de concepção de pavimentos para a rede rodoviária nacional”. Junta Autónoma de Estradas, Lisboa.
- LI, J., YU, Q., WEI, J. & Zhang, T., 2011. *Structural characteristics and hydration kinetics of modified steel slag*. China: Cement And Concrete Research, 2011 Mar, Vol.41(3), pp.324-329.
- LIKOYDIS, S. & LIAPIS, I., 2011. *Use of electric arc furnace in thin skin-resistant surfacing*. Thessaloniki, Greece: 5th International Conference, Bituminous Mixtures And Pavements, pp.276-286.
- LIMA, N., NASCIMENTO, J., FILHO, V. & ALBERNAZ, C., 2000. *Pavimentos de alto desempenho estrutural executados com escória de aciaria*. Uberlândia, Brasil: 10ª Reunião de Pavimentação Urbana.
- LNEC, 1985. *Caracterização de escórias de aciaria para utilização em misturas betuminosas*. Estudo realizado para a Siderurgia Nacional. Lisboa: LNEC, 60 p.
- LÚXAN, M., SOTOLONGO, R., DORREGO, F. & HERRERO, E., 2000. *Characteristics of the steel slags produced in the fusion of scrap steel by electric arc furnace*. Madrid, Spain: Cement and Concrete Research, 2000, Vol.30(4), pp.517-519.
- MACHADO, 2000. *Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria*. São Paulo, Brasil: Dissertação para a obtenção do grau de mestre em engenharia na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- MARQUES, P. J. G., 2009. *Contribuição para o estudo da viabilidade de escórias de aciaria em misturas betuminosas*. Lisboa: Dissertação para a obtenção do grau de mestre em engenharia de aeródromos no IST, 134 p.
- MATOS, L., JEREMIAS, F. & FREIRE, A., 2006. *Agregados aplicáveis em infraestruturas rodoviárias segundo a normalização europeia*. Campus da Universidade Nova de Lisboa: Actas 10º Congresso Nacional de Geotécnia.
- MENDES, S. F., 2011. *Caracterização mecânica de misturas betuminosas a aplicar em infra-estruturas de transportes*. Lisboa: Dissertação para a obtenção do grau de mestre em engenharia civil no ISEL, 137 p.
- MIRANDA, H., 2013. *Pavimentação*. Lisboa: Folhas da U.C. de pavimentação ministrado no mestrado de Vias de Comunicação e Transportes no ISEL.

- NSA, 2014. Disponível em www.nationalslag.org/common-uses-slag. Acedido a 1 dezembro 2014.
- ONOFRE, F., BESSA, L., BRANCO, V. & SOARES, J., 2011. *Correlação entre variáveis de densificação do compactador giratório e resitência a deformação permante de misturas asfálticas*. Brasil: Revista Transportes, v.19 n.1, pp. 13–22.
- PACHECO, A. E. L., 2012. *Estudo da viabilidade da utilização de escórias de aciaria (ASIC) em betão denso*. Porto: Dissertação para a obtenção do grau de mestre em engenharia civil na FEUP. 154 p.
- PAIS, J. & PALHA, C., 2010. *Resistência à fadiga em misturas betuminosas para pavimentos rodoviários*. Guimarães: 8º Congresso Nacional de Mecânica Experimental, 12 p.
- PASETTO, M. & BALDO, N., 2011. *Mix design and performance characterization of bituminous mixtures with electric arc furnace steel slags*. Thessalonki, Greece: 5th International Conference, Bituminous Mixtures And Pavements, pp.748-757.
- PASETTO, M. & BALDO, N., 2012. *Fatigue behavior characterization of bituminous mixtures made with reclaimed asphalt pavement and steel slag*. Italy: SciVerse ScienceDirect (Elsevier) 53(2012), pp.297-306.
- PIMENTEL, C. A. d. A., 2013. *Formulação de misturas betuminosas a quente - Contribuição para um novo método de formulação*. Lisboa: Dissertação para a obtenção do grau de mestre em engenharia civil na ULHT, 124 p.
- RAMOS, T., 2011. *Estudo da viabilidade da substituição do agregado natural por agregado siderúrgico inerte para construção (asic) em betão*. Porto: Dissertação para a obtenção do grau de mestre em engenharia civil na FEUP.
- RAPOSO, C. O. L., 2002. *Estudo experimental de compactação e expansão de uma escória de aciaria LD para uso em pavimentação*. Vitória, Brasil: Dissertação de pós-graduação em engenharia civil na Universidade Federal do Espírito Santo, 164 p.
- ROCHA, F. L. L. d., 2011. *Utilização do agregado siderúrgico em revestimento asfáltico tipo tratamento superficial*. Ouro Preto, Brasil: Dissertação para a obtenção do grau de mestre em engenharia civil na Universidade Federal de Ouro Preto, 130 p.

