



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Carlos Daniel Aleixo Loureiro

**Utilização de resíduos siderúrgicos
como elemento potenciador de
soluções de reparação de pavimentos**



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Carlos Daniel Aleixo Loureiro

**Utilização de resíduos siderúrgicos
como elemento potenciador de
soluções de reparação de pavimentos**

Dissertação de Mestrado
Mestrado Integrado em Engenharia Civil

Trabalho realizado sob a orientação do
Professor Doutor Hugo Manuel Ribeiro Dias da Silva

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição
CC BY

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

AGRADECIMENTOS

A presente dissertação foi desenvolvida no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Civil – Perfil Planeamento e Infraestruturas de Transporte, na Universidade do Minho. Gostaria de expressar os meus profundos agradecimentos e reconhecimento a todas as pessoas que contribuíram para a sua elaboração, e em particular às que refiro em seguida.

Em primeiro lugar, ao Professor Doutor Hugo Silva gostava de dirigir o meu agradecimento por toda a disponibilidade, pelos ensinamentos transmitidos e pelo apoio motivacional demonstrado ao longo da execução da dissertação, bem como toda a sua amizade e reconhecimento.

Aos técnicos do Laboratório de Pavimentos Rodoviários, do Departamento de Engenharia Civil, nomeadamente ao Engenheiro Carlos Palha e ao Engenheiro Hélder Torres, agradeço-lhes toda a disponibilidade, apoio, incentivo e acima de tudo amizade em todas as fases do meu trabalho laboratorial, principalmente num ano tão complicado que todos vivemos.

A todos os professores, técnicos e amigos que estiveram presentes nos Laboratórios de Engenharia Civil da Universidade agradeço os bons momentos e as conversas passadas que me ajudaram a ter um melhor aproveitamento no meu trabalho diário no laboratório.

Aos meus amigos do Hóquei em Patins que me ajudaram a “desanuviar a cabeça” de todo o trabalho que tinha por fazer, e também me iam motivando para finalizar a dissertação.

Por último, deixo um agradecimento à minha família, em especial aos meus pais (Carlos e Rita), à minha irmã Adriana, à minha sobrinha Camila e ao meu cunhado Nuno que sempre estiveram, e sei que vão estar, ao meu lado nos momentos mais difíceis e desafiantes. Pois, sei bem que sem eles, nada disto seria possível...

“Nada acontece a menos que o sonhemos primeiro”

Carl Sandburg

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio, nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Utilização de resíduos siderúrgicos como elemento potenciador de soluções de reparação de pavimentos

RESUMO

A premência de mitigar o consumo de energia e de recursos naturais levou a indústria de pavimentação a mudar o seu paradigma de produção atual, para promover o desenvolvimento de novos materiais e soluções de reparação que aumentem a durabilidade e a qualidade das infraestruturas rodoviárias, de uma forma economicamente sustentável.

A presente dissertação tem como objetivo estudar a influência de aplicar resíduos industriais (escória siderúrgica) e de fibras metálicas como elementos potenciadores de soluções de autorregeneração de pavimentos rodoviários. Através do aquecimento das misturas betuminosas com um equipamento de indução (micro-ondas) e com a realização de ensaios de caracterização mecânica avaliou-se a capacidade de autorregeneração das misturas.

Neste trabalho foram produzidas três misturas de betão betuminoso (AC14), uma de controlo, outra com fibras metálicas e, por último, uma composta por agregados de escória siderúrgica (ASIC) e fibras metálicas. No início, a eficácia da indução por micro-ondas para aquecimento das misturas betuminosas foi o foco do estudo. Posteriormente, avaliou-se a capacidade de recuperação de resistência das misturas através de múltiplos ciclos compostos por ensaios de caracterização mecânica (fadiga e fratura) e ensaios de indução por micro-ondas.

Os resultados de indução nos provetes cilíndricos foram muito encorajadores, visto que se notou que o ASIC e as fibras promoveram temperaturas de regeneração mais altas do que nas misturas convencionais para o mesmo tempo de indução. Relativamente aos ensaios de caracterização mecânica, o dano induzido pelo ensaio de fratura foi recuperado de forma bem mais significativa na mistura betuminosa com ASIC. Nos restantes ensaios mecânicos, na determinação da resistência à fadiga e do módulo de rigidez, verificou-se que o ganho de vida à fadiga derivado da recuperação do módulo de rigidez após regeneração por indução ocorreu em todas misturas. No entanto, a mistura que incorporava apenas fibras metálicas apresentou os piores resultados.

Palavras-chave: Misturas betuminosas; Resíduos industriais; Agregado de escória siderúrgica; Autorregeneração; Indução por Micro-ondas.

Use of steel by-products as an enhancer element for pavement repair solutions

ABSTRACT

The urgency to mitigate energy and natural resources consumption has led the paving industry to change its current production paradigm by promoting the development of new materials and repair solutions that increase the durability and quality of road infrastructures in an economically sustainable way.

Thus, the present dissertation aims to study the influence of applying industrial by-products (steel slag and metallic fibers) as enhancing elements for road pavement repair solutions. The repair process, resulting from heating the asphalt mixtures, was simulated with an induction piece of equipment (microwave), with subsequent evaluation of the self-healing ability through mechanical characterization tests.

Three asphalt concrete (AC14) mixtures were produced in this work, a conventional or control one, another with metallic fibers and, finally, one composed of steel slag aggregates (ASIC) and metallic fibers. In the beginning, the study's focus was the effectiveness of microwave induction for heating asphalt mixtures. Subsequently, the capacity to recover the mixtures' strength was evaluated through multiple cycles composed of mechanical characterization tests (fatigue and fracture) and microwave induction tests.

The induction results in the cylindrical test specimens were very encouraging since it was noticed that ASIC and fibers promoted higher healing temperatures than in conventional mixtures for the same induction time. The fracture test's damage was significantly recovered in the asphalt mixture with ASIC regarding the mechanical characterization tests. In the bending beam tests, carried out to determine the fatigue resistance and the stiffness modulus, it was found that the fatigue life gain derived from the recovery of the stiffness modulus after induction healing occurred in all mixtures. However, the mixture that incorporated only metallic fibers presented the worst results.

Keywords: Asphalt mixtures; Industrial waste; Steel slag aggregates; Self-healing; Microwave induction.

INDÍCE

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Enquadramento temático.....	1
1.2. Objetivos e metodologia.....	2
1.3. Organização da dissertação.....	3
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	5
2.1. Constituição e comportamentos dos pavimentos rodoviários.....	5
2.1.1. Pavimentos flexíveis.....	6
2.1.2. Misturas betuminosas.....	8
2.2. Economia circular e sustentabilidade.....	9
2.2.1. Da economia linear à economia circular no mundo.....	10
2.2.2. Economia circular no contexto da indústria da pavimentação.....	12
2.3. Utilização da escória proveniente da produção do aço como agregado.....	14
2.3.1. Produção do aço.....	17
2.3.2. Agregado siderúrgico inerte para construção (ASIC).....	19
2.3.3. Escórias de aciaria e o seu processamento.....	20
2.3.4. Caracterização química e física da escória de aciaria.....	22
2.3.5. Caracterização ambiental da escória de aciaria.....	23
2.3.6. Estudos e aplicações do ASIC na construção civil.....	25
2.4. Autorregeneração no betão betuminoso.....	28
2.4.1. Aquecimento por indução eletromagnética.....	30
2.4.2. Aquecimento por indução com micro-ondas.....	33
2.4.3. Aplicação de agentes encapsulados rejuvenescedores nas misturas betuminosas.....	35

3. MATERIAIS E METODOLOGIA DE ESTUDO	39
3.1. Identificação dos materiais utilizados	40
3.2. Caraterização dos agregados	41
3.3. Métodos aplicados para caraterização do ligante betuminoso	42
3.3.1. Ensaio de penetração	43
3.3.2. Ensaio de ponto de amolecimento (ensaio “anel e bola”)	44
3.3.3. Ensaio de viscosidade dinâmica.....	45
3.3.4. Ensaio de reologia	45
3.4. Estudo de formulação, de produção e de análise das misturas betuminosas.....	46
3.4.1. Estudo granulométrico das misturas	47
3.4.2. Definição da percentagem de fibras de lã de aço	48
3.4.3. Processo de produção das misturas betuminosas	49
3.4.4. Processo de compactação das misturas betuminosas	51
3.4.5. Identificação e caraterização geométrica das vigas e dos provetes das misturas betuminosas	53
3.4.6. Determinação da baridade aparente	55
3.4.7. Determinação da baridade máxima teórica	56
3.4.8. Determinação do volume de vazios dos provetes.....	57
3.5. Ensaio de indução com equipamento micro-ondas para aquecimento das misturas betuminosas.....	57
3.6. Ensaio de caraterização mecânica e de verificação do efeito do autorregeneração nas misturas betuminosas.....	60
3.6.1. Ensaio do módulo de rigidez por flexão em quatro pontos	60
3.6.2. Ensaio de resistência ao fendilhamento por fadiga	61
3.6.3. Ensaio de rotura por flexão em três pontos	64
4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	67
4.1. Caraterização básica dos agregados e do ligante betuminoso	67
4.1.1. Análise granulométrica dos agregados	67
4.1.2. Análise do ligante	67

4.2. Caracterização reológica do ligante betuminoso	68
4.3. Formulação das misturas betuminosas	72
4.3.1. Ajuste granulométrico das misturas betuminosas.....	72
4.3.2. Características volumétricas das misturas produzidas.....	74
4.4. Indução por aquecimento com um micro-ondas das misturas de betão betuminoso.....	75
4.5. Caracterização mecânica e verificação do efeito da autorregeneração nas misturas betuminosas.....	78
4.5.1. Módulo de rigidez das misturas betuminosas	79
4.5.2. Resistência ao fendilhamento por fadiga das misturas betuminosas	81
4.5.3. Resistência dos provetes semicirculares à fratura por flexão em três pontos	85
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	90
5.1. Conclusões.....	90
5.2. Trabalhos futuros.....	92
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	93
ANEXOS	100

LISTA DE ABREVIATURAS

AACV	– Análise Ambiental do Ciclo de Vida
AC	– <i>Asphalt Concrete</i>
ASIC	– Agregado Siderúrgico Inerte para Construção
BB	– Betão Betuminoso
BMT	– Baridade Máxima Teórica
BOF	– <i>Basic Oxygen Furnace</i>
CBR	– <i>California Bearing Ratio</i>
DA	– <i>Dense Asphalt</i>
DAP	– Declaração Ambiental do Produto
DSR	– <i>Dynamic Shear Rheometer</i>
EAF	– <i>Electric Arc Furnace</i>
EAPA	– <i>European Asphalt Pavement Association</i>
GEE	– Gases com Efeito de Estufa
HL	– <i>Healing Level</i>
LCM	– <i>Life Cycle Management</i>
MIP	– <i>Mercury Intrusion Porosimetry</i>
OH	– <i>Open Heart</i>
PA	– <i>Porous Asphalt</i>
PG	– <i>Performance Grade</i>
SCB	– <i>Semi-Circular Bend</i>
SEM	– <i>Scanning Electron Microscope</i>
SMA	– <i>Stone Mastic Asphalt</i>
SSD	– <i>Saturated Surface Dry</i>
UE	– União Europeia
WLF	– <i>Williams-Landel-Ferry</i>
XRD	– <i>X-Ray Diffraction</i>

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Constituição de um pavimento flexível (adaptado de Silva, 2005)	6
Figura 2 - Economia Linear versus Economia Circular (adaptado de Beatrice, 2017).....	11
Figura 3 - Distribuição da produção de aço bruto em 2019 (World Steel Association, 2020d).....	16
Figura 4 - Etapas de produção do aço nos diferentes fornos (adaptado de World Steel Association, 2020a)	17
Figura 5 - Distribuição do tipo de fornos para produção do aço (adaptado de World Steel Association, 2020c).....	18
Figura 6 - Influência da China na Produção de aço bruto no Mundo nos BOF e EAF (adaptado de World Steel Association, 2021)	19
Figura 7 - Fases do processamento das escórias (Roque et al., 2006)	22
Figura 8 - Central de produção de misturas betuminosas com ASIC (SteelPhalt, 2021).....	27
Figura 9 - Exemplo de aplicação de uma mistura betuminosa com ASIC num pavimento (Derek Lewis, 2021)	28
Figura 10 - Objetivo da curva de um material com capacidade de autorregeneração (adaptado de NL Agency, 2011)	28
Figura 11 - Esquema de forças atuantes no processo de regeneração no betão betuminoso: (a) zoom out da fenda; (b) zoom in da fenda na zona de contacto entre faces (adaptado de García et al., 2013)	29
Figura 12 - Tipos de forças (adesão e coesão) que ocorrem numa mistura betuminosa (adaptado de Guo et al., 2017)	30
Figura 13 - Regeneração por aquecimento por indução eletromagnética (adaptado de Gonzalez-Torre e Norambuena-Contreras, 2020)	31
Figura 14 - (a) Imagem infravermelha da viga ensaiada; (b) Evolução da temperatura superficial da viga ao longo do tempo (adaptado de Garcia et al., 2020).	32
Figura 15 - (a) Esquema de extensão da vida à fadiga por meio de aquecimento por indução; (b) Índice de autorregeneração versus fração do dano; (c) Número ideal de ciclos para aplicar a indução (N_H) e o número extra de ciclos após indução (N_f) (adaptado de Garcia et al., 2020).	32
Figura 16 - (a) Ensaio de aquecimento por micro-ondas (b) Ensaio de flexão em três pontos (adaptado de Norambuena-Contreras e Gonzalez-Torre, 2017).....	33

Figura 17 - (a) Dimensão da fissura antes da indução; (b) Dimensão da fissura após indução (t=40 s); (c) Representação da abertura de fenda em função do tempo de indução (adaptado de Norambuena-Contreras e Gonzalez-Torre, 2017).....	34
Figura 18 - Esquema dos procedimentos adotados no estudo de adaptado de Fakhri et al. (2020)	35
Figura 19 - Exemplo de cápsulas rejuvenescedoras: (a) Cápsula com óleo de girassol e outros constituintes (Garcia et al., 2015); (b) Cápsula de alginato de cálcio (Al-Mansoori et al., 2018).....	36
Figura 20 - Processo de rompimento da cápsula rejuvenescedora: (a) Etapas do ensaio de fratura-regeneração (adaptado de Al-Mansoori et al., 2018); (b) zoom in do passo 3 (Barros, 2020)	36
Figura 21 - (a) Representação do ensaio de flexão em três pontos; (b) Curvas Wohler dos ensaios de fadiga nas diferentes misturas; (c) Rácio de regeneração nas três misturas com 2 kN de carga (adaptado de Garcia-Hernández et al., 2020).....	37
Figura 22 - Secção de uma mistura betuminosa: (a) antes do ensaio; (b) depois de 35% de N _{0,5} ; (c) depois do repouso (adaptado de Garcia-Hernández et al., 2020)	38
Figura 23 - Frações de ASIC utilizadas neste trabalho.....	42
Figura 24 - Curvas granulométricas dos agregados e do filer utilizados neste trabalho	42
Figura 25 - (a) Cápsula de betume 35/50; (b) Penetrómetro e respetiva cápsula.....	43
Figura 26 - Equipamento utilizado no ensaio "anel e bola"	44
Figura 27 - Equipamento utilizado no ensaio de viscosidade dinâmica	45
Figura 28 - (a) Reómetro utilizado no trabalho; (b) Reómetro auxiliado com um sistema computacional.....	46
Figura 29 - Fuso de referência da mistura AC 14 surf 35/50 (BB).....	47
Figura 30 - Fibras de lã de aço utilizadas neste trabalho.....	49
Figura 31 - Processo de fabrico das misturas betuminosas.....	50
Figura 32 - Fibras de lã de aço cortadas para introdução nas misturas	50
Figura 33 - Equipamentos de compactação: (a) Roller Compactor; (b) Compactador de Marshall.....	52
Figura 34 - Provetes cilíndricos (a) antes e (b) depois de serem desmoldados.....	52
Figura 35 - Lajes produzidas: (a) Mistura CR; (b) Mistura CF; (c) Mistura CAF.....	53
Figura 36 - Vigas de ensaio da (a) Mistura CR; (b) Mistura CF; (c) Mistura CAF.....	54
Figura 37 - Provetes semicirculares com a respetiva identificação	54
Figura 38 - Método de determinação da baridade aparente em provetes cilíndricos	55

Figura 39 - (a) Amostra de mistura betuminosa desagregada; (b) Picnómetro; (c) Equipamento de vácuo.	56
Figura 40 - Equipamentos utilizados para indução e medição das temperaturas das misturas betuminosas	58
Figura 41 - Etapas da medição da temperatura superficial do provete: (a) Colocação da câmara termográfica num suporte fixo; (b) Colocação do provete CAF9 no micro-ondas; (c) Medição da temperatura superficial do provete CAF9	59
Figura 42 - Etapas da medição da temperatura interna: (a) Furação dos provetes; (b) Posição dos furos; (c) Colocação das sondas e a respetiva medição	59
Figura 43 - Equipamento usado para a realização dos ensaios de fadiga e módulo de rigidez.....	61
Figura 44 - Etapas do ensaio de indução nas vigas: (a) Colocação na câmara termográfica num suporte fixo; (b) Medição da temperatura inicial da viga; (c) Colocação na viga num suporte de madeira; (d) Medição da temperatura superficial após indução no micro-ondas.....	63
Figura 45 - Procedimento adotado para calcular o nível de regeneração (HL - Healing Level) das vigas após fadiga.....	63
Figura 46 - Colocação do provete CF1A no ensaio de fratura SCB	64
Figura 47 - (a) Formação do entalhe; (b) Caracterização da geometria do provete; (c) Pintura a branco da superfície do provete para uma melhor identificação das fendas	65
Figura 48 - Equipamentos utilizados no ensaio SCB	65
Figura 49 – Variação da viscosidade dinâmica do betume utilizado com a temperatura	68
Figura 50 - Curva do fator de deslocamento (α_t) para as diferentes temperaturas de ensaio ($T_{ref} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$)	69
Figura 51 – Representação gráfica dos resultados de reologia do betume, o módulo complexo e o ângulo de fase.....	70
Figura 52 - Curvas mestras do módulo complexo e do ângulo de fase em função da frequência equivalente ($T_{ref} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$).....	70
Figura 53 - Diagrama de “Black Space” do betume 35/50.....	71
Figura 54 - Determinação do grau PG do betume 35/50 para uma frequência de 10 rad/s.....	71
Figura 55 - Ajustes granulométricos para produção das misturas betuminosas: (a) CR – AC 14 (BB); (b) CF – AC 14 com fibras metálicas; (c) CAF – AC 14 com ASIC e fibras metálicas	73
Figura 56 - Perfis de temperatura com o respetivo valor de um provete circular	75

Figura 57 - Evolução da temperatura superficial para uma potência de (a) 540 W; (b) 720 W; (c) 900 W.....	76
Figura 58 - Evolução da temperatura no interior do provete para um nível de potência de 900 W.....	77
Figura 59 - Temperatura superficial nos provetes semicirculares (a) CF3A, (b) CF1A e (c) CAF1A para 80 s de indução	77
Figura 60 - Variação da temperatura superficial dos provetes semicirculares nos perfis: (a) T_{med} ; (b) T_H ; (c) T_V	78
Figura 61 - Evolução do módulo de rigidez e do ângulo de fase nos três ensaios de módulo entre os quais se procedeu a ciclos de indução na viga CR9	79
Figura 62 - Evolução do módulo de rigidez e do ângulo de fase nos três ensaios de módulo entre os quais se procedeu a ciclos de indução na viga CF4	79
Figura 63 - Evolução do módulo de rigidez e do ângulo de fase nos três ensaios de módulo entre os quais se procedeu a ciclos de indução na viga CAF4	80
Figura 64 - Módulos de rigidez das misturas estudadas nas condições de ensaio referidas na norma (frequência 8 Hz e temperatura de 20 °C).....	80
Figura 65 - Evolução do módulo de rigidez da viga CR6 no ensaio de fadiga ao longo dos dois ciclos de indução comparativamente com a viga CR2 (sem indução).....	82
Figura 66 - Evolução do módulo de rigidez da viga CF9 no ensaio de fadiga ao longo dos dois ciclos de indução comparativamente com a viga CF2 (sem indução).....	82
Figura 67 - Evolução do módulo de rigidez da viga CAF9 no ensaio de fadiga ao longo dos dois ciclos de indução comparativamente com a viga CAF2 (sem indução).....	83
Figura 68 - Índice de regeneração (Onifade e Birgisson) em cada mistura betuminosa nos ensaios de fadiga	84
Figura 69 - Alteração do aspeto e provável degradação do betume nas vigas causado pelos ensaios cíclicos de caracterização mecânica e de indução	84
Figura 70 - Temperatura superficial da Viga CR6: (a) 1ª indução; (b) 2ª indução.....	85
Figura 71 - Variação das temperaturas médias de indução das vigas de cada mistura	85
Figura 72 - Provede CR2A (a) antes do ensaio; (b) fenda do provede; (c) depois da indução	86
Figura 73 - Evolução da força com o deslocamento nos quatro ensaios de fratura: (a) CR3B; (b) CF3B; (c) CAF6	86
Figura 74 - Representação da energia ou trabalho de fratura (W_f)	87

Figura 75 - Nível de autorregeneração (HL) dos provetes semicirculares nos quatro ensaios realizados (1º ensaio antes da indução; 2º a 4º ensaios após 1º a 3º ciclo de indução)..... 88

Figura 76 - Variação das temperaturas médias de indução dos provetes semicirculares de cada mistura 89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipologias de pavimentos rodoviários (adaptado de Branco et al., 2016)	5
Tabela 2 - Quantidade de misturas betuminosas recuperadas nas infraestruturas rodoviárias (adaptado de EAPA, 2020)	13
Tabela 3 - Especificações do betume convencional de penetração normal 35/50	41
Tabela 4 - Critérios para realização do ensaio de penetração de betumes	43
Tabela 5 - Temperaturas médias de compactação das misturas betuminosas.....	51
Tabela 6 - Resultados dos ensaios de penetração e do ponto de amolecimento do betume	68
Tabela 7 - Composição granulométrica das misturas betuminosas	72
Tabela 8 - Percentagens de ligante consideradas nas misturas betuminosas	73
Tabela 9 - Caracterização volumétrica das misturas betuminosas.....	74
Tabela 10 - Valores médios da energia de fratura em cada ensaio para cada mistura betuminosa	87
Tabela 11 - Temperaturas atingidas na indução das vigas	100
Tabela 12 - Dados e resultados do ensaio de resistência à fadiga.....	101
Tabela 13 - Temperaturas atingidas na indução dos provetes semicirculares	102
Tabela 14 - Dados e resultados do ensaio de rotura por flexão em três pontos.....	103

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento temático

A rede rodoviária constitui a infraestrutura de transportes mais relevante para o desenvolvimento global de qualquer país. Portugal, nos últimos 30 anos, tem desenvolvido em grande escala a sua rede rodoviária nacional e, atualmente, segundo dados da Infraestruturas de Portugal (2016), possui uma exploração de 17874 km, e a grande maioria da rede é constituída por pavimentos do tipo flexível.

Este tipo de pavimentos requer ações frequentes de manutenção e de reabilitação devido às ações (tráfego e condições climáticas) a que são constantemente submetidos durante o seu período de vida útil, de forma a assegurar a circulação de veículos em segurança e conforto. Caso não haja ações de reabilitação, o envelhecimento do betume e a mudança das propriedades físico-químicas das misturas betuminosas ocorre de forma mais agravada (Aurstad *et al.*, 2016). Consequentemente, a rigidez da mistura betuminosa aumenta, a sua capacidade de relaxação diminui e o betume torna-se mais frágil, levando assim ao aparecimento de micro fendas. Em seguida, a coalescência e a acumulação dessas micro fendas leva à formação de macro fendas que posteriormente se propagam e resultam na falha total do betão betuminoso (BB) (Onifade e Birgisson, 2017).

Quando surge uma microfissura no betão betuminoso é possível que esta feche naturalmente graças às propriedades viscosas do betume. Quando o betume está entre 30 e 70 °C comporta-se como um fluido Newtoniano e, por capilaridade, consegue fluir pela fenda até a preencher, contribuindo assim para um processo autorregeneração, desde que haja tempo suficiente (dias) nesse intervalo de temperaturas e de preferência sem tráfego (García *et al.*, 2013, Garcia *et al.*, 2015).

Na atualidade, a importância crescente da economia circular e dos seus conceitos associados nas tomadas de decisão por parte dos agentes governamentais de cada país tem sido bem significativa e preponderante. Nesse sentido, a União Europeia (UE) tem apoiado a investigação, a inovação e o investimento em certos setores prioritários de maneira a procurar implementar de forma completa o ciclo da economia circular, sendo um dos objetivos ter uma Europa sustentável até 2030 (European Commission, 2019).

Partindo desses princípios, Araújo *et al.* (2014) já defendiam que a política de dimensionamento e gestão das infraestruturas rodoviárias deveria mudar, passando a valorizar tanto as componentes técnicas e económicas como as componentes ambientais e sustentáveis. Nessa perspetiva, fomenta-se cada vez

mais a utilização de novos métodos que visem a diminuição das emissões de CO₂ para atmosfera, o decréscimo do uso de materiais virgens e o reaproveitamento de resíduos na construção.

Nos últimos anos, têm sido feitos diversos estudos científicos baseados na incorporação de resíduos industriais nas misturas para substituírem de forma parcial ou total certos materiais virgens. Por exemplo, Tarbay *et al.*(2019) apresentaram a utilização de alguns resíduos (lamas de corte de mármore ou granito) e subprodutos (escória de aço) como alternativa ao filler convencional. Outro exemplo, recentemente estudado, foi a substituição parcial do betume por resíduos de poliestireno em misturas betuminosas (Marta *et al.*, 2019).

No seguimento da mesma linha de investigação, mas tendo como aspiração a descoberta de novos métodos de reparação de misturas betuminosas, na presente dissertação procurou-se desenvolver misturas betuminosas com propriedades de reparação melhoradas e que incorporem resíduos industriais (escórias de aço) e fibras metálicas. Para atingir essa meta, avaliou-se se os resíduos industriais adicionados são potenciadores do aumento da capacidade de autorregeneração do betão betuminoso quando este é induzido por um equipamento de aquecimento por micro-ondas, ao permitir aumentar mais rápido a temperatura da mistura betuminosa.

Com este tipo de novas soluções tecnológicas procura-se otimizar o período de vida das misturas betuminosas, reduzindo assim o número de intervenções a serem efetuadas ao longo do tempo e contribuindo paralelamente para um desenvolvimento mais sustentável e com um menor impacto ambiental.

1.2. Objetivos e metodologia

A presente dissertação tem como objetivo estabelecer o desenvolvimento e o estudo de novas técnicas de reparação de pavimentos flexíveis em infraestruturas rodoviárias, segundo ideias inovadoras e eficazes sustentadas por princípios técnicos, económicos, sociais e ambientais.

O principal objetivo do trabalho experimental é estudar a incorporação de subprodutos industriais (escória do aço e fibras de aço) como elementos potenciadores de soluções de reparação de pavimentos e avaliar qual a influência destes materiais no aquecimento de misturas betuminosas com um micro-ondas. Além destes materiais serem bons condutores elétricos e de contribuírem assim para a indução, a sua utilização na indústria dos pavimentos permite criar um valor acrescentado para esses subprodutos, contribuindo igualmente para uma maior eficiência ambiental e energética dos processos construtivos.

De forma a atingir os objetivos mencionados e a gerar novos conhecimentos, inicialmente foi feita uma pesquisa bibliográfica referente às principais características dos pavimentos rodoviários. Posteriormente, analisou-se as metas e os objetivos definidos por organismos governamentais, especificamente na área de pavimentos rodoviários, de maneira a que o planeta tenha atividades com um menor impacto económico e ambiental, contribuindo assim para a transição para uma economia totalmente circular. Por último, pesquisou-se artigos científicos relacionados com a utilização do Agregado Siderúrgico Inerte para Construção (ASIC) em substituição de agregados naturais na área da pavimentação, e com a autorregeneração (*self-healing*, na terminologia Anglo-Saxónica) em misturas betuminosas e a forma como esta pode ser potenciada pela utilização de resíduos industriais (ASIC e fibras).

Após a revisão da literatura, procedeu-se à definição da formulação das misturas betuminosas, dos ensaios laboratoriais a realizar e dos resultados que se pretendem alcançar a nível laboratorial, para depois, numa fase final da dissertação, se efetuar as devidas considerações e análise sobre o trabalho desenvolvido.

Sumariamente, estes são os objetivos e a metodologia de trabalho desta dissertação de mestrado, que estão associados a um projeto de investigação muito mais abrangente e que está agora em curso e que auxiliará o desenvolvimento desta dissertação, respetivamente em questões de materiais e equipamentos que podem vir a ser úteis no desenvolvimento da mesma.

1.3. Organização da dissertação

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos essenciais para responder ao tema proposto em estudo. Então, o primeiro capítulo apresenta um enquadramento temático da dissertação, os seus objetivos e a metodologia adotada para a execução da mesma.

No segundo capítulo, inicia-se o corpo principal do trabalho, faz-se uma breve revisão dos conhecimentos sobre pavimentos flexíveis e misturas betuminosas. Aborda-se também as necessidades para a transição da economia linear para uma economia circular, e analisa-se os trabalhos de investigação existentes sobre o ASIC e a sua utilização na área de pavimentação. Por fim, neste capítulo também se apresentam alguns métodos já existentes ou em desenvolvimento para estudo da regeneração em misturas betuminosas.

No terceiro capítulo são descritos os materiais utilizados na formulação das misturas betuminosas, apresentam-se os métodos utilizados para a produção e caracterização das mesmas e identificam-se a os diferentes ensaios usados no programa experimental com uma breve descrição dos mesmos.

No quarto capítulo faz-se uma análise dos resultados dos ensaios laboratoriais realizados, começando pela caracterização das misturas betuminosas até à exposição dos resultados obtidos nos ensaios de fadiga e de fratura em misturas betuminosas que foram submetidas a ciclos de indução por radiações micro-ondas. Assim, é possível compreender em concreto os resultados de se ter aplicado a metodologia explicitada no capítulo anterior.

Finalmente, no quinto capítulo apresentam-se as considerações finais, incluindo as conclusões retiradas do trabalho efetuado, que respondem aos seus objetivos, e também se sugere a realização de alguns trabalhos futuros que poderão ser realizados nesta temática.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Constituição e comportamentos dos pavimentos rodoviários

Um pavimento rodoviário tem como função primordial assegurar uma superfície que permita a circulação de todo o tipo de veículos com segurança e comodidade, durante um período de vida útil do mesmo, sabendo que este está sujeito a ações de tráfego e a ações climáticas prejudiciais (Branco *et al.*, 2016).

A um pavimento devem-se exigir algumas qualidades, das quais se destacam duas, a qualidade funcional e a qualidade estrutural. A primeira está relacionada com os requisitos que os utentes impõem, o conforto e a segurança na circulação. Por sua vez, a segunda qualidade está relacionada com a capacidade de o pavimento suportar as cargas dos veículos sem sofrer alterações para além dos valores limites definidos em projeto (Pais *et al.*, 2000).

Relativamente à sua constituição, um pavimento pode ser considerado um sistema multiestratificado, formado por diversas camadas de espessura finita, sustentadas na fundação pelo terreno natural, o qual pode ter um coroamento de qualidade melhorada (leito do pavimento) caso seja necessário (Pereira e Miranda, 1999). Da associação das camadas constituídas por diferentes materiais resultam naturalmente os diferentes tipos de pavimentos e daí, em função das cargas e das condições climáticas que se esperam, define-se o tipo de pavimento ideal para determinado local.

Os pavimentos rodoviários podem ser classificados com base em dois critérios, o tipo de material utilizado e a deformabilidade do respetivo pavimento (Tabela 1).

Tabela 1 - Tipologias de pavimentos rodoviários (adaptado de Branco et al., 2016)

Tipo de Pavimento	Materiais (ligante)	Deformabilidade
Flexível	Hidrocarbonatos e granulares	Elevada
Rígido	Hidráulicos e granulares	Muito reduzida
Semirrígido	Hidrocarbonatos, hidráulicos e granulares	Reduzida

Em Portugal, na grande maioria das infraestruturas de transporte rodoviário utilizam-se os pavimentos do tipo flexível.

Um pavimento rodoviário é composto então pela fundação (terreno natural e leito do pavimento) e pelo corpo do pavimento (camadas granulares e camadas ligadas por um ligante betuminoso ou hidráulico). As camadas granulares têm basicamente uma função mais estrutural, cujo objetivo passa pela

degradação das cargas atuantes, para resistir às deformações permanentes e garantir uma adequada drenagem, enquanto as camadas com ligantes betuminosos (pavimentos flexíveis) têm funções estruturais e de regularização do pavimento, garantindo assim a comodidade e a segurança necessária para a circulação dos veículos. Estas camadas também contribuem para a degradação das cargas atuantes, e são particularmente importantes na resistência ao fendilhamento por fadiga dos pavimentos, pois suportam as ações solicitantes apesar das deformações das camadas inferiores, e ainda têm um excelente papel na impermeabilização das camadas subjacentes. Por fim, as camadas ligadas por ligantes hidráulicos, presentes nos pavimentos rígidos ou semirrígidos, desempenham funções de caráter estrutural e de regularização, contribuindo assim para qualidade estrutural e para a qualidade funcional do pavimento (InIR, 2009).

De salientar que as diferentes camadas se dispõem, de um modo geral, com qualidade e resistência decrescente, de cima para baixo, em consonância com as progressivas reduções dos esforços em profundidade.

2.1.1. Pavimentos flexíveis

Os pavimentos flexíveis possuem, normalmente, um número máximo de três camadas betuminosas, sendo elas a camada de desgaste ou superficial, a camada de ligação ou regularização e a camada base. Adicionalmente, existem uma ou duas camadas granulares e o solo de fundação, camadas essas que existem em qualquer tipo de pavimento (Figura 1).

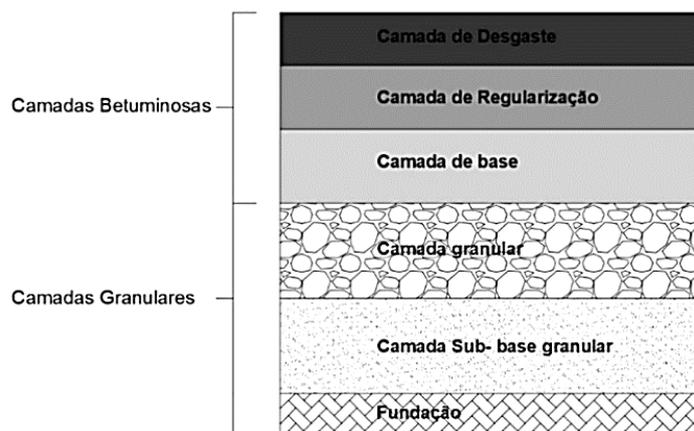


Figura 1 - Constituição de um pavimento flexível (adaptado de Silva, 2005)

A camada de desgaste tem essencialmente as funções de resistir às ações do tráfego e do clima. A camada de ligação serve de suporte à camada sobrejacente e contribui para a resistência estrutural do

pavimento. Por fim, a última camada betuminosa, a camada de base, tem fundamentalmente uma função estrutural (Silva, 2005). No entanto, a constituição destes tipos de pavimentos pode ser diversa, pois estes são projetados e definidos em função da intensidade do tráfego, da resistência do solo de fundação e das características dos materiais disponíveis que variam em função das condições climáticas do local. Além desses fatores, a componente económica é outro fator importantíssimo para definir o número e as respetivas espessuras das camadas do pavimento. Assim sendo, quando o tráfego é reduzido e se dispõe de materiais granulares de boa qualidade no local a um preço reduzido, os pavimentos são projetados e construídos com preponderância nas camadas granulares. Caso contrário, se o tráfego for intenso e numa região sem materiais granulares de qualidade, será necessário construir um pavimento com uma estrutura preponderante de camadas betuminosas e, só por aí, esperar-se-á um custo total da estrutura do pavimento bem superior à anterior.

Este tipo de pavimentos flexíveis apresentam uma elevada deformabilidade (250 a 500 μm), e a cada carga solicitante, verifica-se um estado de tensão de compressão na parte superior das camadas betuminosas e de tração na sua parte inferior. O pavimento é dimensionado para garantir o maior número de ciclos de carga possível, sempre com o compromisso da melhor relação entre o tempo de vida e o investimento económico.

Então, aquando a formalização do projeto da estrutura do pavimento, para cada camada deve-se indicar a sua espessura, o material que a constitui e os valores típicos das características de deformabilidade (ou seja, módulo de rigidez e coeficiente de *Poisson*).

Relativamente aos pavimentos flexíveis, também se deve atender às condições fronteira entre as camadas betuminosas, que em grande parte resultam da aplicação de uma “rega de colagem” entre as respetivas camadas. Esta deve ser executada com a colocação de emulsões betuminosas entre camadas e deve seguir regras específicas de aplicação. Este processo é fundamental para garantir um funcionamento contínuo de transmissão de tensões ao pavimento, permitindo assim uma melhor resistência à fadiga. Caso as camadas estejam “descoladas” entre si, o estado de tensão é muito mais severo que o verificado com interfaces entre camadas “coladas”, e a probabilidade de aparecimento de certas patologias no pavimento é bem maior (Branco *et al.*, 2016).

Face às ações (tráfego e agentes atmosféricos) que estes pavimentos sofrem ao longo do seu ciclo de vida, naturalmente estão sujeitos ao aparecimento de várias patologias, algumas que provêm mais das camadas betuminosas, enquanto outras advêm das camadas granulares. Algumas das principais famílias de degradações dos pavimentos rodoviários são as deformações (abatimento, ondulação e rodeiras), o

fendilhamento (fendas isoladas ou pele de crocodilo), a desagregação de materiais (cabeça de gato, pelada e covas) e o movimento de materiais (exsudação e subida de finos) (Pereira e Miranda, 1999).

Face aos esforços geralmente instalados nos pavimentos flexíveis, estes apresentam dois estados últimos de ruína, um de fendilhamento das camadas betuminosas e outro de deformação permanente da fundação (Freitas, 2004). Estes pavimentos também são suscetíveis a diferentes tipos de degradações nas camadas superiores ao longo do tempo, e daí estes terem a necessidade de sofrer intervenções de conservação e reabilitação, de preferência de em menores intervalos de tempo.

2.1.2. Misturas betuminosas

As misturas betuminosas são constituídas por um conjunto de materiais granulares doseados de forma ponderal ou volumétrica, que são misturados com uma certa quantidade de ligante betuminoso previamente determinado numa central betuminosa própria para a produção destas misturas. Em seguida, a mistura é transportada para o local da obra, onde se a espalha e compacta constituindo assim uma camada do pavimento.

Atendendo ao tipo de camada a construir, as exigências são naturalmente diferentes. Por um lado, pode-se procurar garantir principalmente boas características mecânicas, ou, por outro lado, utilizar misturas que apresentem essencialmente uma boa aptidão para garantir boas condições de segurança e comodidade para os utentes. Porém, em qualquer um dos casos, devem ser garantidos determinados critérios de economia, durabilidade e facilidade de execução para que a mistura a desenvolver seja eficaz e economicamente viável ao longo do seu período de vida.

De um ponto de vista geral, na produção das misturas betuminosas deve-se considerar sempre algumas exigências nas seguintes características das mesmas: estabilidade, durabilidade, flexibilidade, resistência à fadiga, aderência, impermeabilidade e trabalhabilidade (Asphalt Institute, 1983).

