

Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Joana Rita Fernandes Jorge

**Materiais sustentáveis com capacidade sensitiva
para aplicação no setor da construção**



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Joana Rita Fernandes Jorge

**Materiais sustentáveis com capacidade sensitiva
para aplicação no setor da construção**

Dissertação de Mestrado
Mestrado Integrado em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação de
Doutor Joel Ricardo Martins de Oliveira
Doutor Vítor Manuel Couto Fernandes Cunha

Fevereiro de 2022

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 contatar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição-SemDerivações
CC BY-ND

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

AGRADECIMENTOS

Passados cinco anos, chego à etapa mais desafiante da minha vida académica, a escrita desta dissertação. Este desafio só se tornou possível devido ao apoio de várias pessoas. Aqui expresso os meus sinceros agradecimentos a todos, que direta e indiretamente contribuíram para que este trabalho fosse realizado com sucesso.

Em primeiro, agradecer aos meus orientadores, professor Doutor Joel Oliveira e professor Doutor Vítor Cunha por toda a ajuda e disponibilidade demonstrada, motivação, confiança e por todo o conhecimento transmitido.

Aos técnicos do laboratório de pavimentos rodoviários, do Departamento de Engenharia Civil, o Engenheiro Carlos Palha e o Miguel, por toda ajuda na execução dos ensaios, bem como pela disponibilidade, apoio e incentivo.

Aos meus colegas Carlos e Carol, por toda ajuda, apoio e incentivo durante a realização desta dissertação.

Ao Sr. Cunha da eletrónica por todo o tempo dispensado e conhecimento transmitido, só assim foi possível realizar as medições das condutividades.

A todas as pessoas com quem me fui cruzando no laboratório de pavimentos rodoviários da Universidade do Minho, que fizeram com que os momentos lá passados se tornassem ainda melhores.

Por último gostaria de agradecer à minha família, nomeadamente aos meus pais e irmão, por todo o apoio que sempre me deram e por estarem sempre presentes em todas as etapas da minha vida, agradecer também aos meus amigos de longa data por todos os momentos passados e me lembrarem que existe vida para além da académica. Por fim agradecer aos amigos que a UM me deu, que fizeram com que estes anos fossem inesquecíveis.

“A persistência é o caminho do êxito”

Charles Chaplin

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.

RESUMO

Com a crescente preocupação relativamente ao consumo exacerbado de recursos naturais, surge a necessidade de criação de políticas de desenvolvimento sustentável. O sector da construção, nomeadamente, dos pavimentos rodoviários não é diferente, desta forma estes requisitos estão a mudar o paradigma da construção atual inculcando-lhe um carácter iminente sustentável, mas mantendo as mesmas propriedades/características, ou eventualmente, até melhores do que os materiais convencionais.

A presente dissertação tem como objetivo o estudo da utilização de resíduos industriais com propriedades condutivas, como o ASIC, assim como de outros materiais condutivos como a grafite e fibras metálicas, e conseqüentemente avaliar as suas capacidades elétricas para o possível desenvolvimento de materiais sensitivos. Esses materiais poderão ajudar no futuro a monitorizar o comportamento dos pavimentos rodoviários onde estiverem inseridos.

Neste trabalho foram produzidos vários mástiques contendo diferentes quantidades de filler, grafite, pó de ASIC e fibras metálicas. As propriedades elétricas dos materiais desenvolvidos foram aferidas através da medição da sua resistividade e condutividade. A influência de diferentes variáveis, tais como, tipo de corrente (AC/DC), frequência e temperatura na resistividade dos materiais foi avaliada para os distintos mástiques produzidos. Aquele que conduziu a melhores resultados (10% grafite), foi considerado para produzir uma mistura betuminosa para comparação com duas misturas de controlo (AC14), uma contendo agregados convencionais e a outra contendo agregados siderúrgicos inertes para a construção (ASIC).

Com base nos resultados obtidos, foi possível concluir que a temperatura a que os provetes estão durante as medições da condutividade afeta a mesma de maneira diferente, em função dos materiais utilizados e que isso se deve ao facto de terem um coeficiente térmico positivo ou negativo. Em termos de resultados para a temperatura de 20 °C o mástique com 10% de grafite foi o que apresentou melhores resultados e o que incorporou 10% de pó de ASIC o que apresentou valores mais elevados de resistividade. Já para a temperatura de 5 °C o mástique contendo 10% de grafite + 10% de ASIC apresentou os piores resultados e o de 5% ASIC+5% grafite+ fibras apresentou os melhores resultados. Também se verificou que adição de grafite nas misturas betuminosas em comparação com as misturas convencionais melhora a sua condutibilidade.

Palavras-Chave:

Misturas betuminosas, Materiais piezoelétricos, Grafite, Fileres alternativos, Fibras metálicas

ABSTRACT

Creating sustainable development policies is necessary with the worrying concern about the exacerbated consumption of natural resources. The construction sector, namely, road pavements, is no different. Thus, these requirements are changing the current construction paradigm, instilling an imminently sustainable character while maintaining the same properties/characteristics, or possibly even better than the conventional materials.

This dissertation aims to study the use of industrial waste with conductive properties, such as ASIC, and other conductive materials such as graphite and metallic fibres, and consequently evaluate their piezoelectric capabilities for the possible development of sensitive materials. These materials may help monitor the behaviour of road pavements where they are located in the future.

In this work, several mastics were produced containing different amounts of filler, graphite, ASIC powder and metallic fibres. The piezoelectric properties of the developed materials were measured by measuring their resistivity and conductivity. The influence of different variables, such as type of current (AC/DC), frequency and temperature on the resistivity of materials, was evaluated for the different mastics produced. The one that brought the best results (10% graphite) was considered to produce an asphalt concrete mixture for comparison with two control mixtures (AC14), one containing conventional aggregates and the other containing inert steel aggregates for construction (ASIC).

Based on the results obtained, it was possible to conclude that the specimens' temperature during the conductivity measurements affects it. The materials have different behaviours concerning temperature variation, and this is because they have a positive thermal coefficient or negative. Regarding the results for a temperature of 20 °C, the 10% graphite mastic had the best results, and the one with 10% of ASIC had the highest resistivity values. For a temperature of 5 °C, the mastic containing 10% graphite + 10% ASIC presented the worst results, and the one with the best results was 5% ASIC + 5% graphite + fibres. It has also been found that the addition of graphite in asphalt mixtures compared to conventional mixtures improves their conductivity.

Keywords:

Asphalt mixtures, Piezoelectric materials, Graphite, Alternative fillers, Metallic fibres

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE TABELAS	xiv
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO TEMÁTICO	1
1.2. OBJETIVOS.....	2
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	2
2. ESTADO DA ARTE.....	4
2.1. ENQUADRAMENTO HISTÓRICO	4
2.1.2. Evolução do sistema rodoviário	5
2.1.3. Descrição da constituição dos pavimentos rodoviários	8
2.1.4. Produção de resíduos industriais.....	12
2.2. A IMPORTÂNCIA DA ECONOMIA CIRCULAR	20
2.2.1. Introdução	20
2.2.2. Utilização de resíduos industriais em pavimentos rodoviários.....	23
2.2.3. Utilização de resíduos de construção e demolição em pavimentos rodoviários.....	25
2.2.4. Impactos ambientais da utilização de resíduos em pavimentos	26
2.3. PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS.....	29
2.3.1. Requisitos técnicos para os materiais a utilizar nos pavimentos	29
2.3.2. Principais propriedades físicas e mecânicas de misturas betuminosas.....	30
2.3.3. Desempenho de pavimentos com resíduos.....	30
2.4. INDÚSTRIA 4.0.....	32
2.4.1. Revoluções industriais.....	32
2.4.2. A quarta revolução industrial	33
2.4.3. Tecnologias facilitadoras para a construção 4.0.....	36
2.5. SENSORIZAÇÃO NO ÂMBITO DO SISTEMA RODOVIÁRIO	40
2.6. MATERIAIS COM PROPRIEDADES SENSITIVAS.....	45

3.	MATERIAIS E METODOLOGIAS UTILIZADAS	53
3.1.	INTRODUÇÃO	53
3.2.	MATERIAIS UTILIZADOS.....	53
3.3.	CARACTERIZAÇÃO DOS FÍLERES	54
3.3.1.	Análise Granulométrica	54
3.3.2.	Determinação da superfície específica (Método Blaine)	55
3.3.3.	Determinação da massa volúmica dos fileres pelo método do picnómetro.....	56
3.3.4.	Determinação da massa volúmica do filer pelo método Le Châtelier.....	56
3.3.5.	Determinação dos vazios do filer seco compactado (Ensaio de Rigden)	57
3.3.6.	Azul de metileno	58
3.4.	CARACTERIZAÇÃO DO BETUME.....	59
3.4.1.	Penetração a 25°C.....	59
3.4.2.	Temperatura de amolecimento.....	60
3.4.3.	Viscosidade dinâmica.....	60
3.5.	Formulação, produção e moldação dos provetes de mástique	61
3.6.	Avaliação da condutividade dos mástiques em estudo	62
3.7.	Estudo e formulação das misturas betuminosas	63
3.7.1.	Preparação das misturas	65
4.	ANÁLISE DE RESULTADOS	67
4.1.	RESULTADOS DO ENSAIOS DO BETUME	67
4.2.	RESULTADOS DAS PROPRIEDADES FISICAS DOS FÍLERES	68
4.3.	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	69
4.4.	COMPORTAMENTO PIEZOELÉTRICO DAS MISTURAS DESENVOLVIDAS	69
4.4.1.	Influência dos constituintes dos mástiques desenvolvidos em corrente alternada ...	70
4.4.2.	Influência dos constituintes dos mástiques desenvolvidos em corrente continua.....	76
4.4.3.	Influência do tipo de corrente	82
4.4.4.	Influência da frequência	83
4.4.5.	Influência da voltagem	84

4.4.6. Influência da temperatura do provete	85
4.4.7. Análise da temperatura do provete quando sujeito a passagem de corrente	87
4.4.8. Análise comparativa da resistividade dos mástiques e de misturas betuminosas	87
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	94
5.1. CONCLUSÕES	94
5.2. TRABALHOS FUTUROS	95
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	96