- RODRIGUES, G., 2007. *Expansibilidade das escórias LD tratadas e não tratadas*. Vitória, Brasil: Dissertação de pós-graduação em engenharia civil na Universidade Federal do Espírito Santo, 171 p.
- RODRIGUES, G. M. d. S., 2012. *Reciclagem do ASIC e de RCD na camada de drenagem dos aterros de resíduos*. Caparica: Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em engenharia civil na Universidade Nova de Lisboa, 298 p.
- ROHDE, L., 2002. *Uso de escória de aciaria em camadas granulares de pavimentos - Estudo laboratorial*. Porto Alegre, Rio Grande do Sul: Dissertação de pós-graduação em engenharia civil na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 118 p.
- ROQUE, A., CASTRO, F., CORREIA, A. & CAVALHEIRO, A., 2010. *Estudo da lixiviação do agregado proveniente de escórias de aciaria de forno de arco elétrico em laboratório e no campo*. Guimarães: 12º Congresso Nacional de Geotécnia - Contributos recentes para o projeto, a construção, a exploração e a reabilitação, pp.2099-2108.
- ROQUE, A., CORREIA, A., FORTUNATO, E., SANTAYANA, F., CASTRO, F., FERREIRA, S. & TRIGO, L., 2006. *A geotécnica na valorização de agregados siderúrgicos inertes reciclados: um projecto nacional*. Cascais: 12º Encontro Nacional do Saneamento Básico – Planeamento estratégico em águas e resíduos, 16 p. Disponível em http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/6781/3/Artigo_12apesb_Ref%200007.pdf. Acedido a 20 dezembro de 2014.
- ROQUE, A. J. & FORTUNATO, E., 2011. *Valorização de resíduos em obras geotécnicas*. Lisboa: Plano de investigação programada - LNEC 2005-2008, 5 p. Disponível em <http://www.lnec.pt/actividade/pip-2005-2008/as/05-as-04.pdf>. Acedido a 20 dezembro de 2014.
- SAMARIS, 2006. *Sustainable and advanced materials for road infrastructures*. Project funded by the European Commission under the Transport RTD Programme of the 5th Framework Programme.: s.n.
- Shell, 2003. *“The Shell bitumen handbook”*. Thomas Telford Publishing. 5ª edition. London.
- SILVA, E., 1994. *Uso de escória de aciaria em pavimentação viária*. Belo Horizonte: 28ª Reunião Anual de Pavimentação, Belo Horizonte, v. 1, p. 261-283.

- SILVA, E., MENDONÇA, R. & DOBELE, C., 2002. *Utilização da escória de aciaria em todas as camadas do pavimento*. Rio de Janeiro: 16º encontro de asfalto.
- SORLINI, S., SANZENI, A. & RONDI, L., 2012. *Reuse of steel slag in bituminous paving mixtures*. Italy: Journal of Hazardous Materials, 2012, Vol.209-210, pp.84-91.
- SUER, P., LINDQVIST, J.-E., ARM, M. & FROGNER, P. F., 2009. *Reproducing ten years of road ageing - Accelerated carbonation and leaching of EAF steel slag*. Sweden: Science of the Total Environment, 2009, Vol.407(18), pp.5110-5118.
- TAVARES, D. S., 2012. *Avaliação laboratorial de misturas asfálticas do tipo SMA com agregado siderúrgico*. Rio de Janeiro: Dissertação para a obtenção do grau de mestre em engenharia civil na Universidade Federal do Rio de Janeiro, 157 p.
- THOMAZ, E. C. S., 2012. *Escórias de Alto Forno, Notas de aula*. Disponível em http://aquarius.ime.ub.br/webde2/prof/ethomaz/cimentos_concretos/escoria_fabricacao.pdf. Acedido em 7 Setembro 2014.
- UEPG, 2014. *European Aggregates Association*. Disponível em <http://www.uepg.eu/statistics>. Acedido em 1 Dezembro 2014.
- WANG, G., 2010. *Determination of the expansion force of coarse steel slag aggregate*. USA: Construction and Building Materials, Oct, 2010, Vol.24(10), p.1961-1965.
- WANG, G., WANG, Y. & GAO, Z., 2010. *Use of steel slag as a granular material, Volume expansion prediction and usability criteria*. USA: Journal Of Hazardous Materials, 2010 Dec 15, Vol.184(1-3), pp.555-560.
- WANG, Q., YAN, P. & FENG, J., 2011. *A discussion on improving hydration activity of steel slag by altering its mineral compositions*. United Kindom and China: Journal of Hazardous Materials, Feb 28, 2011, Vol.186(2-3), p.1070-1975.
- WorldSteel, 2014. Disponível em <http://www.worldsteel.org/statistics/crude-steel-production.html>. Acedido em 1 Dezembro 2014.
- WU, S., XUE, Y., YE, Q. & CHEN, Y., 2007. *Utilizatioc of steel slag as aggregates for stone mastic asphalt (SMA) mixtures*. China: Building and Environment, 2007, Vol.42(7), pp.2580-2585.
- XIROUCHAKIS, D. & MANOLAKKOU, V., 2011. *Properties of an EAF slag produced in greece: A construction material for sustainable growth*. Greece: 5th International Conference, Bituminous Mixtures And Pavements, pp.287-297.