O ligante betuminoso geralmente ocupa entre 10% a 15% do volume da mistura betuminosa e pode ser um destes três tipos de ligantes: 1) betumes puros, 2) emulsões betuminosas, 3) betumes modificados (Lopes, 2009). Na presente dissertação apenas se utilizaram betumes puros, pelo que apenas se fará uma abordagem deste tipo de ligante. Os betumes puros são obtidos por destilação direta do petróleo bruto, formando uma mistura química muito complexa de moléculas de natureza predominantemente hidrocarbonada. Estes ligantes betuminosos proporcionam ligações tenazes e flexíveis aos materiais com eles tratados, pois o betume é um material viscoelástico e o seu comportamento varia com a velocidade de aplicação das cargas, permitindo assim comportar-se como um material flexível, com baixo módulo

de rigidez e muito deformável. Deste modo, adapta-se às deformações e aos assentamentos das camadas do pavimento e da fundação sem fendilhar, conseguindo ao mesmo tempo comportar-se também como um material estável, com elevado módulo e resposta elástica, quando é sujeitado às ações solicitantes do tráfego (Lopes, 2009).

Outro aspeto importante relativo às condições de fabrico das misturas betuminosas é a temperatura de produção, pois as misturas podem ser classificadas como misturas a frio, misturas semi-quentes, misturas temperadas e misturas produzidas a quente (Cepsa, 2014). Na presente dissertação apenas se produziram misturas betuminosas a quente, porque o estudo do parâmetro temperatura de produção não foi um dos objetivos do trabalho, não obstante de no futuro se pensar em avaliar esse parâmetro.

Relativamente à matéria granular, destaca-se que esta constitui 90 a 95% do peso e 75 a 85% do volume das misturas betuminosas. A matéria que se utiliza normalmente é de origem natural proveniente de extração de areias, de cascalheiras e da exploração de pedreiras (Branco *et al.*, 2016). Estes agregados têm de apresentar excelentes características mecânicas para o efeito, devem ser provenientes da britagem de rochas de boa qualidade e precisam de ser resistentes à fragmentação, ao desgaste provocado pelo tráfego e as partículas dos agregados devem ter também uma elevada resistência ao polimento (Cepsa, 2014). Antes da sua aplicação, esta matéria granular é analisada e a sua granulometria é rigorosamente estudada, possibilitando assim a constituição de um corpo de agregados com diferentes dimensões: 1) agregados grossos, 2) agregados finos; 3) filer (Silva, 2005).

Atualmente, e ao contrário do desejado, o consumo de materiais de origem natural para produção de misturas betuminosas continua a ser muito elevado. Face a este problema, é necessário substituir estes materiais naturais por materiais reciclados, artificiais ou alternativos. Nesse contexto, o presente trabalho, propõe a utilização de agregados siderúrgicos (ASIC) como um material substituto dos agregados naturais, procurando assim promover uma gestão de recursos mais sustentável, utilizando resíduos oriundos da produção do aço.

2.2. Economia circular e sustentabilidade

Atualmente, um conceito que persistentemente continua e continuará a estar no centro das atenções de inúmeros governos, instituições, negócios e investigadores é a Economia Circular e a Sustentabilidade do planeta (European Asphalt Pavement Association, 2020). A nova Comissão Europeia, liderada pela Presidente Ursula von der Leyen, estabeleceu os objetivos mais ambiciosos na história no que toca a estes dois conceitos, através de vários documentos dos quais se destacam o “*The European Green Deal*”

e o “*Circular Economy Action Plan*”. A União Europeia procura acelerar a transição para um modelo de crescimento regenerativo, reduzindo a pegada de consumo de cada indivíduo, e espera dobrar a taxa de uso circular dos materiais na próxima década (European Commission, 2020).

Num contexto geral, o modo como se desenvolve, produz, utiliza, distribui e descarta um produto confere um grande impacto na vida económica, social e ambiental da sociedade. No final da vida de serviço dos produtos, muitos deles são encaminhados diretamente para as lixeiras, não sendo sequer reciclados, causando assim um grande desperdício de recursos para outros fins.

Numa economia circular, procura-se que os produtos mantenham todo o seu potencial para criar valor o maior tempo que seja possível. Ao reutilizar, reciclar ou renovar um produto já utilizado no primeiro ou segundo ciclo de vida, reduzem-se substancialmente as emissões de gases para a atmosfera, diminuem-se os gastos energéticos na cadeia produtor-cliente e, assim, minimizam-se drasticamente os impactos climáticos no planeta.

2.2.1. Da economia linear à economia circular no mundo

A facilidade para aceder e dispor de diferentes materiais e produtos contribuiu para aumentar o nível e a qualidade de vida na União Europeia. Porém, o atual modelo de consumo tem levado a uma extração excessiva de recursos, originando assim uma enorme pressão sobre o capital natural e sobre o clima do planeta (Eurostat, 2018).

A população mundial tem vindo a crescer, e atualmente tem cerca de 7,7 mil milhões de habitantes. Face a uma previsão do aumento da esperança média de vida, projeta-se que no ano de 2050 a população mundial ronde os 9,7 mil milhões de habitantes (United Nations, 2019). Deste modo, as tendências de consumo para 2050 também tendem a aumentar e apontam para a necessidade de extração de 180 mil milhões de toneladas de matérias-primas do planeta, que é oito vezes maior do que as extrações no ano de 1970 (United Nations Environment Programme, 2016).

Outro aspeto importante a considerar é a crescente urbanização, pois as cidades/áreas urbanas ocupam apenas 3% da superfície terrestre, mas mais de metade da população mundial habita nessas áreas (Undesa, 2014). Logo, essas zonas são as que consomem mais recursos (cerca de 75%) e têm um grande contributo para a maioria da emissão de gases com efeito de estufa ou GEE (Nações Unidas, 2018). Naturalmente, face ao número de pessoas que vivem nas cidades existe uma maior procura de recursos para suprimir as necessidades do estilo de consumo das pessoas. Assim, essas zonas tornam-se propícias para a ocorrência de altos riscos ambientais (emissões GEE, contaminação de águas e solo e

redução da biodiversidade) quando ainda se pratica uma economia linear de extrair – transformar – usar – descartar (Smart Waste Portugal, 2017).

O modelo de economia linear que “rege” grande parte do mundo apresenta um elevado e ineficiente consumo de matérias-primas que geram uma grande quantidade de resíduos ao longo de toda a sua cadeia de valor, aumentando assim os custos de gestão dos resíduos gerados e inutilizados, e cria dificuldades para alcançar as políticas e as metas ambientais traçadas (Ellen MacArthur Foundation, 2013). Desse modo, é necessário implementar mudanças drásticas no paradigma atual e deve-se apontar para um modelo de economia circular, esperando que este permita que a capacidade do planeta não seja ultrapassada ao ponto de se darem danos irreversíveis para a produção e exploração de bens necessários para a sobrevivência da humanidade.

Para se fazer a transição de uma economia linear para uma economia circular é necessário mudar o paradigma atual (Figura 2). A Estratégia Europa 2020, da Comissão Europeia, indica que se devem fomentar novos temas que dizem respeito ao desenvolvimento urbano e económico assentes num crescimento inteligente, sustentável e inclusivo. Partindo destas prioridades, procura-se desenvolver e atingir uma economia baseada no conhecimento e inovação, que seja eficiente e eficaz e que promova uma coesão social e territorial com taxas de emprego elevadas (European Commission, 2020).

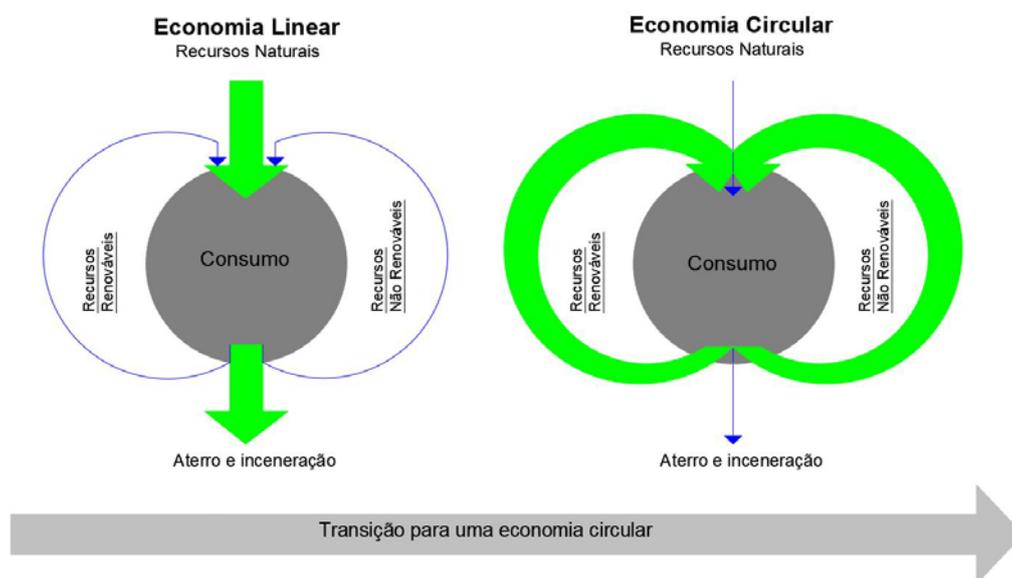


Figura 2 - Economia Linear versus Economia Circular (adaptado de Beatrice, 2017)

Em suma, a economia circular é um conceito associado à ideia de sistemas e economias em circuito fechado, onde os resíduos são colocados de volta no sistema para se tornarem em recursos para os processos de produção (Balanay e Halog, 2016).

2.2.2. Economia circular no contexto da indústria da pavimentação

O setor da construção civil em Portugal tem um enorme peso económico, em particular no número de empresas existentes, no número de pessoas que emprega e no volume de negócios do país. No entanto, esse peso económico não é independente da pegada ecológica do mesmo, pois as obras de construção civil consomem cerca de 75% dos recursos naturais extraídos da natureza. Portanto, é fácil entender as repercussões económicas, ambientais e sociais que o setor da construção civil tem em Portugal (Konstantinovas *et al.*, 2019). Assim sendo, é fundamental que se proceda a uma análise e atuação neste setor, pois não se podem manter os processos e procedimentos atuais e é incontornável acelerar a transição para uma economia circular.

Neste contexto, a indústria de pavimentos rodoviários tem um papel muito importante na transição para uma economia circular, atendendo ao facto de mais de 90% das estradas europeias serem pavimentadas com misturas betuminosas e que este setor foi identificado como um dos que mais contribui para a produção de CO₂ (EAPA, 2019). Por exemplo, no caso da reabilitação de pavimentos antigos, os métodos tradicionais incluem emissões atmosféricas geradas por equipamentos de construção, emissões de poeira associadas à demolição do pavimento, emissão de água para controle da poeira gerada e resíduos sólidos após a remoção do pavimento antigo (Cross *et al.*, 2011). Portanto, apenas neste pequeno exemplo percebe-se bem os problemas ambientais inerentes a esta indústria.

No entanto, alguns setores da indústria dos pavimentos rodoviários também têm vindo a contribuir para a redução de emissões de GEE com o desenvolvimento de tecnologias mais limpas e eficientes. Essas políticas de inovação e desenvolvimento vão-se mantendo e atualmente centram-se em três grandes pilares de ação (EAPA, 2019):

- Descarbonização do transporte rodoviário;
- Construção sustentável e a sua manutenção;
- Pesquisa e inovação.

Em primeiro lugar, a descarbonização é importante pelo facto de as emissões do transporte rodoviário terem vindo a subir desde 1990 e atualmente contribuírem para cerca de um quinto do total de emissões de CO₂ da EU. No entanto, nos últimos anos apenas se tem dado atenção ao contributo dos veículos, negligenciando as emissões produzidas pela própria estrada. Desse modo, a EAPA propôs que as autoridades europeias e nacionais estabelecessem considerações sobre as emissões de CO₂ dos veículos nas estratégias de manutenção das estradas, definindo assim políticas que garantam um estado mínimo de manutenção das vias rodoviárias.

Outro ponto chave de atuação, que vai ao encontro do desenvolvimento da presente dissertação de mestrado, consiste na utilização de metodologias e processos de construção mais sustentáveis e circulares, evitando assim exploração de recursos naturais virgens e a produção de novos resíduos. Para tal, devem-se desenvolver novas tecnologias como pavimentos betuminosos produzidos a menores temperaturas (misturas betuminosas temperadas e frias), a utilização de resíduos para substituir agregados virgens (escórias de diversos tipos) e a reutilização ou reciclagem das misturas betuminosas já existentes no pavimento, cujo os valores têm vindo a subir significativamente nos últimos anos, tal como se pode ver na Tabela 2.

Tabela 2 - Quantidade de misturas betuminosas recuperadas nas infraestruturas rodoviárias (adaptado de EAPA, 2020)

País	Misturas betuminosas recuperadas [ton]				
	2015	2016	2017	2018	2019
Áustria	1350000	1400000	1650000	1900000	1800000
Bélgica	1553994	1240000	1030	1687000	1637000
República Checa	2000000	1800000	2600000	2700000	2800000
Dinamarca	1300000	1150000	1165000	1185000	1255000
Finlândia	1160000	1150000	1200000	1300000	1500000
França	7000000	6370000	6400000	7817000	8074000
Alemanha	11000000	12000000	13000000	13000000	13400000
Reino Unido	3500000	3250000	3400000	6100000	6050000
Itália	9000000	9000000	9000000	9000000	9500000
Noruega	-	1112000	1101000	1004000	1173000
Espanha	410000	490000	494000	1165000	1486000
Turquia	1520000	3551167	2570589	1965000	1038000
USA	69700000	74200000	72500000	91700000	88000000
Total	109493994	116713167	115081619	140523000	137713000

Portanto, as autoridades governamentais devem estimular a indústria de pavimentação rodoviária a utilizar materiais mais sustentáveis, e também devem desenvolver planos regulamentares que estabeleçam parâmetros mínimos de reutilização de misturas betuminosas fresadas dos pavimentos, e máximos de exploração e utilização de recursos naturais virgens, pois só com planos e políticas vocacionados especificamente para cada indústria é que se pode atenuar o impacto ambiental das mesmas no planeta.

Nesse sentido, devem-se desenvolver políticas voltadas para um alcance efetivo dos objetivos de desenvolvimento sustentável, com a criação de processos e produtos inovadores que permitam garantir simultaneamente efeitos positivos do ponto de vista económico, técnico e ambiental (Mantalovas e Di Mino, 2019). Uma abordagem suplementada pelos princípios da economia circular está completamente alinhada neste pressuposto, e por isso devem-se definir modelos e estruturas de trabalho ajustadas a cada indústria e aplicadas em larga escala. Na indústria dos Pavimentos Rodoviários já existem alguns exemplos, tais como: 1) avaliação de sustentabilidade ao longo do ciclo de vida; 2) avaliação do ciclo de vida; 3) análise do custo do ciclo de vida; 4) decisão multicritério. Porém, um elemento essencial de apoio à decisão tem faltado em alguns modelos, que é a avaliação da circularidade dos recursos (Mantalovas e Di Mino, 2020). Nos domínios da investigação já se têm desenvolvidos alguns índices que indicam a circularidade dos materiais resultantes de misturas betuminosas, cujos índices foram desenvolvidos atendendo a vários critérios específicos desses materiais ao longo do seu ciclo de vida.

Partindo destas ideias, em 2017 surgiu um projeto internacional, o *PavementLCM*, com o objetivo de apoiar as Autoridades Rodoviárias Nacionais Europeias para introduzir a sustentabilidade e a economia circular no centro das suas práticas, garantindo formação em técnicas de Gestão do Ciclo de Vida (*Life Cycle Management* - LCM), agindo como uma plataforma de consultoria de conhecimento das melhores práticas assentes na sustentabilidade. Por último, este projeto procurou desenvolver um conjunto de ferramentas, diretrizes, conjunto de dados, roteiros e recomendações para fornecer às autoridades rodoviárias competentes (PavementLCM, 2017).

Por fim, o último pilar de ação é comum e fundamental para todas as indústrias e mercados de trabalho, o ramo da pesquisa e inovação. Este ramo tem de funcionar como um “motor” da construção das vias rodoviárias, deve ser sempre melhorado e testado de modo a garantir melhores condições de utilização e segurança para os utentes das vias, sem nunca menosprezar os aspetos ambientais e as metas de sustentabilidade já mencionadas anteriormente. Nesse contexto, com relações humanas e económicas cada vez mais fortes entre os ramos da investigação e da indústria, a evolução tecnológica e ambiental do setor da construção de vias rodoviárias será muito maior e os efeitos resultantes serão bastante positivos para o planeta em diversas áreas (EAPA, 2019).

2.3. Utilização da escória proveniente da produção do aço como agregado

A conservação dos recursos naturais, a reciclagem e a valorização de resíduos têm estado em voga na definição das políticas e na legislação sobre o meio ambiente, e daí torna-se imperativo para diversos

setores industriais adequar as suas atividades em função da legislação em vigor. Nesse contexto, de modo a satisfazer as metas de valorização de resíduos definidas no âmbito do programa Portugal 2020, o Decreto-Lei nº 18/2008 impôs a incorporação de pelo menos 5% de resíduos em obras de construção e manutenção de infraestruturas.

Deste modo, as indústrias são incentivadas a reclassificarem os seus resíduos não como um objeto sem valor, mas como um potencial recurso a ser valorizado. Partindo desses princípios, nesta dissertação definiu-se o objetivo de estudar misturas betuminosas com a utilização da escória de aciaria, proveniente da produção do aço, como um substituto do agregado convencional. Tendo em consideração que as suas propriedades mecânicas se assemelham às dos agregados naturais e que este resíduo é produzido em quantidades significativas, a sua incorporação em pavimentos permite diminuir o volume desse material depositado em aterro, promovendo o desenvolvimento sustentável (Nascimento *et al.*, 2018).

A atividade de produção de aço teve um grande crescimento nas últimas décadas e não tem parado de aumentar em termos globais, ainda que se denote na última década uma particular expansão em determinados países asiáticos, principalmente na China e no Japão. Contrariamente, na Europa verificou-se alguma estagnação e até um retrocesso da atividade desta indústria para o mesmo período em análise (World Steel Association, 2020c).

A nível mundial a produção de aço entre 1975 e 2019 teve um aumento de mais de 290%, registando em 2019 uma produção de cerca de 1869 milhões de toneladas. Ao longo deste período, a China foi dos países que mais cresceu na sua produção de aço bruto, produzindo em 2019 cerca de 996342 milhares de toneladas de aço bruto, o que representa cerca de 53% da produção mundial (World Steel Association, 2020d), tal como se pode ver na Figura 3.

Para um período mais curto de análise, entre 2010 e 2019, em Portugal também se verificou um aumento considerável na produção de aço bruto, cerca de 130%, produzindo atualmente 2033 milhares de toneladas (World Steel Association, 2020c).

Um dos problemas da indústria siderúrgica é a quantidade de subprodutos que são originados na produção do aço, dos quais se destacam as escórias de alto-forno, as escórias de aciaria, gases, poeiras e petroquímicos. Nos últimos vinte anos, a taxa de recuperação destes resíduos aumentou significativamente, pois têm sido feitos vários investimentos em tecnologias inovadoras e sinergias com outras indústrias de modo que a indústria do aço se aproxime do objetivo *zero-waste* (World Steel Association, 2020b).

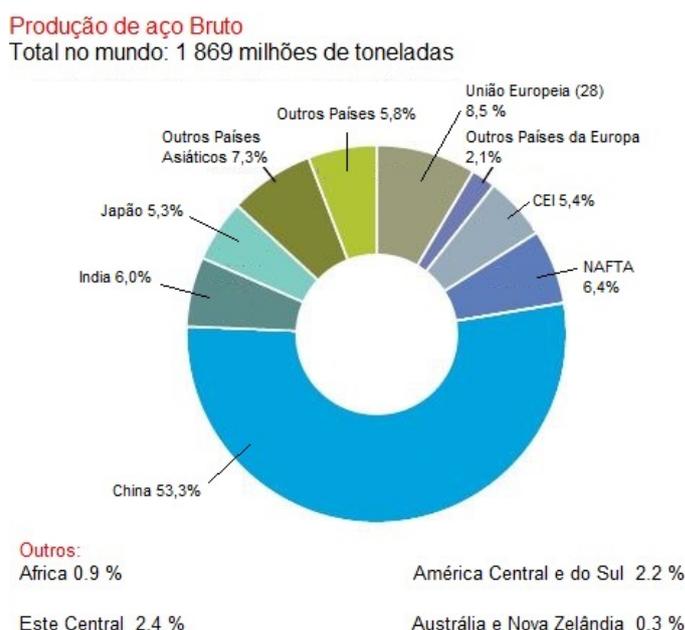


Figura 3 - Distribuição da produção de aço bruto em 2019 (World Steel Association, 2020d)

Segundo a *Euroslag*, associação europeia dos produtores e transformadores de escórias, em 2018 eram produzidas na Europa, anualmente, cerca de 16 milhões de toneladas de escórias de aciaria (*Blast Oxygen Furnace* - BOF, *Electric Arc Furnace* - EAF e secundárias) e cerca de 19 milhões de toneladas de escórias de alto forno (*Blast Furnace Slag* - BFS). Das escórias anteriormente mencionadas, cerca de 70% e 17%, respetivamente, eram utilizadas em infraestruturas rodoviárias (Euroslag, 2021).

De acordo com a *European Aggregates Association*, a área das construções rodoviárias absorve pelo menos 10% de todos os agregados naturais extraídos (Association, 2020). Assim sendo, a substituição parcial ou total dos agregados naturais pelas escórias siderúrgicas no fabrico de misturas betuminosas contribuirá de uma forma significativa para um desenvolvimento mais sustentável e, além disso, nos últimos tempos vão sendo apresentados alguns estudos que comprovam a utilização de escórias como uma excelente alternativa na área da pavimentação rodoviária (Fortunato *et al.*, 2018, Freitas e Motta, 2008, Lima, 2000)

No âmbito desta dissertação, procurar-se-á então dar mais um contributo para a valorização e reutilização do Agregado Siderúrgico Inerte para Construção (ASIC), resultante das escórias de aciaria, na área da pavimentação, evitando assim que o seu destino possa ser maioritariamente o depósito em aterros. Para além das suas excelentes características técnicas, ambientais e económicas já validadas, também se procurará verificar se o ASIC pode funcionar como um elemento potenciador de soluções de reparação de pavimentos, para acrescentar ainda mais valor a este subproduto industrial.

2.3.1. Produção do aço

A indústria de produção do ferro e do aço possui uma estrutura bastante complexa. No entanto, existem poucas tipologias diferentes de produção no mundo (Figura 4) e, além disso, os recursos de energia e de matérias-primas são semelhantes (He *et al.*, 2020).

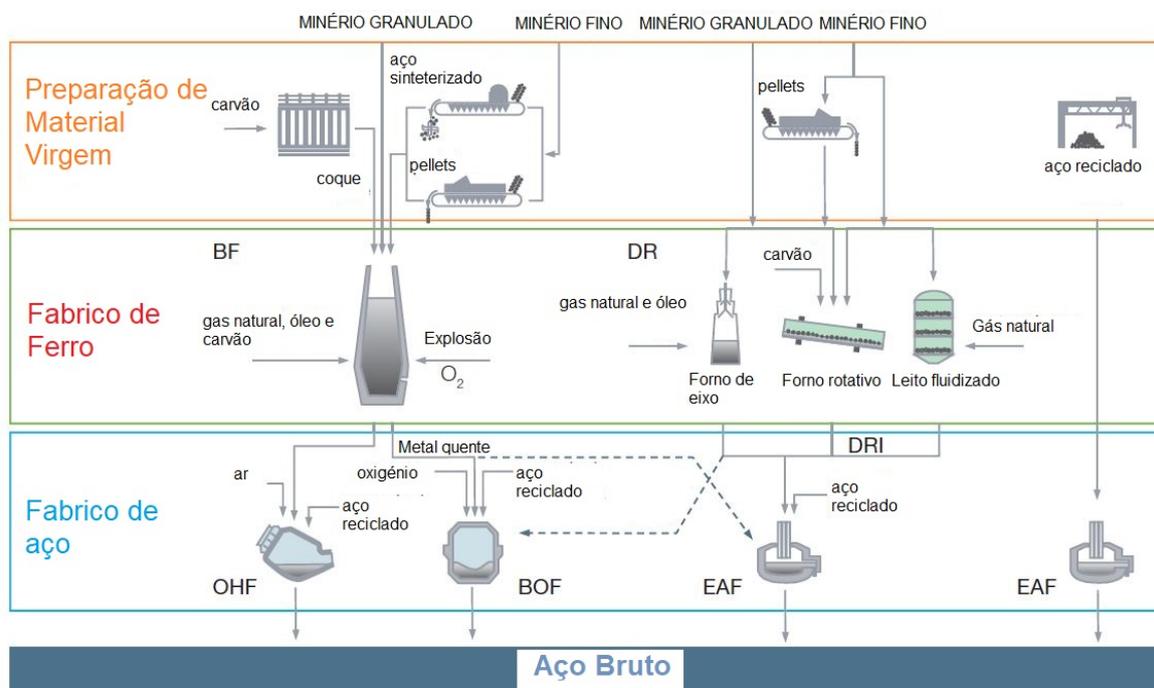


Figura 4 - Etapas de produção do aço nos diferentes fornos (adaptado de World Steel Association, 2020a)

Globalmente, a produção do aço pode ser dividida em dois tipos de siderurgia: i) a siderurgia integrada, onde as matérias primas são o minério de ferro e o carvão, e, ii) a siderurgia semi-integrada, onde se utiliza a sucata ferrosa para fusão (Branco, 2004). Existem três tipos de fornos para a produção do aço, o Siemens-Martin (*Open Heart* - OH), o conversor a oxigênio (*Basic Oxygen Furnace* - BOF) e o forno de arco elétrico (*Electric Arc Furnace* - EAF) (Ferreira, 2010). Os fornos OH e BOF são exemplos de siderurgias integradas e os fornos EAF são um exemplo de siderurgias semi-integradas.

Na rota de produção do aço no BOF, de uma forma sucinta, o minério de ferro (70 a 100% da matéria-prima total) é primeiramente processado em ferro (ferro fundido). Em seguida, o ferro fundido é convertido em aço num conversor e, por fim, após os processos de refinação, fundição e laminação, o aço é entregue em diversas formas (He *et al.*, 2020).

Na rota de produção do aço no EAF, a matéria-prima utilizada é o aço reciclado (70% da matéria-prima total) e alguns componentes, tais como ligas metálicas e cal, que podem ser adicionadas para ajustar a

composição química do aço. Posteriormente, a matéria-prima total é então derretida nos fornos elétricos e, por último, passa pela fase de afinação que é composta por três etapas, a primeira correspondente ao período de oxidação, a segunda ao de redução e a terceira ao do ajuste final da composição. Por fim, também passa por processos de conformação mecânica semelhantes à outra rota antes de ser entregue ao cliente final (He *et al.*, 2020).

Os fornos OH praticamente já não são usados, pois apenas 0,3% da produção mundial de aço em 2019 foi realizada neste tipo de forno. Os BOF são os maiores produtores mundiais, muito por causa da China, que sendo de longe o maior produtor mundial de aço, produz 90% do seu aço através deste tipo de fornos. Os EAF são os principais produtores de aço nos Estados Unidos, com quase 70% do aço a ser produzido nestes fornos. Na União Europeia, embora os fornos conversores de oxigénio sejam os mais utilizados, ainda se produz cerca de 41% do aço através dos fornos de arco elétrico (Figura 5).

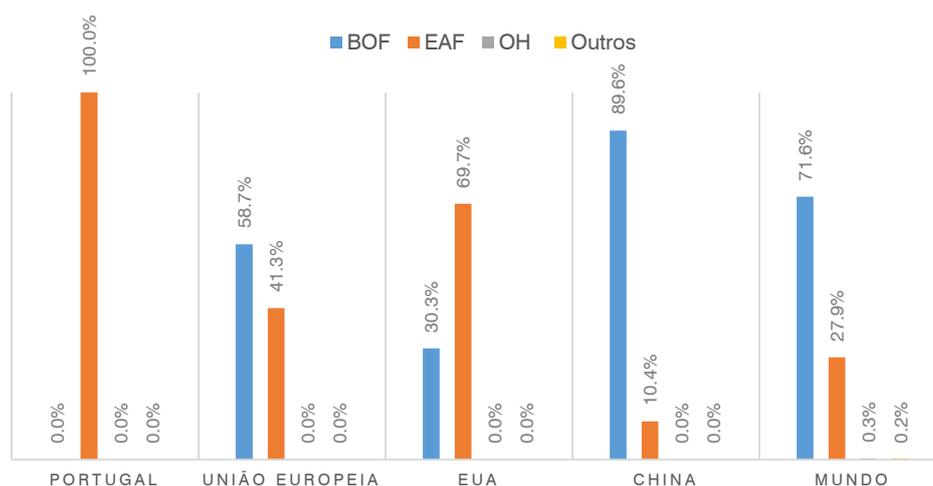


Figura 5 - Distribuição do tipo de fornos para produção do aço (adaptado de World Steel Association, 2020c)

Os tipos de fornos utilizados por cada país no mundo têm sofrido algumas mudanças, pois cada vez mais se tem apostado na transição para os fornos EAF, justificada pela enorme vantagem ambiental e económica. Ambientalmente, estes fornos apresentam um menor consumo em energia (-74%), em matérias-primas (-90%) e em água (-40%) e ainda reduzem em 97% os desperdícios/resíduos da extração mineira. Economicamente, a instalação dos fornos EAF custam quatro vezes menos, os custos de operação e manutenção anual reduzem em cerca 7% e também há um menor investimento para reduzir a poluição ambiental (BIR, 2015).

Neste contexto, do ponto de vista da economia circular e de um desenvolvimento mais sustentável, a China tem um papel fulcral. Este país é o maior produtor mundial de aço, nos BOF e nos EAF, mas a

quantidade de aço produzido na China nos EAF em 2019 apenas representava 10% da produção total (Figuras 5 e 6). Assim, se a China mudar a sua produção de aço para sistemas semi-integrados, os benefícios para o mundo poderão ser enormes do ponto de vista ambiental e económico.

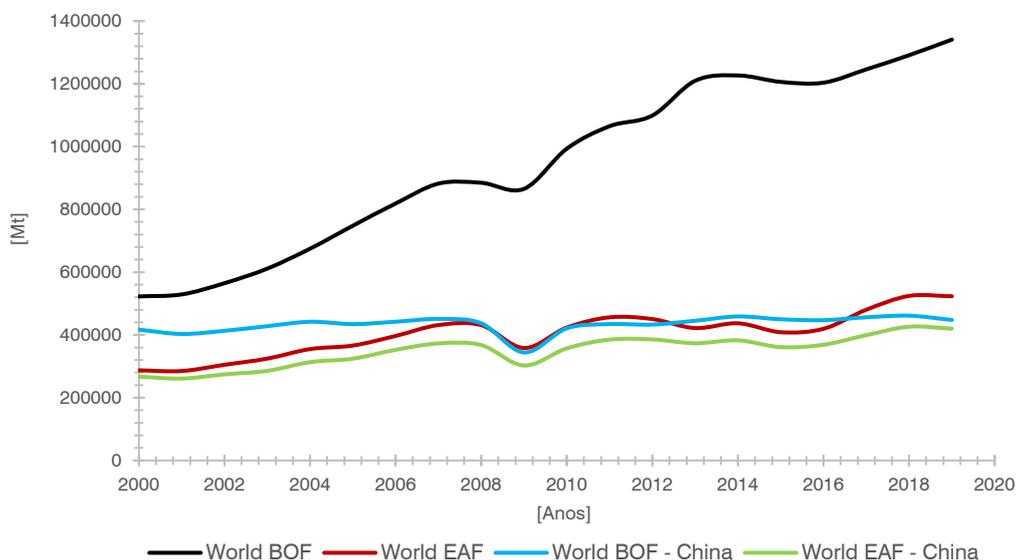


Figura 6 - Influência da China na Produção de aço bruto no Mundo nos BOF e EAF (adaptado de World Steel Association, 2021)

2.3.2. Agregado siderúrgico inerte para construção (ASIC)

A indústria do aço tem feito esforços significativos para encontrar novos mercados e aplicações para subprodutos da produção do aço, que incluem as escórias, gases de processo, alcatrão e benzeno (World Steel Association, 2015)

Das escórias produzidas, há dois tipos que são geradas em maior escala, as escórias de alto forno e as escórias de aciaria (Ferreira, 2010). Estas são um coproduto resultante da separação da parte metálica contida nos minérios de ferro ou nas sucatas ferrosas das restantes “impurezas” (Andrade, 2015).

A variabilidade das características e propriedades das escórias dependem no essencial de certos fatores, nomeadamente, o processo utilizado na produção do aço, o tipo de matéria-prima utilizada, a especificação do aço produzido e o processamento e tipo de arrefecimento dado as escórias (Machado, 2000). As escórias são um subproduto obtido a partir de uma destas fontes (Martinho *et al.*, 2007):

- Alto-forno – escórias líquidas que solidificam granulando por arrefecimento brusco quando lançadas em tanque de água, ou por arrefecimento lento se expostas apenas ao ar, ou ainda por um processo misto que utiliza ar e água, dando assim origem a um aglomerado de escórias;

- Forno de arco elétrico – escórias de aciaria resultantes da fusão de sucata metálica que podem ser aproveitadas depois da remoção dos elementos metálicos incluídos na escória inicial;
- Conversor – escórias constituídas essencialmente por óxidos resultantes da injeção do oxigénio puro na gusa líquida proveniente da primeira fundição que vem do alto-forno (podem estar misturadas com as escórias de forno-elétrico).

No seguimento desta dissertação apenas serão apresentadas com algum pormenor as características das escórias de aciaria, visto que apenas estas são objeto do presente estudo.

2.3.3. Escórias de aciaria e o seu processamento

Atualmente, em Portugal operam duas siderurgias semi-integradas, uma que se situa em Paio Pires, Seixal (SN Seixal), e a outra em S. Pedro de Fins, na Maia (SN Maia), que pertencem à Siderurgia Nacional (Cross *et al.*, 2011). Ambas as siderurgias contêm fornos de arco elétrico para produção de aço, daí que as escórias resultantes são as de aciaria. A Siderurgia Nacional foi privatizada em 2001, data que divide duas eras distintas de produção de aço em Portugal e, por conseguinte, justifica a existência de escórias completamente diferentes. Antes de 2001 também se produziam escórias de alto-forno, mas desde esse ano para cá, apenas passaram a ser produzidas escórias de aciaria (Ferreira, 2010).

As escórias de aciaria elétricas são obtidas em fornos de arco elétrico durante a conversão de sucata ferrosa em aço. Estas tanto podem ser oxidantes (produzida pela injeção de oxigénio no aço fundido para oxidar o carbono, silício e enxofre), denominadas como escórias negras, como podem ser redutoras, vulgarmente designadas por escórias brancas. As redutoras dão-se após o vazamento da escória oxidante através da adição de óxido de cálcio (Machado, 2000).

Durante o processo de produção do aço é eliminado carbono, óxido de cálcio e iões de alumínio, silício e fósforo e, desse modo, todos esses elementos eliminados fazem parte da composição da escória de aciaria (Ziemkiewicz, 1998). Portanto, dentro dos elementos que formam a escória estão silicatos de cálcio (CaSiO_3), óxido de silício (SiO_2), ferrita cálcica (CaFe_2O_4), óxido de magnésio (MgO), óxido de cálcio, entre outros (Martinho, 2014).

Da indústria siderúrgica resultam em média, por cada tonelada de aço líquido, cerca de 11 a 15% de escórias negras e 2 a 3% de escórias brancas (Correia *et al.*, 2006). Dos dois tipos de escórias (brancas e negras) resultantes da produção do aço, só as escórias negras são potencialmente valorizáveis em infraestruturas de transporte (pavimentos) e em obras geotécnicas. A utilização de escórias brancas não

é benéfica para estes tipos de aplicações pois apresentam teores em cal muito elevados (Ferreira, 2010). Assim, na presente dissertação de mestrado, o termo escória de aciaria passa a ser utilizado como sinónimo de escória de aciaria negra.

Tendo em vista a valorização destes resíduos em ASIC, primeiramente, as escórias de aciaria têm de passar por um processo de processamento. De forma sucinta, este processo é feito em seis etapas, nomeadamente, o arrefecimento primário e secundário, a eliminação das componentes metálicas, a parte da fragmentação e da crivagem e, por fim, a neutralização da cal livre de modo a eliminar uma possível expansão do ASIC após a sua aplicação em obra. Este processamento é mais dirigido e vocacionado para uma posterior utilização do material nas obras de engenharia civil, principalmente nos ramos da geotecnia e da pavimentação. As etapas do processamento da escória anteriormente enunciadas podem ser divididas em três fases (Roque *et al.*, 2006):

- 1.^a Procede-se ao escoamento e ao arrefecimento da escória para um local impermeabilizado e com uma respetiva drenagem devidamente controlada (Figura 7a e 7b). O arrefecimento primário pode ser executado ao ar ou através de jatos de água ou de forma mista. Esta etapa é muito importante para o controlo da porosidade e da textura da escória. Caso o arrefecimento seja muito rápido, o material terá menor densidade e, por conseguinte, uma maior porosidade. Se o arrefecimento for lento, o material terá uma estrutura mais cristalina e maior resistência.
- 2.^a Em seguida, o arrefecimento secundário é a última etapa do arrefecimento que é feita de igual forma, mas já num local onde a “escória não processada” (código 10 02 02, segundo a Lista Europeia de Resíduos ou LER, Portaria n.º 209/2004) possa ser armazenada (Figura 7c). Nesta fase, com o auxílio de tambores magnéticos, retira-se a componente metálica mais grossa que ainda possa estar presente na escória (Figura 7d). Esse material ferroso é encaminhado novamente para a alimentação do forno de arco elétrico. Após isso, faz-se o processamento de britagem e crivagem da escoria catalogada como “resíduos do processamento de escórias” (código 10 02 01 da LER).
- 3.^a Na última fase, é feita a valorização da escória de aciaria, crivando-se o ASIC. Primeiramente, faz-se a separação granulométrica pelo método da peneiração até se produzir a granulometria desejável (Figura 7e). Por último, realiza-se o armazenamento e o acondicionamento do ASIC por um período mínimo de 2 a 3 meses. Este deve ser feito de modo que exponha o material aos agentes atmosféricos, nomeadamente para a sua hidratação e para eliminar alguma cal livre que exista na sua composição (Figura 7f).



Figura 7 - Fases do processamento das escórias (Roque et al., 2006)

As escórias de aciaria são produzidas pela Siderurgia Nacional-EPL, S.A., mais especificamente pela Harsco Environmental, e o seu processo de controlo de produção em fábrica é certificado pela *Certif* de acordo o Regulamento da EU nº 305/2011, segundo as normas EN 13242 de 2007, EN 13043 de 2002 e EN 13043 de 2004, de modo a cumprir todos os requisitos necessários para a sua reutilização.

2.3.4. Caracterização química e física da escória de aciaria

As escórias de aciaria são um subproduto industrial que é duro, rugoso, limpo, de densidade elevada e resistente à abrasão. A sua composição química e mineralógica depende de vários fatores, dos quais se destacam o processo de fabrico do aço e processamento dado a esse material. Do ponto de vista químico, as escórias são maioritariamente constituídas por silicatos de cálcio, óxido de ferro, óxido de magnésio, óxido de manganês e alumina, formando assim estes constituintes cerca de 95% da composição total (National Slag Association, 2014). Segundo dados bibliográficos, na composição mineralógica das escórias verifica-se que certas fases mineralógicas estão presentes, nomeadamente, a wustite, a hematite, kirschsteinite, akermanite, silicato de cálcio, ghelenite, entre outras (SAMARIS, 2006).