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema estrutural das estradas romanas adaptado (Maré, 2011).....	6
Figura 2 - Esquema estrutural de um pavimento	8
Figura 3 - Comportamento estrutural dos diferentes tipos de pavimentos (Francisco, 2012).....	11
Figura 4 - Composição do pavimento: (a) flexível e (b) rígido adaptado (Nwakaire et al., 2020).....	12
Figura 5 - Destinos da valorização dos pneus (ValorPneu, 2019)	17
Figura 6 - Aplicação do granulado de borracha nas diferentes atividades (ValorPneu, 2019)	18
Figura 7 - Pilares da construção sustentável (Teodoro, 2011)	21
Figura 8 - Contribuição de cada fase nos impactes ambientais da mistura convencional (Nascimento, 2019).....	28
Figura 9 - Contribuição de cada fase nos impactes ambientais da mistura com material fresado (Nascimento, 2019).....	28
Figura 10 - As quatro revoluções industriais adaptado (Hoff, 2016)	32
Figura 11 - Pilares da indústria 4.0 (Pwc, 2016)	35
Figura 12 - Importância da <i>Big Data Analytics</i> (Coelho, 2016)	36
Figura 13 - Conceito de indústria inteligente.....	36
Figura 14 - Fluxo de trabalho da impressão 3D adaptado (Silva, 2020).....	38
Figura 15 - Benefícios do BIM na construção (Costa, 2020)	40
Figura 16 - Alguns tipos de sensores existentes nos pavimentos (Ghislain, 2011) : a) contador de carros com sensor pneumático, b) ligação dos sensores à berma, c) sensores piezoelétricos.....	42
Figura 17 - Constituição da fibra ótica (Louzada, 2013).....	44
Figura 18 - Funcionamento das microcápsulas adaptado (Lu <i>et al.</i> , 2021).....	47
Figura 19 - Regeneração por aquecimento por indução eletromagnética (Loureiro, 2021)	48
Figura 20 - Efeito ponte (Arabzadeh <i>et. al</i> , 2018)	52
Figura 21 - Análise granulométrica: a) coluna de peneiros b) granulometria do pó	54
Figura 22 - Curva granulométrica dos fileres utilizados	55
Figura 23 - Ensaio de Blaine: a) equipamento utilizado para o ensaio, b) colocação da célula e do bujão no equipamento, c) célula e bujão, d) massa de material compactado.....	55
Figura 24 - Equipamentos utilizados para a determinação da massa volúmica: a) Pesagem da amostra, b) equipamento de vácuo, c) banho maria	56

Figura 25 - Ensaio de Le Châtelier: a) Gasolina em repouso após se ter enchido até a marca 1, b) execução do ensaio, até a gasolina subir aos valores adquados c) medição do volume final após repouso da gasolina	57
Figura 26 - Ensaio de Rigden: a) equipamento utilizado em repouso, b) execução do ensaio, c) aspeto final do filer depois de retirado do molde.....	58
Figura 27 - Etapas do ensaio de Azul-de-metileno : a) colocação dos 500 ml de água no gobelet, b) adição da solução de azul-de-metileno ao material, c) verificação da existência da auréola.....	58
Figura 28 - Ensaio de penetração do betume	59
Figura 29 - Ensaio de temperatura de amolecimento: a) início do ensaio, b) durante o ensaio.....	60
Figura 30 - Equipamento utilizado no ensaio de viscosidade.....	61
Figura 31 - Equipamentos utilizados para a produção de provetes de mástique; a) agitador utilizado para a execução dos mástiques, b) moldes utilizados para os provetes, c) mástique nos moldes.....	62
Figura 32 - Aparelhos utilizados para as medições da condutibilidade: a) Hi Tester, b) multímetro digital e fonte dupla	63
Figura 33 - Medição de condutibilidade elétrica: a) acoplagem dos eléttodos; b) ligação ao Hi-Tester	63
Figura 34 - Esquema do esquartelamento da amostra.....	64
Figura 35 - Fuso de referência utilizado.....	65
Figura 36 - Preparação da mistura.....	65
Figura 37 - Roller Compactor	66
Figura 38 - Lajes da mistura de ASIC e AC14 com grafite.....	66
Figura 39 - Variação da viscosidade do betume com a temperatura.....	67
Figura 40 - Comportamento da grafite.....	70
Figura 41 - Influência da grafite nos restantes mástiques.....	71
Figura 42 - Efeito da adição de ASIC	72
Figura 43 - Influência do ASIC nos restantes mástiques.....	72
Figura 44 - Influência da adição de 5% de grafite ao ASIC.....	73
Figura 45 - Influência da adição de 10 % de grafite ao ASIC.....	73
Figura 46 - Influência da adição de 5% de ASIC à grafite.....	74
Figura 47 - Influência da adição de 10% de ASIC à grafite.....	75

Figura 48 - Influência da adição de diferentes percentagens de ASIC e grafite.....	75
Figura 49 - Influência da adição de diferentes percentagens de ASIC e grafite na presença de fibras	76
Figura 50 - Influência da adição de fibras aos diferentes materiais.....	76
Figura 51 - Comportamento das diferentes percentagens de grafite quando sujeitas a corrente continua	77
Figura 52 - Influência da grafite nos restantes mástiques quando sujeitos a corrente continua	77
Figura 53 - Comportamento nas diferentes percentagens de ASIC em corrente continua.....	78
Figura 54 - Influência da presença de ASIC nos mástiques quando sujeitos a corrente continua.....	79
Figura 55 - Verificação da influência da adição de grafite ao ASIC.....	79
Figura 56 - Influência da adição de ASIC à grafite.....	80
Figura 57 - Influência da adição de ASIC e grafite na mesma quantidade em corrente continua	80
Figura 58 - Efeito conjunto da grafite e do ASIC na presença de fibras	81
Figura 59 - Efeitos na resistividade com a introdução de fibras para corrente continua.....	81
Figura 60 - Influência da frequência nos mástiques produzidos	84
Figura 61- Influência da voltagem na resistividade.....	84
Figura 62 - Influência da voltagem no mástique contendo 10% grafite+10% ASIC	85
Figura 63 - Influência da temperatura para a frequência de 1 KHz	85
Figura 64 - Influência da temperatura para a frequência de 1 MHz.....	86
Figura 65 - Comportamento dos mástiques perante diferentes temperaturas	86
Figura 66 - Verificação do aquecimento dos provetes	87
Figura 67 - Aquecimento registado no mástique que contém 10% de ASIC: a) t= 0 min; b) t=5 min	87
Figura 68 - Mástiques com comportamento idêntico à mistura de referência ASIC	88
Figura 69 - Mástiques com comportamento idêntico à mistura referência AC14	89
Figura 70 - Comparação das misturas de referência para corrente alternada	89
Figura 71 - Comparação das misturas de referência para corrente continua	90
Figura 72 - Influência de 10% de grafite na mistura AC 14.....	90
Figura 73 - Influência de 10% de grafite na mistura de ASIC	91
Figura 74 - Comparação entre as mistura de ASIC e AC 14 contendo grafite	91
Figura 75 - Comparação entre a mistura AC 14 com e sem grafite em corrente contínua.....	92
Figura 76 - Comparação entre a mistura ASIC com e sem grafite em corrente contínua.....	92

Figura 77 - Comparação entre a mistura AC 14 e ASIC ambas com grafite em corrente continua	92
Figura 78 - Diferença de comportamentos na resistividade quando aplicadas diferentes voltagens em corrente alternada.....	93

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Exemplos de aplicação de nanomateriais	52
Tabela 2 - Especificações técnicas do betume 35/50.....	54
Tabela 3 - Composição dos mástiques para 750 g de betume	62
Tabela 4 - Resultados do ensaio de penetração e temperatura de amolecimento	67
Tabela 5 - Ensaio da Grafite	68
Tabela 6 - Ensaio do pó de ASIC	68
Tabela 7 - Ensaio do Filer Comercial	69
Tabela 8 - Composição das misturas betuminosas produzidas.....	69

ABREVIATURAS

JAЕ - Junta autónoma de estradas

RCD - resíduos de construção e demolição

GEE - gases efeito de estufa

IoT - *Internet of Things* (Internet das coisas)

APA - Agência Portuguesa do Ambiente

ASIC - agregado siderúrgico inerte para a construção

RAP - *Reclaimed Asphalt Pavement* (Mistura betuminosa recuperada)

DT - *Digital Twins* (Réplicas digitais)

PRN - Plano Rodoviário Nacional

CBR - *California Bearing Ratio* (Índice de resistência de solos Californiano)

1. INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO TEMÁTICO

A rede rodoviária constitui uma infraestrutura de transportes relevantes e imprescindíveis para o desenvolvimento económico-social de um país, pois possibilita a mobilidade de pessoas e mercadorias. A rede rodoviária Portuguesa possui cerca de 17700 km (Infraestruturas de Portugal, República Portuguesa (2021) e, na sua generalidade, é constituída por pavimentos flexíveis. Uma percentagem significativa da rede rodoviária nacional ficou concluída aquando do PRN 2000, o que leva a que uma parte significativa destas estradas se encontrem perto do fim do seu período de vida.

Após a conclusão da sua construção, os pavimentos rodoviários iniciam logo um processo de degradação, pois ficam sujeitos a ações diversas como é o caso do tráfego e das condições atmosféricas, derrames de óleo ou até mesmo agentes agressivos, entre outras que contribuem continuamente para a sua deterioração, diminuindo assim a qualidade para o qual foram projetados. Com estes fatores externos que não se conseguem controlar, o nível de serviço da estrada vai gradualmente diminuindo. Para que o nível de serviço se consiga manter ao longo do tempo, o pavimento vai necessitar de ações de conservação ou reabilitação, de modo a manter as suas características funcionais e estruturais ao longo do seu ciclo de vida, se estas ações não se realizarem, com as alterações que existem nas propriedades físico-químicas das misturas betuminosas, como o envelhecimento do betume, a perda do nível de serviço acontece com mais rapidez e de forma mais agravada (Oliveira *et al.*, 2011).

Com o consumo exacerbado de recursos surge a necessidade de mudar o paradigma da economia linear para a circular e da consciencialização da sociedade para o facto de que muitos dos recursos disponíveis serem limitados. Globalmente são extraídos 65 mil milhões de toneladas por ano de recursos virgens. A esse ritmo, em 2050 serão necessários recursos equivalentes a três planetas (Decreto-Lei 73, 2011). Esta preocupação surge em todos os setores, e a indústria da construção não é diferente, pois é um dos que mais recursos consome e causa mais emissões de CO₂, nesse sentido, a União Europeia tem implementado medidas de forma a que, em 2030, se tenha uma Europa mais sustentável.

A indústria da pavimentação tem apostado em novos métodos que visem a diminuição das emissões de CO₂ e no decréscimo da utilização de materiais virgens. Para isso opta-se por soluções que tenham maior durabilidade como é o caso da modificação do betume através de polímeros, alguns deles são borracha de pneus e o polietileno ou a utilização de óleos quer alimentares quer da indústria automóvel, outra

opção passa pela utilização de materiais de outras indústrias para substituição parcial ou total do filler e agregados, essas substituições passam pela utilização de resíduos ou subprodutos industriais, como escória de aço, resíduos de construção e demolição (RCD) e material fresado de pavimentos (RAP).

Tendo em conta estas preocupações ambientais na presente dissertação procurou-se desenvolver misturas betuminosas com capacidade sensitiva utilizando-se para isso fileres condutores, para melhorar as suas propriedades condutivas aos quais se irá juntar ASIC. Com isto pretende-se dotar as misturas betuminosas de propriedades elétricas, que possibilitem uma melhor monitorização do pavimento, fazendo com que a intervenção do homem seja menor e quando necessária no tempo certo, pois nos pavimentos rodoviários, pequenas deformações não visíveis a olho humano, ou até mesmo se as tensões limites foram ultrapassadas, podem significar danos muito avultados. Por estas razões, produtos iminente sustentáveis e tecnológicos podem ter bastante sucesso para solucionar determinadas falhas na rede rodoviária mantendo um carácter iminente sustentável.

Com estas soluções pretende-se maximizar o período de vida das misturas betuminosas, reduzindo o número de ações de manutenção efetuadas ao longo do tempo, contribuindo simultaneamente para um desenvolvimento mais sustentável a nível ambiental e económico.