NORMAS/ESPECIFICAÇÕES

ALT-MAT, 2001. *"Alternative materials in road construction". Project Founded by the European Commission under the Transport RTD Programme of the 4th Framework Programme: s.n.*

AASHTO T 283:2010. *Resistance of Compacted Hot-Mix Asphalt (HMA) to Moisture-Induced Damage. USA, 2010.*

ASTM D2940:2009. *Standard specification for graded aggregate material for bases or subbases for highways or airports. USA, 2009.*

ASTM D4792/95. *Standard test method for potential expansion of aggregates from hydration reactions. USA, 1995.*

ASTM D4972/00. *Standard test method for pH of soils. USA, 2000.*

BS 6543:1985. *Guide to use of industrial by-products and waste materials in building and civil engineering. UK, 1985.*

CIRIA 167. *CIRIA Report 167: Use of Industrial By-Products in Road Construction - Water Quality Effects. Construction Industry Research and Information Association. London UK, 1997.*

CNR 138/92. *Spogliamento in acqua a 40°C (Decapagem em água a 40°C). Itália, 1992.*

CNR 149/92. *Valutazione dell'effetto di immersione in acqua sulle proprietà di una miscela (Avaliação do efeito de imersão em água sobre as propriedades de uma mistura). Itália, 1992.*

DIN 38414 S4. *Determination of leachability by water (S4). German standard methods for examination of water, wastewater and sludge. Sludge and Sediments (group S). Alemanha, 1984.*

DNER-262/94. *Escórias de aciaria para pavimentos rodoviários. Departamento Nacional de Infra-estruturas de Transportes (DNIT). Rio de Janeiro, 1994.*

DNER-ES 313/97. *Pavimentação, Concreto Betuminoso. Departamento Nacional de Infra-estruturas de Transportes (DNIT). Rio de Janeiro, 1997.*

DNER-ME 078/94. *Pavimentação, Agregado graúdo – adesividade a ligante betuminoso). Departamento Nacional de Infra-estruturas de Transportes (DNIT). Rio de Janeiro, 1994.*

- EN 196-2:2013.** *Method of testing cement Part 2: Chemical analysis of cement.* Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.
- EN 933-3:2012.** *Tests for geometrical properties of aggregates Part 3: Determination of particle shape - Flakiness index.* Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.
- EN 933-4:2008.** *Tests for geometrical properties of aggregates. Part 4: Determination of particle shape. Shape index.* Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.
- EN 933-5:1998/A1:2004.** *Tests for geometrical properties of aggregates Part 5: Determination of percentage of crushed and broken surfaces in coarse aggregate particles.* Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.
- EN 933-9:2009+A1:2013.** *Tests for geometrical properties of aggregates Part 9: Assessment of fines - Methylene blue test.* Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.
- EN 1067-2:2010.** *Tests for mechanical and physical properties of aggregates Part 2: Methods for the determination of resistance to fragmentation.* Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.
- EN 1097-6:2013.** *Tests for mechanical and physical properties of aggregates Part 6: Determination of particle density and water absorption.* Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.
- EN 1744-1:2009+A1:2012.** *Tests for chemical properties of aggregates Part 1: Chemical analysis.* Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.
- EN 12457:2002.** *Characterisation of waste; Leaching - Compliance test for leaching of granular waste materials and sludges.* Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.
- EN 12697-5:2009/AC:2012.** *Bituminous mixtures Test methods for hot mix asphalt Part 5: Determination of the maximum density.* Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.
- EN 12697-6:2012.** *Bituminous mixtures Test methods for hot mix asphalt Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens.* Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.