No que concerne às propriedades físicas e mecânicas, este material apresenta valores de absorção de água entre 1 a 2% para material grosso e na ordem dos 4% para material fino, é um material com alta porosidade das partículas (pode ser superior a 10%) e comparativamente aos agregados naturais

apresenta uma densidade de partículas mais elevada (3,2 a 3,9). As escórias apresentam também níveis de durabilidade aceitáveis, têm um elevado ângulo de atrito interno (40° a 45°) que contribui para uma elevada estabilidade. Adicionalmente, possui um índice de suporte californiano (*California Bearing Ratio* - CBR) elevado, acima dos 300%, e possui também uma elevada resistência à fragmentação (Lima, 2000, Martinho, 2014, Silva, 1994). Uma propriedade que também importa referir, neste caso indesejável, é a sua expansibilidade, pois este material é bastante expansível devido à sua constituição e, portanto, é um ponto a ser estudado antes da sua possível aplicação em obra. Desse modo, devem-se estudar e usar metodologias que viabilizem a sua utilização em misturas betuminosas sem comprometer o desempenho estrutural do pavimento rodoviário, nomeadamente, métodos de estabilização da expansibilidade do ASIC (Andrade, 2015).

2.3.5. Caracterização ambiental da escória de aciaria

A escória do aço possui uma grande variabilidade de componentes na sua constituição química, podendo existir certas quantidades de materiais pesados que podem causar graves danos ambientais e para a saúde pública (Andrade, 2015). No sentido de valorização dos materiais alternativos, para além da exigida caracterização geotécnica, também é exigida a caracterização ambiental do mesmo, de acordo com ensaios laboratoriais e de campo, tendo esses como objetivo a identificação da existência de algum potencial poluente no material (SAMARIS, 2006).

Neste contexto, para a caracterização ambiental das escórias, atualmente existem ensaios realizados *in situ* e *ex situ*. Em contexto laboratorial (*ex situ*), o ensaio normalmente utilizado na Europa é o ensaio de lixiviação de extração ou método descontínuo realizado segundo as normas europeias EN 12457-2 ou EN 12457-4. Existe outro ensaio de lixiviação, o ensaio de coluna, que segundo alguns estudos simula melhor o comportamento ambiental do ASIC observado em campo. Em contexto de campo (*in situ*), também existem ensaios de lixiviação, que são realizados com recurso a uma pré-instalação de lisímetros. Estes ensaios são menos conservativos do que os laboratoriais, pelo que o risco de inviabilização da reciclagem ou reutilização de alguns resíduos é menor (ALT-MAT, 1999).

Além da composição química dos lixiviados, e para uma boa caracterização ambiental do produto, também se deve analisar o valor de pH e a condutividade elétrica, dada à influência destes parâmetros no meio ambiente. Para determinação do pH devem-se realizar ensaios de pH estáticos e a sua avaliação deve ser feita periodicamente (Reid, 2001). Normalmente, os valores de pH das escórias de aciaria variam entre 10 e 14 dado à presença de cal livre e, por conseguinte, estes materiais não devem estar próximos

de águas paradas. Além disso, quando este material é utilizado em estruturas, o desempenho estrutural pode ficar comprometido devido ao seu elevado pH, pois a presença deste pode levar à corrosão certos materiais (por exemplo, tubagens de alumínio ou galvanizadas) quando são colocados em contacto direto (Ferreira, 2010).

Em Portugal, o ASIC produzido pela MEGASA-Siderurgia Nacional-EPL, S.A., mais especificamente pela Harsco Environmental, tem de cumprir todos os requisitos ambientais de forma a poder ser comercializado. Neste caso, a entidade *DAP Habitat* certificou o ASIC com a emissão de Declaração Ambiental do Produto (DAP), que tem a validade até 23-01-2024. Esta avaliação foi realizada segundo as normas ISO 14025, EN 15804 de 2013 e EN 15942.

Ao longo destes últimos anos têm-se realizado vários estudos e caracterizações ambientais das escórias de aciaria noutros países. Por exemplo, um dos que mais se destacou foi realizado na Suécia, onde se avaliou a composição química de um lixiviado recolhido de um pavimento com a incorporação de ASIC nas camadas granulares após 10 anos de serviço. Constatou-se que as amostras retiradas quase não sofreram alterações, comparando com as amostras no estado inicial. Logo, estes resultados evidenciaram que a utilização do ASIC não provoca qualquer risco ambiental (Suer *et al.*, 2009). Em Itália, segundo um estudo de Sorlini *et al.* (2012), também se estudou a utilização de escórias dos fornos de arco elétrico em camadas betuminosas de base, sub-base e desgaste e verificou-se que, apesar de terem 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.

Num estudo realizado recentemente em Portugal, fez-se a caracterização ambiental através de ensaios de lixiviação, numa primeira fase a ASIC e a agregados naturais graníticos e, em seguida, realizou-se o mesmo ensaio em misturas betuminosas de desgaste com os dois tipos de agregados. Com estes ensaios foi possível comparar a utilização de ASIC *vs.* agregados naturais. Os ensaios a ambos agregados mostram que todos os materiais respeitam os limites especificados no DL-183/2009 para deposição em aterro de inertes. Relativamente aos ensaios às misturas betuminosas, ambas também cumprem genericamente com os requisitos ambientais. Com esse estudo prevê-se que a utilização do ASIC em pavimentos rodoviários não apresente problemas ambientais do ponto de vista de lixiviação de componentes para as linhas de água ou lençóis freáticos (Nascimento *et al.*, 2018).

Assim sendo, através de diversos estudos constata-se que a utilização e aplicação de escórias de aciaria em pavimentos rodoviários é ambientalmente segura. No entanto, a avaliação ambiental do ASIC deve

continuar a ser feita periodicamente, bem como o trabalho de investigação e dinamização deve continuar, de modo a descobrir novas aplicações para este resíduo.

2.3.6. Estudos e aplicações do ASIC na construção civil

Dadas as recentes preocupações governamentais com a valorização dos resíduos, as escórias siderúrgicas passaram a apresentar novas utilizações, que têm sido estudadas de forma mais corrente, das quais se destacam (Eurofer, 2020): 1) construção de infraestruturas rodoviárias; 2) produção de cimento, betão e aditivos; 3) usos na Engenharia Hidráulica; 4) uso como fertilizantes na agricultura.

Paralelamente a essas utilizações, em primeiro lugar, realizaram-se diversos estudos científicos para comprovarem se o material a utilizar tem as condições técnicas necessárias para o fim pretendido. No ramo de investigação e desenvolvimento na área dos pavimentos rodoviários têm sido desenvolvidos vários estudos científicos com a incorporação do ASIC na construção de pavimentos rodoviários, quer em camadas granulares, quer em camadas betuminosas.

Quanto às camadas granulares dos pavimentos, Parente *et al.* (2003) compararam o desempenho mecânico de misturas de solo/agregado natural com misturas de solo/ASIC (50% e 70%), quando estes são utilizados em camadas de sub-base e base de pavimentos. Para determinação das diferenças entre as misturas, realizaram ensaios triaxiais cíclicos e ensaios CBR. Em seguida, com os resultados obtidos verificaram que as misturas de solo com incorporação de ASIC apresentavam maiores valores de massa específica seca máxima, menores valores de teor em água ótimo e apresentavam valores três vezes superiores aos das misturas de solo com agregados naturais no ensaio CBR. Os valores dos módulos reversíveis obtidos nos ensaios triaxiais para as misturas solo/ASIC também eram superiores às misturas solo/agregado natural.

Do ponto de vista técnico, como constataram Lima *et al.* (2000) *apud* Freitas e Motta (2008), as propriedades mecânicas do ASIC podem ser equivalentes ou superiores às dos materiais normalmente utilizados em pavimentação. Esses autores observaram que os pavimentos de bases e sub-bases formadas por escória exibiam módulos de resiliência e uma capacidade de distribuição de carga mais elevados se comparados a estruturas de pavimentos convencionais. Segundo IHOBE (1999) *apud* ROHDE (2002) a utilização do ASIC também é extensível às camadas de sub-base, mas indicam que devido ao contacto direto com o solo, os valores elevados do pH do ASIC e a presença de alguns materiais pesados pode levar à contaminação do meio ambiente e pode ser prejudicial para a saúde pública.

Em Portugal, com o objetivo de validar as propriedades do ASIC estudadas em laboratório, fez-se um estudo de campo com o desenvolvimento de um trecho experimental em aterro e avaliou-se o comportamento em camadas de base, de leito de pavimento e de aterro. O trecho era composto por três seções: i) uma composta por saibro granítico no corpo de aterro e no leito do pavimento e por agregados britados na camada de base; ii) uma seção com saibro granítico também no corpo do aterro e no leito pavimento, mas com ASIC na camada base, e; iii) por último, uma seção composta apenas por ASIC nas três camadas. Após a conclusão do mesmo, fizeram-se campanhas de monitorização periódicas de avaliação do desempenho mecânico e ambiental do ASIC e constatou-se que o desempenho mecânico nas camadas com ASIC era superior ao medido naquelas construídas com materiais naturais (Gomes Correia *et al.*, 2010). Do ponto de vista ambiental fizeram-se ensaios de lixiviação em campo com lisímetros e verificou-se que do ponto de vista da sua lixiviação, o ASIC pode ser considerado como um material inerte, ou seja, não se prevê que venha a contribuir para uma degradação do meio ambiente (Gomes Correia *et al.*, 2009, Gomes Correia *et al.*, 2010). Passados dez anos da data de conclusão do trecho, fez-se uma inspeção visual e uma nova caracterização mecânica com ensaios de deflexão e concluiu-se que o pavimento na zona onde se aplicou ASIC encontra-se, em geral, em melhor estado visual e exibe um melhor comportamento estrutural quando é comparado com as zonas adjacentes que foram construídas com materiais naturais (Fortunato *et al.*, 2018).

No que se refere às camadas betuminosas, Wu *et al.* (2007) investigaram a possibilidade de aplicação de escória de aciaria como agregado em pavimentos. Através da realização de ensaios de difração de raio X (*X-Ray Diffraction* - XRD), microscópio eletrónico de varrimento (*Scanning Electron Microscope* - SEM) e análise de porosimetria por intrusão de mercúrio (*Mercury intrusion porosimetry* - MIP) avaliaram as propriedades mecânicas, químicas e as mudanças físicas da escória do aço. Com os resultados obtidos constataram que a aplicação da escória do aço como agregado fornecia uma abordagem inovadora e mais rentável, do ponto de vista económico e sustentável.

Outros estudos também revelaram que a substituição das frações mais grossas dos agregados naturais em misturas betuminosas por ASIC confere às misturas resultantes uma maior resistência à fadiga e uma maior resistência à fissuração (Fakhri e Ahmadi, 2017b, Kavussi e Qazizadeh, 2014). Porém, também existem algumas desvantagens, pois a geometria do ASIC tem uma forma mais angular e uma textura mais porosa, levando a um aumento do consumo de betume. As misturas que contêm apenas ASIC podem ter problemas de compactação e uma percentagem de vazios na mistura acima dos valores das misturas de referência (Kavussi e Qazizadeh, 2014, Oluwasola *et al.*, 2015).

Em outro estudo, Kara *et al.* (2004) indicam que a reciclagem de escória de aço como agregado em camadas de base, ligação e desgaste betuminosas de pavimentos rodoviários é viável. Fakhri e Ahmadi (2017a) vão mais além, e indicam que a inclusão de agregados provenientes da escória de aciaria em misturas betuminosas recicladas melhoram a sua resistência ao fendilhamento e, por outro lado, a incorporação de material fresado em misturas com agregados de origem siderúrgica também melhora os níveis de suscetibilidade à humidade dessas misturas. Em suma, esta combinação de materiais garante enormes vantagens técnicas e ambientais, conseguindo superar certos parâmetros técnicos das misturas convencionais.

Em estudos mais recentes, Nascimento *et al.* (2018) estudaram a incorporação de ASIC em duas misturas diferentes, uma mistura para camada de desgaste e outra para camada de base, ambas com a incorporação de 75% de ASIC. Face aos resultados obtidos em diversos ensaios verificou-se que as misturas apresentaram um excelente comportamento nos ensaios de sensibilidade à água e de resistência à deformação permanente. Apenas no ensaio de resistência à fadiga é que as misturas de ASIC apresentaram um desempenho ligeiramente inferior comparativamente com as misturas de referência. Não obstante esse resultado, os autores concluíram que o comportamento funcional das misturas com ASIC é igual ou até superior ao das misturas convencionais. Logo, concluíram que o ASIC tem aptidão para ser aplicado em misturas betuminosas de desgaste.

Por fim, é importante referir que nos últimos anos já existem centrais dedicadas à produção misturas betuminosas com agregados siderúrgicos, como a central *SteelPhalt* (Figura 8) situada em Rotherham, no Reino Unido, e já se tem vindo a fazer aplicações desses agregados em camadas betuminosas, como se pode ver na Figura 9.



(a)



(b)

Figura 8 - Central de produção de misturas betuminosas com ASIC (SteelPhalt, 2021)



Figura 9 - Exemplo de aplicação de uma mistura betuminosa com ASIC num pavimento (Derek Lewis, 2021)

2.4. Autorregeneração no betão betuminoso

Os materiais autorregeneráveis (*self-healing*, na terminologia Anglo-Saxónica) podem acrescentar um grande valor para a sociedade e para a economia. O desenvolvimento da capacidade de autorregeneração no betão betuminoso é uma excelente inovação tecnológica, pois este fenómeno permite aumentar a durabilidade do mesmo, tal como se apresenta na Figura 10, e assim dá-se um grande impulso para uma construção economicamente mais sustentável (NL Agency, 2011).

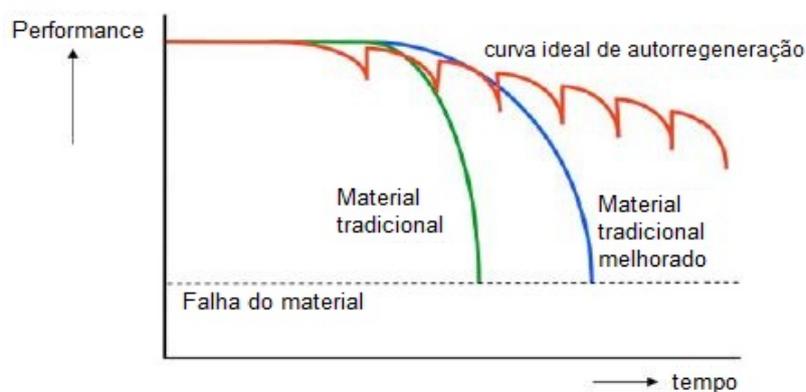


Figura 10 - Objetivo da curva de um material com capacidade de autorregeneração (adaptado de NL Agency, 2011)

O betão betuminoso tem a habilidade de se reparar a ele próprio quando sofre danos mecânicos ou quando é induzido termicamente por via artificial (García, 2012). As fissuras nos pavimentos flexíveis são causadas essencialmente pelas ações do tráfego diário e pelos agentes atmosféricos. Sabe-se que este material tem capacidade de se autorregenerar. Portanto, quando ocorre uma microfissura no pavimento, o processo de cura procede-se automaticamente e geralmente aumenta a durabilidade do pavimento. Porém, este efeito muitas vezes acaba por ser ineficiente e não é possível controlá-lo, pois a autorregeneração à temperatura ambiente tanto pode ocorrer num intervalo de horas como de dias, e a influência do tráfego também é prejudicial (García *et al.*, 2013).

Desde os anos 60 que o fenómeno da autorreparação em materiais betuminosos tem sido um tema de estudo a nível laboratorial e em campo (Bazin e Saunier, 1967). No entanto, ultimamente tem-se apostado em novas tecnologias que permitam melhorar a eficiência da autorregeneração nas misturas betuminosas através de um ou múltiplos estímulos externos (González *et al.*, 2018, Norambuena-Contreras *et al.*, 2016).

Este fenómeno de regeneração pode ser explicado de uma forma sucinta. Quando se forma uma fenda no betão betuminoso, alguns pontos de ambas as faces da fenda ficam em contacto (Figura 11), e caso a temperatura do pavimento esteja entre os 30 e os 70 °C, o ligante funciona como um fluido newtoniano, e pela diferença de pressões existentes na fenda, por capilaridade, o betume sobe pela fenda até a preencher a sua totalidade (García, 2012).

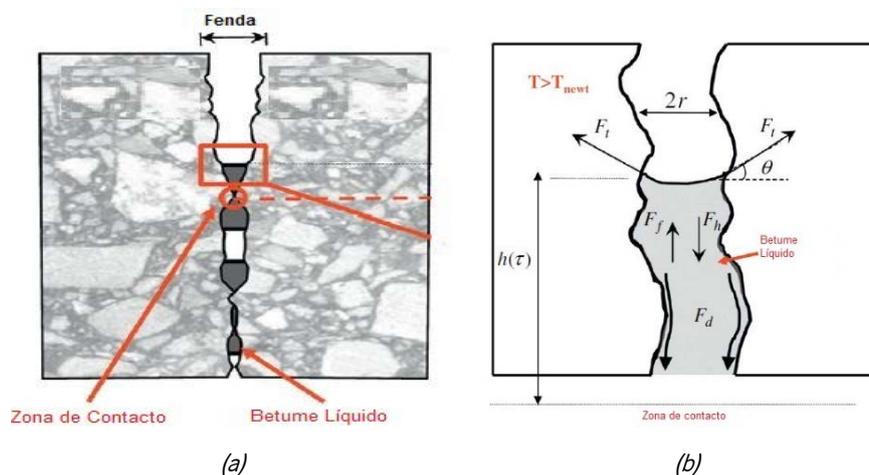


Figura 11 - Esquema de forças atuantes no processo de regeneração no betão betuminoso: (a) zoom out da fenda; (b) zoom in da fenda na zona de contacto entre faces (adaptado de García *et al.*, 2013)

A regeneração da mistura betuminosa tem uma elevada importância no seu desempenho. Todavia, o fenómeno da autorregeneração nas misturas betuminosas está longe de ser completamente entendido. Diferentes autores propuseram que existem dois tipos de autorreparação e forças associadas, como se pode observar na Figura 12 (Kim *et al.*, 2003, Song *et al.*, 2005, Yuan *et al.*, 2020): i) reparação adesiva na interface do agregado com o betume; ii) reparação coesiva dentro do ligante viscoelástico (betume) da mistura betuminosa.

Adicionalmente, outros investigadores relataram que a autorregeneração nas misturas betuminosas é influenciada por cinco fatores (García *et al.*, 2015): i) a viscosidade do betume; ii) a composição química do betume; iii) a idade da estrada; iv) o tipo de agregados; v) a densidade dos agregados.



Figura 12 - Tipos de forças (adesão e coesão) que ocorrem numa mistura betuminosa (adaptado de Guo et al., 2017)

Para medir a capacidade autorregenerativa das misturas betuminosas, diversos métodos foram desenvolvidos, quer em laboratório, quer em campo, nas escalas micro, meso e macro, para além dos métodos de simulação computacional. Os métodos em macro escala são os mais utilizados para medir a regeneração, principalmente os que medem o reflexo desse fenómeno sobre as propriedades mecânicas dos materiais betuminosos. Esses métodos podem ser divididos em ensaios de fadiga ou de fratura e em medições em campo. Nesta dissertação apenas se utilizaram os dois primeiros ensaios.

Em seguida, apresentam-se características das técnicas de reparação atrás mencionadas. No entanto, o foco principal será feito na técnica de aquecimento por um micro-ondas, dado que esta foi a técnica laboratorial utilizada na presente dissertação de mestrado.

2.4.1. Aquecimento por indução eletromagnética

O aquecimento por indução é um fenómeno complexo que combina o eletromagnetismo com a transferência de calor. Hoje em dia, este fenómeno tem sido usado nos pavimentos rodoviários como uma técnica de manutenção preventiva. Comparativamente com as técnicas convencionais, o aquecimento por indução permite estender a vida útil dos pavimentos a um menor custo e sem a necessidade de consumo de novos materiais virgens.

O betão betuminoso é um material não condutor, mas quando se adicionam partículas condutoras à mistura, tais como fibras de aço, as propriedades eletromagnéticas da mistura são aumentadas e, assim, a mistura torna-se suscetível para o aquecimento por indução (Apostolidis, 2015).

As misturas betuminosas podem ser aquecidas no local sob um campo magnético variável no tempo. Esse campo magnético forma-se quando a corrente elétrica alternada é aplicada numa bobina de indução que é colocada por cima do betão betuminoso. Assim, de acordo com a lei de Faraday, o campo magnético formado induz correntes nos aditivos (fibras de aço) colocados dentro da mistura e eles são

aquecidos com base nos princípios da lei de Joule. Dessa maneira, o calor gerado nos aditivos aumenta localmente a temperatura na envolvente dos mesmos, permite que o betume derreta e assim as microfissuras são preenchidas e as propriedades mecânicas da mistura são restabelecidas (Figura 13).

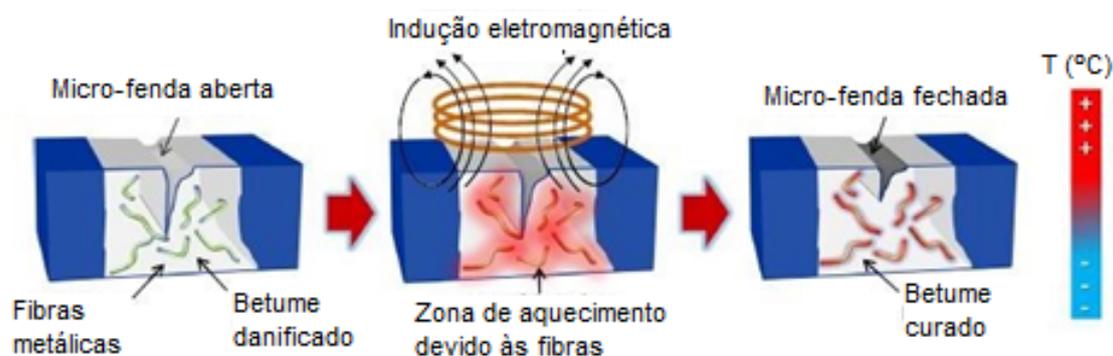


Figura 13 - Regeneração por aquecimento por indução eletromagnética (adaptado de Gonzalez-Torre e Norambuena-Contreras, 2020)

Naturalmente, a taxa de eficácia do aquecimento por indução é dependente da frequência do campo magnético, das propriedades elétricas e térmicas e da permeabilidade magnética das misturas betuminosas (Apostolidis, 2015).

Nos diversos estudos científicos que têm sido feitos neste tema, existem alguns parâmetros diferenciadores em cada estudo. Por exemplo, a percentagem de adição de fibras, o tipo de fibras, a frequência e a potência da corrente elétrica, a temperatura de aquecimento, a constituição da mistura e o tipo de medição utilizado para quantificar a autorregeneração. Em seguida, apresentam-se alguns estudos com as suas conclusões e considerações finais.

Liu *et al.* (2012) estudaram a capacidade de regeneração em misturas betuminosas porosas com a incorporação de fibras de lã de aço. Utilizou-se 1,27% de fibras em relação à massa total da mistura e os resultados mostraram que o aquecimento por indução (50 kW e 70 kHz) aumentou a taxa de reparação das vigas betuminosas ensaiadas. Neste estudo também foi demonstrado que a temperatura ótima para a regeneração ronda os 85 °C e que a vida à fadiga da mistura betuminosa porosa aumentou significativamente (extensão num rácio de 63,9%), graças aos múltiplos períodos de indução.

Num dos estudos mais recentes, Garcia *et al.* (2020) adicionaram 1,1% de fibras de lã de aço em relação ao peso total de uma mistura betuminosa porosa. O aquecimento por indução, claramente identificado na Figura 14, foi gerado por uma bobina com uma potência de 2,8 kW e uma frequência de 348 Hz com um período de indução de 90 segundos.

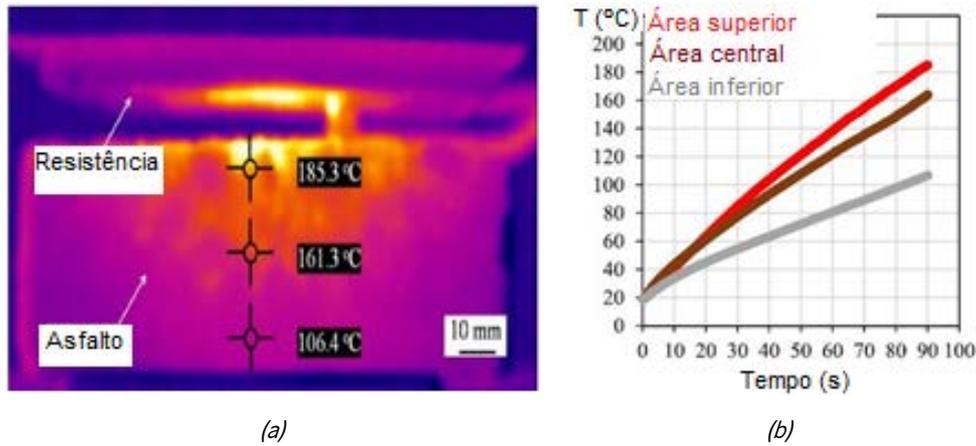


Figura 14 - (a) Imagem infravermelha da viga ensaiada; (b) Evolução da temperatura superficial da viga ao longo do tempo (adaptado de Garcia et al., 2020).

No mesmo estudo, a partir dos resultados obtidos num ensaio de fadiga em três pontos, mediu-se a eficácia de autorregeneração da mistura betuminosa. O objetivo desse estudo foi determinar o nível de dano que o aquecimento por indução seria capaz de recuperar (*Healing Index*), mediante a aplicação da indução ao fim de várias percentagens de vida de fadiga já consumidas. Com os resultados obtidos, concluiu-se que existe um momento ideal para aplicar a indução, que corresponde ao momento em que a extensão da vida de fadiga é máxima (Figura 15a). Em todos os casos, o momento ideal rondou os 35% de vida ou durabilidade total da mistura betuminosa (Figura 15b). Pela análise da Figura 15c também se concluiu que a extensão da vida de fadiga pode ser superior a 100%, e até a 200%, desde que o processo de indução seja aplicado no tempo certo ($N_h = 0,35 \times N_{0,5}$).

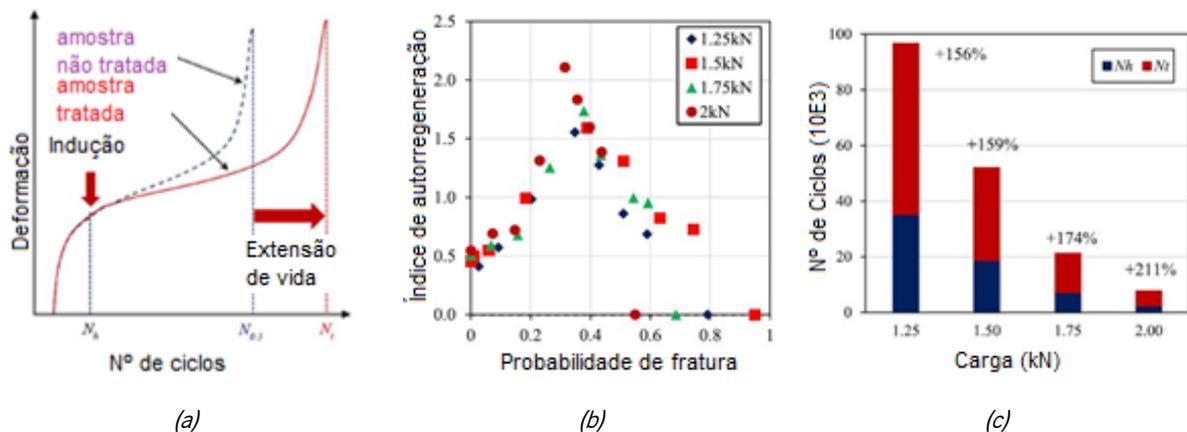


Figura 15 - (a) Esquema de extensão da vida à fadiga por meio de aquecimento por indução; (b) Índice de autorregeneração versus fração do dano; (c) Número ideal de ciclos para aplicar a indução (N_h) e o número extra de ciclos após indução (N_f) (adaptado de Garcia et al., 2020).

2.4.2. Aquecimento por indução com micro-ondas

O aquecimento por micro-ondas usa as características do material (condutividade elétrica, teor em água e propriedades dielétricas) para assegurar uma geração de calor rápida e direta no material (Dogan Halkman *et al.*, 2014).

Este tipo de aquecimento é considerado como uma técnica promissora para promover a autorregeneração de misturas betuminosas com a adição de fibras metálicas. Com o aquecimento cria-se um campo magnético alternado e as moléculas polares mudam a sua orientação e o seu movimento natural é perturbado. Como resultado, a temperatura da mistura sobe, e com a adição das partículas ferrosas, a temperatura da mistura ainda aumenta de forma mais rápida devido à boa condutividade dessas partículas (Liu *et al.*, 2018). Assim, conforme já foi explicado anteriormente, com o aumento da temperatura do betão betuminoso, o ligante funde e preenche as micro fendas existentes por capilaridade, contribuindo assim para o processo de regeneração da mistura betuminosa.

Norambuena-Contreras e Gonzalez-Torre (2017) realizaram um estudo com o objetivo de avaliar a influência do tempo do aquecimento por micro-ondas no comportamento de autorregeneração de misturas betuminosas (Figura 16a). Em contexto laboratorial estudaram quatro misturas betuminosas, onde usaram a mesma granulometria de agregados e o mesmo teor em betume, apenas variando a quantidade de fibras de lã de aço usadas (2, 4, 6 e 8% do volume total de betume). O processo de indução ocorreu por quatro períodos diferentes: 10, 20, 30 e 40 segundos.

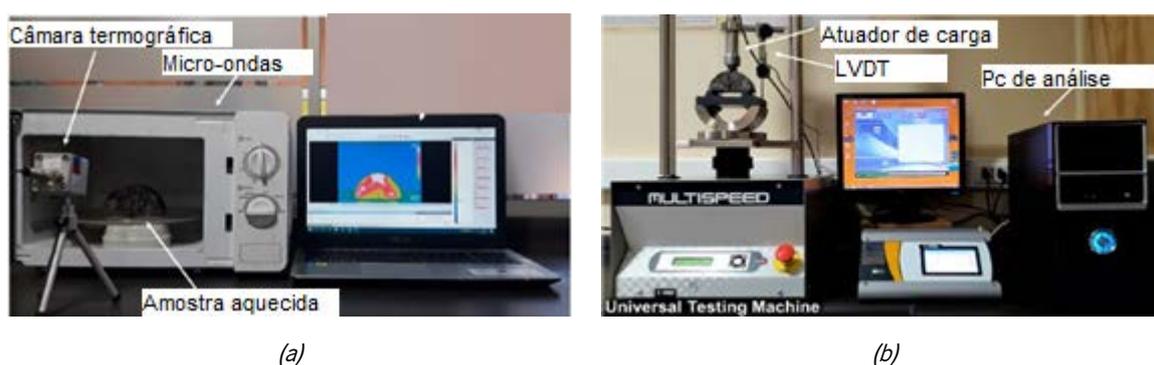


Figura 16 - (a) Ensaio de aquecimento por micro-ondas (b) Ensaio de flexão em três pontos (adaptado de Norambuena-Contreras e Gonzalez-Torre, 2017)

Para medir o nível de regeneração (*Healing Level*- HL) do betão betuminoso, os autores usaram o ensaio de flexão em três pontos (Figura 16b). Submeteram os provetes de cada mistura ao ensaio, antes e depois da indução, repetindo este processo dez vezes. O HL foi calculado com base na Equação 1, pelo

quociente entre a máxima força resistente do provete de ensaio antes da indução (F_i) e a máxima força resistente após indução (F_r).

$$HL = \frac{F_r}{F_i} \quad (1)$$

Deste estudo científico, Norambuena-Contreras e Gonzalez-Torre (2017) concluíram que o tempo de aquecimento é a variável mais influente para um excelente nível de regeneração, enquanto que a variação da percentagem das fibras não teve uma grande influência. Também descobriram que o tempo ótimo de aquecimento, para um micro-ondas com uma potência de 700 W e uma frequência de 2,45 GHz, foi de 40 segundos, tempo este com que se atingiu os resultados mais altos do HL (Figura 17).

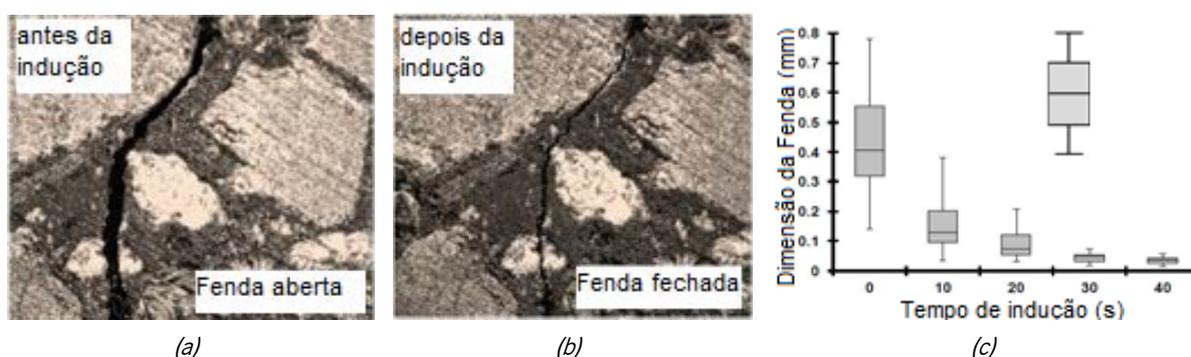


Figura 17 - (a) Dimensão da fissura antes da indução; (b) Dimensão da fissura após indução ($t=40$ s); (c) Representação da abertura de fenda em função do tempo de indução (adaptado de Norambuena-Contreras e Gonzalez-Torre, 2017).

Fakhri *et al.* (2020) estudaram a evolução dos efeitos da adição de resíduos metálicos em misturas betuminosas produzidas a quente. Utilizaram três tipos de aditivos: aparas de aço, fibras de aço e filer de escoria de aço. Produziram cinco tipos de mistura, uma de referência, uma com fibras de aço (1, 2 e 4% do volume total de betume) e filer comercial, outra com aparas de aço (1, 2 e 4% do volume total de betume) e filer comercial e as últimas duas, apenas trocaram o filer comercial por filer de escoria de aço para verificar a influência do mesmo. No processo indução utilizaram uma câmara termográfica nos três períodos de medição: 20, 30 e 40 segundos. Para medirem o HL usaram um processo semelhante ao indicado no artigo anterior, e submeteram os provetes de cada mistura betuminosa a um ensaio de flexão em três pontos, antes e depois da indução, repetindo este processo cinco vezes (Figura 18).

Em função dos resultados obtidos, Fakhri *et al.* (2020) constataram que as misturas betuminosas que continham filer de escoria de aço exibiam valores mais altos de resistência à humidade e à deformação. Além disso, graças às imagens da câmara termográfica verificaram que as amostras com o filer da

escoria do aço apresentam uma melhor distribuição superficial da temperatura. Por fim, os resultados do HL demonstraram que a adição do filer da escoria de aço em misturas betuminosas com percentagens iguais ou inferiores a 2% de fibras aumenta significativamente o HL e reduz o tempo necessário de indução da mistura.



Figura 18 - Esquema dos procedimentos adotados no estudo de adaptado de Fakhri et al. (2020)

Os resultados positivos da utilização da escória do aço como filer, que foram verificados no estudo anterior, faz antever que na presente dissertação os resultados que se venham a obter com a utilização da escoria do aço como um agregado também possam ser igualmente positivos e promissores.

2.4.3. Aplicação de agentes encapsulados rejuvenescedores nas misturas betuminosas

O envelhecimento do betume é uma das principais causas que leva a ações de reabilitação e de conservação nos pavimentos. Tendo como objetivo alterar as propriedades dos betumes envelhecidos, através de diversos estudos científicos foram propostos diversos materiais para tentar solucionar esse problema, nomeadamente, os recuperadores, os agentes de amolecimento, os rejuvenescedores e os óleos aromáticos. Segundo García *et al.* (2010), os agentes de amolecimento são usados para baixar a viscosidade do betume envelhecido, enquanto que os rejuvenescedores têm capacidade para restaurar as propriedades físicas e químicas das misturas betuminosas.

Uma das tecnologias mais adotadas ultimamente é a utilização de rejuvenescedores encapsulados (Figura 19), que são partículas esféricas que contém cerca de 70% de óleo, por exemplo do tipo girassol.

Estas cápsulas são adicionadas à mistura como um aditivo (Gómez Mejjide *et al.*, 2016), visto que o óleo é um poderoso solvente para o betume.



Figura 19 - Exemplo de cápsulas rejuvenescedoras: (a) Cápsula com óleo de girassol e outros constituintes (2 mm) (Garcia *et al.*, 2015); (b) Cápsula de alginato de cálcio (0,5 mm) (Al-Mansoori *et al.*, 2018).

Com as cargas do tráfego, as cápsulas vão ficando danificadas e acabam por romper numa certa altura. A resistência da cápsula às cargas externas deve ser estudada e bem definida de modo a que esta rompa no preciso momento em que ocorram as primeiras fissuras no pavimento (Al-Mansoori *et al.*, 2018). Em geral, as cápsulas tendem a romper na periferia das fissuras, pois a concentração de tensões aí existentes é muito significativa (Figura 20). Tendo por base o objetivo final de aumentar a durabilidade do pavimento, resumidamente, o óleo libertado pelas cápsulas difunde-se pela mistura e leva a que a viscosidade do betume reduza localmente e, assim, o betume consegue facilmente difundir-se e preencher as fissuras (Garcia-Hernández *et al.*, 2020).

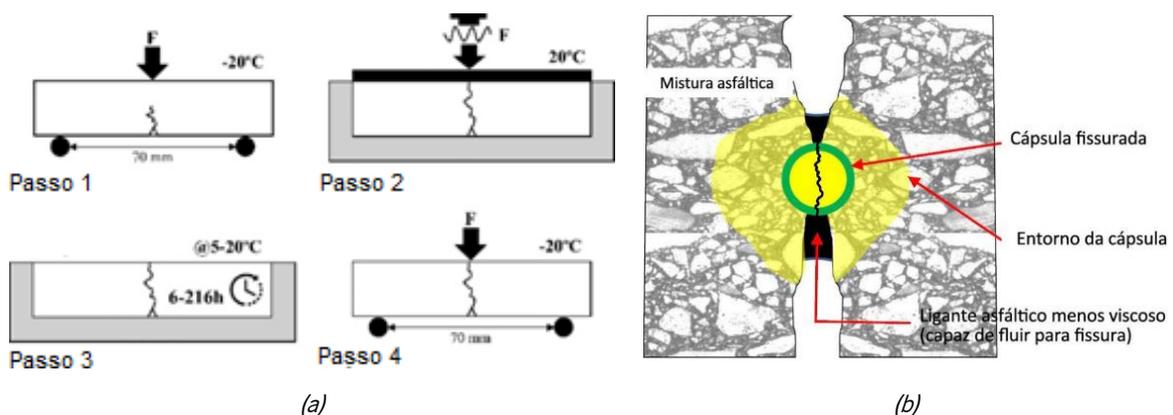


Figura 20 - Processo de rompimento da cápsula rejuvenescedora: (a) Etapas do ensaio de fratura-regeneração (adaptado de Al-Mansoori *et al.*, 2018); (b) zoom in do passo 3 (Barros, 2020)

Garcia-Hernández *et al.* (2020) utilizaram um método mecânico macro para medir a autorregeneração em misturas betuminosas com agentes encapsulados incorporados. Dada a boa capacidade para

promover regeneração, utilizaram cápsulas de óleo de girassol com membranas de alginato de cálcio. Realizaram três tipos de misturas (*Stone Mastic Asphalt* - SMA, misturas porosas ou drenantes - PA e misturas densas - DA), produzindo provetes com e sem cápsulas para cada mistura betuminosa. Coloraram 0,5% de cápsulas em função do peso total de cada mistura.