1.2. OBJETIVOS

A presente dissertação tem como objetivo desenvolver materiais com incorporação de resíduos da construção e demolição (RCD) ou subprodutos industriais que consigam dotar os pavimentos rodoviários de capacidades sensitivas, de modo que estas soluções sejam tecnicamente viáveis e com uma diminuta pegada ambiental.

Pretendem-se fazer a caracterização das principais propriedades físico-químicas destes materiais, avaliar a influência da temperatura e da frequência da corrente elétrica na condutividade de diferentes mástiques e misturas betuminosas produzidos com materiais condutivos (grafite, ASIC, fibras metálicas), por comparação com mástiques e misturas produzidos com fileres e agregados convencionais.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação inclui cinco capítulos para responder ao tema em estudo. Assim, o primeiro capítulo expõe um enquadramento temático da dissertação, os seus objetivos e a metodologia adotada para a execução da mesma.

O segundo capítulo é dedicado ao estado da arte, onde se realizou uma revisão bibliográfica, para permitir inteirar de trabalhos já realizados e adquirir os conhecimentos necessários para a elaboração desta dissertação. Fala-se da necessidade de economia de recursos, alternativas aos pavimentos convencionais, a importância da utilização de resíduos na pavimentação, as suas vantagens e desvantagens. Aborda-se também as necessidades para a transição da economia linear para uma economia circular, analisa-se os trabalhos de investigação existentes sobre a comparação de pavimentos tradicionais e pavimentos com incorporação de resíduos. Por fim, neste capítulo também se apresenta um pouco das revoluções industriais, as tecnologias facilitadoras da indústria de construção e a construção de pavimentos sensitivos.

No terceiro capítulo apresentam-se os materiais utilizados nos mástiques e nas misturas betuminosas e o motivo da sua escolha, a formulação das misturas produzidas, bem como, o modo de execução dos ensaios com uma breve descrição dos mesmos.

No quarto capítulo apresenta-se os resultados obtidos nos diversos ensaios realizados.

No quinto e último capítulo, apresentam-se as considerações finais, conclusões retiradas bem como trabalhos futuros que poderão ser desenvolvidos no âmbito da temática abordada nesta dissertação.

2. ESTADO DA ARTE

2.1. ENQUADRAMENTO HISTÓRICO

As vias de comunicação como hoje são conhecidas, repletas de conforto e qualidade, nada têm a ver com as estradas da antiguidade, quer no seu processo construtivo, quer nos materiais aplicados. Esta evolução deve-se às necessidades da sociedade e ao aumento do volume de tráfego, o que implica que os pavimentos sejam mais resistentes. Estas necessidades levaram a uma evolução dos materiais utilizados e das técnicas de dimensionamento. No entanto, nas últimas décadas este setor deparou-se com outras necessidades, nomeadamente, questões ambientais (Reis, 2009).

Um dos principais fatores que contribuem para o desenvolvimento das civilizações, são as infraestruturas rodoviárias. O povo romano foi um dos grandes responsáveis pela evolução rodoviária, devido à necessidade com fins militares, deixando uma vasta rede de estradas, designadas de Estradas Romanas. Estas eram construídas em pedra, tinham diferentes dimensões e espessuras (a dimensão da pedra ia diminuindo à medida que se aproximavam da camada superficial), em que a última camada era de granito ou basalto conforme a região, conferindo assim maior resistência ao tráfego e as condições climatéricas (Maré, 2011).

Com o fim do Império Romano a rede de estradas evoluiu de forma natural, mas sem grande planeamento e com a construção de troços curtos, perdendo-se um pouco a noção de rede de estradas, ou seja, os grandes trajetos que ligavam as principais cidades da península ibérica caíram em desuso, ficando toda a rede de estradas segmentada em rotas mais curtas (Rodrigues, 2012).

As características das infraestruturas de transportes terrestres tiveram avanços técnicos ao longo do tempo, sempre condicionados por fatores económicos, políticos, sociais e geográficos. Com os avanços tecnológicos tentou-se, entre outros objetivos, minimizar os tempos de deslocação criando uma rede mais uniforme, melhorando o conforto da condução, aumentando a durabilidade dos pavimentos com a finalidade de se reduzir as intervenções de manutenção, bem como melhorar as características relativas ao ruído e diminuir as deformações permanentes e fissuração (Rodrigues, 2012).

Os pavimentos rodoviários são infraestruturas muito caras que consomem grandes quantidades de recursos naturais, daí ser importante optar-se pela utilização de resíduos da construção e demolição (RCD), assim como subprodutos de outras indústrias na sua conceção. Da inclusão de resíduos advém uma série de benefícios para a sustentabilidade ambiental, económica e social, o que reduziria a pegada

de carbono da indústria da construção, resultaria na conservação dos recursos naturais, redução de emissões prejudiciais e minimização do custo de construção do pavimento (Nwakaire *et al.*, 2020).

A utilização de pavimentos degradados para a construção de novos pavimentos, denominada de reciclagem de pavimentos surgiu na década de 70 nos Estados Unidos. Esta necessidade de eco-inovação surge numa época em que o custo do petróleo registava valores muito elevados, traduzindo-se em custos muito elevados de fabrico, transporte e aplicação das misturas betuminosas. No entanto, na década de 90 surge novamente uma necessidade mais premente da opção pela reciclagem de pavimentos rodoviários, mas desta vez, não só por razões de ordem económica, mas sobretudo devido a fatores de ordem ambiental (Cunha, 2010). A partir dessa altura, os fatores ambientais passam a assumir uma maior importância na escolha do processo de reabilitação de um pavimento. A reciclagem surge como uma solução de resposta às preocupações em relação aos recursos não renováveis e também à deposição dos resíduos provenientes de pavimentos degradados, sendo considerada genericamente como um instrumento de desenvolvimento sustentável (Cunha, 2010).

2.1.2. Evolução do sistema rodoviário

As rodovias existem desde a antiguidade e ao longo de anos e séculos tiveram uma grande evolução tanto a nível estrutural como a nível funcional. Estas alterações devem-se ao desenvolvimento do ser humano, leia-se sociedade, dos transportes e à criação do automóvel (Cunha, 2010).

As primeiras estradas não surgiram com o império Romano. No entanto foi na época dos romanos que se verificou um avanço significativo na sua construção, para uso militar, devido à necessidade de espalhar e controlar o império, e de forma a facilitar o comércio, pois até essa época grande parte das deslocações era feita por mar. As estradas romanas eram constituídas por 4 camadas, todas feitas em pedra com diferentes dimensões, na camada a hoje chamamos de fundação, eram colocadas grandes pedras formando uma espessura de 30 a 60 cm, esta camada ficou conhecida como "*statumen*". Por cima desta camada era colocada areia e gravilha até perfazer uma camada de 20 cm, chamada "*rudus*", por cima da segunda camada levava uma outra de 20 cm designada de "*nucleus*", constituída por pedra triturada misturada com cal. Por fim a camada superior que hoje corresponde a camada de desgaste designada por "*sumus crustae*" ou "*stratum*", constituída por lajes de granito ou basalto (Maré, 2011), como se pode observar na Figura 1.

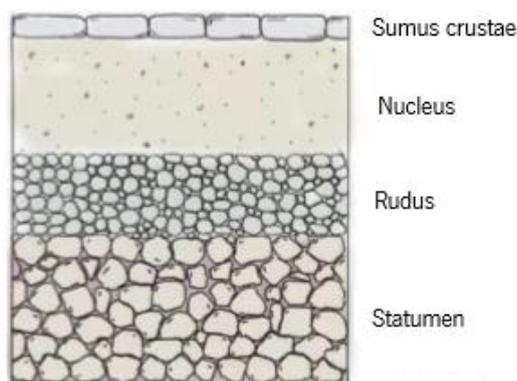


Figura 1 - Esquema estrutural das estradas romanas adaptado (Maré, 2011)

Na idade média em Portugal a rede de estradas ainda era pequena, eram feitas em terra batida e estreitas, pois até aqui as deslocações eram feitas através de animais ou a pé, só a partir de meados do século XVIII com o surgimento do serviço de Mala-posta é que se começou a observar ações que conduziram a edificação de novas estradas e de pontes (Pacheco, 2004).

Em Portugal a rede de estradas teve a sua grande explosão no século XIX, através de Fontes Pereira de Melo que foi responsável pela construção do primeiro troço de caminho de ferro que ligava Lisboa ao Carregado, reconstrução e manutenção das vias romanas, estas medidas conduziram a que o tempo de deslocação fosse menor e o conforto das vias fosse aumentado (Maré, 2011).

A nível global, em meados do século XIX deu-se uma grande revolução relativamente à constituição dos pavimentos, designadamente, ao ser introduzido o método McAdam. Esta técnica foi desenvolvida pelo escocês John McAdam, tendo essa prática ficado conhecida como Macadame (Maré, 2011). A técnica consistia em assentar três camadas de brita, numa fundação com valas laterais para a escoamento da água da chuva. Neste método cada camada é constituída por diferentes dimensões e os vazios são preenchidos por saibro, após cada camada estar completa é compactada de modo que as pedras juntamente com o saibro se reajustem de modo a reduzir os vazios, a este pavimento dá-se o nome de macadame hidráulico, pois consegue drenar adequadamente a água (Maré, 2011).

No século XX, com o surgimento da Junta Autónoma de Estradas - JAE resolveram-se muitos problemas até aí existentes como estradas muito segmentadas, ausência do fecho da malha e em mau estado, que não abrangiam todo o país. O objetivo primordial da JAE foi a uniformização da rede viária nacional, a requalificação dos antigos troços, dar continuidade à malha viária, para diminuir o tempo e deslocações, e retificar os traçados de forma a permitir maior conforto e segurança (Pacheco, 2004).

A JAE foi também responsável pela substituição dos pavimentos mais antigos feitos em macadame, por betuminoso, paralelepípedos ou cubos. Esta substituição conduziu a grandes melhorias ao nível da aderência e drenagem, o que conseqüentemente levou a uma maior segurança (Maré, 2011).

No início do século XX começou-se a aplicar ligantes com base de hidrocarbonetos. Esta necessidade surgiu nos Estados Unidos com o surgimento do trânsito automóvel, pois o pavimento em macadame, apresentava entraves tanto no verão, que formava grandes quantidades de poeira como no inverno que devido a chuva formava lama. Este método rapidamente se espalhou pela europa, incluindo Portugal, apesar de inicialmente ter sido apenas aplicado a estradas de grande importância (Maré, 2011).

No final dos anos 20 deixou-se o revestimento superficial em terra batida e começou a utilizar-se um revestimento de semipenetração, este método consistia em preencher as interfaces da brita com betume, daí surgiu o macadame betuminoso, esta técnica é uma evolução da técnica macadame, mas em vez de na camada superficial se colocar o saibro é colocado betume (Maré, 2011).

Na época da segunda guerra mundial, em Portugal, eram aplicados os seguintes pavimentos: i) revestimento superficial betuminoso, ii) semipenetração betuminosa, iii) penetração betuminosa. Todas estas técnicas eram utilizadas para manutenção de estradas com pouco tráfego (Maré, 2011).