- EN 12697-8:2003.** *Bituminous mixtures Test methods for hot mix asphalt Part 8: Determination of void characteristics of bituminous specimen.* Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.
- EN 12697-11:2012.** *Bituminous mixtures Test methods for hot mix asphalt Part 11: Determination of the affinity between aggregate and bitumen.* Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.
- EN 12697-12:2008.** *Bituminous mixtures Test methods for hot mix asphalt Part 12: Determination of the water sensitivity of bituminous specimen.* Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.
- EN 12697-22:2003+A1:2007.** *Bituminous mixtures Test methods for hot mix asphalt Part 22: Wheel tracking.* Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.
- EN 12697-23:2003.** *Bituminous mixtures Test methods for hot mix asphalt Part 23: Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens.* Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.
- EN 12697-24:2012.** *Bituminous mixtures Test methods for hot mix asphalt Part 24: Resistance to fatigue.* Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.
- EN 12697-25:2005.** *Bituminous mixtures Test methods for hot mix asphalt Part 25: Cyclic compression test.* Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.
- EN 12697-26:2012.** *Bituminous mixtures Test methods for hot mix asphalt Part 26: Stiffness.* Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.
- EN 12697-29:2002.** *Bituminous mixtures Test method for hot mix asphalt Part 29: Determination of the dimensions of bituminous specimen.* Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas
- EN 12697-30:2012.** *Bituminous mixtures Test methods for hot mix asphalt Part 30: Specimen preparation by impact compactor.* Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.
- EN 12697-34:2012.** *Bituminous mixtures Test methods for hot mix asphalt Part 34: Marshall test.* Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.
- EN 12697-35:2004+A1:2007.** *Bituminous mixtures Test methods for hot mix asphalt Part 35: Laboratory mixing.* Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.

- IHOBE, 1999.** *Libro blanco para la minimización de residuos y emisiones - Escorias de acería.* Sociedad Pública Gestión Ambiental, País Vasco, Espanha.
- JIS A 5015/92.** *Iron and steel slag for road construction.* Japanese Industrial Standards, 1992.
- LNEC E474–2009.** Guia para a utilização de materiais reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição em aterros e camada de leito de infra-estruturas de transporte. Especificação LNEC, Lisboa, 2009.
- NBR 10.004.** Resíduos sólidos. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro, 1987.
- NBR 10.005.** Lixiviação de resíduos. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro, 1987, 10p.
- NP 142:1968.** Misturas betuminosas. Ensaio de compressão Marshall, LNEC, Lisboa.
- NP EN 933-1:2014.** Ensaio das propriedades geométricas dos agregados Parte 1: Análise granulométrica Método da peneiração. Instituto Português da Qualidade (IPQ), Portugal.
- NP EN 933-3:2014.** Ensaio das propriedades geométricas dos agregados Parte 1: Análise granulométrica Método da peneiração. Instituto Português da Qualidade (IPQ), Portugal.
- NP EN 933-8:2014.** Ensaio das propriedades geométricas dos agregados Parte 8: Avaliação dos finos Ensaio do equivalente de areia. Instituto Português da Qualidade (IPQ), Portugal.
- NP EN 1097-1:2012.** Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados Parte 1: Determinação da resistência ao desgaste (*micro-Deval*). Instituto Português da Qualidade (IPQ), Portugal.
- NP EN 1097-2:2011.** Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados Parte 2: Métodos para a determinação da resistência à fragmentação (*Los Angeles*). Instituto Português da Qualidade (IPQ), Portugal.
- NP EN 1744-3:2005.** Ensaio das propriedades químicas dos agregados Parte 3: Preparação de eluatos por lixiviação dos agregados. Instituto Português da Qualidade (IPQ), Portugal.

- NP EN 13043:2004/AC:2010.** Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação. Instituto Português da Qualidade (IPQ), Portugal.
- NP EN 13108-1:2011.** Misturas betuminosas Especificações dos materiais Parte 1: Betão betuminoso. Instituto Português da Qualidade (IPQ), Portugal.
- NP EN 13108-20:2008.** Misturas betuminosas Especificações dos materiais Parte 20: Ensaio de Tipo. Instituto Português da Qualidade (IPQ), Portugal.
- NP 13242:2002+A1:2010.** Agregados para materiais não ligados ou tratados com ligantes hidráulicos utilizados em trabalhos de engenharia civil e na construção rodoviária. Instituto Português da Qualidade (IPQ), Portugal.
- PG-3, 2008 - *Pliego de Prescripciones Tecnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes.*** Parte 5^a – *Firmes*. Espanha, 2008.
- PTM-130/78. *Pennsylvania Testing Method.*** Método de ensaio para avaliação do potencial de expansão da escória de aciaria. Departamento de Transportes da Pensilvânia, 1978.
- ROAD 94. *General technical construction specifications for roads. Swedish national road administration, road and traffic division, Engineering department.*** Borlänge Suécia, 1994.
- SAMARIS, 2006. *Sustainable and advanced materials for road infrastructures.*** Project funded by the European Commission under the Transport RTD Programme of the 5th Framework Programme.: s.n.