Para medir a eficiência da autorregeneração, Garcia-Hernández *et al.* (2020) utilizaram ensaios com carregamentos repetidos a uma frequência de 0,4 Hz, segundo uma configuração de flexão três pontos (Figura 21). De modo a determinar a influência para carga no processo de regeneração, aplicaram quatro cargas diferentes: 1,25, 1,5, 1,75 e 2 kN (PA e SMA) e 2, 2,5, 3 e 3,5 kN (DA). Os resultados do ensaio foram determinados repetindo o ensaio em séries de doze provetes de ensaio para cada nível de carregamento em estudo.

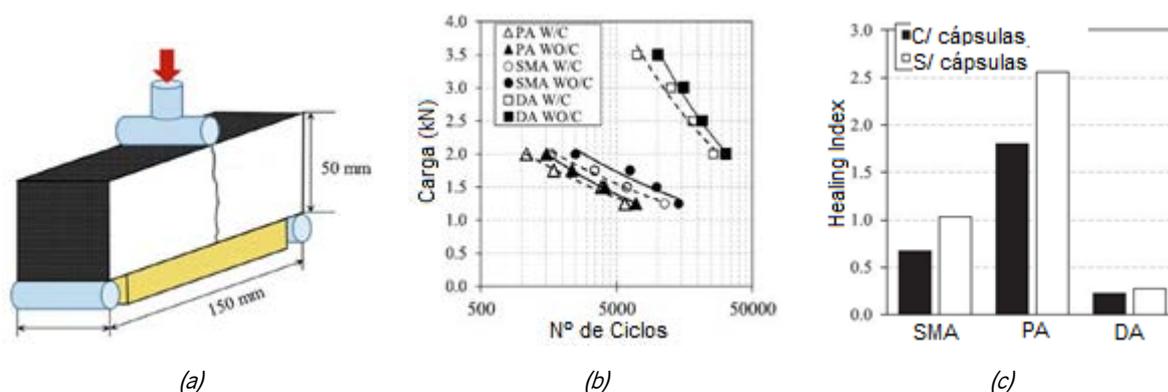


Figura 21 - (a) Representação do ensaio de flexão em três pontos; (b) Curvas Wohler dos ensaios de fadiga nas diferentes misturas; (c) Rácio de regeneração nas três misturas com 2 kN de carga (adaptado de Garcia-Hernández *et al.*, 2020)

Em função dos ensaios mecânicos executados nesse estudo, os autores verificaram que para a carga de 2 kN, as cápsulas aumentavam o rácio de regeneração em 35, 30 e 19% para as misturas SMA, PA e DA, respetivamente. Assim, com dados obtidos Garcia-Hernández *et al.* (2020) supuseram que o índice máximo de regeneração alcançado está relacionado com o período de rompimento das cápsulas e com o tipo de dano criado na mistura betuminosa.

Por último, no mesmo artigo também se verificou que geralmente as primeiras fendas visíveis começavam a aparecer quando as cargas cíclicas eram superiores a 35% de $N_{0,5}$ (Figura 22). Portanto, os autores consideraram que esse é o momento ideal para se aplicar uma técnica de manutenção, pois a partir desse momento as micro fendas evoluem para macro fendas e o aí processo de autorregeneração já não é eficaz.

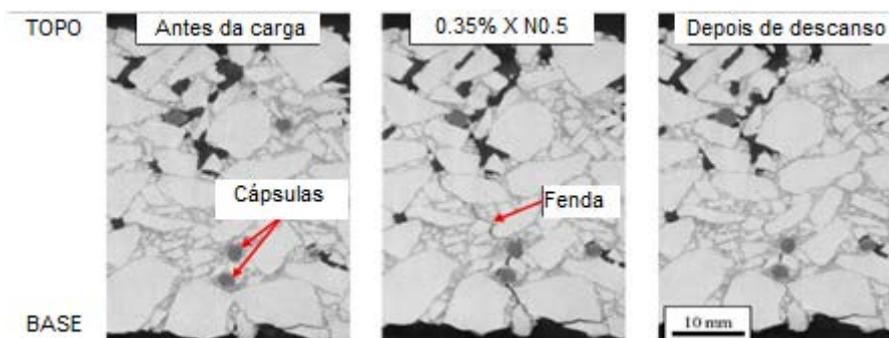


Figura 22 - Secção de uma mistura betuminosa: (a) antes do ensaio; (b) depois de 35% de $N_{0,5}$; (c) depois do repouso
(adaptado de Garcia-Hernández et al., 2020)

Como se pode verificar, vários autores já estão a estudar métodos de indução e de estudo da autorregeneração de misturas betuminosas, mas ainda não existem procedimentos normalizados para se proceder à avaliação desta propriedade. Nesse sentido, os trabalhos apresentados neste segundo capítulo foram essenciais para as fases de definição das metodologias de ensaio e de análise de resultados apresentadas nos capítulos seguintes desta dissertação.

3. MATERIAIS E METODOLOGIA DE ESTUDO

O programa experimental desta dissertação de mestrado foi realizado no Laboratório de Infraestruturas de Transporte do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho. Este programa teve por base a caracterização dos diversos materiais utilizados, a formulação das misturas betuminosas e a realização de diversos ensaios laboratoriais, de maneira a atingir os objetivos propostos para esta dissertação.

Inicialmente, face à reduzida experiência na produção de misturas de betão betuminoso que incorporem resíduos industriais para potenciarem a sua autorregeneração, procedeu-se a uma pesquisa do tipo de misturas mais utilizadas, à seleção do tipo de betume a aplicar, e à definição do tipo e percentagens de resíduos a incorporar, entre outros aspetos. Em seguida, já com a definição dos materiais a utilizar, fez-se a caracterização e análise granulométrica dos agregados e realizaram-se estudos de caracterização ao betume. No seguimento do trabalho, fez-se a formulação e produção das misturas betuminosas e, por fim, nesta primeira fase, caracterizou-se a volumetria e a geometria das vigas e dos provetes obtidos com as diferentes misturas betuminosas.

A segunda fase do trabalho laboratorial compreendeu o estudo das metodologias e dos procedimentos a utilizar no processo de indução das misturas betuminosas por micro-ondas. Analisaram-se as características e as funcionalidades dos equipamentos utilizados (micro-ondas e câmara térmica) e, conjugando essas informações com as de outros estudos científicos já apresentados, realizaram-se ensaios de indução em provetes circulares até se definir a potência do micro-ondas e o tempo de indução ideal para promover o processo de autorregeneração das misturas betuminosas.

Nas últimas duas fases do processo experimental, executaram-se três ensaios laboratoriais, tendo em vista a avaliação do desempenho de autorregeneração (*self-healing*) das misturas betuminosas. Dois desses ensaios foram executados na terceira fase do estudo, e o outro ensaio foi realizado na quarta e última fase do estudo. Na terceira fase submeteram-se as vigas de cada mistura aos ensaios de flexão em quatro pontos para avaliação da resistência ao fendilhamento por fadiga e determinação do módulo de rigidez. Na quarta fase, utilizaram-se provetes semicirculares para realizar um ensaio de fratura ou rotura por flexão em três pontos, o *Semi-Circular Bending Test* (SCB).

Nas duas últimas fases, os provetes foram sujeitos a múltiplos ciclos compostos por ensaios de caracterização mecânica e por ensaios de indução, e com os respetivos dados obtidos conseguiu-se fazer a avaliação do nível de regeneração (HL) das misturas betuminosas produzidas nesta dissertação.

3.1. Identificação dos materiais utilizados

Inicialmente, o processo experimental incidiu sobre a formulação e a produção de três misturas betuminosas diferentes, cujo fabrico necessitou de diversos materiais, dos quais se destacam os agregados naturais graníticos, o filer comercial de calcário, os agregados siderúrgicos inertes para construção (ASIC), as fibras de lã de aço e o betume convencional.

Quanto aos agregados, sabe-se que estes fazem parte dos constituintes da mistura betuminosa, mais concretamente da fração sólida, representando em média cerca de 90 a 95% do peso total da mistura e cerca de 75 a 85% do volume da mistura (Branco *et al.*, 2016).

Para a produção das misturas betuminosas utilizaram-se agregados de origem natural granítica, bem como agregados de origem siderúrgica, o ASIC, material esse que é proveniente da escória de aciaria da produção do aço. Na produção das misturas betuminosas também se incorporou filer, neste caso também de natureza calcária.

Os agregados naturais de origem granítica foram adquiridos na empresa Bezerras, Lda., e estes são certificados do ponto de vista técnico, ambiental e de desempenho de acordo com a norma EN 13043 de 2004. Por outro lado, o filer comercial utilizado neste trabalho, de origem calcária, foi fornecido pela empresa DST Group.

Em relação ao ASIC, a totalidade do mesmo foi fornecido pela empresa DST Group, no âmbito de um projeto em investigação em curso. Este material foi produzido na MEGASA-Siderurgia Nacional-EPL, S.A., mais especificamente na Harsco Environmental, cujo processo de controlo de fabrico é certificado de acordo com as normas EN 13242 de 2007, EN 13043 de 2004 e também é certificado ambientalmente segundo as normas ISO 14025, EN 15804 de 2013 e EN 15942. É importante salientar que todos os agregados selecionados para a produção das misturas foram esquartelados e armazenados em estufa de acordo com a norma EN 13043 de 2004.

Para se efetuar o presente estudo, escolheu-se como ligante um betume convencional de penetração da classe 35/50 da Galp Energia, por ser o mais utilizado pelas empresas do setor. O ligante betuminoso também foi fornecido pela empresa DST Group em latas de 5 litros.

Em seguida, a Tabela 3 apresenta as especificações técnicas do betume de pavimentação selecionado para realizar este trabalho, que cumpre com os requisitos exigidos pela norma EN 12591 de 2011 (Galp Energia, 2020).

Tabela 3 - Especificações do betume convencional de penetração normal 35/50

Caraterísticas		Método de ensaio	Unidade	Classe 35/50
Penetração a 25 °C		EN 1426	0,1 mm	35-50
Temperatura de amolecimento		EN 1427	°C	50-58
Temperatura de inflamação		EN ISO 2592	°C	≥ 240
Solubilidade		EN 12592	%	≥ 99,0
Índice de penetração		EN 12591 - Anexo A	-	-1,5 a +0,7
Temperatura de fragilidade de <i>Fraass</i>		EN 12593	°C	≤ -5
Viscosidade cinemática a 135 °C		EN 12595	mm ² /s	≥ 370
Teor em parafinas		EN 12606-2	%	≤ 4,5
Resistência ao envelhecimento	Penetração retida		%	≥ 53
	Aumento da temperatura de amolecimento	EN 12607-1	°C	≤ 11
	Variação de massa (valor absoluto)		%	≤ 0,5

3.2. Caraterização dos agregados

Devido aos objetivos principais desta dissertação, a caraterização dos agregados utilizados na produção das misturas betuminosas não foi pormenorizada. Apenas se fez a caraterização geométrica, nomeadamente a análise da curva granulométrica, quer dos agregados naturais, quer do ASIC.

Além disso, na presente dissertação utilizam-se os agregados naturais e o ASIC do mesmo lote de um estudo de Nascimento *et al.* (2018), e por essa razão também foi desnecessário a realização de novos ensaios laboratoriais para a caraterização do ASIC. Nesse estudo determinou-se a massa volúmica e a absorção de água do agregado, quantificou-se a resistência ao desgaste por atrito, avaliou-se a capacidade do material para aplicação na camada de desgaste e, por fim, também se avaliou a afinidade entre o ASIC e o betume. Com base nesses ensaios, os autores concluíram que é viável a substituição dos agregados naturais pelo ASIC.

A análise granulométrica consiste na peneiração da amostra do material (agregados) seco ao ar por um conjunto de peneiros de malha quadrada com aberturas consecutivamente mais reduzidas. Com este ensaio determina-se a distribuição das partículas com base na sua dimensão geométrica e consegue-se calcular a sua respetiva percentagem sob o peso da totalidade na amostra. Este ensaio geométrico foi realizado conforme a norma EN 933-1 de 2014, pelo método de peneiração mecânica a seco.

Neste trabalho experimental são analisadas as duas frações de ASIC apresentadas na Figura 23, ou seja, o ASIC 0/10 de dimensão entre 0 e 10 mm e o ASIC 10/14 compreendido entre 10 e 14 mm.



Figura 23 - Frações de ASIC utilizadas neste trabalho

Em relação aos agregados naturais graníticos avaliaram-se três frações: 0/4, 4/6 e 6/14. A análise granulométrica a cada uma das frações foi feita para posteriormente, na fase de formulação das misturas betuminosas, se calcular a sua distribuição percentual de forma a obter uma curva adequada ao fuso pretendido. Na Figura 24 apresentam-se graficamente as curvas granulométricas das várias frações de ASIC, agregados naturais e filler.

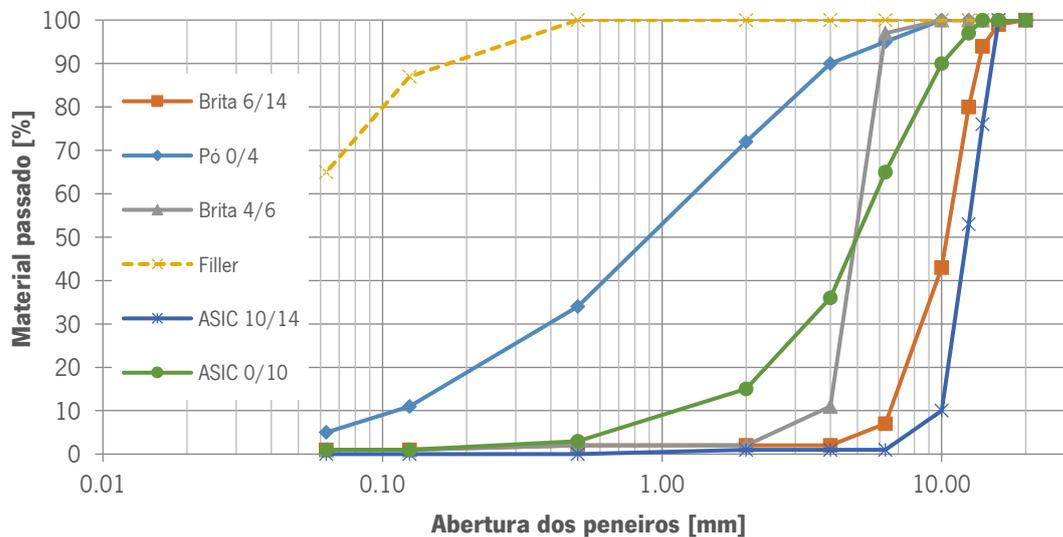


Figura 24 - Curvas granulométricas dos agregados e do filler utilizados neste trabalho

3.3. Métodos aplicados para caracterização do ligante betuminoso

Na presente dissertação foi utilizado sempre o mesmo tipo de ligante betuminoso para se produzir as misturas betuminosas, o betume de penetração normal de classe 35/50. Em seguida, apresenta-se a descrição dos métodos utilizados para a caracterização do mesmo.

3.3.1. Ensaio de penetração

O ensaio de penetração (Figura 25) permite determinar a consistência do betume à temperatura de 25 °C. Este ensaio foi realizado de acordo com a norma EN 1426 e consiste na medição, em décimos de milímetros, do quanto uma agulha padrão penetra verticalmente em uma amostra de betume sob condições específicas de temperatura (25 °C), carga (100 gramas) e tempo (5 segundos). O penetrómetro utilizado neste ensaio é da marca Controls, modelo 81-B0101/D, semiautomático.

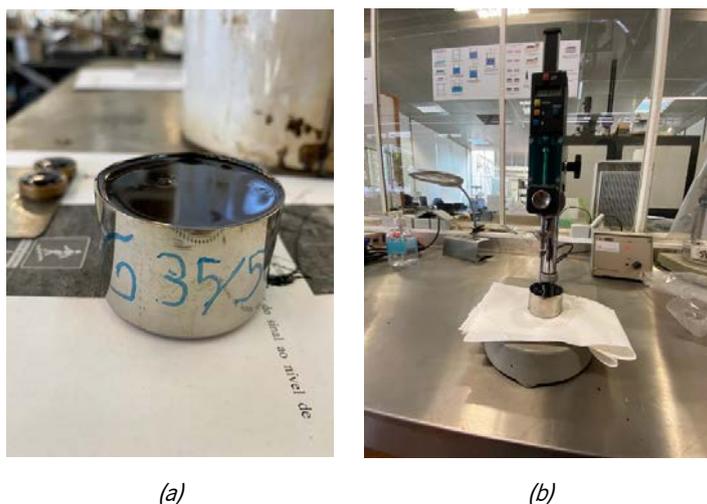


Figura 25 - (a) Cápsula de betume 35/50; (b) Penetrómetro e respetiva cápsula

Para a realização deste ensaio encheu-se uma cápsula com o betume em análise e deixou-se arrefecer até atingir a temperatura ambiente. Seguidamente, colocou-se a cápsula em banho maria à temperatura de 25 °C durante 1 hora. Após esse passo, ligou-se o penetrómetro, colocou-se a agulha (100 gramas) e a amostra no local de ensaio. Por fim, fez-se a penetração da agulha no betume durante 5 segundos em três pontos da cápsula, pontos esses espaçados pelo menos em 1 cm entre si e da borda. A profundidade média dos resultados das três medições corresponde ao valor final deste ensaio. No final deve-se verificar a validade do mesmo e se foram cumpridos os parâmetros da Tabela 4.

Tabela 4 - Critérios para realização do ensaio de penetração de betumes

Penetração [0,1 mm]	Profundidade interna [mm]	Diâmetro interno [mm]	Volume aproximado da amostra [ml]	Tempo de condicionamento no ar ou em água [min]
Pen < 160	35	55	80	60
160 ≤ Pen < 330	45	70	170	75
330 ≤ Pen < 500	60	70	230	90

É importante salientar que a classificação dos betumes utilizada nos países europeus é determinada em função dos valores obtidos neste ensaio de penetração.

3.3.2. Ensaio de ponto de amolecimento (ensaio “anel e bola”)

O ensaio de ponto de amolecimento, vulgarmente denominado por ensaio “anel e bola”, é um ensaio que permite calcular a temperatura de amolecimento do betume. Desse modo, determina-se a temperatura a que o betume perde a sua estabilidade, ou seja, o momento em que o betume apresenta uma consistência demasiado baixa para suportar cargas.

Tendo por base a norma EN 1427 deste ensaio, em primeiro lugar preparam-se dois anéis com betume e deixa-se arrefecer (Figura 26a). Em seguida, rasa-se a superfície do mesmo com uma espátula.

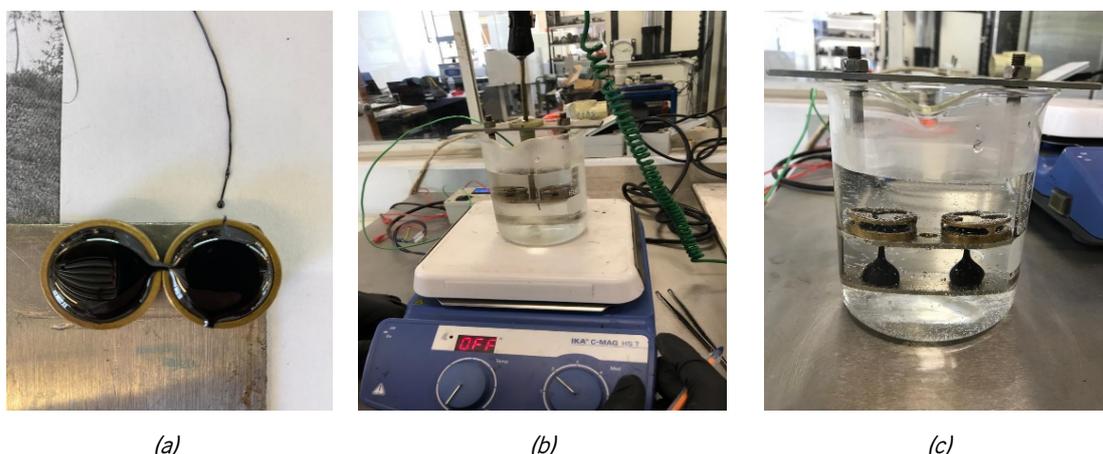


Figura 26 - Equipamento utilizado no ensaio "anel e bola"

Seguidamente, colocam-se os anéis no suporte de ensaio juntamente com as duas esferas previamente limpas, e tudo isto é colocado dentro do copo de ensaio. Visto que o ligante a ensaiar é um betume 35/50 espera-se que a temperatura de amolecimento esteja entre 28 e 80 °C, e por isso encheu-se o copo com água até uma altura de 5 cm acima dos anéis. Caso se esperasse uma temperatura de amolecimento acima dos 80 °C, enchia-se o copo com glicerina. Após esse procedimento, leva-se o conjunto a um frigorífico até se atingir uma temperatura da água a rondar os 5 °C. Por fim, o conjunto laboratorial é aquecido gradualmente a uma taxa de variação de temperatura de 5 °C/minuto (Figura 26b). Entretanto, devido ao peso da esfera e ao aquecimento, a amostra de betume deforma-se e, no momento exato em que a mesma toca no suporte metálico inferior, regista-se a respetiva temperatura e obtêm-se assim o ponto de amolecimento do betume (Figura 26c).

3.3.3. Ensaio de viscosidade dinâmica

O ensaio de viscosidade dinâmica é aplicado para caracterizar a viscosidade ou fluidez do betume acima de uma temperatura de referência (100 °C) e é baseado na norma EN 13302. O procedimento de ensaio adotado foi sustentado no método proposto por Silva *et al.* (2009).

Neste método utiliza-se um viscosímetro rotacional de “*Brookfield*” (Figura 27). O funcionamento deste ensaio é basicamente realizado por movimento giratório de um *spindle*, a uma velocidade constante, que é imerso numa amostra cilíndrica preenchida com betume fluido. Nesse movimento gera-se um esforço de rotação que determina o torque necessário para vencer a resistência que a viscosidade do material fluido oferece ao movimento rotacional. Esse esforço é proporcional à viscosidade do betume, pois quanto maior for a viscosidade do betume, maior será a resistência ao escoamento.



Figura 27 - Equipamento utilizado no ensaio de viscosidade dinâmica

Este ensaio iniciou-se a uma temperatura de 100 °C e, à medida que se ia fazendo a respetiva medição do esforço de torque no equipamento, ia-se aumentando a temperatura em 10 °C até ser atingida a temperatura de 180 °C. A cada variação da temperatura do ensaio, no momento que essa estabilizava, procedia-se à respetiva medição do esforço de torque para essa temperatura ao fim de certo tempo. De destacar que todo o procedimento do ensaio foi monitorizado por um sistema computacional.

3.3.4. Ensaio de reologia

O ensaio de reologia permite caracterizar o comportamento viscoelástico do betume num intervalo alargado de temperaturas e fornece características intrínsecas do material, nomeadamente o módulo de

rigidez complexo (G^*), o módulo elástico (G') e viscoso (G'') e o ângulo de fase ($^\circ$), quando sujeito a várias condições de temperatura e frequência diferentes. Para a execução do ensaio utilizou-se um reómetro do tipo *Dynamic Shear Reometer* (DSR) da marca Physica, modelo MCR 100 (Figura 28) e os procedimentos adotados no ensaio laboratorial foram baseados na norma EN 14770. É importante referir que o ensaio foi realizado com varrimento de frequências entre 0,1 e 20 Hz.

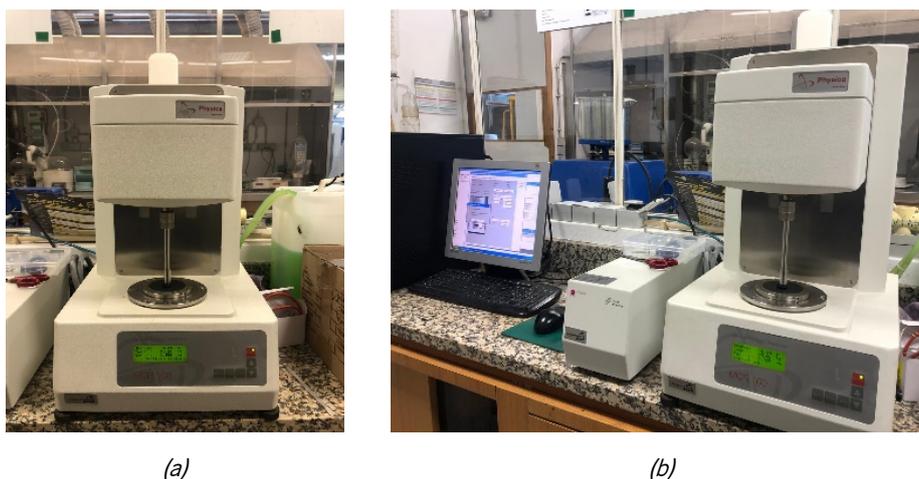


Figura 28 - (a) Reómetro utilizado no trabalho; (b) Reómetro auxiliado com um sistema computacional

Com o acionamento do equipamento criam-se movimentos oscilatórios entre a placa de atuação e a amostra de betume. Com esses movimentos, aplicam-se pequenas deformações de torção (no regime de comportamento linear) à amostra de ligante betuminoso e simultaneamente vai se medindo o esforço de torque necessário para que se atinja essas deformações, para as várias frequências de ensaio. Assim, com o esforço de torque e com a respetiva deformação é possível determinar as propriedades reológicas do betume anteriormente mencionadas. O betume 35/50 foi ensaiado a diferentes temperaturas que variaram entre -6 e 88 °C. Para este ensaio são usados dois tipos de amostras, uma com 2 mm de espessura que é colocada num prato de 8 mm e é ensaiada entre -6 e 40 °C e uma outra amostra com 1 mm de espessura que é ensaiada entre 34 e 88 °C num prato de 25 mm. Excetuando alguns casos específicos, o ensaio é realizado numa região em que o comportamento viscoelástico do betume é linear, e daí a razão de se proceder à troca dos pratos de ensaio.

3.4. Estudo de formulação, de produção e de análise das misturas betuminosas

Após a realização dos ensaios de caracterização dos agregados e do ligante betuminoso, executou-se a formulação e a produção das misturas de betão betuminoso utilizadas nesta dissertação.

Tendo em conta os objetivos propostos para esta dissertação, o tipo de misturas betuminosas a desenvolver e a sua formulação é uma das etapas mais importantes para o sucesso do trabalho. Portanto, sabendo que um dos objetivos desta dissertação é estudar a influência de subprodutos industriais no processo de indução de misturas betuminosas com um micro-ondas, resolveu-se fazer três misturas betuminosas diferentes para o estudo ser mais conclusivo e abrangente. Nesse contexto, realizou-se uma mistura betuminosa convencional AC 14 surf 35/50 (BB) (mistura CR), uma mistura betuminosa semelhante à anterior, mas com a adição de fibras de lã de aço (mistura CF) e, por último, uma mistura betuminosa em que se substituiu de forma parcial (cerca de 50%) os agregados naturais por ASIC, contendo esta mistura também fibras de lã de aço (mistura CAF).

3.4.1. Estudo granulométrico das misturas

No estudo granulométrico das três misturas realizadas utilizou-se o fuso granulométrico da mistura AC 14 surf 35/50 (BB), apresentado na Figura 29, como referência. Este fuso foi adotado para todas as misturas em estudo e cumpre todos os requisitos enunciados no quadro 14.03.2e do Caderno de Encargos da Infraestruturas de Portugal para utilização em camadas de desgaste.

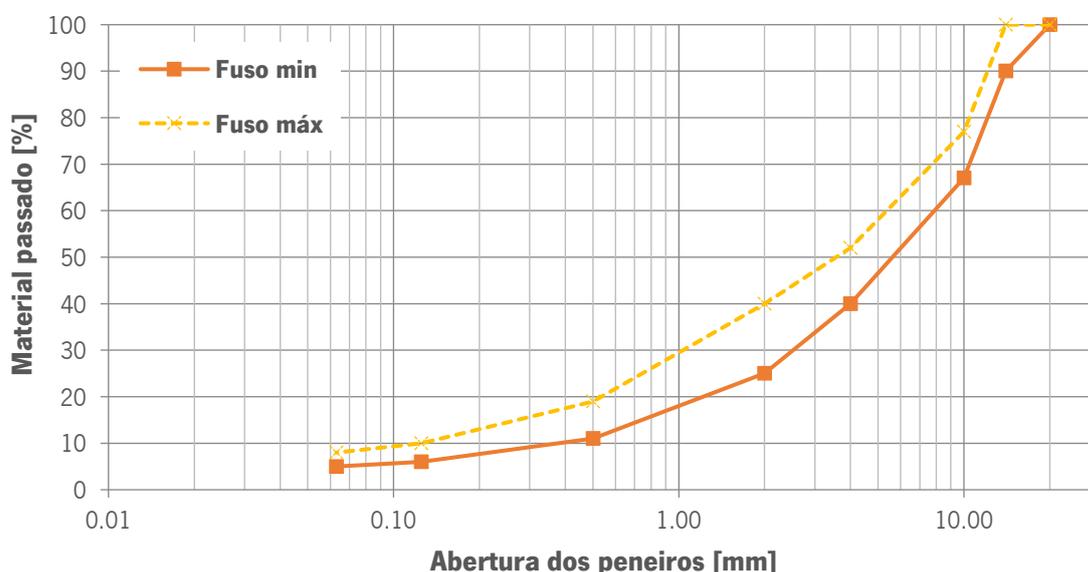


Figura 29 - Fuso de referência da mistura AC 14 surf 35/50 (BB)

Em função do fuso de referência enunciado na Figura 29, para cada mistura fizeram-se os respetivos cálculos de modo a determinar a quantidade de agregado de cada fração a utilizar, a apresentar no Capítulo 4. Portanto, procurou-se determinar uma curva granulométrica de cada mistura que esteja situada entre a curva de valores máximos e mínimos do fuso referência.

3.4.2. Definição da percentagem de fibras de lã de aço

No presente trabalho, um dos primeiros passos para a formulação das misturas passou pela definição da percentagem das fibras de lã de aço a incorporar em duas misturas betuminosas em estudo neste trabalho (mistura CF e mistura CAF).

Inicialmente, pensou-se fazer misturas betuminosas com diferentes percentagens de fibras de lã de aço. Todavia, face à necessidade de redução do horário laboratorial devido às contingências provocadas pela pandemia COVID-19, definiu-se que apenas se realizariam misturas betuminosas com uma única percentagem de fibras. Assim, antes de se escolher a percentagem final de fibras a incorporar, analisaram-se artigos e estudos científicos do mesmo âmbito desta dissertação de modo a que a tomada de decisão fosse bem sustentada.

No estudo de Liu (2018) utilizou-se uma percentagem de fibras de 6% em relação ao volume do betume. Os resultados apresentados foram positivos, dado que as misturas betuminosas apresentaram maior resistência do que restantes misturas já ensaiadas, tiveram uma boa resistência à perda de partículas e a sua velocidade de indução também foi aceitável. Contudo, neste artigo o comprimento das fibras foi de apenas 4,2 mm, que se verificou não ser o ideal para um aumento mais rápido da temperatura nas misturas betuminosas.

Por outro lado, Tabaković *et al.* (2019) utilizaram três percentagens diferentes de fibras para cada mistura betuminosa (5, 10 e 15% do volume do betume) com um comprimento de fibras de 10 mm. A mistura com 5% de fibras apresentou diversas vantagens relativamente às outras, pois apresentou os melhores resultados no processo de autorregeneração. Além disso, os bons resultados foram bem visíveis a olho nu, visto que a fissura fechou completamente e a mistura betuminosa não sofreu nenhum dano, como por exemplo, a criação de crostas ou oxidação, estragos estes que aconteceram nas outras misturas com maior percentagem de fibras.

Por último, Gallego *et al.* (2013) produziram várias misturas betuminosas com diferentes percentagens de fibras entre 0,2 a 1,8% da massa total da mistura, onde em cada mistura o diâmetro das mesmas também variou entre certos intervalos (0,04 a 0,06 mm e 0,10 a 0,12 mm). Neste artigo comprovou-se que a eficiência energética das fibras com 10 mm é superior às fibras de 5 mm, e também se compreendeu que as fibras com espessura de 0,04 a 0,06 mm são melhores. Por último, também se verificou que a percentagem de 0,2% de fibras em relação peso total da mistura já foi suficiente quando se utilizaram fibras com 10 mm de comprimento.

Então, tendo por base os vários artigos mencionados, para ambas as misturas betuminosas com fibras de lã de aço (Figura 30), definiu-se uma percentagem de 7% do volume do betume (cerca de 0,35% da massa total da mistura), com um comprimento das fibras entre 8 e 10 mm e com diâmetro situado entre 0,04 e 0,06 mm.



Figura 30 - Fibras de lã de aço utilizadas neste trabalho

3.4.3. Processo de produção das misturas betuminosas

Conforme já foi mencionado anteriormente, no presente trabalho executaram-se três tipos de misturas de betão betuminoso produzido a quente: 1) uma mistura convencional AC14 surf (BB); 2) uma mistura betuminosa com incorporação de fibras de lã de aço, e; 3) uma mistura com cerca de 50% de ASIC e fibras de lã de aço. Seguidamente, apresentam-se os processos adotados no fabrico das mesmas e identificam-se as diferenças entre os procedimentos.

Primeiramente, antes de se iniciar o processo de produção das misturas, e face ao número e ao tipo de ensaios laboratoriais a desenvolver nesta dissertação, definiu-se o número de provetes e vigas necessários. A partir daí, calculou-se o número de amassaduras a desenvolver para cada mistura. Assim sendo, para cada mistura foi necessário obter 12 vigas e 9 provetes, e para isso fez-se três amassaduras para as vigas e uma amassadura para os provetes.

Para a mistura convencional, antes de se iniciar a sua produção, colocou-se os agregados da mistura a aquecer num forno a uma temperatura de 165 °C e aqueceu-se o betume 35/50 também a 165 °C. Em seguida, fez-se a respetiva pesagem de cada fração dos agregados e colocaram-se numa panela misturadora (Figura 31a). Estes materiais foram misturados durante um minuto de forma a que a mistura dos vários agregados fosse o mais homogénea possível e a temperatura de produção rondasse os

150 °C. Por fim, adicionou-se o betume (Figura 31b) e misturou-se na panela durante mais dois minutos (Figura 31c). O aspeto final da mistura deve ser uniforme e todos os agregados devem estar cobertos por betume, como se pode ver na Figura 31d.

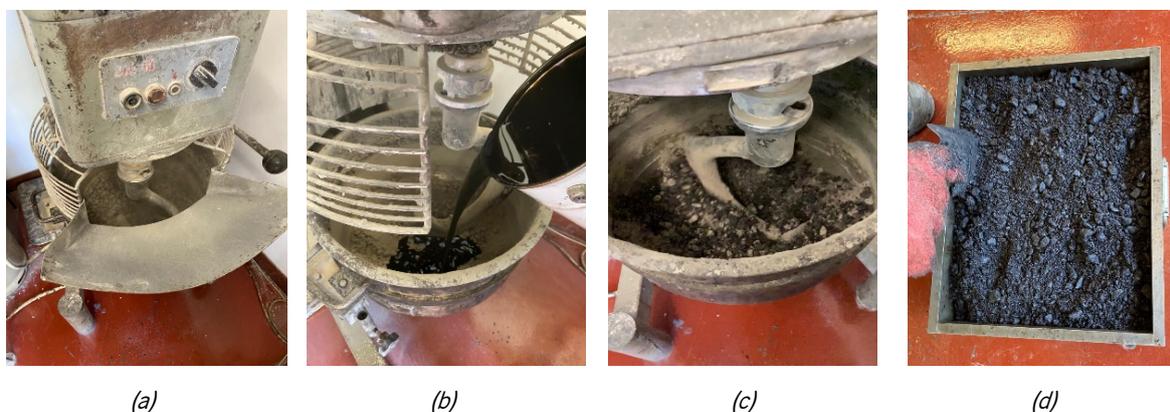


Figura 31 - Processo de fabrico das misturas betuminosas

Relativamente às outras duas misturas betuminosas, também se fez um aquecimento prévio dos agregados e do betume. Além disso, cortaram-se as fibras metálicas com cerca de 1 cm de comprimento (Figura 32) para introdução nas misturas. Este processo de corte ainda foi demorado, devido à falta de material no laboratório para um corte rápido e preciso. Portanto, num futuro trabalho deve-se arranjar uma forma de melhorar o corte das fibras metálicas.



Figura 32 - Fibras de lã de aço cortadas para introdução nas misturas

Após a pesagem dos agregados, colocaram-se as fibras na panela misturadora e mexeu-se durante um minuto. Depois, aumentou-se a velocidade de rotação da panela misturadora e, gradualmente,

adicionou-se a quantidade de fibras na panela num período de dois minutos, de modo a que a mistura de agregados ficasse o mais homogénea possível e as fibras ficassem bem distribuídas. Porém, este processo foi complicado dado que as fibras se aglomeravam umas com as outras. Assim, para projetos futuros neste âmbito deve-se arranjar um método mais eficiente de colocação das fibras. No final, adicionou-se o betume aos materiais anteriores e misturou-se tudo durante mais dois minutos.

Finalizando este processo, colocou-se o material betuminoso em moldes específicos para as lajes e para os provetes cilíndricos, e depois procedeu-se à respetiva compactação. Adicionalmente, também se colocou num tabuleiro com cerca de 2 kg de amostra de cada mistura para se proceder ao ensaio de determinação da baridade máxima teórica (BMT).

Antes de efetuar a compactação, mediu-se a temperatura de cada amassadura, conforme se pode verificar na Tabela 5. No caso dos provetes, as temperaturas medidas foram inferiores, porque a perda de temperatura é mais rápida devido à sua menor massa, e além disso fez-se a pesagem da amostra betuminosa em cada provete e só antes de se compactar é que mediu a temperatura. Portanto, existiram perdas de calor entre a misturadora, pesagem, forno e equipamento de compactação.

Tabela 5 - Temperaturas médias de compactação das misturas betuminosas

Referência da Mistura	Temperatura média das lajes [°C]	Temperatura média dos provetes [°C]
CR	139	127
CF	149	132
CAF	142	130

3.4.4. Processo de compactação das misturas betuminosas

No processo de compactação das misturas betuminosas, utilizaram-se dois equipamentos diferentes, um equipamento para as lajes, o *Roller Compactor*, e outro equipamento para os provetes cilíndricos, o compactador de *Marshall* (Figura 33).

À medida que se foi produzindo cada mistura betuminosa, iniciava-se o processo de compactação da mesma. Para cada mistura obtiveram-se 9 provetes cilíndricos e 3 lajes retangulares que depois de cortadas originaram 12 vigas. Os provetes cilíndricos destinaram-se para os ensaios de indução e para os ensaios de fratura ou rotura por flexão em três pontos (SCB), enquanto as vigas também se destinaram aos ensaios de indução, bem como ao ensaio de determinação da resistência à fadiga e do módulo de rigidez por flexão em quatro pontos.



Figura 33 - Equipamentos de compactação: (a) Roller Compactor; (b) Compactador de Marshall

A compactação dos provetes cilíndricos é executada através de um compactador de impacto (Figura 33b) que aplica 75 pancadas em cada face do provete, como referido no anexo nacional da norma EN 13108-1. Antes desse processo, fez-se a preparação dos provetes, colocando uma determinada quantidade de cada mistura betuminosa em moldes metálicos com diâmetro interno de 101,6 mm e 63,4 mm de altura, que foram previamente aquecidos em estufa.

Em seguida, pousou-se uma folha de papel em cada face do molde de modo a que o martelo, durante o processo de compactação, não aderisse às faces do provete. Antes de iniciar a compactação de cada provete realizou-se um controlo de temperatura de maneira a garantir que o processo estava a ser executado dentro dos valores previstos. Após esse processo, os provetes cilíndricos foram desmoldados (Figura 34) num equipamento de estrutura universal de carga da marca Matest Unitronic.