Já desde a época dos romanos que os pavimentos são constituídos por camadas. A camada de desgaste tem como função assegurar a impermeabilização das camadas inferiores, distribuir as tensões produzidas pelo tráfego, para além das características funcionais de conferir comodidade e segurança. A sub-base é responsável por proteger as camadas inferiores durante a fase construtiva e proteger da subida da água capilar, já base é responsável pela degradação das cargas induzidas pelo tráfego (*In/R*, 2009). A fundação é o principal suporte do pavimento, geralmente constituída pelo terreno natural. É com base nas suas características que se dimensiona o pavimento. Quando este solo não apresenta as características ideais acrescenta-se uma camada chamada leito do pavimento, esta camada consiste na colocação de uma camada de solo que pode ser tratada com ligante, para conferir a resistência necessária a fundação, para aí ser assente o resto do corpo do pavimento (Fernandes, 2016, Ribeiro, 2014), cujas camadas podem ser observadas na Figura 2.

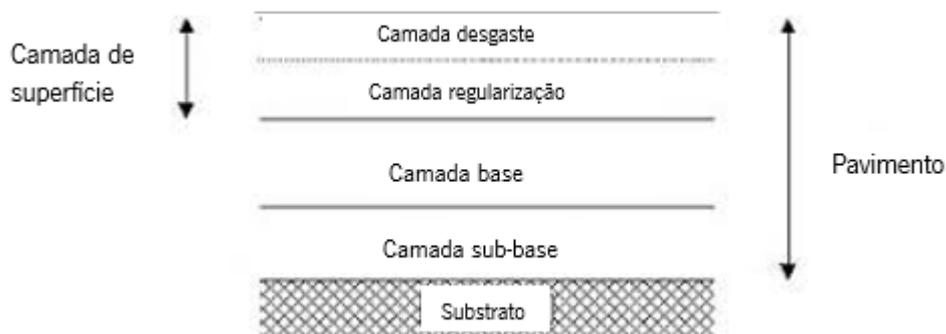


Figura 2 - Esquema estrutural de um pavimento

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.

Na atualidade, além da preocupação de as estradas oferecerem grande segurança e conforto, acresce o fator da sustentabilidade. Assim, com as incertezas das mudanças climáticas assim como o esgotamento de fontes naturais, como é o caso do betume, principal elemento aplicado nos pavimentos surge a necessidade de mudanças inovadoras que levem a um futuro ambiental melhor para todos. Esses factos reforçam a importância da adoção de estratégias sustentáveis, principalmente para os setores responsáveis pela criação dessas situações prevaletentes (Plati, 2019). Consequentemente, torna-se premente a utilização de materiais reciclados da construção, da indústria metalúrgica e da indústria automóvel, como é o caso da borracha dos pneus, pó de vidro, tijolo triturado, escórias de alto forno, eles conseguem melhorar as propriedades volumétricas e estabilidade das misturas betuminosas, já os resíduos de plástico aumentaram as propriedades do ligante betuminoso (Nwakaire *et al.*, 2020).

2.1.3. Descrição da constituição dos pavimentos rodoviários

A estrutura construída sobre a terraplenagem de um terreno é denominada por pavimento, constituído por múltiplas camadas, com diferentes propriedades geotécnicas que suportam as cargas provenientes do tráfego e transmitem essas cargas ao solo de fundação (Francisco, 2012, Nwakaire *et al.*, 2020).

Os pavimentos têm duas exigências básicas, são elas os requisitos funcionais em que devem proporcionar condições de conforto, economia e segurança aos utentes e os requisitos estruturais, em que devem resistir aos esforços nele aplicados, neste caso as ações do tráfego, sem necessitar de grandes intervenções durante o período de vida útil (Francisco, 2012, Pais *et al.*, 2000).

Os materiais e as espessuras das camadas do pavimento de uma via, são propriedades intrínsecas dessa mesma via, pois é função do tráfego que essa mesma estrada deverá suportar e igualmente dos atributos do solo de fundação que lhe servirá de suporte. A qualidade do pavimento depende diretamente da qualidade dos materiais utilizados para a sua construção, daí a sua seleção ser criteriosa (Nwakaire *et al.*, 2020).

A produção de materiais é o maior contribuinte de emissões de CO₂ na construção de pavimentos rodoviários. Essa fase contribui com até 63% de emissões de CO₂, enquanto o transporte de materiais e o equipamento de espalhamento e compactação contribuem com 25% e 12% respetivamente. Isso mostra que até 88% das emissões de CO₂ na construção de pavimentos está relacionada com os materiais dos quais os agregados são o principal contribuinte (Nwakaire *et al.*, 2020).

Neste momento, em Portugal utilizam-se essencialmente três tipos de pavimentos, os flexíveis, os rígidos e os semirrígidos. Os pavimentos são classificados com base em dois critérios o tipo de material utilizado e a deformabilidade do respetivo pavimento (Loureiro, 2021). Os pavimentos flexíveis caracterizam-se pela utilização de misturas betuminosas na camada superior e materiais granulares nas camadas inferiores. No caso dos pavimentos rígidos, como são construídos para suportarem cargas superiores, a camada de desgaste é composta por betão de cimento e as restantes camadas são de material granular (Francisco, 2012). Por sua vez, o pavimento semirrígido é composto por camadas betuminosas aplicadas sobre camadas com ligantes hidráulicos e agregados granulares (Loureiro, 2021).

Pavimentos flexíveis

Um pavimento flexível caracteriza-se pela a sua estrutura consistir num revestimento betuminoso apoiado sobre camadas granulares ou de solo estabilizado mecanicamente (Rodrigues, 2012). É o tipo de pavimentos mais utilizado em Portugal.

Os pavimentos flexíveis caracterizam-se pela sua capacidade de suporte ser em função das características das camadas sobrepostas, em que as camadas mais próximas do local onde a carga é aplicada são as que possuem melhor qualidade (Rodrigues, 2011b). É a camada de desgaste exposta diretamente às ações climáticas e às forças do tráfego que é responsável por transmitir esses esforços as outras camadas de forma mais ténue (Rodrigues, 2012).

A camada de desgaste é constituída por uma mistura betuminosa, podendo esta ser substituída por um revestimento simples, revestimento duplo ou revestimento duplo invertido. A camada de base é formada por uma mistura betuminosa ou por agregados britados de granulometria extensa e a camada de sub-

base é constituída por materiais menos nobres, utilizando-se para o efeito solos seleccionados ou agregados britados de granulometria extensa (Reis, 2009).

Pavimentos rígidos

Os pavimentos rígidos diferenciam-se dos pavimentos flexíveis pois, são geralmente constituídos por uma camada superior de betão, em que esta camada tem a função da camada de desgaste e de base (Rodrigues, 2011b). Estes pavimentos possuem maior resistência à flexão e rigidez devido as características do betão. Daí este tipo de pavimento ser aplicado em locais onde as tensões/cargas são elevadas e em solos com pouca capacidade de carga, geralmente são utilizados em aeroportos devido ao peso dos aviões e ao facto de estes estarem muito tempo parados no mesmo sítio, não provocando assim excessivas deformações, no entanto cada vez mais são aplicados em zonas onde as empresas possuem a sua frota de pesados (Rodrigues, 2012). Este tipo de pavimento também possui uma elevada durabilidade (cerca do dobro dos pavimentos flexíveis), aguentando em média 40 anos sem necessitar de grandes intervenções.

Devido às características do betão, as cargas impostas ao pavimento são absorvidas por ele e degradadas numa grande área, o que faz com que a tensão vertical máxima atingida ao nível da cota de fundação corresponda a uma pequena fração da força exercida entre o pneu-pavimento, na camada superficial. Pelo facto de o betão conseguir absorver quase a totalidade das cargas, a fundação já não necessita de ter um papel tão relevante na capacidade de suporte do pavimento, como no caso de um pavimento flexível (Rodrigues, 2011b).

Estes pavimentos são constituídos por uma camada superficial com função de revestimento e base, feitos numa laje de betão, a sub-base é constituída por material granular, que pode ser estabilizada com ligante hidráulico, de forma a conferir maior resistência a camada. A fundação deve ser constituída por material homogéneo, não sensível à água, se o solo não tiver capacidade de suporte suficiente para as cargas de dimensionamento deve-se fazer uma camada de subleito (Rodrigues, 2012).

Os pavimentos rígidos podem ser construídos em betão com juntas e passadores, betão com juntas, betão armado com juntas, betão armado contínuo (Reis, 2009) e betão reforçado com fibras discretas.

Pavimentos semirrígidos

Os pavimentos semirrígidos caracterizam-se por serem uma mistura dos pavimentos flexíveis e rígidos, o que leva a que tenha uma maior deformabilidade que os pavimentos rígidos e uma menor que os flexíveis (Fernandes, 2016).

Este tipo de pavimentos geralmente tem uma camada superficial idêntica aos pavimentos flexíveis, ou seja, o revestimento é betuminoso, a camada abaixo da superficial (camada base) é tratada com cimento de elevada rigidez, o que faz com que a maioria dos esforços sejam aí absorvidos e por fim as sub-bases são formadas por materiais granulares (Reis, 2009). Os pavimentos semirrígidos podem classificar-se em direto sempre que a camada de betuminoso é aplicada em cima da camada de base de betão, ou invertido, quando a camada de revestimento é executada sobre camada de base granular e sub-base de betão (E-Civil). Em Portugal este tipo de pavimento não é muito utilizado.

Como já mencionado a resposta estrutural de cada um destes pavimentos é diferente na presença das mesmas ações. E tudo se reflete na constituição da camada superficial. Nos pavimentos flexíveis, devido a flexibilidade do betuminoso, leva a uma maior concentração de tensões no solo de fundação. Já no que concerne aos pavimentos rígidos, devido a estes possuírem a camada superficial em betão, leva a que haja uma maior distribuição de tensões no solo de fundação, enquanto no pavimento flexível esta distribuição é feita numa área menor, o que faz com que a tensão máxima exercida ao nível da fundação nos pavimentos flexíveis seja maior quando comparada com a tensão máxima exercida pelos pavimentos rígidos (Francisco, 2012, Rodrigues, 2011b). As diferenças entre a degradação das cargas para os dois tipos de pavimentos estão representadas na Figura 3.

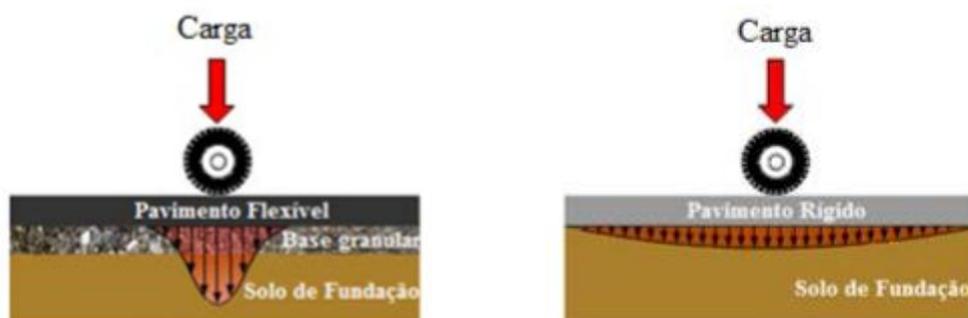


Figura 3 - Comportamento estrutural dos diferentes tipos de pavimentos (Francisco, 2012)

Para além dos diferentes desempenhos em relativamente à absorção da carga, a sua constituição também é diferente, embora o elemento principal continue a ser o agregado. Na Figura 4(a) é apresentada a constituição de um pavimento flexível, enquanto na Figura 4(b) a de um pavimento rígido.