Figura 34 - Provetes cilíndricos (a) antes e (b) depois de serem desmoldados

Relativamente ao processo de compactação das lajes, inicialmente colocou-se óleo de descofragem em toda a superfície do molde e, logo após, introduziu-se a respetiva quantidade de mistura betuminosa no seu interior, espalhou-se bem a amostra e, por fim, colocou-se o molde no *Roller Compactor*. No *software* do compactador introduziram-se as dimensões do molde ($30,5 \times 40 \times 7 \text{ cm}^3$) e procedeu-se à respetiva compactação. O molde foi retirado do equipamento no final desse processo, desmoldou-se a laje, e aguardou-se até ao dia seguinte para que a laje atingisse a temperatura ambiente (Figura 35). Nessa altura, cada laje foi encaminhada para o respetivo corte, o que permitiu obter quatro vigas por cada laje para os ensaios de flexão em quatro pontos.

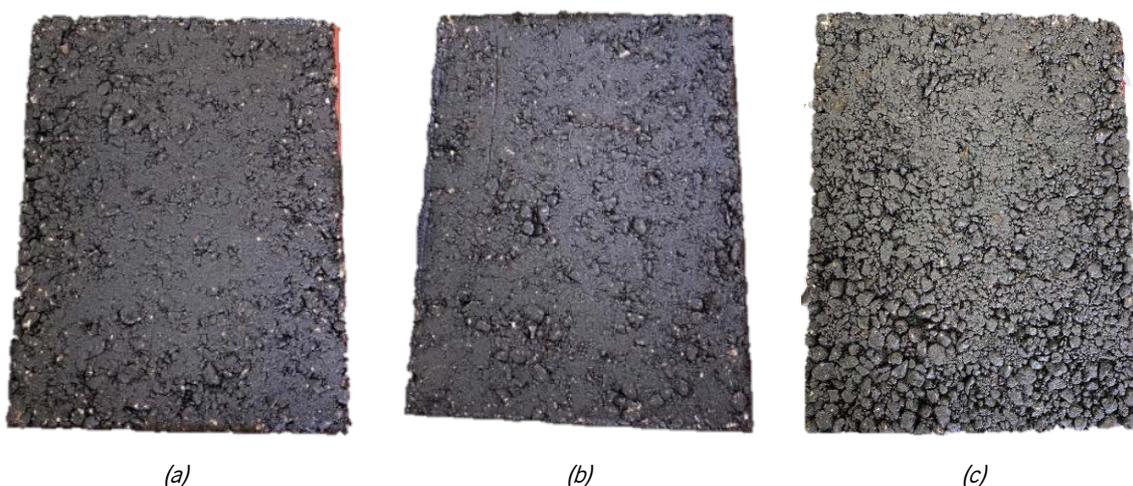


Figura 35 - Lajes produzidas: (a) Mistura CR; (b) Mistura CF; (c) Mistura CAF.

Os processos de compactação foram idênticos para as três misturas betuminosas produzidas nesta dissertação. Resumidamente, deste processo de compactação resultaram vinte e sete provetes cilíndricos e trinta e seis vigas.

3.4.5. Identificação e caracterização geométrica das vigas e dos provetes das misturas betuminosas

Após a obtenção das vigas e dos provetes cilíndricos de cada mistura, fez-se a respetiva identificação. A nomenclatura para a primeira viga da mistura convencional foi “CR1”, para a mistura betuminosa apenas com fibras metálicas foi “CF1” e, por último, à mistura com ASIC e fibras metálicas deu-se o nome “CAF1”, alterando-se o número final para as restantes vigas (Figura 36).

Nos provetes cilíndricos também se utilizou a mesma nomenclatura. Nesta fase preliminar, mas já após o ensaio de determinação da baridade aparente, também se procedeu ao corte dos provetes cilíndricos a meio ao longo do seu diâmetro para o ensaio SCB, formando assim dois provetes semicirculares com

a nomenclatura “CR1A e CR1B” (Figura 37). Efetuou-se este corte em seis dos nove provetes de cada mistura, para serem utilizados numa fase posterior do trabalho experimental. Os outros três provetes foram utilizados nos ensaios iniciais de calibração do processo de indução.

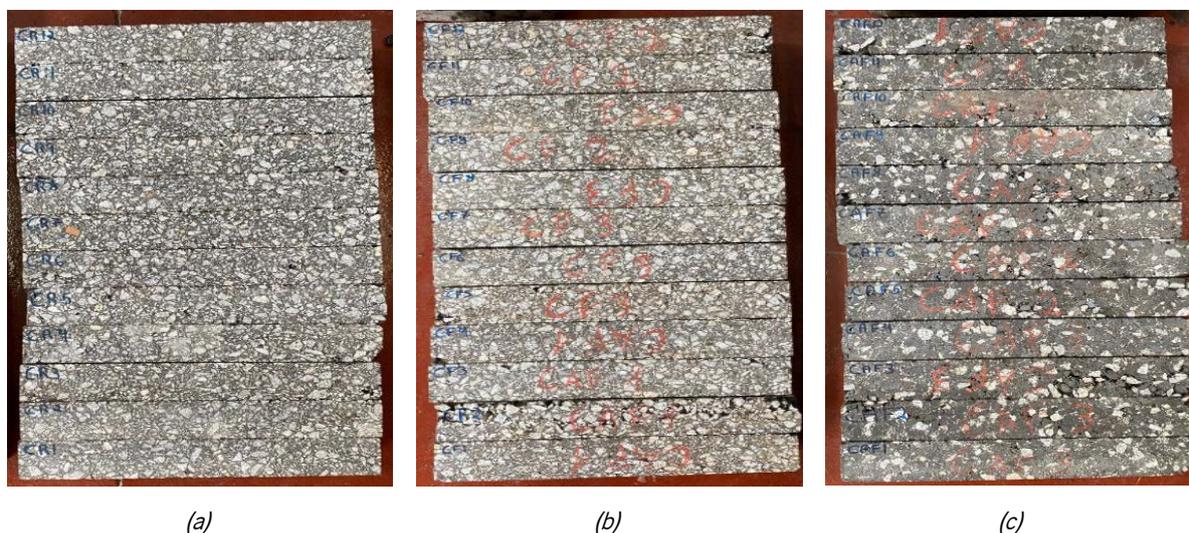


Figura 36 - Vigas de ensaio da (a) Mistura CR; (b) Mistura CF; (c) Mistura CAF.



Figura 37 - Provetes semicirculares com a respetiva identificação

Por último, fez-se a medição das dimensões geométricas dos vários provetes obtidos para ensaio. Em cada viga, em primeiro lugar, mediu-se a sua massa total e em seguida, mediram-se três pontos da largura e da altura da mesma, de modo a determinar a sua largura e altura média. Nos provetes cilíndricos também se determinou a massa, e em seguida mediu-se o diâmetro e a respetiva altura de cada provete. Relativamente aos provetes semicirculares, também se fez as respetivas medições de acordo com a norma de ensaio EN 12697-44.

3.4.6. Determinação da baridade aparente

Para determinar a baridade aparente de provetes de betão betuminoso existem alguns métodos. Neste trabalho utilizou-se o método B da norma EN12697-6. Este método consiste em calcular a massa de um provete seco e, após esse cálculo, colocam-se todos os provetes submersos em água no interior de um recipiente durante 30 minutos. Posteriormente, calcula-se a massa do provete submerso e a massa do provete saturado com superfície seca (Figura 38). É importante salientar que se deve ir medindo a temperatura da água do recipiente à medida que se vai realizando o ensaio, de modo a que o cálculo da densidade da água do recipiente seja o mais preciso possível.

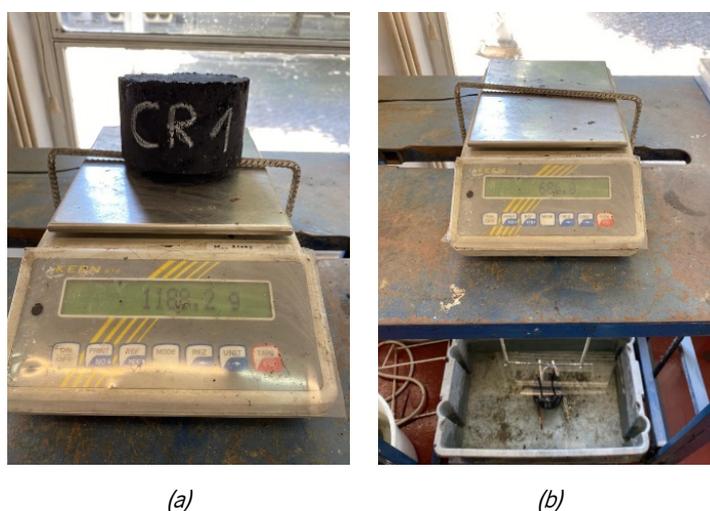


Figura 38 - Método de determinação da baridade aparente em provetes cilíndricos

O cálculo da densidade aparente é feito através da relação entre a massa do provete seco e a diferença de massa entre o provete saturado com superfície seca e o provete imerso (Equação 2).

$$\rho_{bssd} = \left(\frac{m_1}{m_3 - m_2} \right) \times \rho_w \quad (2)$$

Onde:

ρ_{bssd} é a densidade aparente, em megagramas por metro cúbico (Mg/m³);

ρ_w é a densidade da água à temperatura do ensaio, em megagramas por metro cúbico (Mg/m³);

m_1 é a massa do provete seco, em gramas (g);

m_2 é a massa do provete imerso, em gramas (g);

m_3 é a massa do provete saturado com superfície seca, em gramas (g).

Relativamente à baridade aparente das lajes, esta determina-se através do método D da norma EN 12697-6, onde se calcula o quociente entre a massa da laje seca e o seu volume. Neste caso, o volume deve ser determinado em função das medições geométricas da laje.

3.4.7. Determinação da baridade máxima teórica

A determinação da baridade máxima teórica (BMT) está definida pelo método A da norma EN 12697-5 e consiste no uso de um picnómetro submetido a vácuo. Em uma das quatro amassaduras realizadas para produção de cada mistura betuminosa, reservou-se cerca de 2 kg de amostra desagregada para a realização deste ensaio (Figura 39a).



Figura 39 - (a) Amostra de mistura betuminosa desagregada; (b) Picnómetro; (c) Equipamento de vácuo.

Neste ensaio, em primeiro lugar mediu-se a massa do picnómetro vazio, depois tarou-se a balança e colocou-se a amostra no picnómetro de modo a medir a massa precisa da amostra desagregada. Em seguida, mediu-se a massa total do picnómetro com a amostra. Após esse procedimento, adicionou-se ao picnómetro água destilada a 25 °C até cobrir a amostra e depois colocou-se o picnómetro numa mesa vibratória (Figura 39b) sujeito a vácuo (Figura 39c) durante 15 minutos de modo a que água preenchesse os vazios da amostra. No final desse período, esse equipamento com amostra é colocado em banho maria durante 30 minutos a 25 °C. Por fim, é necessário encher a totalidade do picnómetro com água e mede-se a massa do mesmo.

A baridade máxima teórica é calculada com base na massa do picnómetro, na massa do picnómetro com a amostra, na massa do picnómetro cheio apenas de água e na massa do picnómetro com amostra e cheio de água.

3.4.8. Determinação do volume de vazios dos provetes

O último ensaio de caracterização volumétrica que se executou nesta dissertação foi a determinação do volume de vazios de cada provete, e para tal é necessário conhecer a baridade aparente e a baridade máxima teórica (Equação 3). Esta determinação é muito importante para avaliar o desempenho de misturas betuminosas em camadas de pavimentos e para verificar o cumprimento de valores especificados no caderno de encargos.

$$V_v = \left(\frac{BMT - BA}{BMT} \right) \times 100 \quad (3)$$

Onde:

V_v é o volume de vazios, em percentagem (%);

BA é a baridade máxima teórica, em gramas por centímetro cúbico (g/cm^3);

BMT é a baridade aparente, em gramas por centímetro cúbico (g/cm^3);

3.5. Ensaio de indução com equipamento micro-ondas para aquecimento das misturas betuminosas

Tendo em conta os propósitos desta dissertação, inicialmente elaborou-se um estudo laboratorial com o objetivo de avaliar o comportamento térmico das três misturas betuminosas resultante do aquecimento proveniente da indução por radiações micro-ondas. Igualmente, procurou-se verificar se as misturas betuminosas que continham subprodutos ou materiais de origem siderúrgica (ASIC e fibras) eram mais facilmente induzidas pelas radiações emitidas pelo micro-ondas.

Para este estudo utilizaram-se três provetes cilíndricos e dois provetes semicirculares de cada mistura betuminosa. A temperatura da amostra betuminosa foi medida através da análise da temperatura superficial e da temperatura interior do provete.

Relativamente aos equipamentos necessários para este ensaio, usou-se um micro-ondas para indução do aquecimento das misturas betuminosas. Este equipamento é da marca Becken, tem uma capacidade de 25 litros, possui cinco níveis de potência (até uma potência máxima de 900 W) e a frequência é de 2400 MHz (Figura 40a).

No que respeita à medição da temperatura, utilizaram-se três equipamentos diferentes. Para medir a temperatura superficial e a distribuição da temperatura pelo provete usou-se uma câmara termográfica

(Optris Xi 400) com uma taxa de enquadramento de 80 Hz (Figura 40b). De forma a validar a medição anterior, também se utilizou um termómetro infravermelho com mira laser (Figura 40c). Por fim, para se quantificar a temperatura interior dos provetes utilizaram-se sondas de temperatura que foram medidas num aparelho próprio de leitura, o Hanna Instruments HI 93531 (Figura 40d).



Figura 40 - Equipamentos utilizados para indução e medição das temperaturas das misturas betuminosas

Antes de se definirem os procedimentos do ensaio, fez-se uma análise bibliográfica de alguns artigos científicos do âmbito deste ensaio, para identificar os tempos de indução e a potência do micro-ondas a utilizar. Gallego *et al.* (2013) utilizaram um micro-ondas com uma potência de 800 W e induziram os provetes semicirculares durante 120 segundos, com intervalos para medição de temperatura de 20 em 20 segundos. Como resultado desse tempo de exposição, algumas misturas atingiram 140 °C. Noutro estudo científico, Tabaković *et al.* (2019) usaram um micro-ondas com uma potência de 300 W (opção “descongelar”) e induziram provetes cilíndricos durante um período de três minutos.

Nesse contexto, pela análise dos artigos atrás mencionados verifica-se que os procedimentos adotados são distintos, apesar dos objetivos em ambos os artigos terem sido atingidos. Foi possível concluir que o tempo de indução “ótimo” para promover a autorregeneração no micro-ondas varia em função do tipo de equipamento utilizado, da geometria do provete a ensaiar, da mistura betuminosa e do tempo de indução adotado. Desse modo, neste ensaio laboratorial fez-se um estudo prévio da evolução da temperatura dos provetes em função de diferentes níveis de potência. Apesar das misturas betuminosas serem diferentes, definiram-se os mesmos tempos de indução para as três misturas.

Assim, neste ensaio experimental aqueceram-se os provetes circulares em três diferentes níveis de potência do micro-ondas (540, 720 e 900 W), durante um tempo total de 160 segundos, mas com medições da temperatura superficial a cada 20 segundos e da temperatura interna a cada 40 segundos. De modo a uniformizar o aquecimento em toda a área superficial do provete, utilizou-se o prato giratório

do micro-ondas (Figura 41b). É importante salientar que todos os provetes estudados, antes de serem induzidos, foram colocados numa câmara térmica a 20 °C, de modo a que a temperatura inicial de todas amostras fosse sempre a mesma.

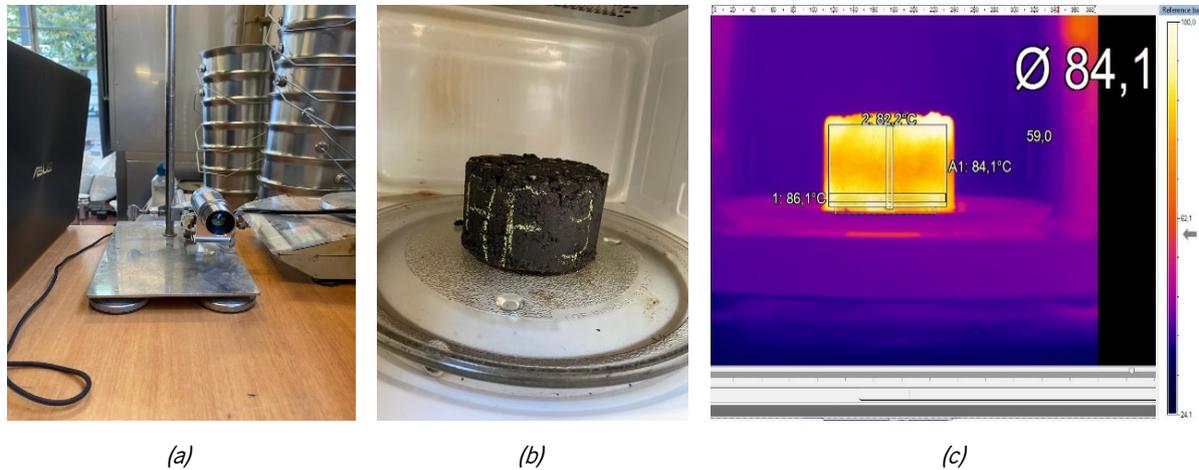


Figura 41 - Etapas da medição da temperatura superficial do provete: (a) Colocação da câmara termográfica num suporte fixo; (b) Colocação do provete CAF9 no micro-ondas; (c) Medição da temperatura superficial do provete CAF9

Para se proceder à medição da temperatura interior dos provetes fizeram-se dois furos no provete com cerca de 2 cm de profundidade (Figura 42). À medida que se procedia a indução, colocavam-se duas sondas e mediam-se as respetivas temperaturas para cada tempo de indução. De notar que nestas medições os ensaios só se realizaram num provete de cada mistura betuminosa (CR7, CF7 e CAF7), enquanto nas medições da temperatura superficial mediu-se nos restantes provetes CR8, CR9, CF8, CF9, CAF8 e CAF9.

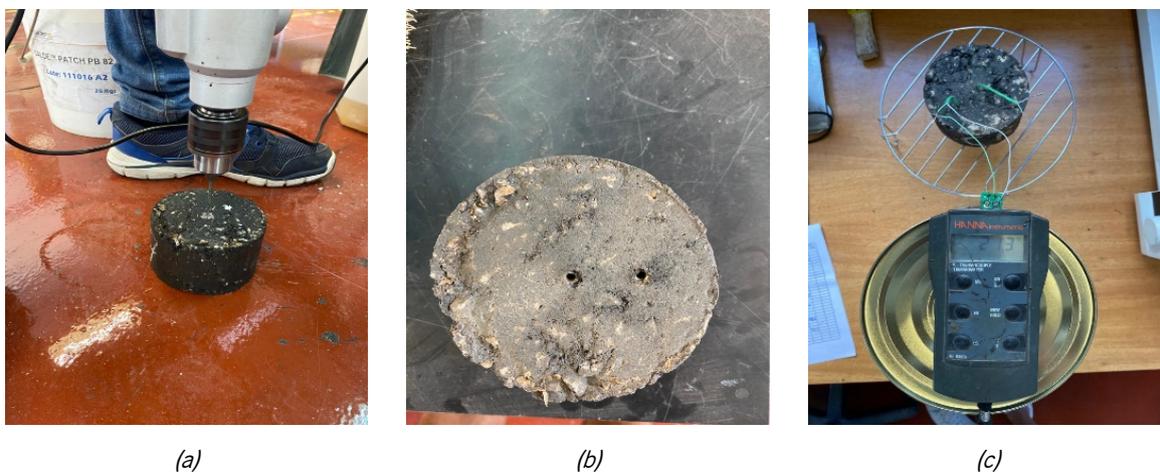


Figura 42 - Etapas da medição da temperatura interna: (a) Furação dos provetes; (b) Posição dos furos; (c) Colocação das sondas e a respetiva medição

Nos provetes semicirculares também se efetuaram ensaios experimentais de indução, com medições de temperatura a cada 20 segundos. Com estes ensaios procurou-se determinar o tempo “ótimo” de indução para a geometria destes provetes, de modo a promover o fenómeno de autorregeneração das misturas sem danificar as propriedades do betume por envelhecimento. Posteriormente, após a definição da potência e tempo de indução ideais, estes valores foram utilizados nos restantes ensaios de indução realizados ao longo do trabalho que deu origem a esta dissertação.

3.6. Ensaios de caracterização mecânica e de verificação do efeito do autorregeneração nas misturas betuminosas

A caracterização mecânica é um dos pontos mais importantes para analisar o desempenho das misturas betuminosas. Neste caso, esta análise teve uma importância dupla, pois além de se analisar as diferenças da resistência entre as misturas, calculou-se também o índice de recuperação das mesmas derivado do processo de indução aplicado. Em seguida apresenta-se uma breve descrição dos procedimentos adotados em cada ensaio. A presente dissertação focou a sua atenção em ensaios de fadiga ou fratura que induzam fendilhamento nas misturas, pois o fenómeno de regeneração só será efetivo em misturas já fendilhadas.

Assim, não se realizaram ensaios de avaliação da deformação permanente, nem de avaliação da sensibilidade à água das misturas, visto que estes ensaios não iam ao encontro dos objetivos principais desta dissertação. Futuramente, após a definição de processos otimizados de indução por aquecimento com micro-ondas, a realização destes ensaios e a sua análise deverão ser promovidos.

3.6.1. Ensaio do módulo de rigidez por flexão em quatro pontos

O módulo de rigidez é uma das propriedades das misturas betuminosas utilizadas no dimensionamento de pavimentos rodoviários, sendo importante para avaliar o comportamento estrutural da infraestrutura onde as misturas betuminosas vão ser utilizadas. Esta propriedade depende de diversos fatores, tais como: 1) temperatura; 2) frequência de carregamento; 3) características dos materiais.

A análise desta propriedade é bastante complexa do ponto de vista do desempenho estrutural de um pavimento. Por exemplo, o aumento da rigidez, aumenta a capacidade resistente da estrutura devido à diminuição do nível de extensão instalado, mas o aumento da rigidez também pode reduzir a flexibilidade do pavimento, originando uma redução da resistência ao fendilhamento por fadiga.

De modo a avaliar o módulo de rigidez das misturas betuminosas em estudo, ensaiaram-se nove vigas de cada mistura numa configuração de ensaio de flexão repetida em quatro pontos (Figura 43) com dois pontos de apoio nas extremidades e dois pontos de aplicação de carga na zona intermédia da viga. O ensaio foi realizado a uma temperatura 20 °C, que foi definida de acordo com as recomendações da norma EN 13108-20. Além disso, definiu-se um nível baixo para controlo de extensão (100×10^{-6}), promovendo assim uma medição no regime de comportamento linear nas misturas. Em cada ensaio fez-se um varrimento de frequências (0,1, 0,2, 0,5, 1, 2, 5, 8 e 10 Hz) de acordo com os procedimentos para determinação do módulo de rigidez da norma EN 12697-26.



Figura 43 - Equipamento usado para a realização dos ensaios de fadiga e módulo de rigidez

De salientar que apenas três das nove vigas ensaiadas foram ensaiadas uma única vez. As restantes vigas foram ensaiadas mais uma ou duas vezes, depois de serem submetidas ao ensaio de indução por aquecimento via micro-ondas no intervalo entre os vários ensaios de determinação do módulo de rigidez. Na próxima secção desta dissertação apresenta-se de forma mais pormenorizada os procedimentos adotados nestes ciclos de ensaios mecânicos e de indução.

3.6.2. Ensaio de resistência ao fendilhamento por fadiga

O ensaio de determinação da resistência à fadiga dá indicações sobre o comportamento das misturas betuminosas relativamente ao fendilhamento provocado pelas ações cíclicas do tráfego, para determinadas condições de temperatura.

Este ensaio é realizado de acordo com a norma EN 12697-24, a uma temperatura de ensaio de 20 °C (recomendado pela norma EN 13108-1) e a uma frequência de aplicação da carga cíclica sinusoidal de 10 Hz. As vigas utilizadas neste ensaio são as mesmas do ensaio de módulo de rigidez (ensaio não

destrutivo) e os ensaios são realizados no mesmo equipamento (Figura 43). A configuração do ensaio também foi semelhante. Todavia, como este ensaio é destrutivo, os níveis de extensão foram mais elevados (400×10^{-6}) de modo a ir causando um dano progressivo às vigas por fadiga.

O ensaio de resistência à fadiga tem como intuito determinar o número de ciclos necessários para que a mistura betuminosa atinja a rotura por fadiga. Neste trabalho, a ruína de uma viga por fadiga foi definida pela redução do valor do módulo de rigidez para metade do seu valor inicial ($N_{0,5}$), uma vez que este ensaio é realizado em extensão controlada. Porém, nesta dissertação das nove vigas ensaiadas em cada mistura betuminosa, apenas três foram levadas à ruína no primeiro ensaio de fadiga. Nas restantes seis vigas de cada mistura, três foram levadas à rotura no segundo ensaio de fadiga, após um ciclo de indução, e as outras três apenas no terceiro ensaio de fadiga, após um segundo ciclo de indução.

Aquando a revisão da literatura, diversos autores de artigos científicos realizados neste âmbito defenderam que nos ensaios de resistência à fadiga não se devia levar as vigas até à ruína para se obter melhores índices de autorreparação nas misturas. Nos resultados de Garcia *et al.* (2020) comprovou-se que o momento ótimo para acontecer a autorreparação de uma mistura dá-se a 35% do número de ciclos necessários para ocorrer a ruína ($0,35 \times N_{0,5}$). Por outro lado, Liu *et al.* (2012) levaram as vigas até ao estado de ruína no ensaio de fadiga, e mesmo assim apresentaram resultados de autorreparação positivos. Nesta dissertação optou-se por uma abordagem mais expedita, mas que se inspira nos trabalhos anteriores, e definiu-se que o critério de paragem no ensaio de fadiga para realização de um novo ciclo de regeneração deve ocorrer quando o módulo de rigidez reduz 35% do seu valor inicial.

Nesse contexto, a metodologia da totalidade do ensaio passou por danificar seis vigas de cada mistura no equipamento de fadiga por flexão em quatro pontos até que o módulo de rigidez inicial reduzisse 35%. Após esse processo, encaminhou-se as vigas para um sistema de indução com micro-ondas (Figura 44), onde se procedeu ao aquecimento das misturas durante 210 segundos a uma potência de 900 W. Nessa fase, com o auxílio da câmara termográfica mediu-se a distribuição da temperatura nas vigas. É importante salientar que no ensaio de indução as vigas foram colocadas num molde de madeira durante o aquecimento, evitando assim que elas se deformassem com o aumento da temperatura.

Depois da indução, essas seis vigas voltaram a ser ensaiadas à fadiga, sendo que três delas foram levadas à ruína, enquanto as restantes foram ensaiadas de novo até 35% de redução do módulo de rigidez inicial desse ensaio. Voltou-se a levar essas três vigas ao sistema de indução, para depois se voltar a determinar a resistência à fadiga das vigas, só que desta vez todas as vigas foram ensaiadas até à ruína, concluindo assim a totalidade do método de ensaio (Figura 45).

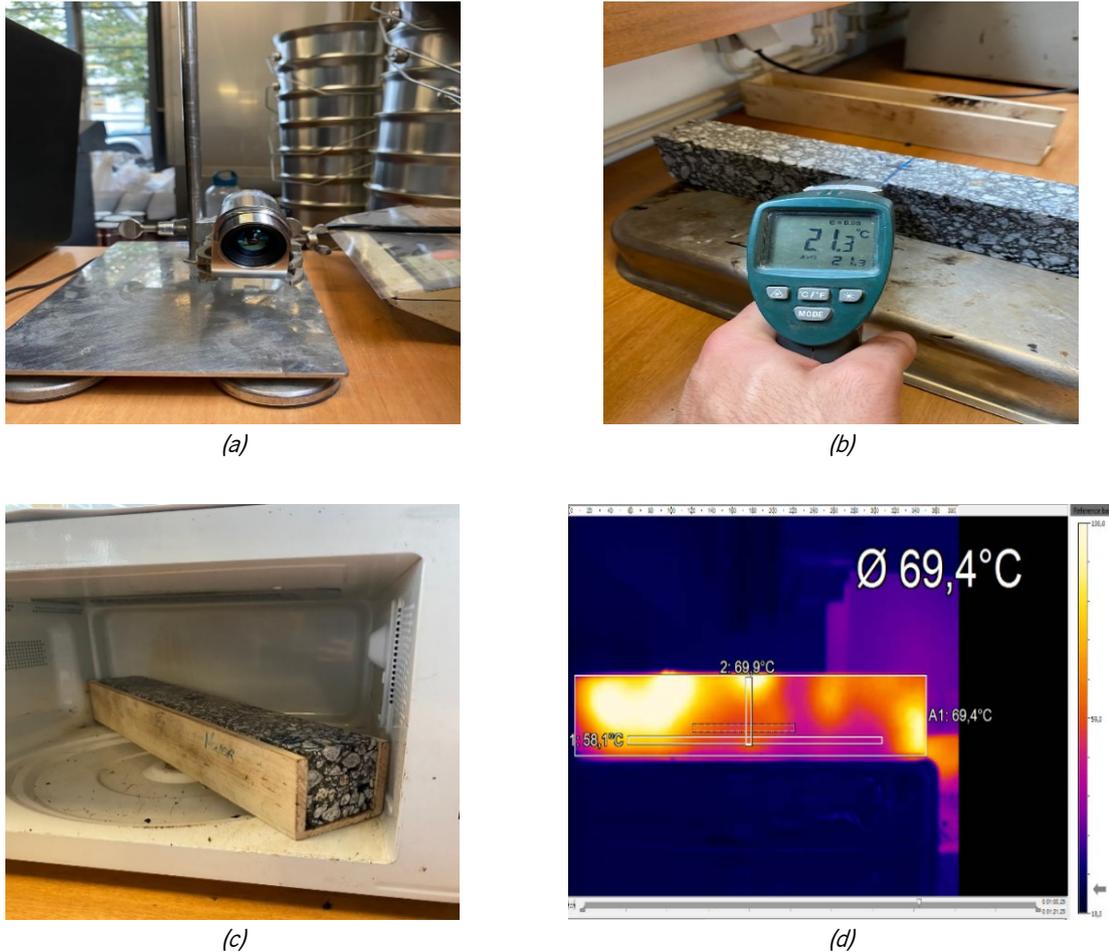


Figura 44 - Etapas do ensaio de indução nas vigas: (a) Colocação na câmara termográfica num suporte fixo; (b) Medição da temperatura inicial da viga; (c) Colocação na viga num suporte de madeira; (d) Medição da temperatura superficial após indução no micro-ondas



Figura 45 - Procedimento adotado para calcular o nível de regeneração (HL - Healing Level) das vigas após fadiga

Com este ensaio procurou-se determinar o ganho de vida útil de um pavimento, comparando o número de ciclos das vigas que foram à ruína sem indução com o número de ciclos das vigas que foram à ruína, mas que foram sujeitas a um ou dois períodos de indução. No Capítulo 4 desta dissertação são apresentados os resultados obtidos neste ensaio.

3.6.3. Ensaio de rotura por flexão em três pontos

O ensaio de fratura ou rotura por flexão em três pontos em provetes semicirculares foi baseado nos procedimentos da norma EN 12697-44. Neste ensaio procurou-se comparar o comportamento das três misturas betuminosas, avaliando a carga máxima, o deslocamento máximo e a energia de fratura de cada provete. No entanto, o objetivo principal deste ensaio foi medir a recuperação do dano significativo dos provetes após regeneração dos mesmos por indução via micro-ondas.

O ensaio foi realizado num equipamento de estrutura universal de carga da marca Matest Unitronic, numa configuração de ensaio de flexão com dois pontos de apoio, espaçados entre si de 8 cm, e um ponto de aplicação de carga na zona intermédia do provete (Figura 46). O ensaio foi realizado à temperatura ambiente, pois o equipamento não tinha controlo de temperatura. No entanto, de modo a que a fratura do provete fosse frágil e a fenda criada fosse bem definida, colocaram-se todos os provetes num frigorífico a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, que foi a temperatura de ensaio (pois este ocorre de forma muito rápida, praticamente sem perda de temperatura).



Figura 46 - Colocação do provete CF1A no ensaio de fratura SCB

A velocidade de aplicação da carga nos provetes foi de $0,5\text{ mm/min}$. A temperatura de ensaio dos provetes e a velocidade de carga foram definidos em função da análise de estudos científicos de diversos investigadores (Fakhri *et al.*, 2020, Norambuena-Contreras e Gonzalez-Torre, 2017).

Outro aspeto importante de organização preliminar deste ensaio foi a preparação dos provetes semicirculares. Depois de se realizar a identificação dos mesmos, obteve-se as medidas geométricas de acordo com a norma de ensaio já mencionada e na zona intermédia dos provetes, além de pintar a

superfície de branco, fez-se um entalhe de 1 cm (aproximadamente), de modo a controlar o início e a progressão da fenda resultante do ensaio de fratura. Os vários procedimentos atrás descritos são apresentados na Figura 47.

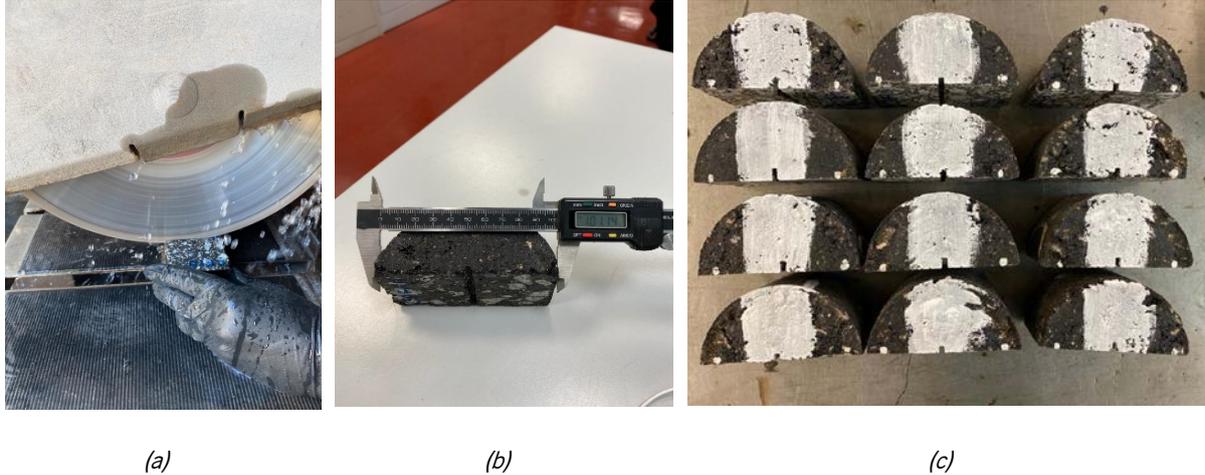


Figura 47 - (a) Formação do entalhe; (b) Caracterização da geometria do provete; (c) Pintura a branco da superfície do provete para uma melhor identificação das fendas

Durante o ensaio de flexão foram colocadas duas câmaras a fotografar em períodos de 5 em 5 segundos (Figura 48), uma a controlar a evolução da abertura de fenda e outra a controlar a evolução dos valores da força e do deslocamento do ensaio. Além dessas duas câmaras, também se utilizou a câmara termográfica para analisar a distribuição de temperaturas ao longo da criação da fenda.

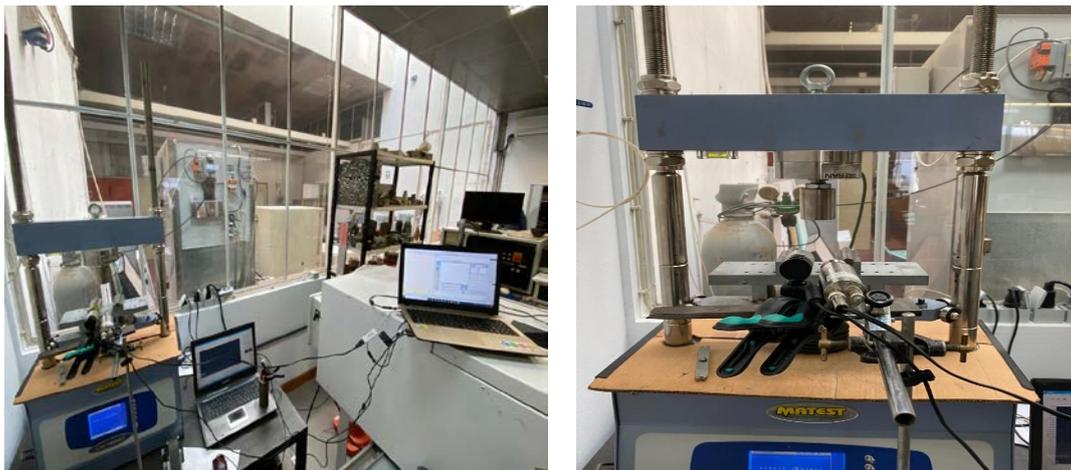


Figura 48 - Equipamentos utilizados no ensaio SCB

O objetivo de utilizar as diversas câmaras era compreender a evolução da progressão da fenda e a eventual dissipação de calor na zona de abertura da fenda, mas não se teve sucesso porque o ensaio foi

muito rápido. De futuro pretende avaliar-se esta questão com mais pormenor, realizando ensaios a temperaturas mais altas ou com uma menor velocidade de aplicação de deformação, para se seja possível acompanhar a progressão da fenda durante o ensaio.

Tal como se referiu anteriormente, o principal objetivo deste ensaio era determinar a capacidade de regeneração das misturas por indução após rotura completa dos provetes. De forma sucinta, os procedimentos adotados para calcular o nível de regeneração ou HL (*healing level*) das misturas betuminosas através deste ensaio de caracterização mecânica e do ensaio de indução por aquecimento no micro-ondas foram os seguintes:

1. Colocação dos provetes semicirculares numa câmara térmica a uma temperatura de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas;
2. Realização do ensaio de fratura SCB a uma velocidade de $0,5\text{ mm/min}$;
3. Colocação dos provetes fraturados numa câmara térmica ventilada a uma temperatura de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 3 horas de modo a evaporar a água existente na fenda;
4. Realização do ensaio de indução durante 80 segundos a uma potência de 900 W ;
5. Após o ensaio de indução, pousar os provetes num local à temperatura ambiente durante 2 horas e depois repetir os procedimentos de 1 a 5 durante três ciclos.

Por último, após a conclusão dos três ciclos de ensaios, obtiveram-se os dados necessários para analisar a forma como cada mistura betuminosa foi influenciada pelo processo de autorregeneração dos provetes, através do cálculo do quociente entre a força resistente máxima final e a força resistente máxima inicial. Também se fez o mesmo cálculo utilizando a energia de fratura de cada provete.

Depois de apresentados os materiais e os métodos de ensaio, no próximo capítulo apresentam-se e analisam-se os resultados obtidos neste trabalho, com os quais foi possível retirar um conjunto de conclusões que dão resposta aos objetivos desta dissertação.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados de caracterização dos materiais utilizados no presente estudo, tendo por base a aplicação dos métodos de ensaio às misturas betuminosas desenvolvidas, que foram mencionados no capítulo anterior.

4.1. Caracterização básica dos agregados e do ligante betuminoso

4.1.1. Análise granulométrica dos agregados

No estudo da formulação de uma mistura betuminosa é fundamental conhecer as curvas granulométricas das diferentes frações dos agregados que vão ser utilizados na produção da mistura. De acordo com o procedimento apresentado no Capítulo 3, realizou-se um ensaio de determinação da curva granulométrica para cada uma das frações dos agregados naturais graníticos, dos agregados siderúrgicos (ASIC) e do filer comercial calcário. Os resultados obtidos já foram apresentados no Capítulo 3, mais especificamente na Figura 23, e foram essenciais para estudar o ajuste granulométrico das três misturas em estudo ao fuso de referência de uma mistura AC 14 surf 35/50 já estabelecido.

É importante referir que os agregados e as respetivas curvas granulométricas são sempre as mesmas para as três misturas betuminosas produzidas para evitar incertezas na análise, pois se os agregados fossem diferentes, os ensaios apresentariam resultados diferentes também.