Os agregados originam 62% a 68% em volume da camada superficial do pavimento de betão, bem como 80% a 85% em volume da camada superficial do pavimento betuminoso (Nwakaire *et al.*, 2020).

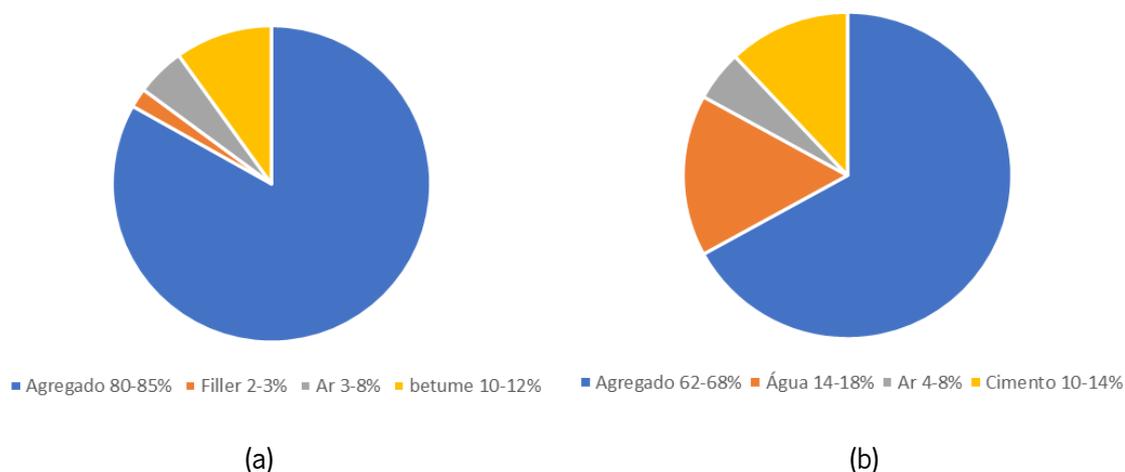


Figura 4 - Composição do pavimento: (a) flexível e (b) rígido adaptado (Nwakaire *et al.*, 2020)

2.1.4. Produção de resíduos industriais

Com a noção que o mundo está a sofrer mudanças constantes e que algumas delas são irreversíveis, existe uma necessidade de reduzir a dependência de matérias-primas que começam a existir em quantidades cada vez mais limitadas. Atualmente, a taxa de produção de resíduos sólidos é demasiado alta para ser ignorada. A indústria da construção, que desempenha um papel importante na urbanização e desenvolvimento das cidades mundiais, produz uma quantidade muito elevada de resíduos sólidos tanto no processo de construção como após a vida útil das estruturas (Nwakaire *et al.*, 2020).

A construção de uma nova estrada tem uma sucessão de implicações para o meio ambiente, dado que envolve uma grande porção de materiais e de energia. Para além destes inconvenientes, acresce o facto do preço do petróleo ter aumentado expressivamente nos últimos anos e este ser o principal constituinte do ligante betuminoso, implicando consequentemente um incremento no preço total das misturas betuminosas (Kowalski *et al.*, 2016).

Para promover práticas sustentáveis e consequentemente combater o aumento de preços, devem ser implementadas medidas em que se promovam estas práticas, sendo que uma das estratégias passará por garantir compensações monetárias para quem adotar e aplicar estas medidas de carácter sustentável. O desenvolvimento de tecnologias para integrar materiais mais verdes em novas construções, através do aproveitamento de resíduos da construção e materiais reciclados no ciclo de produção de misturas betuminosas é uma solução que melhora a sustentabilidade e a economia da

indústria da pavimentação (Kowalski *et al.*, 2016). Contudo é necessário ter cuidado com a aplicação destes novos materiais, é impreterível saber se estes não provocam efeitos secundários não benéficos para o meio ambiente. Quando se aplicam estes materiais em obras geotécnicas, é indispensável saber o efeito de lixiviação. Quantificar a lixiviação é fundamental pois elevadas quantidades de metais pesados como o chumbo, crómio, cobre e zinco podem ser prejudiciais para o solo e até contaminar as águas subterrâneas (Butera *et al.*, 2015).

A reciclagem de pavimentos betuminosos reduz o custo da produção de novo pavimento, para além de reduzir a colocação de resíduos em aterro e otimizar o uso de recursos naturais. Diversos estudos afirmam que a produção de misturas betuminosas contendo até 30% de material fresado *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP), conseguem obter um desempenho tão bom quanto o das misturas betuminosas convencionais (Yang *et al.*, 2020).

Resíduos de Construção e Demolição

Globalmente são produzidos anualmente milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição (RCD). A União Europeia em 2017 gerou 914 milhões de toneladas (Zou *et al.*, 2020). Os RCD provêm sobretudo das demolições e construção de novas edificações. Como exemplos de RCD's pode referir-se os tijolos, o betão, o solo proveniente das escavações, madeiras, argamassa, gesso, telhas, colas, papel e cartão, metais, pavimentos e plásticos (E-Civil, Zou *et al.*, 2020).

Os resíduos de construção advêm sobretudo do dimensionamento, leia-se, quantificação incorreta no que respeita às matérias-primas empregues numa obra, das perdas de material devido aos erros dos construtores, bem como das técnicas/soluções usadas, para além dos resíduos inerentes ao acondicionamento dos materiais, como as paletes de madeira, os plásticos resultantes das embalagens e do acondicionamento dos materiais durante o transporte (Pereira e Vieira, 2013).

Dos resíduos provenientes de demolições os que são mais utilizados para reciclagem são o betão e a argamassa que representam 70% dos RCD's produzidos. Através da britagem obtém-se materiais que podem ser aproveitados para o mesmo processo construtivo ou noutras atividades (Nwakaire *et al.*, 2020).

Segundo as normas do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, LNEC, alguns dos RCD's podem ser aplicados em betões de ligantes hidráulicos como agregados grossos, em camadas não ligadas de pavimentos, como é o caso de camadas de leito e em misturas betuminosas desde que sejam efetuadas a quente em central (Santos, 2010).

Em concordância com a Lista Europeia de Resíduos (LER) publicada pela Decisão 2014/955/EU, os RCD's qualificam-se segundo o tipo de obra, tipo de material e destino final e dentro destas categorias existem subcategorias (Ferreira, 2013). Em Portugal, na categoria do tipo de material, os RCD's classificam-se em inertes, não inertes e perigosos. Na primeira categoria enquadram-se os resíduos que não sofrem transformações físicas ou químicas como é o caso das argamassas e alvenarias, na segunda são aqueles que não apresentam perigo de forma direta para o ser humano nem para o meio ambiente, mas podem sofrer alterações físicas e químicas, como é o caso da madeira, metais e plásticos e por último são aqueles que apresentam risco para a saúde pública ou para o ambiente, como é o caso de solos contaminados (Ferreira, 2013, Freire, 2018).

Em 2018, em Portugal foram recolhidas 2 529 899 toneladas de RCD. Destas, 75 868 toneladas dizem respeito a RCD de origem perigosa, o que corresponde a 3% do total de toneladas recolhidas. Considerando apenas a parcela de com potencial de reutilização, 1 695 918 toneladas foram efetivamente encaminhadas para valorização, o que corresponde a 78,24%, ou seja apenas 21,76% das toneladas recolhidas não foram reutilizadas para novos materiais, estes dados foram recolhidos com base na informação que consta na APA (2018b).

Material fresado

O material fresado de pavimentos (RAP) é um resíduo produzido durante a reabilitação de uma estrada com pavimento betuminoso (Costa *et al.*, 2020). O RAP resulta da remoção das camadas superficiais do pavimento através da fresagem, estes resíduos são reincorporados nos materiais para a construção de um novo pavimento rodoviário, através da produção de uma nova mistura ou em camadas não ligadas (Fernandes, 2012).

Estes materiais podem também ser empregues para estabilização de solos onde é adicionado cimento ou pó de pedra, em camadas de base granulares, como alternativa ao *tout-venant*, em camadas ligadas betuminosas, onde é adicionado ligante ou o material fresado é integrado no processo de produção. Se ao material fresado se adicionar um agregado com granulometria fina, este permite preencher os vazios, o que aumenta a capacidade de carga (Fernandes, 2012).

A Europa e os EUA, juntos, produziram bem mais de 100 milhões de toneladas de RAP em 2017. Na Europa, 68% do asfalto recuperado é reutilizado em misturas de asfalto, 19% é usado como materiais granulares em camadas não ligadas, 2% encontra aplicação em outros projetos do sector da Arquitetura Engenharia e Construção (AEC), sendo que os restantes 11% terminam em aterros sanitários (Costa *et al.*, 2020).

Agregado siderúrgico inerte para a construção

Este agregado resulta do processo de fabrico do aço. Existem dois métodos de produção do aço estando associado a cada um deles diferentes tipos de escórias. Este fabrico é feito através da siderurgia integrada ou semi-integrada. O que distingue estes dois métodos é a matéria-prima utilizada, no primeiro o aço resulta de minérios e no segundo da fusão de sucatas. Na produção do aço existem dois tipos de forno, que dependem do tipo de siderurgia em causa, na siderurgia integrada utiliza-se o alto-forno no qual as escórias produzidas por este sistema se classificam em escórias de alto forno, já no sistema semi-integrado utilizam-se fornos de arco elétrico e as escórias resultantes são classificadas em escórias de aciaria (Pacheco, 2012).

As escórias de aciaria classificam-se em escórias negras e brancas, no entanto só as negras é que tem grande potencial para serem aplicadas em pavimentos rodoviários e obras geotécnicas. As escórias brancas não são ainda muito utilizadas por apresentarem grande teor de cal, este elevado teor de cal leva a que sejam bastante sensíveis à presença da água, o que compromete a utilidade no setor da construção (Vargas, 2013). As escórias negras podem ser aplicadas como agregado em misturas betuminosas, estas escórias apresentam algumas vantagens em relação aos agregados convencionais pois apresentam maior durabilidade, maior resistência ao desgaste, habitualmente exibem valores elevados de CBR (California Bearing Ratio) e valores de desgaste de Los Angeles inferiores aos dos agregados convencionais e melhor resistência ao gelo-degelo (Vargas, 2013). Em média, por cada tonelada de aço líquido são produzidas 20 a 30 kg de escórias brancas e cinco vezes mais (110 a 150 kg) de escórias negras (Correia *et al.*, 2010).

As escórias negras, passam por um processo de separação de componentes para serem transformadas em ASIC, tendo grande aplicabilidade no setor da construção. Estas podem ser utilizados para camadas de base e sub-base de pavimentos, leito de pavimentos, solos compactados, parques de estacionamento, pois substituem a brita e o saibro e apresentam maior resistência (Correia *et al.*, 2010).

Neste momento em Portugal atuam duas siderurgias semi-integradas, sendo que uma se situa na Maia (SN Maia) e a outra no Seixal (SN Seixal). As duas contêm fornos de arco elétrico para produção de aço, daí que as escórias resultantes são as de aciaria.