Um aspeto que também vai ter bastante influência na formulação da mistura com ASIC é a diferença de densidade entre os agregados naturais e o ASIC, pois isso altera as proporções ponderais quando se pretende manter as proporções volumétricas. Neste trabalho, e para formulação das misturas betuminosas, considerou-se os valores de densidade determinados para os mesmos materiais no trabalho de Nascimento *et al.* (2018), que foram de 2,65 g/cm³ para os agregados naturais e filer, 3,25 g/cm³ para o ASIC e 1,03 g/cm³ para o betume.

4.1.2. Análise do ligante

No presente trabalho utilizou-se um betume 35/50, fornecido pela empresa DST Group, pois este tipo de ligante é o mais utilizado no país. Para caracterização do betume foram realizados ensaios de penetração (EN 1426), de ponto de amolecimento pelo método de “Anel e Bola” (EN 1427) e de viscosidade dinâmica (EN 13302), cujos resultados são apresentados na Tabela 6 e na Figura 49.

Tabela 6 - Resultados dos ensaios de penetração e do ponto de amolecimento do betume

Ensaio	Método de ensaio	Amostra	Valor
Penetração do betume [0,1 mm]	EN 1426	1	43,9
		2	44,9
		3	45,9
Ponto de amolecimento pelo método de "Anel e Bola" [°C]	EN 1427	1	50,9
		2	51,2

Os resultados dos ensaios de penetração e "anel e bola" estão dentro do esperado, pois segundo a ficha técnica desse produto, os valores da temperatura de amolecimento variam entre 50 e 58 °C e os valores de penetração devem situar-se num intervalo de valores entre 35 e 50 décimas de milímetro.

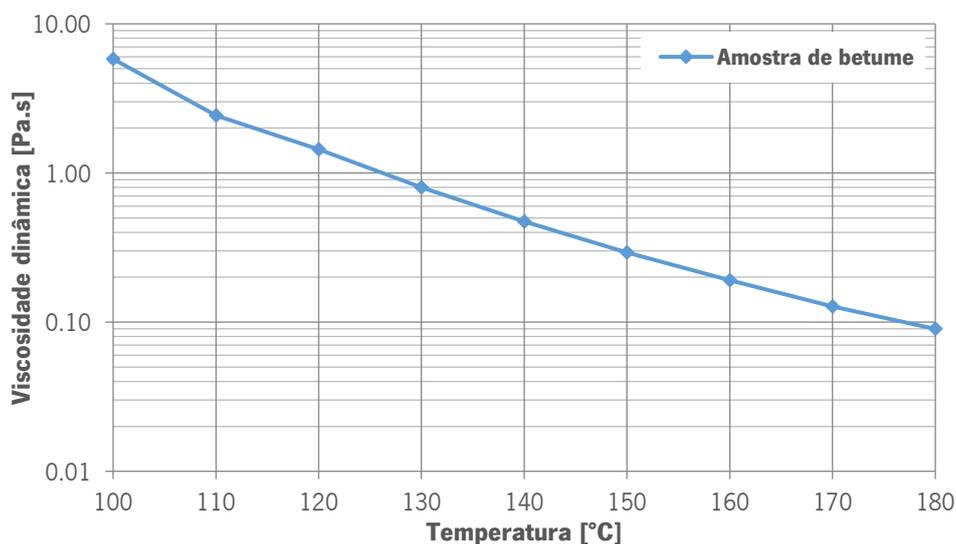


Figura 49 – Variação da viscosidade dinâmica do betume utilizado com a temperatura

A viscosidade dinâmica determina a fluidez ou viscosidade dos betumes para um leque de temperaturas mais elevadas. Com base nos resultados de viscosidade do betume utilizado é possível confirmar que a temperatura de produção das misturas referida no Capítulo 2 (165 °C) é adequada, uma vez que a viscosidade de referência (0,2 Pa.s) para a operação de mistura seria obtida para uma temperatura de aproximadamente 160 °C, e o efeito provocado por uma diferença de 5 °C é desprezável.

4.2. Caracterização reológica do ligante betuminoso

O reómetro dinâmico de corte (DSR) é um equipamento que permite determinar os parâmetros viscoelásticos do betume, controlando perfeitamente a cinemática do fluxo do ligante, sujeito a condições determinadas de carga e temperatura. Os parâmetros principais medidos neste ensaio são o módulo

complexo (G^*) e o ângulo de fase ($^\circ$), com os quais é possível determinar muitas outras propriedades. Com a realização deste ensaio foi possível construir uma curva mestra através do ensaio dinâmico por varrimento de frequência. O princípio de sobreposição tempo-temperatura é válido para o betume 35/50 em estudo e os deslocamentos horizontais a realizar para obtenção da curva mestra são descritos pela relação da equação de Williams-Landel-Ferry (WLF). A equação de WLF é uma formulação bastante utilizada para o cálculo do fator de deslocamento de materiais viscoelásticos. Os fatores de deslocamento dos ensaios realizados ao betume 35/50 foram determinados com base na Equação 4 para cada temperatura de ensaio (Figura 50), sendo a temperatura de referência igual a 40 °C.

$$\log(\alpha_t) = \frac{-C_1(T - T_{ref})}{C_2 + (T - T_{ref})} \quad (4)$$

Onde:

- α_t é o fator de deslocamento;
- C_1 é uma constante adimensional;
- C_2 é uma constante, medida em Kelvins (K);
- T é uma temperatura, medida em graus Celsius (°C);
- T_{ref} é a temperatura de referência, medida em graus Celsius (°C).

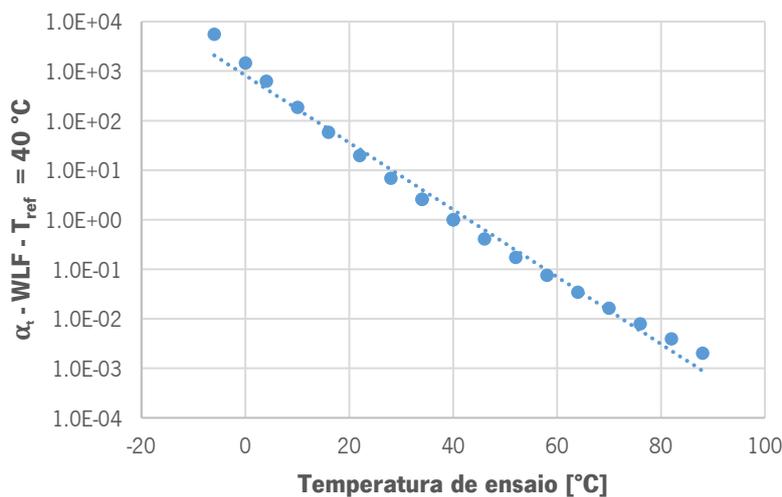


Figura 50 - Curva do fator de deslocamento (α_t) para as diferentes temperaturas de ensaio ($T_{ref} = 40 \text{ } ^\circ\text{C}$)

Verifica-se que a curva que relaciona o fator de deslocamento com as temperaturas do ensaio de reologia se aproxima de uma linha de tendência exponencial, o que vai ao encontro do esperado na equação WLF. Assim, pelo princípio de sobreposição tempo-temperatura foi possível construir uma curva mestra

para a temperatura de referência de 40 °C, correspondente à temperatura média dos ensaios realizados. Para a construção da curva mestra utilizaram-se todos os resultados dos ensaios dinâmicos (módulo complexo e ângulo de fase) efetuados ao betume, cuja representação gráfica em função da frequência é apresentada na Figura 51 numa escala logarítmica.

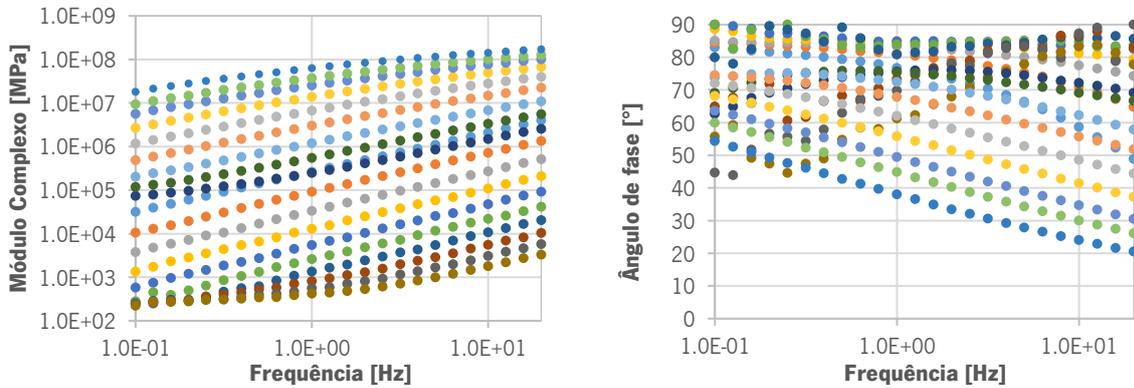


Figura 51 – Representação gráfica dos resultados de reologia do betume, o módulo complexo e o ângulo de fase

Ao aplicar os fatores de deslocamento (Figura 50) aos resultados da Figura 51, determinaram-se frequências equivalentes que permitiram obter a curva mestra do módulo complexo e do ângulo de fase para a temperatura de referência, que são apresentadas na Figura 52. As curvas apresentadas estão em linha com os resultados obtidos por outros autores para um betume 35/50. No entanto, na curva mestra do módulo complexo nota-se que existe uma descontinuidade devido a alterações das condições de ensaio (mudança do prato de ensaio), e na curva do ângulo de fase existe uma maior dispersão dos valores obtidos para os valores mais altos, fugindo um pouco da linha de tendência da curva.

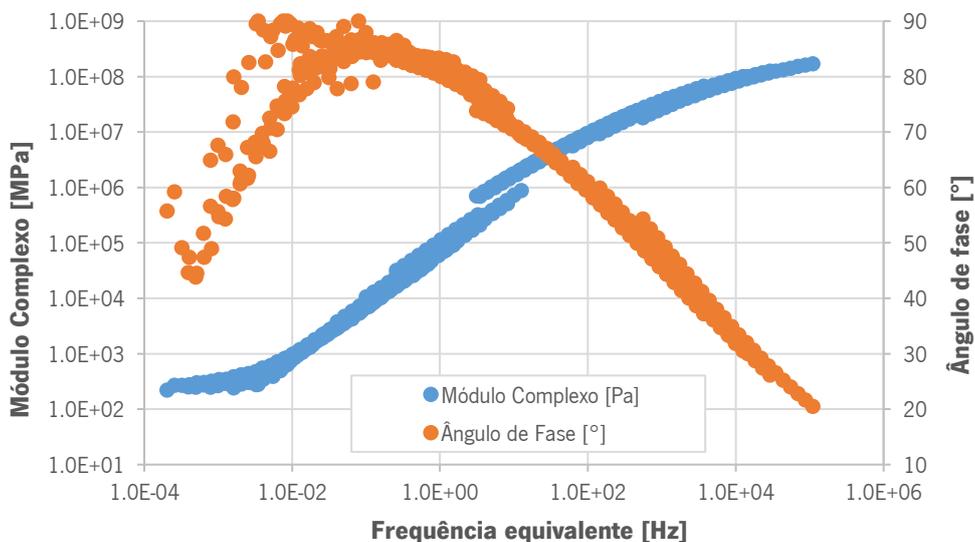


Figura 52 - Curvas mestras do módulo complexo e do ângulo de fase em função da frequência equivalente ($T_{ref} = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$)

Os resultados do módulo complexo e do ângulo de fase também foram apresentados no diagrama de “Black Space” (Figura 53). Este diagrama é uma representação semilogarítmica que relaciona o módulo complexo e o ângulo de fase do betume obtidos no DSR, para todas as temperaturas e frequências ensaiadas. A curva apresentada expressa a variação da reologia do betume sem considerar o efeito da frequência, observando-se que a mudança de fase do betume para um comportamento viscoso ocorre na zona de maior dispersão de resultados, com ângulos de fase próximos de 90°.

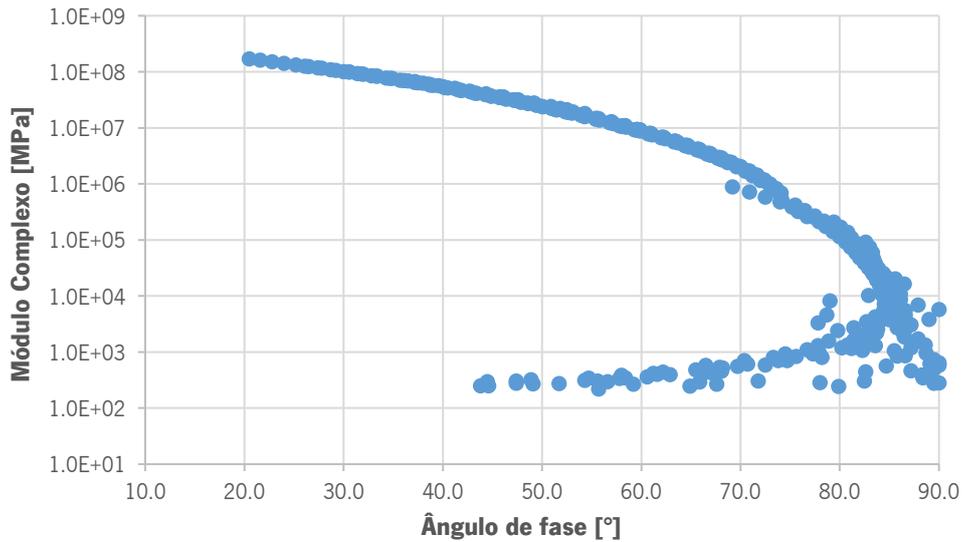


Figura 53 - Diagrama de “Black Space” do betume 35/50

Por último, determinou-se o grau de desempenho PG (*Performance Grade*) do betume 35/50 (Figura 54), utilizando como referência o valor de $G^*/\text{sen}(\delta)$ igual a 1000 Pa para uma frequência de 10 rad/s. O valor de PG é a maior temperatura de ensaio que tem um valor de $G^*/\text{sen}(\delta)$ superior a 1000 Pa

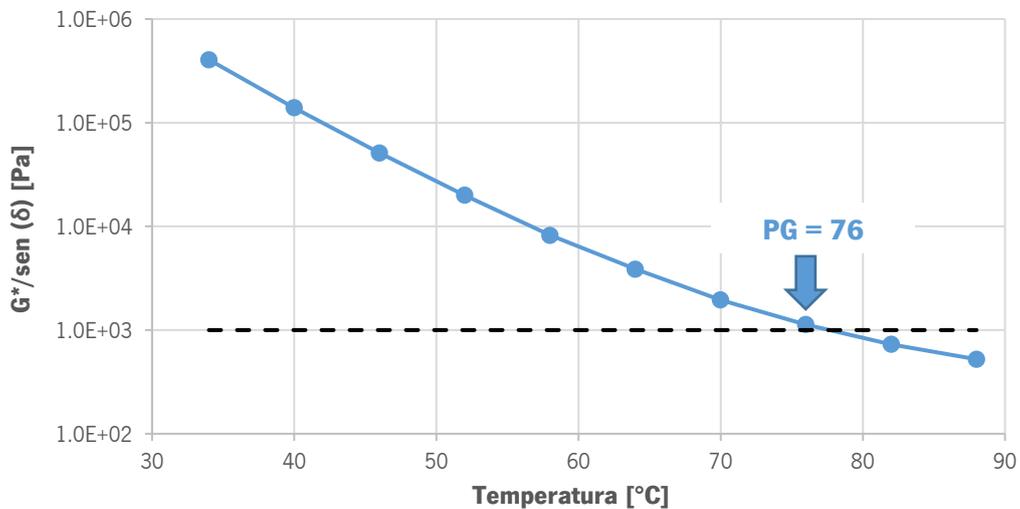


Figura 54 - Determinação do grau PG do betume 35/50 para uma frequência de 10 rad/s

Neste caso em concreto, pela análise da Figura 54 verifica-se que o grau PG é de 76, o que quer significa que este betume resiste bem a grandes deformações até aos 76 °C. Este valor é superior aos valores usuais para betumes não modificados, que normalmente apresentam valores PG de 64 ou 70.

4.3. Formulação das misturas betuminosas

4.3.1. Ajuste granulométrico das misturas betuminosas

Depois da caracterização e análise dos resultados obtidos sobre os agregados (graníticos e siderúrgicos) e sobre o betume, procedeu-se à formulação das misturas betuminosas.

Conforme já foi mencionado no Capítulo 3, nesta dissertação foram produzidas três misturas de betão betuminoso (AC 14 surf 35/50), uma de controlo ou convencional, outra com fibras metálicas e, por último, uma composta por agregados de escória siderúrgica (ASIC) e fibras metálicas. Na Tabela 7 são apresentadas as composições granulométricas (definidas em volume) das respetivas misturas. Os valores correspondentes em massa (utilizados para a produção das misturas) foram determinados em função da densidade de cada agregado. Após o estudo granulométrico destes agregados, determinou-se a respetiva composição granulométrica de cada mistura betuminosa.

Tabela 7 - Composição granulométrica das misturas betuminosas

Fração de agregado	Misturas		
	CR – AC 14 Surf 35/50 (BB)	CF – AC 14 Surf 35/50 (BB) com fibras metálicas	CAF – AC 14 Surf 35/50 (BB) com ASIC e fibras metálicas
ASIC 10/14	-	-	14%
Brita 6/14	42%	42%	17%
ASIC 0/10	-	-	36%
Brita 4/6	14%	14%	-
Pó 0/4	40%	40%	27%
Filer	4%	4%	6%
Fibras	-	7% (do volume de betume)	7% (do volume de betume)

O estudo de formulação de Marshall começa pelo ajuste granulométrico da mistura de agregados ao fuso respetivo da mistura. Na Figura 55 apresenta-se o resultado do ajuste obtido pela combinação das diferentes percentagens de agregados (naturais e ASIC) apresentados na Tabela 7. É importante realçar que a percentagem das fibras a adicionar era tão baixa (cerca de 0,35% da massa total da mistura) que não se considerou o seu peso em volume nos ajustes granulométricos.

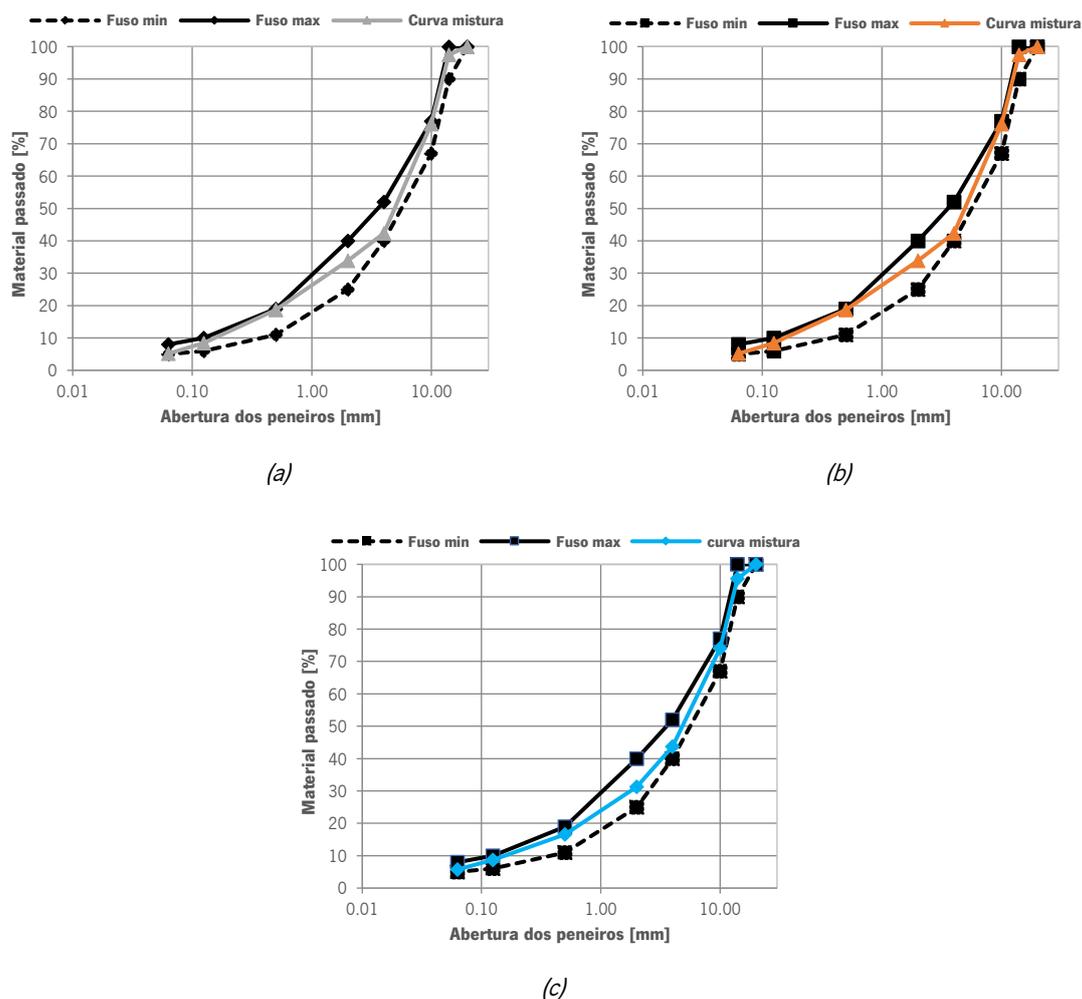


Figura 55 - Ajustes granulométricos para produção das misturas betuminosas: (a) CR – AC 14 (BB); (b) CF – AC 14 com fibras metálicas; (c) CAF – AC 14 com ASIC e fibras metálicas

A fração 0/4 foi uma das principais componentes dos agregados naturais utilizada em todas as misturas, principalmente na mistura com ASIC, dado que os agregados siderúrgicos não contêm partículas dessas dimensões em quantidades suficientes para cumprir o fuso. As percentagens de betume que se utilizaram nas misturas betuminosas (Tabela 8) basearam-se no estudo anterior de Nascimento *et al.* (2018). A percentagem de betume em massa na mistura com ASIC variou devido à sua densidade.

Tabela 8 - Percentagens de ligante consideradas nas misturas betuminosas

Misturas	Percentagem de betume [%]	
	(em massa)	(em volume)
CR – AC 14 Surf 35/50 (BB)	5,0	5,0
CF – AC 14 Surf 35/50 (BB) com fibras metálicas	5,0	5,0
CAF – AC 14 Surf 35/50 (BB) com ASIC e fibras metálicas	4,5	5,0

4.3.2. Características volumétricas das misturas produzidas

Depois de estudada a composição granulométrica de cada mistura, procedeu-se à produção e compactação em laboratório, de acordo com os procedimentos apresentados no Capítulo 3, para se avaliar as características volumétricas das mesmas.

As características volumétricas das três misturas foram obtidas com o recurso aos ensaios de determinação da baridade máxima teórica (BMT) e da baridade aparente (BA), as quais permitem o cálculo do volume de vazios de cada provete. Na Tabela 9 apresentam-se os valores individuais de cada provete e os valores médios de cada mistura betuminosa.

Tabela 9 - Caracterização volumétrica das misturas betuminosas

Mistura	BMT [kg/m ³]	Referência	BA (método B) [kg/m ³]		Vv [%]	
			Individual	Média	Individual	Média
AC 14 Surf (BB)	2484	CR1	2416	2415	2,8	2,8
		CR2	2410		3,0	
		CR3	2410		3,0	
		CR4	2406		3,1	
		CR5	2423		2,5	
		CR6	2424		2,4	
		CR7	2416		2,7	
		CR8	2412		2,9	
		CR9	2419		2,6	
AC 14 Surf (BB) com fibras metálicas	2481	CF1	2389	2410	3,7	2,9
		CF2	2406		3,0	
		CF3	2412		2,8	
		CF4	2417		2,6	
		CF5	2415		2,6	
		CF6	2419		2,5	
		CF7	2419		2,5	
		CF8	2385		3,9	
		CF9	2423		2,3	
AC 14 Surf (BB) com fibras metálicas e ASIC	2830	CAF1	2733	2753	3,4	2,7
		CAF2	2730		3,5	
		CAF3	2746		3,0	
		CAF4	2762		2,4	
		CAF5	2750		2,8	
		CAF6	2760		2,5	
		CAF7	2758		2,5	
		CAF8	2765		2,3	
		CAF9	2771		2,1	

Pela análise dos valores da Tabela 9, na mistura com ASIC e fibras metálicas esperava-se valores de porosidade mais elevados. Comparando com um estudo de Nascimento *et al.* (2018), para uma mistura semelhante com 50% de ASIC, o valor médio do volume de vazios dos provetes foi de 3,9%, enquanto nesta dissertação o valor médio foi de 2,7%. Portanto, apesar de não ser um dos objetivos desta dissertação, a configuração da curva granulométrica da mistura com ASIC e fibras metálicas apresentou resultados muito satisfatórios, pelo que a formulação desta mistura deve ser integrada em trabalhos futuros com agregados ASIC.

4.4. Indução por aquecimento com um micro-ondas das misturas de betão betuminoso

Na presente dissertação fez-se um estudo sobre a indução de misturas betuminosas aquecendo-as com um micro-ondas. Pretendeu-se avaliar a evolução da temperatura de um provete ao longo do tempo para uma dada potência do micro-ondas, para encontrar diferenças da velocidade de aquecimento entre as três misturas produzidas.

Primeiramente, procurou-se avaliar a influência do valor da potência do micro-ondas no aquecimento das misturas, para verificar se o mesmo tinha influência na rapidez de aquecimento das misturas. Nesse contexto, realizaram-se ensaios de indução para três níveis de potência (540, 720 e 900 W) diferentes. Porém, os restantes parâmetros de ensaio foram mantidos idênticos ($\Delta t = 160$ s e $T_0 \approx 20$ °C).

De modo a aferir com maior rigor a distribuição da temperatura nos provetes, no *software* integrado com a câmara termográfica, inseriu-se três perfis de medição da temperatura média da respetiva área de cada perfil. Desse modo, aplicou-se um perfil em toda a área da amostra ($T_{med} = "A1"$), um perfil horizontal linear na parte inferior ($T_h = "1"$) e, por último, um perfil vertical linear na zona central da mesma ($T_v = "2"$), conforme se pode verificar na Figura 56.



Figura 56 - Perfis de temperatura com o respetivo valor de um provete circular

Os ensaios decorreram de acordo com os procedimentos e técnicas referidos no Capítulo 3 do presente trabalho. Na Figura 57 apresentam-se os valores da temperatura do perfil “A1” das misturas betuminosas em estudo em função dos diferentes níveis de potência utilizados.

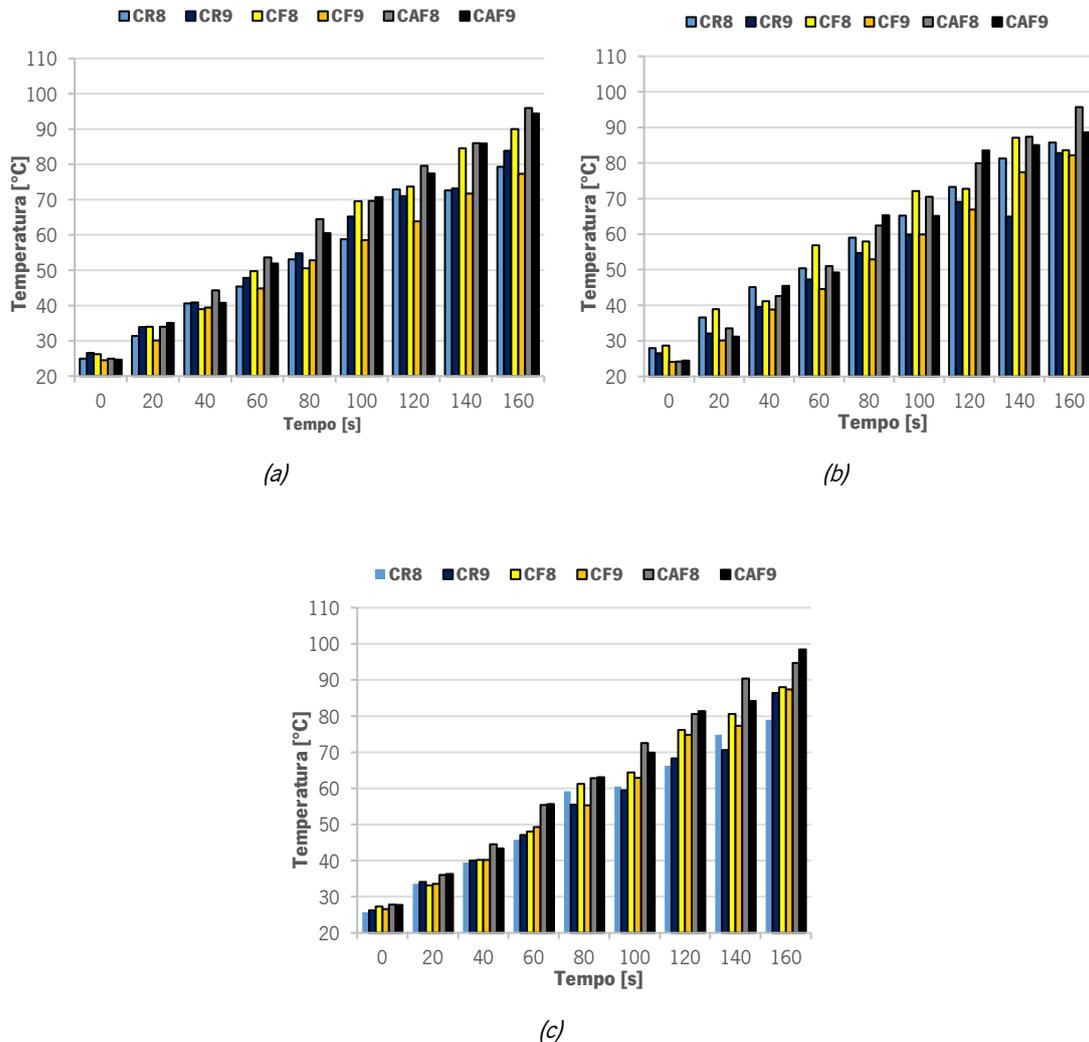


Figura 57 - Evolução da temperatura superficial para uma potência de (a) 540 W; (b) 720 W; (c) 900 W.

Com a análise da Figura 57 comprava-se que as misturas com fibras metálicas, para o mesmo intervalo de tempo de indução, apresentam temperaturas mais altas comparativamente com a mistura convencional. No entanto, o maior destaque recai nas misturas incorporadas com ASIC e fibras, onde as temperaturas são quase sempre as mais altas, principalmente para maiores tempos de indução (140 e 160 segundos). Com estes ensaios conseguiu-se comprovar que os elementos metálicos (ASIC e fibras de lã de aço) têm a capacidade de potenciar uma maior rapidez de aquecimento no processo de indução via micro-ondas. No entanto, é importante referir que quando se atinge temperaturas de indução muito altas (acima de 100 °C), o betume da mistura betuminosa envelhece e, por consequente, fica mais

rígido e a sua resistência à fadiga e à fratura tende a diminuir. Relativamente aos diferentes níveis de potência utilizados, as diferenças não foram tão significativas como se esperava, o que pode ter a ver com o próprio micro-ondas. No entanto, deu para perceber que para a potência de 900 W a evolução da temperatura para todas as misturas ocorreu de uma forma mais linear e uniforme, e por isso definiu-se sempre a potência de 900 W para os restantes ensaios de indução nesta dissertação.

Pela análise da temperatura interna dos provetes (Figura 58) conseguiu-se verificar que para os mesmos intervalos de tempo, as temperaturas medidas eram inferiores às temperaturas superficiais dos provetes. Além disso, verificou-se que as temperaturas internas foram maiores no provete CF7 (mistura betuminosa apenas com fibras metálicas). A razão de este provete apresentar temperaturas maiores em relação ao provete CAF7 (mistura com ASIC) pode ter a ver com a existência de uma quantidade elevada de fibras próximas do local de introdução das sondas.

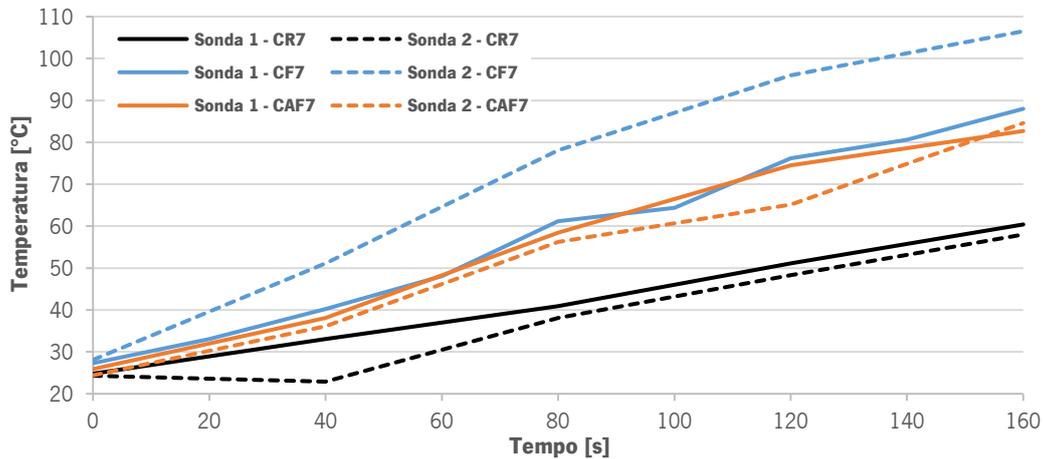


Figura 58 - Evolução da temperatura no interior do provete para um nível de potência de 900 W

Por último, neste subcapítulo realizaram-se ensaios de indução aos provetes semicirculares, avaliando a variação da temperatura nos perfis de temperatura anteriormente mencionados (Figura 59).

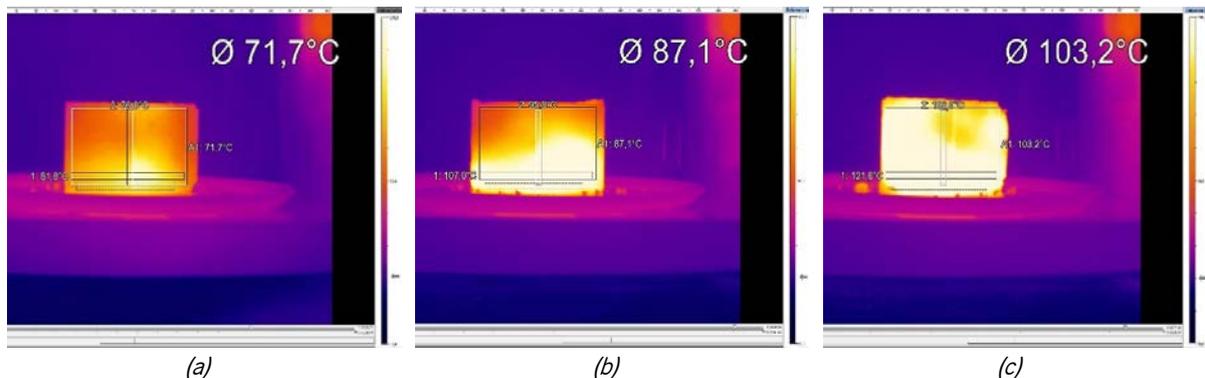


Figura 59 - Temperatura superficial nos provetes semicirculares (a) CF3A, (b) CF1A e (c) CAF1A para 80 s de indução

Estes ensaios auxiliaram na definição do tempo de indução a escolher para o ensaio de indução a aplicar a estes provetes semi-circulares (Figura 60), após terem sido previamente submetidos ao ensaio de rotura por flexão em três pontos. Com base nos resultados apresentados em seguida escolheu-se um tempo de indução de 60 segundos, mas esse tempo teve de ser corrigido para 80 segundos ao avaliar os resultados mecânicos após indução. A união das duas faces dos provetes não estava a ocorrer dentro do esperado, daí aumentou-se o tempo de indução e durante o processo de indução também se colocaram uns elásticos a volta dos provetes de modo a facilitar o processo de união.

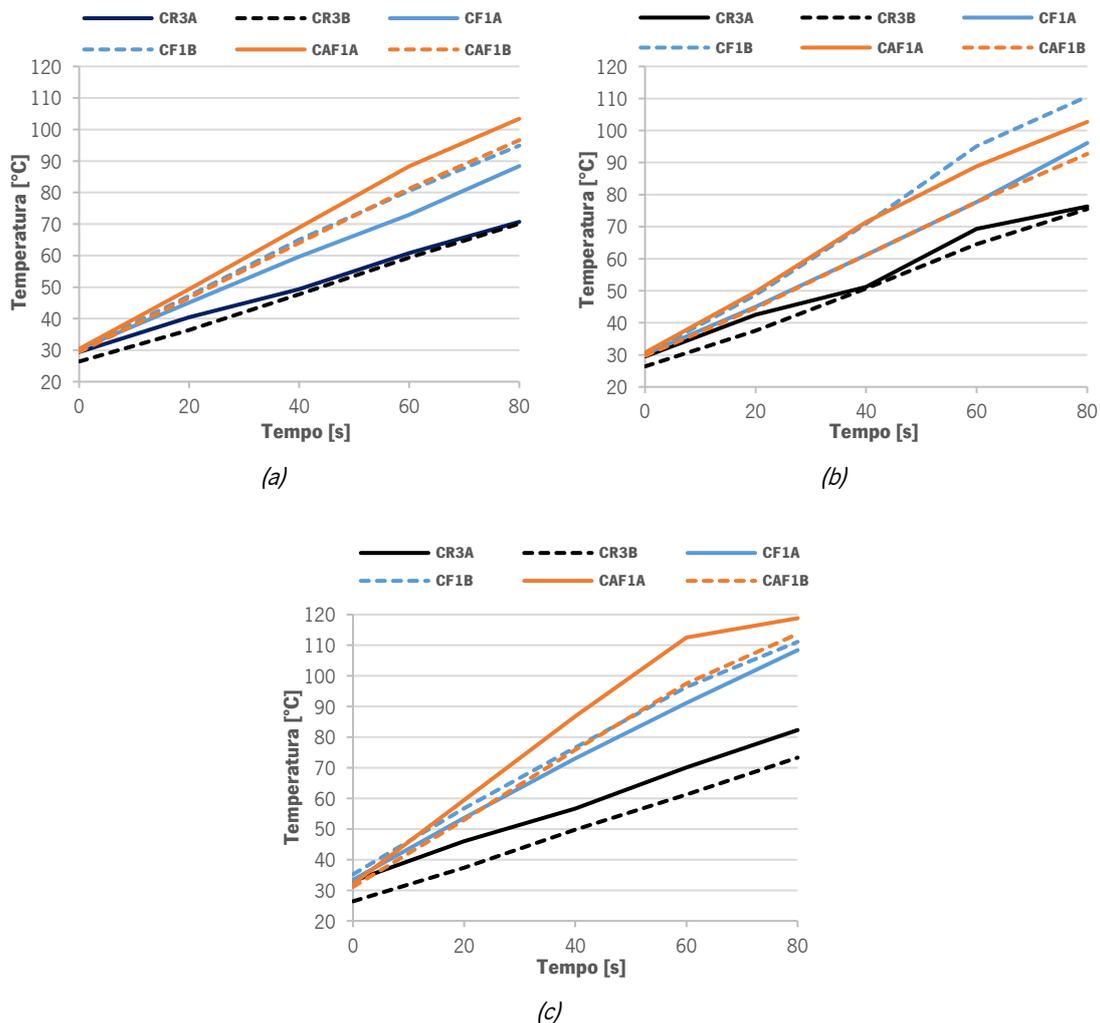


Figura 60 - Variação da temperatura superficial dos provetes semicirculares nos perfis: (a) T_{med} ; (b) T_{iv} ; (c) T_v

4.5. Caracterização mecânica e verificação da autorregeneração nas misturas betuminosas

Nesta secção analisa-se a recuperação de resistência das misturas betuminosas (autorregeneração) através de ciclos de ensaios de caracterização mecânica (fadiga e fratura) e de indução por micro-ondas.