A nível mundial, a produção de aço entre 1950 e 2020 teve um grande aumento passando dos 189 milhões de toneladas para uma produção 1878 milhões de toneladas em 2020. A China é um dos países que mais produz, cerca de 1064,5 milhões de toneladas de aço bruto em 2020, o que representa cerca de 57% da produção mundial, em segundo lugar encontra-se a Índia com uma produção 100 milhões de

toneladas o equivalente a cerca de 5% da produção mundial e em terceiro o Japão com cerca de 83 milhões de toneladas o correspondente a 4,4%. Já a União Europeia produziu em 2020 o equivalente a 7,4% (Worldsteel, 2021).

A indústria siderúrgica tem subprodutos com valor para a indústria da construção, nomeadamente para a dos pavimentos rodoviários. No entanto também liberta uma quantidade de emissões que afetam o meio ambiente como gases, poeiras e petroquímicos (Loureiro, 2021).

Areias de fundição

Estes resíduos são resultantes da produção de peças industriais através do metal em estado líquido em moldes de areia, estas peças necessitam de ter as dimensões exatas e para isso são utilizados moldes, que podem ser de areia ou metálicos, dependendo da temperatura necessária para fundir o metal. Os moldes de areia são mais utilizados para o aço e o ferro fundido, pois suporta melhor as elevadas temperaturas. No entanto após vários ciclos de fabrico dos moldes, as características da areia mudam e estas deixam de ter qualidade para a execução rigorosa de moldes, tendo que ser substituída, produzindo os resíduos de areia de fundição (AdNormas, 2019).

Pneus

Um outro material proveniente da indústria automóvel é a borracha resultante dos pneus usados. O seu tratamento é deveras importante pois no final da sua vida, ainda lhe podem ser aplicados quatro tratamentos, que evitam que os pneus fiquem depositados em aterros ao ar livre e que com o passar do tempo comecem a degradar-se e a libertar poluentes para os solos e para a atmosfera. Atualmente, a deposição de pneus em aterros está estritamente proibida ao abrigo da diretiva europeia 2006/12/EC. Para além das limitações legais, convém ter presente que a produção de um pneu novo gasta cerca de 27 litros de petróleo bruto (Deco-Proteste, 2015).

Um dos quatro tratamentos aplicados a pneus é a reutilização, emprega-se a pneus ainda em bom estado que são colocados novamente no mercado, outro é a recauchutagem que é um procedimento que consiste na aplicação de um novo piso, das paredes laterais ou dos dois, com o objetivo de se dar uma nova vida ao pneu, outro destes processos é a reciclagem, através do qual se extrai matéria-prima para outras aplicações. Essas matérias são a borracha, aço e têxteis. Por fim, o último tratamento é a valorização energética que abrange a utilização dos pneus usados, como combustível para o fabrico de cimento ou para a produção de eletricidade (Deco-Proteste, 2015, Rodrigues, 2012).

Os pneus em fim de vida podem ter diversas valorizações, uma delas é a incorporação de borracha vulcanizada nas misturas betuminosas, outra consiste na utilização de pneus inteiros ou fragmentados na construção de infraestruturas rodoviárias. A utilização de pneus em diversas configurações permite a aplicação em pavimentos para parques infantis, campos de futebol sintéticos, sobre solos de fracas características mecânicas, em materiais isolantes. A borracha dos pneus retarda a fissuração do pavimento, diminui a penetração do gelo sob os pavimentos, absorve o ruído e aumenta a aderência do pneu-pavimento (Santos, 2010, Vargas, 2013).

Existem diversos processos para o tratamento da borracha dos pneus. Os métodos mecânicos e criogénicos são dois dos métodos disponíveis usados durante o processo de reciclagem, sendo estes mais amplamente disseminados e usados em Portugal. O método mecânico consiste nas sucessivas triturações do pneu à temperatura ambiente. Inicialmente, os pneus são reduzidos a fragmentos com 50 mm (intitulados de chips), a seguir já reduzidos a 10 mm noutra trituradora, é nesta etapa que se dá a separação dos diversos constituintes do pneu, das fibras, do aço e dos grânulos de borracha. Para o aço esta separação é feita magneticamente enquanto as fibras é com a ajuda de peneiros vibratórios. O método criogénico é caracterizado pelo arrefecimento dos “chips” obtidos no método mecânico através de azoto líquido (Rodrigues, 2012).

Em Portugal, no ano de 2019 foram fabricados 8.425.354 pneus de diferentes categorias, desde veículos ligeiros e pesados, bicicletas, máquinas industriais, máquinas agrícolas perfazendo um total de 97,95 toneladas. Das 80,8 toneladas tratadas pela Valorpneu a reciclagem foi o processo que teve maior destino, com 58,4%, seguida da valorização energética com 38,2% (ValorPneu, 2019), como mostra a Figura 5.

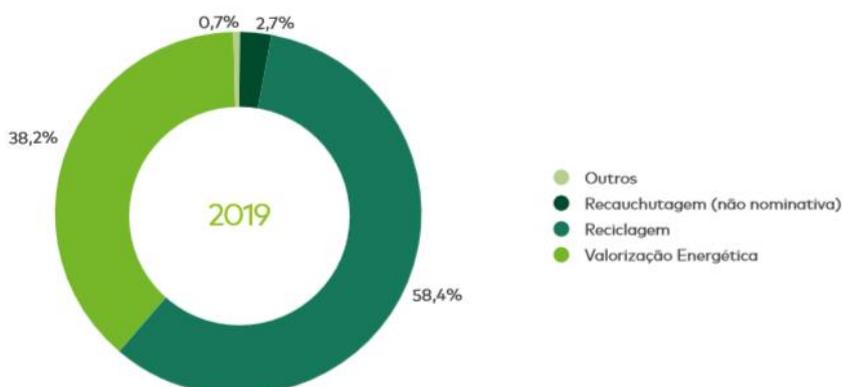


Figura 5 - Destinos da valorização dos pneus (ValorPneu, 2019)

Em 2019, o granulado de borracha representou 62,2% dos pneus transformados, em comparação com o aço e o têxtil, com valores de 20,7% e 16,9%, respetivamente. Em 2019, a Valorpneu reportou que

foram aplicadas 28,67 toneladas de granulado de borracha, e que metade dessas toneladas, 50,3% foi aplicada em pavimentos diversos. Na Figura 6 pode ver-se quais os principais setores onde o granulado de borracha é aplicado (ValorPneu, 2019).

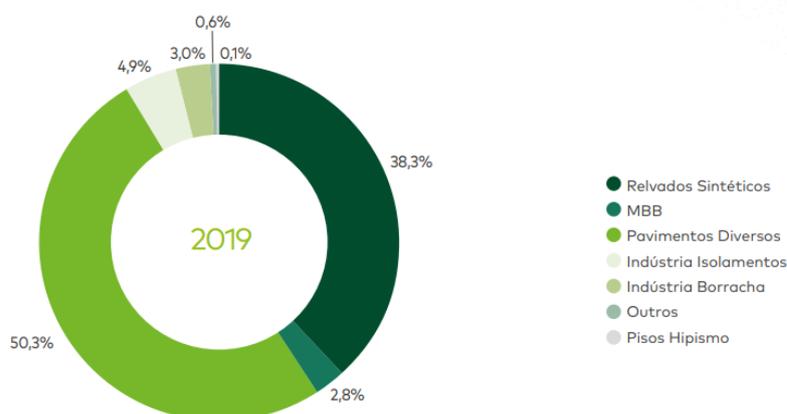


Figura 6 - Aplicação do granulado de borracha nas diferentes atividades (ValorPneu, 2019)

Vidro

O vidro está presente em quase todas as aplicações do quotidiano, desde uma janela, a um simples frasco de café. No entanto, o vidro tem inúmeras aplicabilidades conforme o seu tratamento, existe vidro aplicado como barreira acústica em estradas de elevado tráfego, vidro com controlo solar, vidros de autolimpeza, vidros anti-bala, vidros para pavimentos como pontes pedonais ou passadiços, fibra de vidro, entre outros. No entanto, se for triturado até ficar em pó pode ser aplicado em pavimentos rodoviários e em betão (Vassiglass, 2017).

Nos últimos anos, a taxa de reciclagem de vidro tem vindo a aumentar. No entanto, Portugal continua nos últimos lugares de reciclagem de vidro na Europa, ficando só à frente da Grécia, Lituânia, Turquia e Hungria. Em 2018, quase 13 milhões de toneladas de vidro, em diferentes formas foram recolhidos na União Europeia, colocando a taxa de reciclagem nos 76% a nível europeu (Packaging, 2021). No entanto, Portugal situa-se bastante abaixo desse nível. Em 2016 foram recolhidas 162922 toneladas de vidro e em 2018 foram utilizadas 379 079 toneladas de embalagens de vidro, sendo que foram recicladas apenas 185612 toneladas, deixando a taxa de reciclagem nos 49%. Isto demonstra que muito há a fazer a nível de consciencialização da população (Packaging, 2021).

Silica

A sílica é um subproduto do fabrico de metais e de ligas de ferro e silício, sendo utilizada para a produção de betões de elevado desempenho, embora se trate de um produto de custo bastante superior ao do cimento Portland (em Portugal, o seu custo é cerca de dez vezes do cimento Portland). Este subproduto

não se utiliza muito devido ao seu elevado custo, mas apresenta vantagens ambientais quando comparado com a produção de cimento Portland, visto que para se produzir uma tonelada de cimento Portland, este emite uma tonelada de CO₂ (Azevedo, 2002).

Cinzas volantes

As cinzas volantes são um pó mineral, que resulta das impurezas minerais do carvão, quando este é queimado a altas temperaturas e pressões. As cinzas podem ser provenientes da precipitação electrostática ou captação mecânica. Devido as suas características pozolânicas são empregues como aditivo em argamassas e betões (Yoshitake *et al.*, 2016).

Dependendo do tipo de carvão e método de obtenção a composição química das cinzas volantes é diferente, o que leva a que não tenha todas a mesma aplicabilidade. Para utilização no betão, as cinzas costumam ser classificadas em três categorias de acordo com a norma C618 da ASTM, nomeadamente tipo N, F e C. As do tipo F e C tem propriedades pozolânicas, o que permitem ser utilizadas como ligante.

Geralmente, a cinza volante que é oriunda da queima de carvão negro é adequada para a estabilização de solos pois é rica em sílica e alumina e pobre em cálcio e carbono. Quando se aplicam as cinzas em betões ou pavimentos contendo betão deve-se limitar as suas proporções a 10%, pois o carbono orgânico não queimado quebra a continuidade nas reações cimentícias (Austroads, 2019).

Cinzas de fundo

As cinzas de fundo são comumente conhecidas como escórias e advêm da incineração dos resíduos sólidos urbanos, constituídos sobretudo por matéria inorgânica (Santos, 2010).

Sendo indicadas como uma alternativa aos agregados nas camadas estruturais de pavimentos rodoviários, esta reutilização implica uma redução da quantidade de resíduos encaminhados a aterro e traz vantagens não só económicas como ambientais. Este material pode ser aplicado em sub-bases e em leitos de baixo tráfego (Santos, 2010).

Plásticos

Os plásticos tornaram-se num elemento inevitável no quotidiano do ser humano. Anualmente o consumo de plástico tem vindo a aumentar em todo o mundo, isto acontece devido às suas características, que incluem baixo custo, baixa densidade, longa vida útil, leveza e resistência. O plástico está presente em vários utensílios do nosso quotidiano, como cadeiras, talheres, embalagens, roupas e indústria automóvel, entre outros (Perera *et al.*, 2019).