4.5.1. Módulo de rigidez das misturas betuminosas

Primeiro realizou-se o ensaio de caracterização do módulo de rigidez das três misturas betuminosas produzidas com base nos procedimentos apresentados no Capítulo 3.

Nas Figuras 61 a 63 apresentam-se os principais resultados obtidos neste ensaio (evolução do módulo de rigidez e ângulo de fase com a frequência) à temperatura de 20 °C, para as vigas CR9, CF4 e CAF4, sujeitas a três ensaios de determinação do módulo e a dois ensaios de indução por micro-ondas.

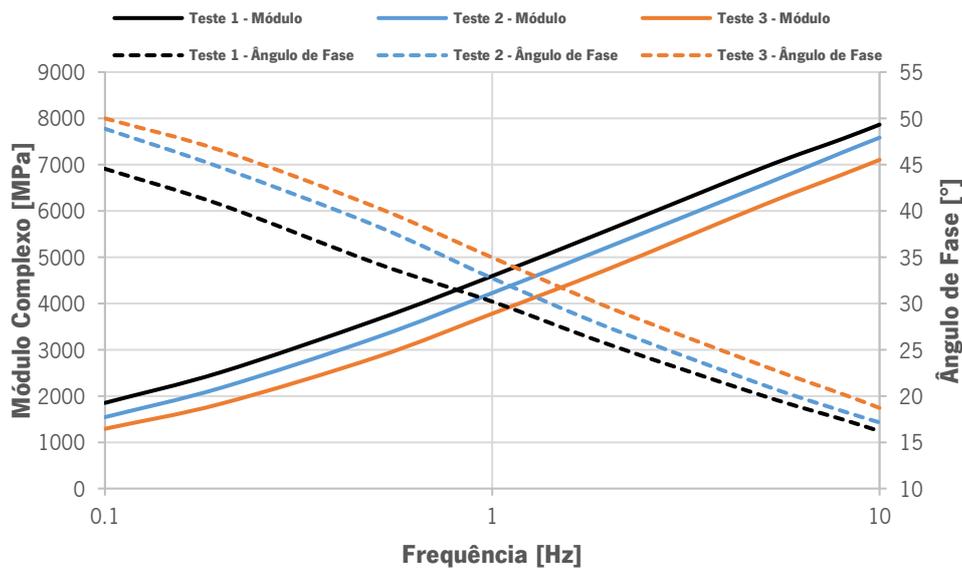


Figura 61 - Evolução do módulo de rigidez e do ângulo de fase nos três ensaios de módulo entre os quais se procedeu a ciclos de indução na viga CR9

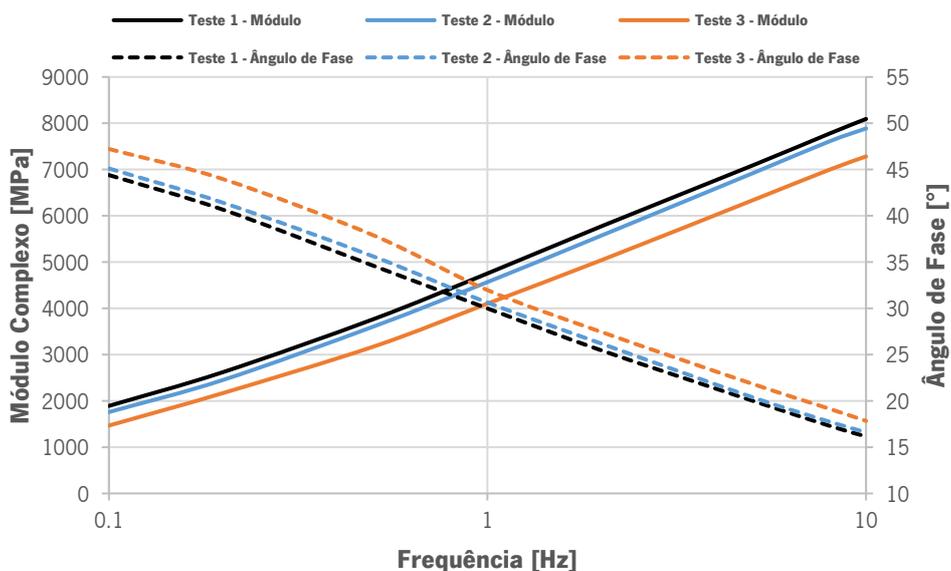


Figura 62 - Evolução do módulo de rigidez e do ângulo de fase nos três ensaios de módulo entre os quais se procedeu a ciclos de indução na viga CF4

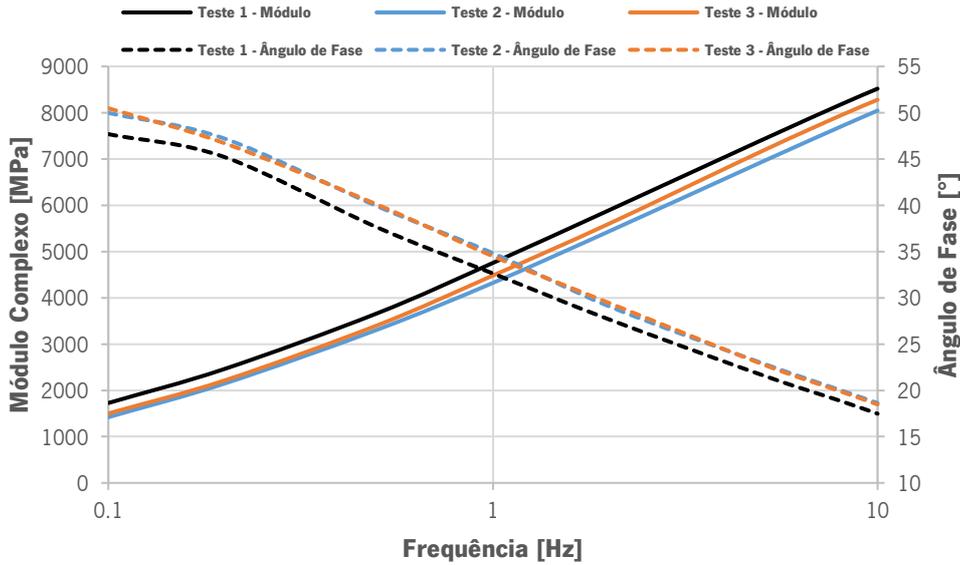


Figura 63 - Evolução do módulo de rigidez e do ângulo de fase nos três ensaios de módulo entre os quais se procedeu a ciclos de indução na viga CAF4

Com estes resultados, pretende-se identificar qual foi a variação do valor do módulo complexo e do ângulo de fase das vigas após o processo de indução. O restabelecimento da resistência, de forma total ou parcial, deveu-se ao processo de autorregeneração que ocorreu na viga e que foi potenciado pelo sistema de indução por micro-ondas. Com base nos resultados obtidos é possível concluir que a indução aplicada nas misturas contribui de forma preponderante na recuperação da resistência da mesma, pois mesmo após as vigas sofrerem o ensaio de determinação do módulo e o ensaio de resistência à fadiga, as vigas conseguem recuperar o módulo inicial quase na sua totalidade, ocorrendo em alguns casos a subida do módulo inicial em relação ao ensaio anterior, como se pode ver na Figura 64.

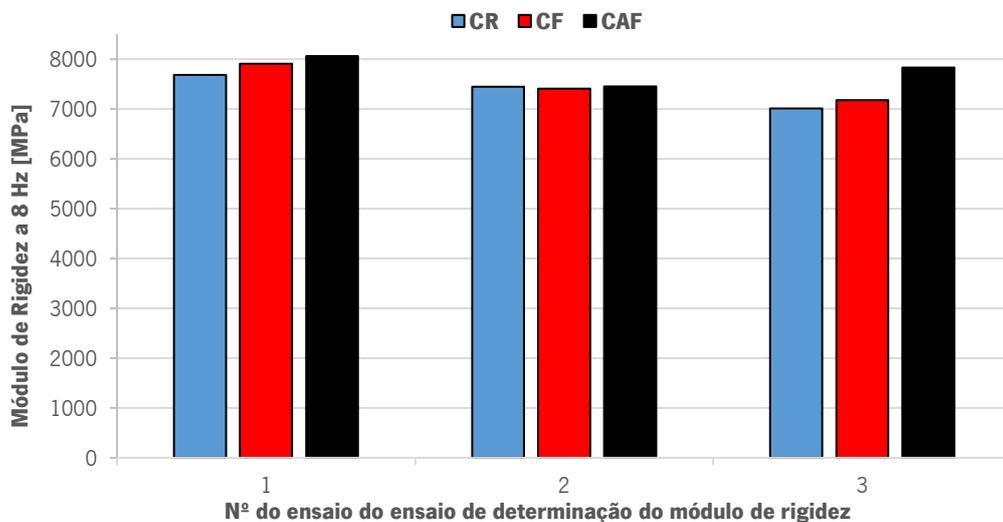


Figura 64 - Módulos de rigidez das misturas estudadas nas condições de ensaio referidas na norma (frequência 8 Hz e temperatura de 20 °C)

As razões que levaram a essa subida podem ser diversas, como por exemplo, uma melhor ligação entre os agregados e o betume ou o envelhecimento do ligante. De salientar que em certos casos a autorregeneração da mistura não só restabelece, como ainda melhora as suas propriedades iniciais. De acordo com os resultados, também é possível analisar que a mistura com ASIC e fibras metálicas tem um módulo de rigidez complexo ligeiramente superior em relação às restantes misturas. Por consequência, o seu ângulo de fase apresenta um comportamento inverso.

4.5.2. Resistência ao fendilhamento por fadiga das misturas betuminosas

Após o ensaio de determinação do módulo de rigidez, realizou-se o ensaio de resistência ao fendilhamento por fadiga nas misturas betuminosas produzidas com base nos procedimentos já mencionados nesta dissertação.

De modo a otimizar o nível de recuperação de resistência das vigas, no ensaio de fadiga o critério de paragem foi definido quando o módulo de rigidez da viga reduzia 35% em relação ao seu valor inicial. Fazia-se a respetiva anotação do valor do número de ciclos do ensaio correspondente a esse momento e, posteriormente, após submeter as vigas ao sistema de indução por micro-ondas durante um tempo de 210 segundos, voltou-se a ensaiar a viga à fadiga e definiu-se o mesmo critério de paragem. Este ciclo de ensaios repetiu-se duas vezes e com os resultados obtidos conseguiu-se quantificar qual foi o ganho de vida à fadiga da viga, ou seja, conseguiu-se calcular o *healing index* (Onifade e Birgisson) ou índice de regeneração (Onifade e Birgisson, 2017). O tempo de indução definido (210 segundos) foi baseado a partir de uns ensaios prévios de indução a vigas existentes no laboratório de misturas betuminosas do tipo AC 14 surf BB. O HI foi calculado (Equação 5) pela diferença do número de ciclos entre os ensaios de fadiga consecutivos para uma dada percentagem de redução do módulo de rigidez.

$$HI = \frac{N_f - N_x}{N_x} \quad (5)$$

Onde:

N_f é a total durabilidade da viga até um certo valor definido, medido em n° de ciclos;

N_x é a durabilidade da viga até um valor definido no primeiro ensaio, medido em n° de ciclos.

Antes de se apresentar os resultados obtidos, convém voltar a referir que das nove vigas ensaiadas à fadiga de cada mistura, apenas foram realizados dois ciclos de ensaios (fadiga – indução – fadiga) em três vigas, onde no terceiro ensaio as vigas foram levadas à rotura (redução de 50% do módulo de rigidez

inicial). Três das restantes vigas foram levadas à rotura logo no primeiro ensaio de fadiga, enquanto as outras três foram levadas à rotura após a conclusão do primeiro ciclo de indução.

Nas Figuras 65 a 67 faz-se uma análise do ganho de vida útil à fadiga de uma viga de cada mistura betuminosa em estudo (CR, CF e CAF) e faz-se uma comparação do número de ciclos necessários para ir à rotura entre uma viga que cumpriu os todos os ciclos de ensaios (redução do módulo de rigidez até ao 35% do valor inicial) com uma viga que apenas realizou um ensaio à fadiga (redução do módulo de rigidez em 50% do valor inicial). A escolha da viga para a respetiva comparação baseou-se em função da proximidade entre as curvas no primeiro ensaio de fadiga.

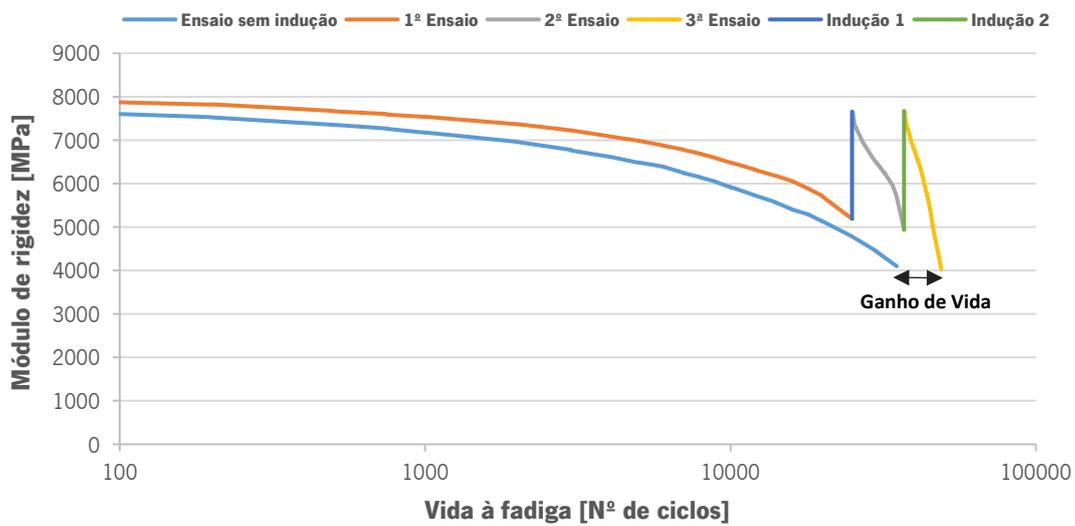


Figura 65 - Evolução do módulo de rigidez da viga CR6 no ensaio de fadiga ao longo dos dois ciclos de indução comparativamente com a viga CR2 (sem indução)

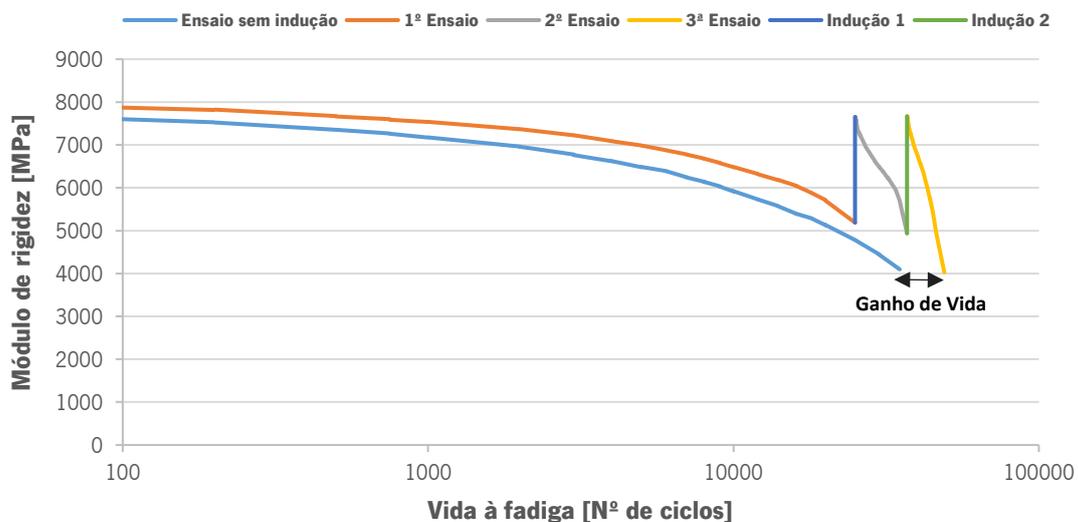


Figura 66 - Evolução do módulo de rigidez da viga CF9 no ensaio de fadiga ao longo dos dois ciclos de indução comparativamente com a viga CF2 (sem indução)

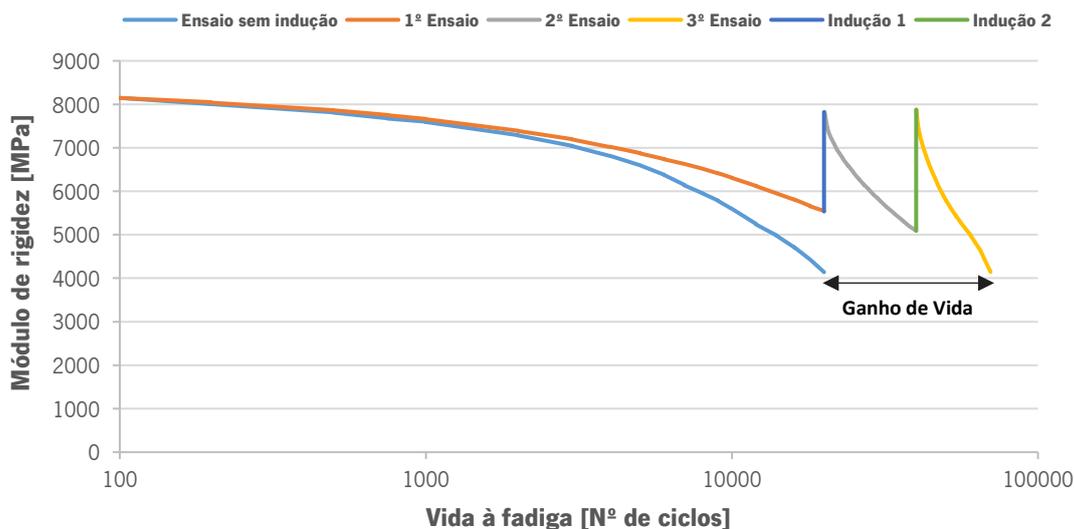


Figura 67 - Evolução do módulo de rigidez da viga CAF9 no ensaio de fadiga ao longo dos dois ciclos de indução comparativamente com a viga CAF2 (sem indução)

Relativamente à evolução da vida à fadiga para cada mistura betuminosa, verifica-se que o ganho de vida é bem perceptível e é importante salientar que o eixo horizontal dos gráficos está numa escala logarítmica. Assim, pode-se concluir que se o mecanismo de indução for aplicado num período certo da vida do pavimento, esse pavimento terá uma extensão significativa do período de vida para o qual foi inicialmente dimensionado. Logo, percebe-se que a utilização de sistemas de indução para reparação de pavimentos, além de ser uma solução mais sustentável do que as convencionais, também apresenta excelentes resultados laboratoriais. Portanto, seria interessante num futuro próximo fazer um estudo numa infraestrutura rodoviária em contexto real.

Em função dos dados adquiridos nos ensaios de fadiga (módulo de rigidez e nº de ciclos), construiu-se um gráfico de barras (Figura 68) onde se avalia o índice de regeneração das três misturas betuminosas estudadas, a partir do cálculo do HI. Para o cálculo do HI considerou-se como valor N_f o número total de ciclos até ao 3º ensaio de fadiga até reduzir o módulo de rigidez inicial do respetivo ensaio em 35%. Para N_x considerou-se o número de ciclos do 1º ensaio até a uma redução de 35% do módulo inicial. É importante referir que em função dos dados disponíveis, poder-se-iam apresentar diversos cálculos diferentes do HI, mas considerou-se que esta é a mais representativa, dado que se comparam o número de ciclos de cada ensaio, sempre com o mesmo critério de paragem ($0,35 \times E$). Portanto, consegue-se verificar qual o ganho de vida (nº de ciclos) de um ciclo para o outro.

A Figura 68 apresenta os valores médios das vigas foram submetidas a dois ensaios de indução. Com base nos resultados desta figura, verifica-se que o ganho de vida à fadiga foi bem perceptível em todas as

misturas estudadas. A mistura convencional apresentou resultados muito positivos, apresentando um HI de 1,9, ou seja, o ganho de vida dessa mistura foi de quase 200% graças à indução por micro-ondas.

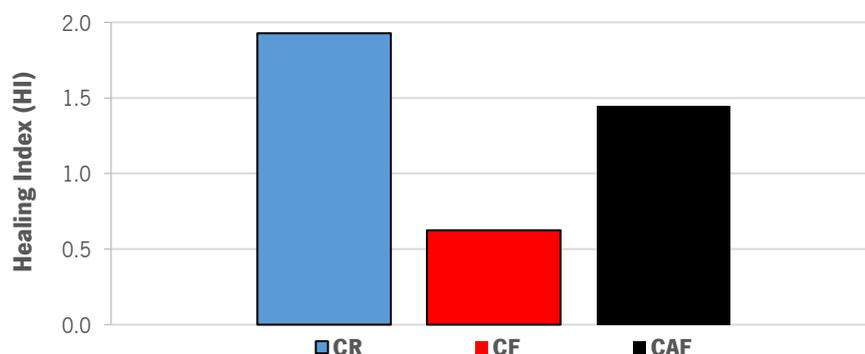


Figura 68 - Índice de regeneração (Onifade e Birgisson) em cada mistura betuminosa nos ensaios de fadiga

Assim, pode-se concluir que o processo de indução por micro-ondas também potencia a capacidade de regeneração nas misturas convencionais. Desse modo, deve-se continuar a fazer estudos nesta área para brevemente se aplicar estes processos de indução em pavimentos com misturas convencionais. A mistura com ASIC e fibras metálicas também apresentou bons resultados de autorreparação, visto que o número de ciclos aumentou quase em 150%. Por último, a mistura apenas com fibras metálicas apresentou os piores resultados, mas mesmo assim apresentou um HI acima de 50%.

De modo a evitar que as vigas se deformassem no aquecimento, as mesmas foram colocadas numa caixa em madeira durante o processo de indução. Com resultado dos ciclos de ensaios, as vigas sofreram deformações e em algumas partes desagregavam-se, principalmente nas zonas mais críticas (zonas de aplicação das cargas), como se pode ver na Figura 69.

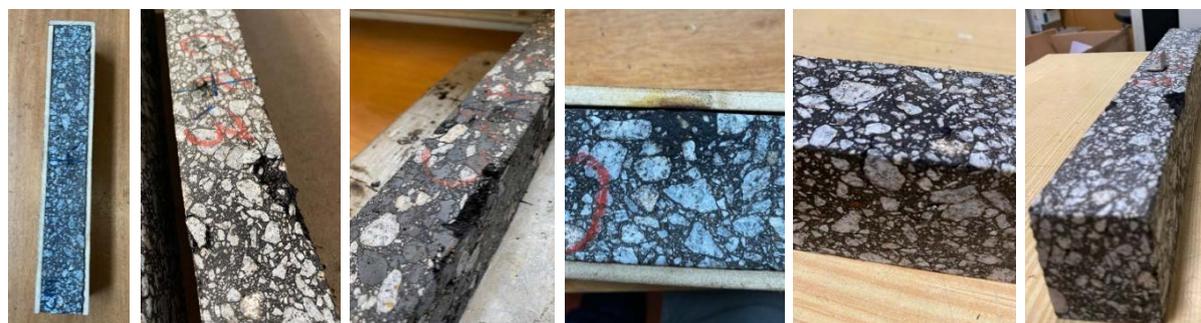


Figura 69 – Alteração do aspeto e provável degradação do betume nas vigas causado pelos ensaios cíclicos de caracterização mecânica e de indução

Por último, nas Figuras 70 e 71 analisam-se os valores das temperaturas médias de indução nas vigas. Neste caso não se verificou a influência nem do ASIC nem das fibras metálicas, tal como se tinha

observado para os carotes. Contudo, todas as misturas atingiram sempre temperaturas médias entre 60 e 70 °C, suficiente para promover a sua autorregeneração, como os resultados comprovam.

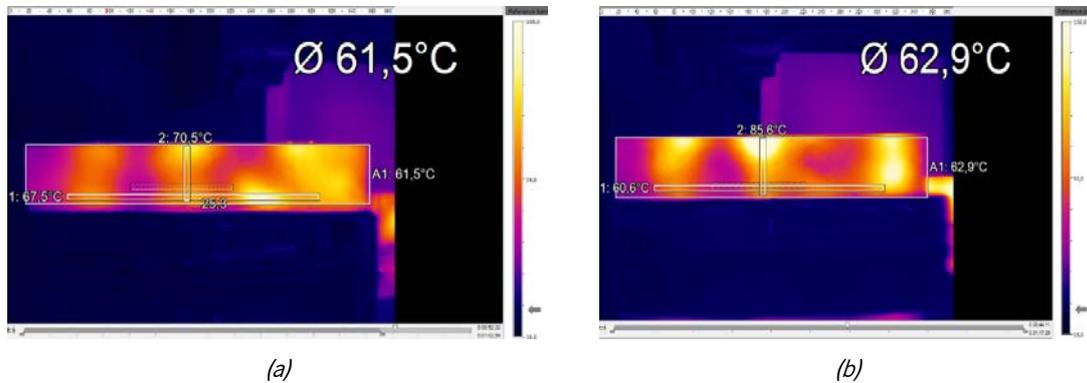


Figura 70 - Temperatura superficial da Viga CR6: (a) 1ª indução; (b) 2ª indução

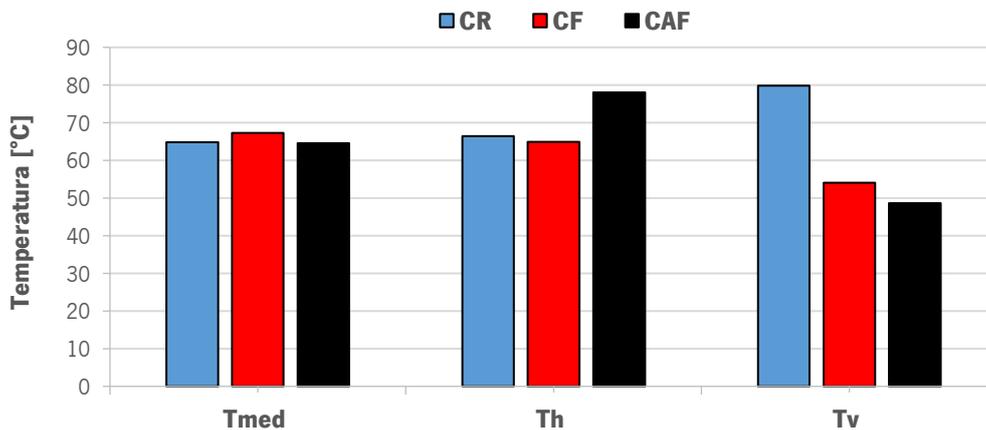


Figura 71 - Variação das temperaturas médias de indução das vigas de cada mistura

4.5.3. Resistência dos provetes semicirculares à fratura por flexão em três pontos

O último ensaio de caracterização mecânica realizado foi o ensaio de rotura por flexão em três pontos em provetes semicirculares (Figura 72). Escolheu-se este ensaio de caracterização para avaliar a capacidade de autorregeneração de uma mistura betuminosa quando esta é sujeita a uma rotura total do material, que pode dificultar a ação de regeneração.

Neste ensaio experimental foram utilizados no total 36 provetes (12 de cada mistura) em quatro ensaios de fratura e em três ensaios de indução. Inicialmente, definiu-se um tempo de indução de 60 segundos, mas na maioria dos provetes o processo de regeneração e de união dos provetes não estava a ocorrer dentro do esperado. Desse modo, aumentou-se o tempo de indução para 80 segundos e utilizou-se elástico a envolver o provete, e que permitiu resolver essa situação para todos provetes.

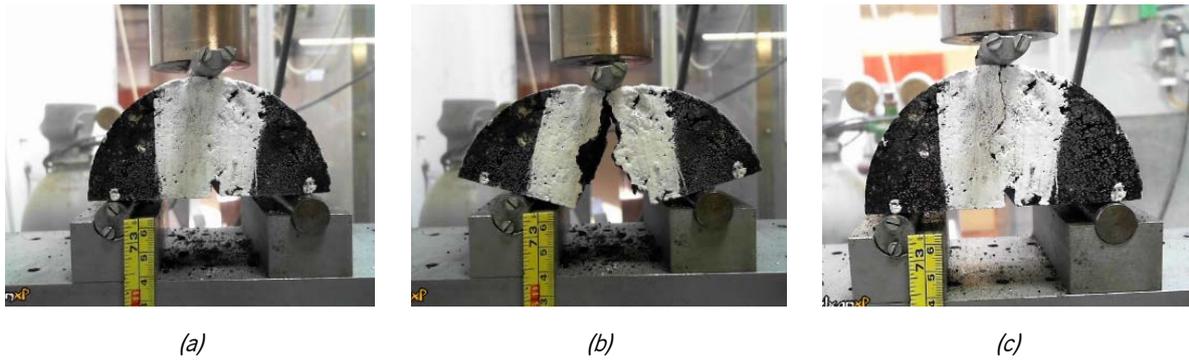


Figura 72 - Provete CR2A (a) antes do ensaio; (b) fenda do provete; (c) depois da indução

Após a recolha e a organização dos dados obtidos do ensaio de rotura (força e deslocamento), analisaram-se os valores mais importantes para cada provete, a força máxima e a deformação de pico. Porém, traçaram-se gráficos da curva força vs. deslocamento para todos os provetes ensaiados, que são apresentados na Figura 73 para um provete representativo de cada mistura betuminosa em estudo.

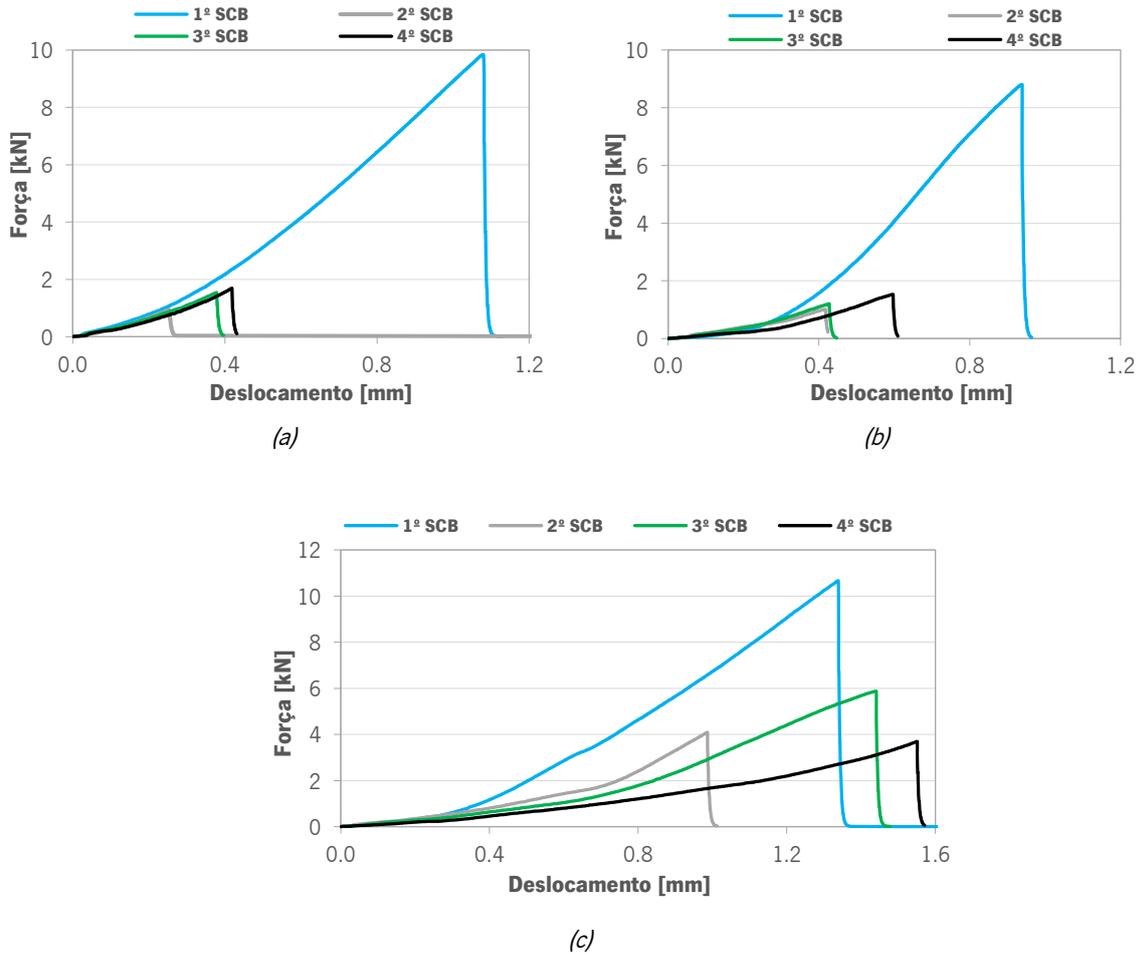


Figura 73 - Evolução da força com o deslocamento nos quatro ensaios de fratura: (a) CR3B; (b) CF3B; (c) CAF6

Adicionalmente, neste ensaio de caracterização mecânica também se quantificou a energia de fratura (Figura 74) ao ensaiar cada provete nos quatro ensaios de fratura, de acordo com a Equação 6.

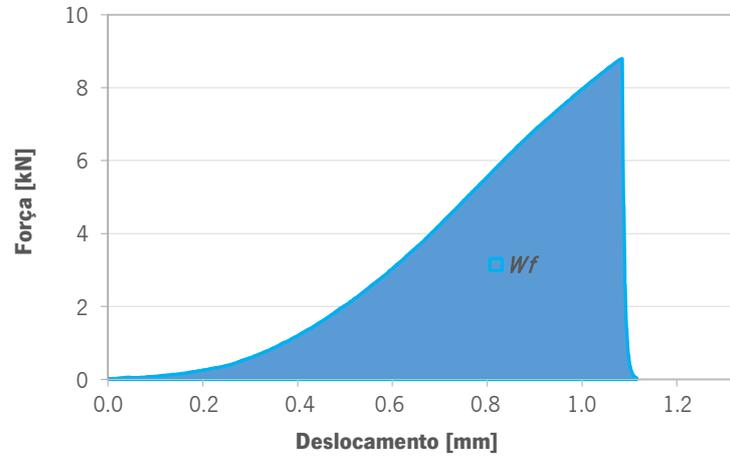


Figura 74 - Representação da energia ou trabalho de fratura (W_f)

$$G_f = \frac{W_f}{t - (w - a)} \quad (6)$$

Onde:

G_f é a energia de fratura, medida em Joules por milímetro ao quadrado (J/mm^2);

w_f é o trabalho de fratura, medido em kilo Newton vezes milímetro ($kN \cdot mm$);

t é a espessura do provete, medida em milímetro (mm);

w é a altura média do provete, medido em milímetro (mm);

a é a altura do entalhe, medido em milímetro (mm).

Os resultados obtidos em cada ensaio relativos à energia de fratura são apresentados na Tabela 10, e serviram para ajudar a analisar a capacidade de regeneração de cada mistura betuminosa.

Tabela 10 - Valores médios da energia de fratura em cada ensaio para cada mistura betuminosa

Mistura	Média de G_f [kJ/m^2]			
	1ª Fratura	2ª Fratura	3ª Fratura	4ª Fratura
CAF	972,2	72,8	255,4	164,2
CF	728,0	4,3	7,2	10,4
CR	510,6	1,2	6,5	9,7

Neste ensaio também se quantificou a capacidade de autorregeneração das misturas betuminosas. O *Healing Level* (HL) foi calculado pelo quociente entre a máxima força resistente da amostra depois de ser induzida e a máxima força resistente antes de ser induzida (Equação 1). Os valores do HL obtidos desse modo são apresentados na Figura 75.

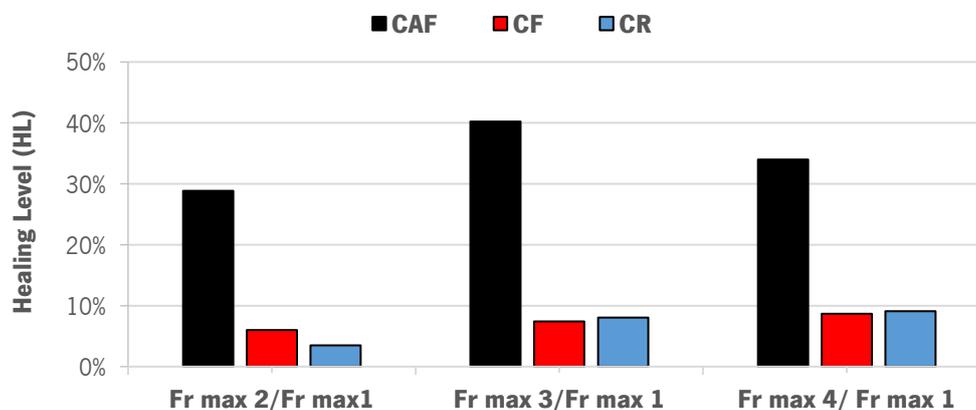


Figura 75 - Nível de autorregeneração (HL) dos provetes semicirculares nos ensaios realizados (1º ensaio antes da indução; 2º a 4º ensaios após 1º a 3º ciclo de indução)

Em primeiro lugar, é importante referir que pela análise das curvas dos gráficos da Figura 73, os provetes semicirculares no ensaio de rotura apresentaram um comportamento frágil, conforme se esperava, devido à temperatura muito baixa dos mesmos (-20 °C).

Com base nos dados obtidos é notório concluir que o dano induzido pelo ensaio de fratura foi recuperado de forma bem mais significativa na mistura betuminosa com ASIC. Além da força resistente máxima da mistura no 2º, 3º e 4º ensaio recuperar cerca de 40% da força resistente máxima inicial, pela análise da Figura 75 e da Tabela 10 também se percebe que existe um incremento do deslocamento de pico destas misturas. Daí a razão de os valores da energia de fratura para a mistura de ASIC serem bastantes superiores aos valores das restantes misturas betuminosas. Relativamente às outras misturas, tanto a mistura convencional como a mistura apenas com fibras têm baixos valores de autorregeneração e de energia de fratura após o 1º ensaio.

Por último, o ensaio de indução nos provetes semicirculares também se procedeu de acordo com os procedimentos previamente definidos e não ocorreram nenhuns contratemplos. Contrariamente ao que aconteceu com as vigas, nos provetes semicirculares foi evidente a influência do ASIC e das fibras metálicas na potenciação da rapidez de aquecimento das misturas. As temperaturas atingidas no processo de autorregeneração dos provetes semicirculares são apresentadas na Figura 76.

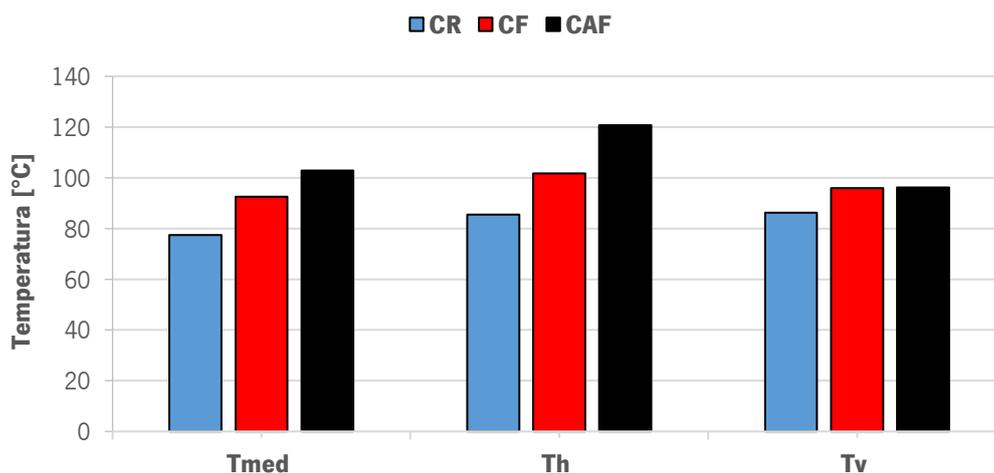


Figura 76 - Variação das temperaturas médias de indução dos provetes semicirculares de cada mistura

Pela análise da Figura 76, verifica-se que a mistura com ASIC foi a que atingiu valores mais altos de temperatura, valores um pouco acima do indicado. Portanto, em ensaios futuros a definição do tempo de indução deve ser feita em função da temperatura que se pretende atingir, pois isso pode influenciar os resultados obtidos.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. Conclusões

O objetivo principal desta dissertação de mestrado consistiu no estudo da influência da aplicação de subprodutos industriais (escória siderúrgica e fibras metálicas) em misturas de betão betuminoso, de maneira a que estes funcionem como elementos potenciadores de soluções de reparação de pavimentos rodoviários. Nesse contexto, foram produzidas misturas betuminosas com composições diferentes, tendo como fim a avaliação dos objetivos que foram propostos. Tendo como base os dados e os resultados obtidos nesta presente dissertação é possível concluir que os objetivos inicialmente definidos foram atingidos.

Após concluída a revisão da literatura, a componente experimental deste trabalho começou pela caracterização dos agregados e do ligante betuminoso. Na generalidade, os estudos realizados ao betume 35/50 da Galp estão dentro dos valores admissíveis, excetuando o valor do grau PG (76) que apresentou um valor acima. Portanto, pode-se concluir que este betume tem uma excelente capacidade resistente a temperaturas altas.

Além da produção de uma mistura de betão betuminoso convencional (AC14), fabricou-se uma mistura betuminosa com fibras metálicas e, por último, uma mistura composta por agregados de escória de siderúrgica (ASIC) e fibras metálicas. Relativamente à definição da percentagem adotada de fibras metálicas (7% do volume de betume) pode-se concluir que esta foi bem definida, pois quer nas vigas, quer nos provetes não existiram degradações (oxidação e crostas) visíveis a olho nu. Em trabalhos futuros, dever-se-á fazer estudos da análise de tomografia computadorizada, de modo a verificar se a dispersão espacial das fibras pelas misturas foi conseguida.

Quanto ao ensaio de indução por aquecimento com o micro-ondas, pela evolução da temperatura superficial e da temperatura interna ao longo tempo, foi evidente que de uma forma generalizada, o aquecimento para cada mistura se procedeu segundo um comportamento linear e que as temperaturas superficiais atingidas foram superiores às temperaturas internas. Pela análise das imagens da câmara termográfica é possível concluir que a distribuição das temperaturas foi mais uniforme nos provetes, comparativamente com as vigas, pois nos provetes o ensaio decorreu sempre com um prato giratório, ao passo que nas vigas não foi possível, devido as dimensões das mesmas e assim a distribuição das ondas de calor emitidas pelo micro-ondas não foram bem distribuídas nas vigas. Outro ponto a retirar

deste trabalho é a evidente influência dos subprodutos industriais no processo de aquecimento, onde o aquecimento das misturas compostas com esses resíduos foi bastante superior ao da mistura convencional. Assim, a adição destes materiais em misturas betuminosas, além de ir ao encontro dos pressupostas da economia circular, pode contribuir para uma diminuição do consumo energético associado ao processo de indução.

Em relação ao desempenho verificado nas diferentes misturas ao longo deste estudo, é importante referir que, apesar de não ser um dos objetivos principais do trabalho, na produção dos provetes conseguiu-se contornar a maior porosidade das misturas constituída por ASIC observada em estudos anteriores.

Relativamente à capacidade recuperação de resistência das misturas através de ciclos compostos por ensaios de caracterização mecânica e por ensaios de indução por micro-ondas, pode-se concluir que os resultados foram muito encorajadores dado que se verificou recuperação do dano aplicado em todos os métodos de ensaio utilizados.

No ensaio de determinação do módulo de rigidez, após as vigas serem induzidas no micro-ondas (este sistema potencia a autorregeneração) constatou-se que a recuperação do módulo de rigidez inicial deu-se quase na totalidade, e em alguns casos ocorreu a subida do módulo de rigidez. Portanto, além de suceder uma recuperação da resistência, existiu um melhoramento das características estruturais da mistura betuminosa.

A recuperação do dano no ensaio de fadiga também foi demais evidente em todas as misturas produzidas. A mistura convencional de betão betuminoso e a mistura com incorporação de ASIC apresentaram valores de índice de autorregeneração acima dos 150%, enquanto que a mistura apenas com fibras metálicas apresentou valores acima dos 50%. Com estes resultados, podemos concluir que a vida à fadiga na mistura AC14 e na mistura com ASIC duplicou. Consequentemente, a definição do critério de paragem do ensaio de fadiga (redução em 35% do módulo de rigidez) e dos procedimentos do ensaio de indução foram bem escolhidos (tempo de indução e temperaturas atingidas).

Por último, na caracterização mecânica das misturas, realizou-se o ensaio de rotura por flexão em três pontos em provetes semicirculares e os resultados deste método também foram ao encontro dos anteriores. Apesar deste método ser de fratura, os resultados de recuperação da resistência do provete foram visíveis em todas as misturas. Todavia, apenas os resultados na mistura incorporada com ASIC é que apresentaram índices de autorregeneração mais altos, cerca de 40%, ao passo que nas restantes misturas os valores rondaram uma recuperação de 10%. Deste conjunto de ciclos de ensaios (fratura-

indução-fratura), pode-se concluir que a utilização do ASIC contribui de forma preponderante para a uma maior recuperação da força resistente máxima inicial.

Finalizando, globalmente o trabalho desenvolvido em toda a dissertação foi ao encontro dos objetivos propostos e veio complementar e enriquecer o conhecimento sobre o processo de autorregeneração em misturas betuminosas utilizando um sistema de indução por micro-ondas, sendo que esse processo pode ser ainda mais potenciado pela introdução de subprodutos da indústria siderúrgica nas misturas betuminosas.

5.2. Trabalhos futuros

Através das conclusões mencionadas anteriormente, é importante dar continuidade a estudos científicos neste âmbito, pois apesar de os resultados terem sido satisfatórios, ainda existem muitas dúvidas relacionadas com os processos de potenciação de autorregeneração em misturas de betão betuminoso. Nesse contexto, seguidamente apresentam-se algumas sugestões para desenvolvimentos de trabalhos futuros.

Primeiramente, para uma maior e melhor comparação da influência dos subprodutos industriais, em futuros trabalhos devem-se produzir misturas com diferentes parâmetros relativos às fibras metálicas (tipo, geometria e percentagens), misturas com maiores percentagens de agregados ASIC, misturas betuminosas com diferentes tipos de betume e misturas com incorporação de material fresado.

Relativamente aos ensaios de indução, futuramente também se deve comparar a indução via micro-ondas com a indução eletromagnética para quantificar as vantagens e as desvantagens respetivas de cada ensaio.

Relacionado com este tema, também se deve fazer estudos relacionados com a incorporação de agentes encapsulados rejuvenescedores em misturas de betão betuminoso. Deve-se verificar, se estas cápsulas contribuem de igual maneira para o processo de autorregeneração de misturas betuminosas, como os ensaios de indução anteriormente mencionados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al-Mansoori, T., Norambuena-Contreras, J., Micaelo, R., Garcia, A. (2018). Self-healing of asphalt mastic by the action of polymeric capsules containing rejuvenators, *Construction and Building Materials*, Vol. 161, pp. 330-339.
- ALT-MAT (1999). *Alternative materials in road construction*.
- Andrade, R.M.A. (2015). *Caracterização Laboratorial de Misturas Betuminosas com Incorporação de Agregado Siderúrgico Inerte para Construção (ASIC)*, Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na área de especialização de Vias de Comunicação e Transportes, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- Apostolidis, P. (2015). *Experimental and numerical investigation of induction heating in asphalt mixes*, Thesis for the degree Master of Science (MSc) in Structural Engineering, Delft University of Technology.
- Araújo, J.P.C., Oliveira, J.R.M., Silva, H.M.R.D. (2014). The importance of the use phase on the LCA of environmentally friendly solutions for asphalt road pavements, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 32, pp. 97-110.
- Asphalt Institute (1983). *Principles of Construction of Hot-Mix Asphalt Pavements*, Lexington.
- Association, E.A. (2020). *A Sustainable Industry for a Sustainable Europe*.
- Aurstad, J., Uthus, N.S., Telle, R., Bakløkk, L.J. (2016). The influence of asphalt workmanship on pavement service life, *E&E Congress 2016 | 6th Euraspalt & Eurobitume Congress | 1-3 June 2016* Prague, Czech Republic.
- Balanay, R., Halog, A. (2016). Charting Policy Directions for Mining's Sustainability with Circular Economy, Vol. 1 (2), pp. 219-231.
- Barros, A.G.d. (2020). *O efeito do uso de agentes rejuvenescedores encapsulados sobre a autorregeneração de misturas asfálticas*, Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB.
- Bazin, P., Saunier, J. (1967). Deformability, fatigue and healing properties of asphalt mixes, *Proceedings of the 2nd International Conference on the Structural - Design of Asphalt Pavements*, Ann Arbor, Michigan, USA.
- Beatrice, B. (2017). *La transizione all'economia circolare in Europa: come monitorare i progressi e ruolo della LCA*; <https://www.ciclodivita.it/2017/07/la-transizione-alleconomia-circolare-in-europa-come-monitorare-i-progressi-e-ruolo-della-lca/>; Acedido em 15-12-2020.
- BIR (2015). Bureau of International Recycling Bruxelas, Bélgica.
- Branco, F., Pereira, P., Picado Santos, L. (2016). *Pavimentos Rodoviários*.

- Branco, V.T. (2004). *Caracterização de misturas asfálticas com o uso de escória de aciaria como agregado*, Tese para obtenção do grau de Mestre de Ciências da Engenharia Civil.
- Cepca (2014). Manual de Pavimentação.
- Correia, A.G., Ferreira, S., Araújo, N., Castro, F., Trigo, L., Roque, A.J., Fortunato, E., Santayana, F.P.d. (2006). *Estudo de viabilidade de aplicação de agregado siderúrgico inerte para construção (ASIC) da Siderurgia Nacional do Seixal em camadas de base, sub-base, leito de pavimento e aterro*.
- Cross, S.A., Chesner, W.H., Justus, H.G., Kearney, E.R. (2011). Life-Cycle Environmental Analysis for Evaluation of Pavement Rehabilitation Options, Vol. 2227 (1), pp. 43-52.
- Derek Lewis, R.S. (2021). *Case Studies*.; <http://dereklewis.co.uk/>.
- Dogan Halkman, H.B., Yücel, P.K., Halkman, A.K. (2014). Non-thermal processing | Microwave., *Encyclopedia of Food Microbiology (Second Edition)*, p. 962-965, Academic Press, Oxford.
- EAPA (2019). *A European Green Deal -The asphalt industry's contributions to climate neutrality and preservation of Europe's natural environment*.
- EAPA (2020). Asphalt in figures 2019.
- Ellen MacArthur Foundation (2013). Towards the Circular Economy - Economic and business rationale for an accelerated transition.
- Eurofer (2020). *European Steel in figures*.; www.eurofer.eu.
- European Asphalt Pavement Association (2020). *Asphalt and Circular Economy*, <https://eapa.org/recycling/>.
- European Commission (2019). *Towards a Sustainable Europe by 2030*, https://ec.europa.eu/commission/publications/reflection-paper-towards-sustainable-europe-2030_pt; Acedido em 02-12-20.
- European Commission (2020). *Circular Economy Action Plan*, <https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/>.
- Euroslag (2021). *Steel industry by-products. Statistics 2018*. ; <http://www.euroslag.com/>; Acedido em 05-01-2021.
- Eurostat (2018). *Desenvolvimento sustentável na União Europeia – Relatório de acompanhamento sobre os progressos para alcançar os ODS no contexto da UE* https://ec.europa.eu/commission/sites/beta-political/files/reflection_paper_sustainable_annexii_pt.pdf.
- Fakhri, M., Ahmadi, A. (2017a). Evaluation of fracture resistance of asphalt mixes involving steel slag and RAP: Susceptibility to aging level and freeze and thaw cycles, *Construction and Building Materials*, Vol. 157, pp. 748-756.
- Fakhri, M., Ahmadi, A. (2017b). Recycling of RAP and steel slag aggregates into the warm mix asphalt: A performance evaluation, *Construction and Building Materials*, Vol. 147, pp. 630-638.

- Fakhri, M., Bahmai, B.B., Javadi, S., Sharafi, M. (2020). An evaluation of the mechanical and self-healing properties of warm mix asphalt containing scrap metal additives, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 253, pp. 119963.
- Ferreira, S.M.R. (2010). *Comportamento Mecânico e Ambiental de Materiais Granulares. Aplicação às Escórias de Aciaria Nacionais*, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade do Minho
- Fortunato, E., Roque, A., Correia, A. (2018). *Comportamento estrutural de um trecho rodoviário construído com agregado siderúrgico inerte para construção (ASIC)*.
- Freitas, E.F. (2004). *Contribuição para o Desenvolvimento de Modelos de Comportamento dos Pavimentos Rodoviários Flexíveis. Fendilhamento com Origem na Superfície*, Tese submetida para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil pela Universidade do Minho.
- Freitas, H.B., Motta, L.M.G.d. (2008). Uso de escória de aciaria em misturas asfálticas de módulo elevado., *Transportes, Vol 16*.
- Gallego, J., del Val, M.A., Contreras, V., Páez, A. (2013). Heating asphalt mixtures with microwaves to promote self-healing, *Construction and Building Materials*, Vol. 42, pp. 1-4.
- Galp Energia (2020). *Betumes de pavimentação*; <https://galp.com/pt/pt/empresas/construcao>.
- García-Hernández, A., Salih, S., Ruiz-Riancho, I., Norambuena-Contreras, J., Hudson-Griffiths, R., Gomez-Meijide, B. (2020). Self-healing of reflective cracks in asphalt mixtures by the action of encapsulated agents, *Construction and Building Materials*, Vol. 252, pp. 118929.
- García, Á. (2012). Self-healing of open cracks in asphalt mastic, *Fuel*, Vol. 93, pp. 264-272.
- García, A., Bueno, M., Norambuena-Contreras, J., Partl, M.N. (2013). Induction healing of dense asphalt concrete, *Construction and Building Materials*, Vol. 49, pp. 1-7.
- García, A., Jelfs, J., Austin, C.J. (2015). Internal asphalt mixture rejuvenation using capsules, *Construction and Building Materials*, Vol. 101, pp. 309-316.
- García, A., Salih, S., Gómez-Meijide, B. (2020). Optimum moment to heal cracks in asphalt roads by means electromagnetic induction, *Construction and Building Materials*, Vol. 238, pp. 117627.
- García, Á., Schlangen, E., van de Ven, M., Sierra-Beltrán, G. (2010). Preparation of capsules containing rejuvenators for their use in asphalt concrete, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 184 (1), pp. 603-611.
- Gomes Correia, A., Martins, J., Ferreira, S., Roque, A.J., Caldeira, L., Fortunato, E. (2009). *Trecho experimental no itinerário EN 311 - Fafe/Várzea Cova. Observação e monitorização do comportamento mecânico. Relatório anual.*, Centro para a Valorização de Resíduos, Universidade do Minho, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Gomes Correia, A., Martins, J., Ferreira, S., Roque, A.J., Caldeira, L., Fortunato, E. (2010). *Trecho experimental no itinerário EN 311 - Fafe/Várzea Cova. Observação e monitorização do comportamento mecânico e ambiental. Relatório final.*, Centro para a Valorização de Resíduos, Univ. do Minho, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

- Gómez Meijide, B., Ajam, H., Lastra-González, P., García, A. (2016). Effect of air voids content on asphalt self-healing via induction and infrared heating, *Construction and Building Materials*, Vol. 126, pp. 957-966.
- Gonzalez-Torre, I., Norambuena-Contreras, J. (2020). Recent advances on self-healing of bituminous materials by the action of encapsulated rejuvenators, *Construction and Building Materials*, Vol. 258, pp. 119568.
- González, A., Norambuena-Contreras, J., Storey, L., Schlangen, E. (2018). Effect of RAP and fibers addition on asphalt mixtures with self-healing properties gained by microwave radiation heating, *Construction and Building Materials*, Vol. 159, pp. 164-174.
- Guo, M., Tan, Y., Wang, L., Hou, Y. (2017). A state-of-the-art review on interfacial behavior between asphalt binder and mineral aggregate, *Frontiers of Structural and Civil Engineering*.
- He, K., Wang, L., Li, X. (2020). Review of the Energy Consumption and Production Structure of China's Steel Industry: Current Situation and Future Development, Vol. 10 (3), pp. 302.
- Ihobe (1999). *Libro blanco para la minimización de residuos y emisiones - Escorias de acería*.
- Infraestruturas de Portugal (2016). *Rede Rodoviária*, <https://www.infraestruturasdeportugal.pt/rede/rodoviaria>; Acedido em 15-01-2021.
- InIR (2009). *Diretivas para a Conceção de Pavimentos - Critérios de Dimensionamento. Documento Base. Instituto de Infraestruturas Rodoviárias, I.P. Lisboa*.
- Kara, M., Günay, E., Kavakli, B., Tayfur, S., Eren, K., Karadag, G. (2004). The Use of Steel Slag in Asphaltic Mixture, *Key Engineering Materials*, Vol. 264-268, pp. 2493-2496.
- Kavussi, A., Qazizadeh, M.J. (2014). Fatigue characterization of asphalt mixes containing electric arc furnace (EAF) steel slag subjected to long term aging, *Construction and Building Materials*, Vol. 72, pp. 158-166.
- Kim, Y.-R., Little, D.N., Lytton, R.L. (2003). Fatigue and Healing Characterization of Asphalt Mixtures, Vol. 15 (1), pp. 75-83.
- Konstantinovas, B., Ventura Bento, N., Sanches, T. (2019). *Economia Circular no Setor da Construção Civil I - Ciclo dos materiais*, <http://www.ccdr-lvt.pt/files/3dc71cc1ec03480c312bf8d9f67da0e0f7305e77.pdf>.
- Lima, N., Nascimento, J., Filho, V., Albernaz, C. (2000). Pavimentos de alto desempenho estrutural executados com escória de aciaria, *10ª Reunião de Pavimentação Urbana*, Uberlândia, MG.
- Liu, Q., Chen, C., Li, B., Sun, Y., Li, H. (2018). Heating Characteristics and Induced Healing Efficiencies of Asphalt Mixture via Induction and Microwave Heating, *Materials (Basel, Switzerland)*, Vol. 11 (6), pp. 913.
- Liu, Q., Schlangen, E., van de Ven, M., van Bochove, G., van Montfort, J. (2012). Evaluation of the induction healing effect of porous asphalt concrete through four point bending fatigue test, *Construction and Building Materials*, Vol. 29, pp. 403-409.

- Lopes, Ó.M.M. (2009). *Misturas betuminosas – determinação das características para o cálculo dos pavimentos*, Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de Mestre em Engenharia Civil —especialização em Vias de Comunicação, U.Porto - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Machado, A.T. (2000). *Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria*, Tese de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Mantalovas, K., Di Mino, G. (2019). The Sustainability of Reclaimed Asphalt as a Resource for Road Pavement Management through a Circular Economic Model, Vol. 11 (8), pp. 2234.
- Mantalovas, K., Di Mino, G. (2020). Integrating Circularity in the Sustainability Assessment of Asphalt Mixtures, Vol. 12 (2), pp. 594.
- Marta, V.-C., Pedro, L.-G., Miguel Ángel, C.-P., Indacochea-Vega, I. (2019). 15 - The use of recycled plastic as partial replacement of bitumen in asphalt concrete, *Use of Recycled Plastics in Eco-efficient Concrete*, p. 327-347, Woodhead Publishing.
- Martinho, F., Fernandes, E., Korczak, P. (2007). A Utilização de Agregados Siderúrgicos Inertes na Construção de Aterros em Infraestruturas Viárias, *XIV CILA - Congresso Ibero-Latino Americano do Asfalto*, La Habana.
- Martinho, F.d.C.G. (2014). *Misturas Betuminosas Temperadas com Incorporação de Subprodutos Industriais – Caracterização e Validação Tecnológica.*, Tese aprovada em provas públicas para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico.
- Nações Unidas (2018). Goal #11: Sustainable Cities and Communities.
- Nascimento, L.P.d., Silva, H.M.R.D.d., Oliveira, J.R.M.d. (2018). *Relatório de Atividades do Projeto Estudo Experimental de Utilização de ASIC em Betão e Misturas Betuminosas: Estudo Laboratorial de Misturas Betuminosas com Elevada Taxa de Incorporação de ASIC.*
- National Slag Association (2014). <http://nationalslag.org/publications/>; Acedido em 06-01-2021.
- NL Agency (2011). *Self healing materials - concept and applications*, Second Edition ed, Ministry of Economic Affairs, Agriculture and innovation.
- Norambuena-Contreras, J., Gonzalez-Torre, I. (2017). Influence of the Microwave Heating Time on the Self-Healing Properties of Asphalt Mixtures, Vol. 7 (10), pp. 1076.
- Norambuena-Contreras, J., Serpell, R., Valdés Vidal, G., González, A., Schlangen, E. (2016). Effect of fibres addition on the physical and mechanical properties of asphalt mixtures with crack-healing purposes by microwave radiation, *Construction and Building Materials*, Vol. 127, pp. 369-382.
- Oluwasola, E.A., Hainin, M.R., Aziz, M.M.A. (2015). Evaluation of asphalt mixtures incorporating electric arc furnace steel slag and copper mine tailings for road construction, *Transportation Geotechnics*, Vol. 2, pp. 47-55.
- Onifade, I., Birgisson, B. (2017). Damage and fracture characterization of asphalt concrete mixtures using the equivalent micro-crack stress approach, *Construction and Building Materials*, Vol. 148, pp. 521-530.

- Pais, J., Pereira, P., Azevedo, M.D. (2000). A Reflexão de Fendas no dimensionamento de Reforços de Pavimentos Flexíveis, *A Qualidade Rodoviária na Viragem do Século, 1º Congresso Rodoviário Português - Estrada 2000*, Lisboa, pp. pp 627-637.
- Parente, E.B., Boavista, A.H., Soares, J.B. (2003). Estudo do comportamento mecânico de misturas de solo e escória de aciaria para aplicação na construção rodoviária na região metropolitana de Fortaleza. , *XVII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET*, pp. pp. 215-222.
- PavementLCM (2017). *Life Cycle Management of green asphalt mixtures and road pavement*, <https://www.pavementlcm.eu/>.
- Pereira, P., Miranda, V. (1999). *Gestão da Conservação dos Pavimentos Rodoviários*, Universidade do Minho.
- Reid, J.M. (2001). The use of alternative materials in road construction.
- Rohde, L. (2002). *Uso de escória de aciaria em camadas granulares de pavimentos - Estudo laboratorial*. , Dissertação de pós-graduação em engenharia civil na Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Roque, A.J., Correia, A.G., Fortunato, E., Santayana, F.P.d., Castro, F., Ferreira, S., Trigo, L. (2006). A geotecnia na valorização de agregados siderúrgicos inertes reciclados – um projecto nacional., *Encontro nacional do saneamento básico*, Cascais, Portugal.
- SAMARIS (2006). *Sustainable and Advanced MAterials for Road InfraStructure*.
- Silva, E.A. (1994). Uso de escória de aciaria em pavimentação viária., *Reunião anual de Pavimentação, 28*, Rio de Janeiro, pp. pp. 261-283.
- Silva, H., Oliveira, J., Ferreira, C., Peralta, E. (2009). Evaluation of the rheological behaviour of Warm Mix Asphalt (WMA) modified binders, *7th International RILEM Symposium on Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials (ATCBM09)*, pp. pp. 661-673.
- Silva, H.M.R.D.d. (2005). *Caracterização do mastique betuminoso e da ligação agregado-mastique. Contribuição para o Estudo do Comportamento das Misturas Betuminosas*, Tese de Doutoramento Engenharia Civil – Vias de Comunicação, Universidade do Minho - Escola de Engenharia.
- Smart Waste Portugal (2017). A transição para a economia circular: a colaboração entre entidades e as novas oportunidades de negócios. .
- Song, I., Little, D., Masad, E., Lytton, R.L. (2005). Comprehensive evaluation of damage in asphalt mastics using x-ray CT, continuum mechanics, and micromechanics, *Association of Asphalt Paving Technologists Technical Sessions*, Long Beach, California, USA.
- Sorlini, S., Sanzeni, A., Rondi, L. (2012). Reuse of steel slag in bituminous paving mixtures, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. Vol.209-210, pp. pp.84-91.
- SteelPhalt (2021). *Roadmaking Project Gallery & Case Studies*, <http://www.steelphalt.com/resources/project-gallery.php>; Acedido em 08-01-2021.
- 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, pp. pp.5110-5118.

- Tabaković, A., O'Prey, D., McKenna, D., Woodward, D. (2019). Microwave self-healing technology as airfield porous asphalt friction course repair and maintenance system, *Case Studies in Construction Materials*, Vol. 10, pp. e00233.
- Tarbay, E., Azam, A., El-Badawy, S. (2019). Waste materials and by-products as mineral fillers in asphalt mixtures, *Innovative Infrastructure Solutions*, Vol. 4.
- Undesa (2014). World Urbanization Prospects: The 2014 Revision.
- United Nations (2019). *World Population Prospects 2019: Highlights*, <https://www.un.org/development/desa/publications/world-population-prospects-2019-highlights.html>.
- United Nations Environment Programme (2016). *Global Material Flows and Resource Productivity-Assessment Report for the UNEP International Resource Panel*, <https://www.resourcepanel.org/reports/global-material-flows-and-resource-productivity-database-link>.
- World Steel Association (2015). *Steel in the Circular Economy*.
- World Steel Association (2020a). *Fact sheet - Steel and raw materials*.
- World Steel Association (2020b). *Steel Industry Co-Products*, <https://www.worldsteel.org/publications/position-papers/co-product-position-paper.html>; Acedido em 20-12-2020.
- World Steel Association (2020c). *Steel Statistical Yearbook 2020 concise version - A cross-section of steel industry statistics 2010 - 2019*.
- World Steel Association (2020d). *World Steel in Figures*.
- World Steel Association (2021). *Production of crude steel in electric furnaces*, https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/steel-data-viewer/P1_crude_steel_EF/CHN/IND; Acedido em 06-01-2021.
- Wu, S., Xue, Y., Ye, Q., Chen, Y. (2007). Utilization of steel slag as aggregates for stone mastic asphalt (SMA) mixtures, *Building and Environment*, Vol. 42 (7), pp. 2580-2585.
- Yuan, Y., Zhu, X., Chen, L. (2020). Relationship among cohesion, adhesion, and bond strength: From multi-scale investigation of asphalt-based composites subjected to laboratory-simulated aging, *Materials & Design*, Vol. 185, pp. 108272.
- Ziemkiewicz, P. (1998). Steel slag: applications for AMD control, *Proceedings of the 1998 conference on Hazardous Waste Research*, pp. 44-62.

ANEXOS*Tabela 11 - Temperaturas atingidas na indução das vigas*

Viga	Potência [W]	Δ_t [s]	1ª Indução			2ª Indução		
			T _{med} [°C]	T _h [°C]	T _v [°C]	T _{med} [°C]	T _h [°C]	T _v [°C]
CR4	900	210	68,1	75,8	79,5	-	-	-
CR5	900	210	68,0	75,6	90,1	64,1	58,8	78,6
CR6	900	210	61,5	67,5	70,5	62,9	60,6	85,6
CR7	900	210	67,1	75,3	78,6	-	-	-
CR8	900	210	67,0	73,2	74,4	-	-	-
CR9	900	210	64,2	76,2	77,7	64,2	57,4	79,4
CF4	900	210	72,2	78,2	63,6	68,5	61,9	58,1
CF5	900	210	63,8	66	50,5	-	-	-
CF6	900	210	68,1	74,3	59,3	-	-	-
CF7	900	210	69,0	62,5	52,6	-	-	-
CF8	900	210	67,5	72,3	59,0	63,7	58,9	44,0
CF9	900	210	69,4	58,1	69,9	66,3	62,9	44,8
CAF4	900	210	61,3	58,8	78,9	64,6	80,6	46,5
CAF5	900	210	64,4	80,1	44,0	-	-	-
CAF6	900	210	66,1	81,6	42,8	-	-	-
CAF7	900	210	64,0	78,2	44,9	65,1	79,6	47,6
CAF8	900	210	65,3	80,8	41,1	-	-	-
CAF9	900	210	64,2	78,0	44,3	65,0	79,5	49,5

Tabela 12 - Dados e resultados do ensaio de resistência à fadiga

Viga	Extensão [$\times 10^{-6}$]	1º Ensaio				2º Ensaio				3º Ensaio			
		Tipo	Módulo [MPa]		Nº ciclos	Tipo	Módulo [MPa]		Nº ciclos	Tipo	Módulo [MPa]		Nº ciclos
			Inicial	Paragem			Inicial	Paragem			Inicial	Paragem	
CR4	200	35%	7303	5073	12000	Rotura	7318	3332	31102		-		
CR5	200	35%	6807	4793	24448	35%	6872	4489	33433	Rotura	6344	3055	81365
CR6	200	35%	8056	5625	31922	35%	7955	5390	28793	Rotura	7744	3301	35018
CR7	200	35%	7279	4957	20000	Rotura	7131	3743	37234		-		
CR8	200	35%	7764	5235	18833	Rotura	7878	3158	40190		-		
CR9	200	35%	7416	4869	41391	35%	7352	4809	37436	Rotura	-	-	-
CF4	200	35%	8033	5544	22381	35%	7388	4533	9093	Rotura	6640	2898	8193
CF5	200	35%	7328	4718	14361	Rotura	7046	3522	15111		-		
CF6	200	35%	7954	5527	29003	Rotura	7339	3257	40748		-		
CF7	200	35%	8333	5320	39212	Rotura	5913	1496	2639		-		
CF8	200	35%	7826	5328	18911	35%	7643	4965	6685	Rotura	7014	1355	3403
CF9	200	35%	7871	5187	26363	35%	7654	4937	12872	Rotura	7669	3360	14301
CAF4	200	35%	8043	5137	14173	35%	7669	5041	10854	Rotura	7808	3310	12343
CAF5	200	35%	8181	5258	13122	Rotura	7395	1465	36347		-		
CAF6	200	35%	8048	4975	12004	Rotura	-	-	11616		-		
CAF7	200	35%	7992	5270	19274	35%	7304	4766	17603	Rotura	7358	3613	21038
CAF8	200	35%	7016	5055	4877	Rotura	6814	1795	3720		-		
CAF9	200	35%	8145	5538	24854	35%	7822	5091	22053	Rotura	7878	4147	34558

Tabela 13 - Temperaturas atingidas na indução dos provetes semicirculares

Provete	Δ_t [s]	Potência [W]	1ª Indução			2ª Indução			3ª Indução		
			T _{med} [°C]	T _h [°C]	T _v [°C]	T _{med} [°C]	T _h [°C]	T _v [°C]	T _{med} [°C]	T _h [°C]	T _v [°C]
CR1A	80	900	79,5	75,2	86,2	76,6	68,4	87,7	79,3	82,3	90,3
CR1B	80	900	83,9	86,1	96,3	80,3	97,8	94,8	81,3	90,1	93,2
CR2A	80	900	76,7	82,1	83,3	73,3	78,4	80,7	73,4	82,1	73,4
CR2B	80	900	72,9	74,2	83,8	74,5	81,3	88,9	79,8	93,6	93,5
CR3A	80	900	79,2	94,5	84,5	78,5	89,0	89,0	73,4	88,4	86,5
CR3B	80	900	74,0	83,3	78,5	74,9	87,7	84,8	72,2	85,9	82,0
CR4A	80	900	74,9	80,8	77,4	73,2	91,0	79,0	91,4	98,1	100,0
CR4B	80	900	76,1	79,5	79,3	76,6	81,7	81,4	81,8	85,8	89,2
CR5A	80	900	87,2	94,1	96,6	75,9	92,9	92,5	76,3	76,2	91,3
CR5B	80	900	81,1	93,4	84,0	78,8	95,2	84,7	77,2	93,2	83,4
CR6A	80	900	78,3	85,2	95,2	79,1	81,2	86,4	76,8	90,3	84,5
CR6B	80	900	73,9	79,6	79,3	73,4	79,2	81,9	71,3	79,0	80,5
CF1A	80	900	88,3	112,1	89,1	90,4	101	92,1	87,0	108,0	94,1
CF1B	80	900	99,4	106,5	108,0	92,2	101	101,0	96,3	108,3	91,7
CF2A	80	900	88,2	94,4	95,7	87,4	93,0	92,7	90,6	97,4	88,7
CF2B	80	900	91,1	80,1	90,1	92,6	70,0	92,7	89,0	98,4	91,3
CF3A	80	900	92,0	110,3	101,0	92,6	102,7	96,7	92,9	111,1	99,1
CF3B	80	900	89,4	111,2	99,4	89,5	90,0	106,0	87,0	114,5	99,0
CF4A	80	900	91,8	111,5	86,9	91,0	102,3	93,7	92,9	105,1	95,5
CF4B	80	900	97,5	103,2	104,0	97,1	100,7	105,0	97,4	104,0	99,2
CF5A	80	900	83,1	98,2	87,2	84,6	97,4	88,3	83,4	106,0	88,4
CF5B	80	900	93,2	114,5	90,9	91,3	89,4	91,4	92,3	110,8	94,1
CF6A	80	900	106,2	108,1	103,0	106,5	91,2	109,0	103,7	106,5	92,4
CF6B	80	900	88,3	104,7	86,3	99,0	92,3	107,0	97,5	108,2	101,0
CAF1A	80	900	104,2	118,0	94,1	103,7	120,7	106	102,8	124,1	96,0
CAF1B	80	900	105,7	125,0	96,9	95,1	112,8	94,8	102,0	123,6	96,0
CAF2A	80	900	106,5	122,9	100,0	99,5	120,6	94,5	104,1	123,9	96,9
CAF2B	80	900	91,7	113,0	86,9	101,7	120,4	93,4	97,1	120,2	94,9
CAF3A	80	900	107,6	115,5	98,5	103,3	116,6	100,0	102,0	117,2	96,5
CAF3B	80	900	102,1	119,1	92,3	105,8	122,0	95,8	101,1	122,8	87,1
CAF4A	80	900	Provete com fissura na superfície lateral								
CAF4B	80	900	107,4	125	102	106,3	118,8	106,0	106,1	123,6	99,4
CAF5A	80	900	100,2	124,1	92,6	99,5	123,1	94,7	102,0	125,0	92,7
CAF5B	80	900	103,5	124,2	98,9	103,2	119,9	99,9	100,9	122,3	93,3
CAF6A	80	900	106,6	124,7	94,3	99,9	108,8	89,7	103,4	123,0	92,6
CAF6B	80	900	107,3	123,2	97,8	106,2	120,3	102,0	105,5	121,6	96,9

Tabela 14 - Dados e resultados do ensaio de rotura por flexão em três pontos

Provete	1º Ensaio			2º Ensaio			3º Ensaio			4º Ensaio		
	F [kN]	δ [mm]	G _f [kJ/m ²]	F [kN]	δ [mm]	G _f [kJ/m ²]	F [kN]	δ [mm]	G _f [kJ/m ²]	F [kN]	δ [mm]	G _f [kJ/m ²]
CR1A	10,7	1,2	684,3		-		0,6	0,2	3,1	1,6	0,5	24,8
CR1B	9,6	1,1	330,1	0,3	0,3	1,9	1,3	0,5	16,1	0,8	0,4	11,2
CR2A	9,7	0,6	288,7	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2	0,7	0,2	4,0
CR2B	9,4	0,9	297,1	0,1	0,0	0,0	0,6	0,2	2,4	0,3	0,2	0,6
CR3A	9,2	1,4	527,7	0,3	0,1	0,6	0,3	0,2	1,2	0,4	0,2	2,1
CR3B	9,8	1,1	883,7	0,9	0,3	4,7	1,5	0,4	18,9	1,7	0,4	22,6
CR4A	8,7	1,3	381,4	0,5	0,5	3,8	1,3	0,4	13,0	1,0	0,3	6,8
CR4B	9,0	0,6	221,6	0,2	0,2	0,8	1,2	0,5	14,4	0,6	0,4	9,9
CR5A	10,1	0,7	339,0	0,4	0,3	1,6	0,4	0,2	1,9	0,8	0,3	6,4
CR5B	10,7	0,8	415,8	0,3	0,2	0,6	0,5	0,3	0,0	0,7	0,3	5,7
CR6A	10,3	1,2	1334,1		-		0,5	0,3	3,0	1,5	0,4	19,3
CR6B	10,0	1,2	423,5	0,3	0,2	0,8	0,7	0,2	3,4	0,6	0,2	3,4
CF1A	8,1	0,8	327,6	0,6	0,3	3,4	1,0	0,4	6,7	1,3	0,5	33,1
CF1B	10,8	1,5	723,8	1,2	0,4	9,1	1,2	0,4	3,9		-	
CF2A	10,7	1,3	795,2	0,4	0,2	1,2	0,7	0,4	5,9	0,6	0,2	2,8
CF2B	9,2	1,2	459,9		-		1,0	0,3	10,7	0,4	0,2	1,8
CF3A	10,9	1,4	845,6	0,4	0,3	3,6	0,5	0,2	0,6	0,3	0,2	1,0
CF3B	8,8	0,9	455,1	1,0	0,4	15,4	1,2	0,4	16,9	1,5	0,6	19,1
CF4A	11,1	1,2	539,7	0,1	0,1	0,1	0,6	0,2	1,5	0,8	0,3	5,2
CF4B	11,8	1,3	1243,2	0,3	0,5	3,4	0,3	0,2	1,3	0,3	0,2	1,2
CF5A	11,6	1,4	1506,5		-		0,4	0,2	1,0	0,7	0,3	5,0
CF5B	10,2	0,9	779,3	0,4	0,1	0,5	0,6	0,2	1,8	0,8	0,2	3,6
CF6A	10,0	1,2	390,1	0,2	0,1	0,5	0,4	0,3	2,4	0,3	0,2	1,4
CF6B	8,7	1,0	669,9	1,0	0,5	14,5	0,8	0,6	33,4	2,0	0,6	50,5
CAF1A	8,9	1,1	716,1	3,2	0,6	78,7	4,2	1,1	229,4	3,7	0,8	155,5
CAF1B	11,4	1,2	872,5	3,6	0,9	170,1	4,3	0,9	274,7	3,3	0,9	174,8
CAF2A	5,2	1,2	904,4	1,9	0,6	35,4	3,9	1,4	603,2	3,3	0,9	157,1
CAF2B	10,4	1,6	1214,3	2,4	1,4	90,8	2,2	1,4	118,7	2,5	1,2	87,1
CAF3A	9,0	1,1	747,6	1,9	0,7	66,2	3,2	1,1	184,7	2,9	0,9	117,7
CAF3B	7,0	1,1	521,4		-		4,3	1,9	570,1	3,5	1,6	386,1
CAF4A				Provete com fissura na superfície lateral								
CAF4B	9,7	1,3	501,6	1,8	0,6	28,4	2,0	0,7	38,4	1,9	0,7	36,6
CAF5A	12,1	1,4	882,6		-		2,9	0,7	74,9	2,7	0,5	21,0
CAF5B	10,5	1,4	1223,7	3,6	0,9	108,6	4,1	1,1	194,0	3,4	0,8	118,3
CAF6A	11,7	1,4	1170,6	2,4	0,9	77,9	2,9	0,7	100,8	2,8	1,3	170,2
CAF6B	10,7	1,3	1149,8	4,1	1,0	217,4	5,9	1,4	676,5	3,7	1,6	546,2