O plástico é desenvolvido através da nafta, a nafta é um subproduto do petróleo, que contem matérias relevantes para o fabrico do plástico, dessas matérias destacam-se o benzeno, propeno, eteno e o butadieno. No entanto com a refinação do petróleo consegue-se obter outros subprodutos como o betume, a gasolina e o gasóleo (eCycle, 2011).

Anualmente, a Europa gera cerca 58 milhões de toneladas de plástico, das quais 370 toneladas são atribuídas a Portugal. Do total europeu 40% foi utilizado em embalagens, 22% em bens de uso doméstico e consumo, 20% em edifícios e construção, 9% na indústria automóvel, 6% em equipamento eletrónico e 3% na agricultura (ENEA, 2018).

2.2. A IMPORTÂNCIA DA ECONOMIA CIRCULAR

2.2.1. Introdução

Atualmente, a sustentabilidade é um dos temas que mais debate suscita a nível mundial, pois a urgência climática leva a que seja necessário tomar rapidamente decisões políticas na persecução de medidas que impactem numa mudança de paradigma. As incertezas que as mudanças climáticas acarretam, bem como o consumo elevado de matérias primas e recursos não renováveis, destruição da camada de ozono, aumento das emissões de gases que provocam o efeito estufa, bem como alto custo de aquisição de materiais convencionais, ilustram a necessidade de mudanças inovadoras que conduzam a um melhor futuro ambiental (Nwakaire *et al.*, 2020).

Segundo o relatório Brundtland desenvolvido sob o auspício da Organização da Nações Unidas (ONU), o desenvolvimento sustentável satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras poderem também satisfazer as suas, daí ser imperioso apostar-se numa abordagem de economia circular (Teodoro, 2011).

Nos dias de hoje, embora já se esteja a mudar para outro sistema económico, o mais utilizado ainda continua o sistema económico linear, este sistema apoia-se numa linearidade de produção e extração de recursos, o que leva a uma maior rejeição dos mesmos e faz com que seja responsável por inúmeros impactes ambientais que se sucedem no planeta. Contudo, inerente à insuficiência de recursos, adicionando o facto de se ter pouco espaço para depósito dos resíduos, impõe-se alterar o padrão da economia linear para uma economia mais sustentável (Nascimento, 2019). Esse novo modelo caracteriza-se pela circularidade no fluxo de materiais, o que leva a que seja entendido como uma economia circular. Esta economia promove o uso eficiente dos recursos devido aos seus ideais assentes

na reutilização, reciclagem e recuperação dos materiais, com isto, procura-se extrair o maior valor económico e utilidade dos materiais, dando assim ao material uma maior longevidade (Costa *et al.*, 2017) .

A sustentabilidade como já referido é um tema em voga na Sociedade, mas já é uma inquietação que o Homem tem há bastantes anos. Desde os anos 70, em que surgiu a crise de petróleo, que muitas nações investigaram novas fontes de energia, organizando convenções europeias e algumas até mundiais, que ainda existem nos dias de hoje. Nestas reuniões foram afixadas metas, ações e planos que, ao serem executados, possibilitariam repor e proteger os recursos do planeta (Teodoro, 2011).

A adoção dos conceitos de desenvolvimento sustentável tornou-se mais importante nos últimos tempos, pois o rápido crescimento da população e da urbanização tem dificultado a conservação e proteção dos recursos naturais (Nwakaire *et al.*, 2020).

Foi nos anos 80 que a palavra reciclagem começou a ser ouvida nos media, de forma a alertar a população para a escassez dos recursos naturais, aquando da verificação da escassez de fontes de petróleo, a palavra reciclagem surge do inglês *recycle* que significa repetir o ciclo (Teodoro, 2011).

Vários países adotaram convenções para atingir as suas próprias metas. Em Portugal algumas delas passaram pelo estabelecimento da reutilização de 70% dos RCD 's produzidos, a cumprir até 2020 e a obrigatoriedade da aplicação de 5% de materiais reciclados em obras com contratos públicos de edificação e de conservação, nomeadamente, cumprindo o Decreto-Lei n.º 73/2011 (APA, 2018a).

Pode dizer-se que a construção sustentável se baseia essencialmente em 8 pilares, respetivamente identificados na Figura 7.

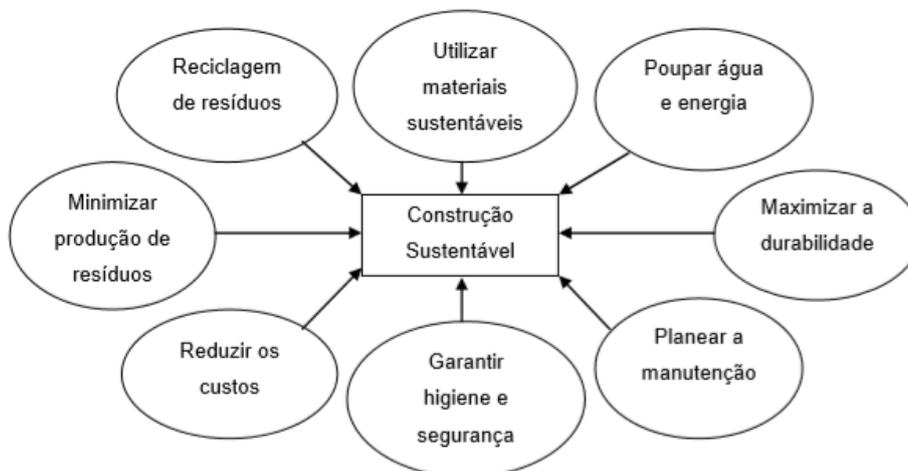


Figura 7 - Pilares da construção sustentável (Teodoro, 2011)

A indústria da construção civil é uma das que mais resíduos produz e energia consome e, conseqüentemente, mais recursos explora, o que leva a sua escassez. Por estas razões, ao longo dos anos, surgiu a necessidade de dar um novo uso a esses resíduos, numa tentativa de aumentar os índices de sustentabilidade desta atividade. Estes resíduos são provenientes da construção e demolição, restos das explorações de pedreiras e da construção de obras geotécnicas e hidráulicas (Fernandes, 2012).

A nível europeu, os resíduos resultantes da construção civil (RCD's) representam produção de um terço da produção total de resíduos. Em Portugal 73% dos materiais extraídos correspondem a materiais não metálicos (APA, 2018a).

No setor da pavimentação já existem vários estudos na área da aplicação de RCD em camadas de base, sub-base e camadas drenantes, no entanto estes novos materiais devem possuir um desempenho igual ou superior ao de materiais novos. De salientar que nenhum dos novos produtos será 100% reciclado (Nwakaire *et al.*, 2020).

Uma mistura betuminosa tradicional é constituída por 95% de agregado e 5% de betume. Com estas percentagens consegue-se perceber que o emprego de agregados reutilizados/reciclados nos pavimentos é uma mais valia pois evita os danos ambientais causados pela exploração mineira, pode levar a uma redução do custo do pavimento, para além de se conseguir alcançar um nível elevado de sustentabilidade (Nascimento, 2019). A produção mundial anual atual de betume é de 102 milhões de toneladas, sendo 85% desse volume usado como aglutinantes em inúmeras aplicações de pavimentação de estradas (Tokede *et al.*, 2020).

É necessário pôr um travão urgente na exploração dos recursos, pois globalmente são extraídos 65 mil milhões de toneladas ao ano de recursos virgens. A esse ritmo, em 2050 serão necessários recursos equivalentes a três planetas (Decreto-Lei n.º 73/2011). A exploração de materiais provoca muitos gases efeito de estufa, sendo assim um material desde a sua extração/processos de produção e aplicação mesmo antes de ser utilizado já gerou 70% de emissões.

A indústria dos pavimentos rodoviários tem vindo a contribuir para diminuição das emissões de Gases com Efeito de Estufa, GEE, para isso apostou na construção sustentável, técnicas de construção inovadoras e descarbonização do transporte rodoviário (Loureiro, 2021).

2.2.2. Utilização de resíduos industriais em pavimentos rodoviários

As inúmeras opções disponíveis devem ser investigadas sob todos os aspetos, com o objetivo de otimizar os potenciais resultados. O projeto de pavimentos sustentáveis é baseado em alguns critérios, como minimizar o uso de recursos naturais, reduzir o consumo de energia e as emissões de GEE, limitar a poluição do solo, do ar e da água, reduzir a produção de ruído, bem como garantir a segurança e a prevenção de riscos para o utente (Jamshidi *et al.*, 2016a).

De seguida apresenta-se um conjunto de exemplos de aplicação de resíduos ou subprodutos industriais na construção ou reabilitação de pavimentos rodoviários.

Resíduos de vidro

O uso de resíduos de vidro é uma alternativa para a substituição parcial de agregados naturais nas misturas betuminosas e de betão. O uso de resíduos de vidro melhora o desempenho estrutural do pavimento, aumentando a resistência, durabilidade, mas também a estética (Jamshidi *et al.*, 2016b). A incorporação de resíduos de vidro até 15% em misturas de betão contendo agregados reciclados de betão é fortemente recomendada para camadas de base e sub-base (Plati, 2019).

Já a utilização de pó de vidro como substituto parcial do cimento em misturas de betão, ou mesmo como filer em misturas betuminosas, apresenta boas propriedades mecânicas levando ao aprimoramento de algumas características como resistência ao gelo-degelo, resistência à permeabilidade de iões de cloreto, contribuindo também para a redução das emissões de GEE e dos impactos e custos relacionados com o uso do aterro (Omran e Tagnit-Hamou, 2016).

Pó de tijolo

O pó de tijolo pode ser empregue nas misturas betuminosas como substituto do filer, permitindo o aperfeiçoamento de algumas propriedades mecânicas, como é o caso da resistência à deformação permanente bem como melhor desempenho à fadiga (Chen *et al.*, 2011). O pó de tijolo pode ser igualmente utilizado como substituto parcial do cimento convencional e como estabilizador de solos (Kinuthia e Nidzam, 2011).

Resíduos de areia de fundição

Resíduos de areia de fundição podem fazer uma substituição parcial de agregado fino em misturas de betão e betuminoso. A sua resistência pode levar a melhoria da qualidade das misturas de betão. A substituição do agregado fino até 20% é aceitável e tem um efeito positivo nas propriedades mecânicas

das misturas de betão (Basar e Deveci Aksoy, 2012) . Quanto aos pavimentos, estes resíduos são adequados para uso em sub-base (Yazoghli-Marzouk *et al.*, 2014).

Cinzas volantes

As cinzas volantes funcionam como substituto parcial do cimento, o que é proveitoso, pois tem um custo menor. As percentagens mais comuns de substituição variam entre 15 a 40%. Alguns dos benefícios de se utilizar cinzas volantes em betões é a redução do calor de hidratação, maior trabalhabilidade da mistura, menor absorção de água e uma atenuação da reação álcali-silica (Plati, 2019).

Ensaio em betões contendo elevadas percentagens de cinzas volantes mostram resultados positivos nas suas características físicas, tais como menor necessidade de água, boa trabalhabilidade e resistência à abrasão melhorada, no entanto as suas propriedades mecânicas não sofrem alterações significativas (Alaka e Oyedele, 2016), não sendo de descurar um efeito pozolânico a longo prazo. Outros estudos apontam que a junção de cinzas volantes com RCD constituem uma mistura ideal para ser aplicada em estabilizações de camadas de pavimento (Plati, 2019).

Pneus usados

O armazenamento de pneus usados em locais inapropriados cria muitos riscos ambientais, como a poluição do ar, da água e do solo, o que leva a problemas de saúde. A estes problemas acresce o facto de os pneus serem feitos de materiais incompressíveis e não biodegradáveis, o que conduz a que a sua degradação seja extremamente lenta (Arulrajah *et al.*, 2019). No entanto, este problema pode ser minimizado pois os pneus conseguem ser incorporados em diversas formas nos pavimentos rodoviários, bem como noutras soluções para o sector da construção.

A incorporação da borracha nos pavimentos rodoviários pode ser feita de duas maneiras, através da modificação do betume, onde a borracha fragmentada é dissolvida no betume ou então como substituto parcial dos agregados finos (Huang *et al.*, 2007).

As misturas betuminosas que contêm este tipo de borracha veem a sua suscetibilidade à temperatura melhorada, assim como o seu desempenho a fadiga. A introdução de borracha nas misturas betuminosas reduz o ruído gerado aquando da passagem dos veículos (Plati, 2019) e a borracha aplicada em camadas de base e sub-base diminui a profundidade de penetração do gelo (Huang *et al.*, 2007). Os pneus podem ser aplicados nas fundações dos pavimentos e em relação ao solo compactado apresentam inúmeras vantagens, apresentam melhor condutividade térmica, são mais leves e têm uma elevada resistência ao

corte. No entanto, ao serem aplicados em camadas mais profundas deve-se ter em conta a lixiviação para não contaminar o solo (Huang *et al.*, 2007).

Agregado Siderúrgico Inerte para a Construção

A introdução de agregado siderúrgico inerte para a construção (ASIC) nas misturas betuminosas melhora a resistência ao fendilhamento e à humidade (Plati, 2019). No entanto, a sua geometria leva a um aumento do consumo de betume, pois este material é mais poroso e anguloso que os agregados convencionais. Existem estudos que referem que misturas contendo apenas ASIC apresentam uma percentagem de vazios acima da permitida e dificuldades de compactação (Kavussi e Qazizadeh, 2014).

2.2.3. Utilização de resíduos de construção e demolição em pavimentos rodoviários

Material betuminoso recuperado

O material betuminoso recuperado, conhecido na terminologia Anglo-Saxónica como *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP), resulta da fresagem das camadas superficiais dos pavimentos betuminosos (Plati, 2019). Nos últimos anos tem-se utilizado bastante o RAP para a substituição parcial dos agregados nos pavimentos. No entanto ainda se aplica em pequenas percentagens. Isto acontece porque não é muito habitual o RAP ser utilizado nas fundações do pavimento, que devido a sua maior espessura conseguia consumir mais quantidade de RAP. Como o RAP apresenta características mecânicas inferiores aos agregados convencionais, quando se utiliza o RAP em grandes percentagens em camadas de base e sub-base é adicionado cimento para melhorar essas características (Costa *et al.*, 2020).

Em camadas base e de sub-base pode-se aplicar até 50% deste material, mas recomenda-se potencialmente um uso entre 15 a 30%, para as propriedades do material não serem afetadas. O uso do RAP em camadas betuminosas ainda não é consensual pois em alguns países não é permitida a sua incorporação em camadas superficiais enquanto noutros países é totalmente o oposto, pois permitem a substituição integral do agregados convencionais por RAP (Plati, 2019). Quando se opta pela substituição, esta tem efeitos positivos na rigidez e na deformação permanente. No entanto, em relação à fadiga o pavimento já vê as suas características pioradas (Costa *et al.*, 2020).

Um dos maiores obstáculos à utilização de RAP está associado à sua utilização com ligantes cimentícios, pois o betume que envolve a superfície dos agregados está envelhecido, para além de os agregados não conseguirem ser envolvidos diretamente pelo cimento, isto leva a que pavimentos contendo ligantes cimentícios e RAP tenham propriedades inferiores (Saride *et al.*, 2016).

Resíduos de Construção e Demolição

Os resíduos de construção e demolição são provenientes de várias origens, por esse facto existe uma maior probabilidade de apresentarem materiais indesejáveis, materiais que contaminem o novo material produzido. Por este motivo deve-se fazer um estudo exaustivo de todas as componentes desses materiais desde as características físicas, químicas e mecânicas de modo a potenciar o sucesso da sua aplicação. Para isso existem normas que estabelecem quais as características/propriedades que estes agregados reciclados devem ter, como a especificação do LNEC E473 que refere quais os requisitos que agregados reciclados devem ter em camadas não ligadas de pavimentos (Fernandes, 2012).

Relativamente à utilização de RCD de betão britado, estudos efetuados na Suécia referem que existe um aumento do módulo de deformabilidade de camadas não ligadas a longo prazo, ou seja esta propriedade não é afetada logo após a construção, demonstrando que o que leva a este aumento de módulo é o facto de algumas partículas de cimento se hidratarem (Gonçalves, 2007). Já noutros estudos é demonstrado que existe uma melhoria do módulo de deformabilidade e do CBR, isto acontece devido à presença de finos e do cimento, estes elementos amplificam a ligação entre partículas, o que se traduz numa maior resistência da camada (Fernandes, 2012). Quando se faz a comparação entre as características físicas e mecânicas de agregados RCD com agregados naturais, os primeiros apresentam melhor CBR pela existência de partículas mais angulosas e de uma elevada quantidade de finos. Estas duas propriedades levam a que exista boa coesão. No entanto devido a sua porosidade e presença do cimento apresentam humidades secas máximas inferiores às ditas normais e teores ótimos em água superiores (Fernandes, 2012).

2.2.4. Impactos ambientais da utilização de resíduos em pavimentos

Com o desenvolvimento populacional desenfreado e conseqüentemente dos seus centros urbanos, a preservação dos recursos naturais foi muitas vezes descurada. No entanto, atualmente, com a adoção dos paradigmas da circularidade como por exemplo a inclusão de resíduos de várias indústrias em pavimentos, consegue-se contribuir para soluções mais sustentáveis e minimizar múltiplos efeitos nefastos para o planeta, podendo-se realçar a emissão de GEE, emissões de CO₂ provenientes da exploração mineira, o dano na camada de ozono e a redução da deposição de resíduos (Nwakaire *et al.*, 2020, Palha, 2012).

No que respeita aos pavimentos rodoviários quando se aplica resíduos para a sua construção ou reabilitação, está-se a restringir a nova matéria prima utilizada, neste caso o betume e os agregados,

consequentemente existe uma redução do custo do pavimento e dos materiais colocados em vazadouro (Ribeiro, 2014).

No entanto, quando se faz esta substituição de materiais é necessário ter em conta que eles não tenham um impacto maior que a solução convencional, daí ser imperioso a identificação de contaminantes em resíduos industriais, que são tóxicos, de composição complexa e causam sérios danos ao meio ambiente e ao humano (Chen *et al.*, 2020). Nos dias de hoje, o principal método para determinação da perigosidade dos materiais é o ensaio de lixiviação (Chen *et al.*, 2020), embora existam vários parâmetros que devem ser avaliados em relação à poluição da água, solo e ar. Para a água devem ser analisados os efeitos na eutrofização e da ecotoxicidade, inerente aos solos a sua acidificação. Fora desses grupos também se deve analisar quais as mudanças climáticas que causam, assim como a destruição da camada de ozono, o esgotamento de recursos minerais e fósseis e a toxidade humana (Chen *et al.*, 2020, Nascimento, 2019).

Quando se aplica resíduos nos pavimentos, esta ação reflete-se nalguns dos parâmetros que devem ser analisados, sendo evidente que a sua utilização minimiza os resultados desses parâmetros, como é o caso do impacto do esgotamento mineral, que está relacionado com o consumo de material virgem, como a extração de agregados e exploração mineira (Nascimento, 2019).

A acidificação terrestre caracteriza-se pelo depósito de partículas inorgânicas na atmosfera, como sulfatos, nitratos e fosfatos, que alteram o pH do solo (de Vries e de Boer, 2010). A eutrofização consiste na limitação da evolução da biomassa aquática devido ao desenvolvimento de nutrientes que limitam o seu crescimento. Já a ecotoxicidade terrestre está diretamente relacionada com a utilização de pesticidas ou metais pesados no solo (Nascimento, 2019). A ecotoxicidade marinha é influenciada pela absorção de metais pesados e ácido sulfúrico, esta contaminação pode ocorrer através de cursos de água contaminados ou absorção das partículas existentes no ar pela água (Legret *et al.*, 2005).

Nascimento (2019) estudou os impactos ambientais de 6 misturas betuminosas, nomeadamente, uma mistura convencional, uma mistura com escória, uma mistura com material fresado, uma mistura com lamas de corte de pedras ornamentais, uma mistura com polietileno reticulado e uma mistura com areia de fundição. Nesse estudo avaliou 5 etapas necessárias à construção de um pavimento, são elas a produção da mistura, a construção, a reabilitação, o uso e o fim de vida e qual a sua influência nos impactos mencionados acima. De seguida é apresentado o comportamento de uma mistura convencional e da fresada, pois foi a qual Nascimento concluiu que era mais benéfica.

Relativamente à mistura convencional, Nascimento (2019) observou que a generalidade dos impactos se deve às fases de produção, reabilitação e fim de vida. Este facto era esperado pois são as três atividades que mais recursos consomem e emissões produzem, como se pode ver na Figura 8 .

Das misturas estudadas, a que contém material fresado (Figura 9) foi a que alcançou melhor desempenho ambiental. Nesta mistura as classes com maior impacto foram os processos de fim de vida e reabilitação, isto pode dever-se a que tanto na reabilitação como no fim de vida seja necessário fazer a remoção do pavimento o que vai conduzir a mais emissões de CO₂.

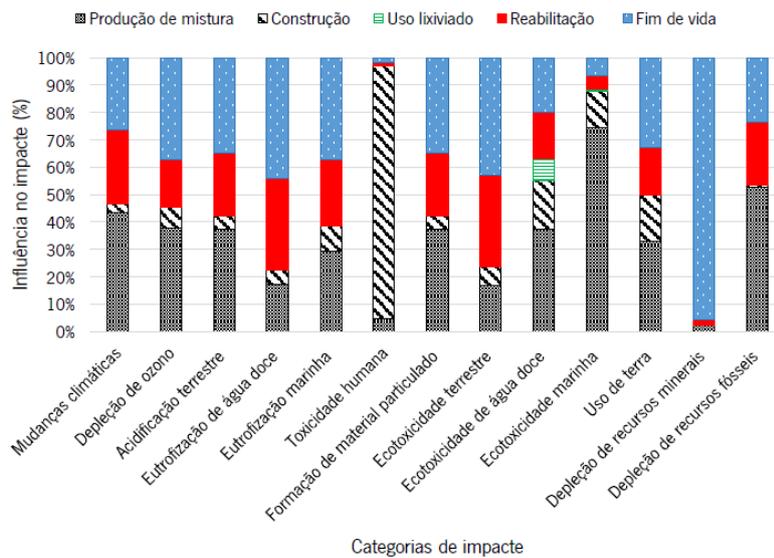


Figura 8 - Contribuição de cada fase nos impactes ambientais da mistura convencional (Nascimento, 2019)

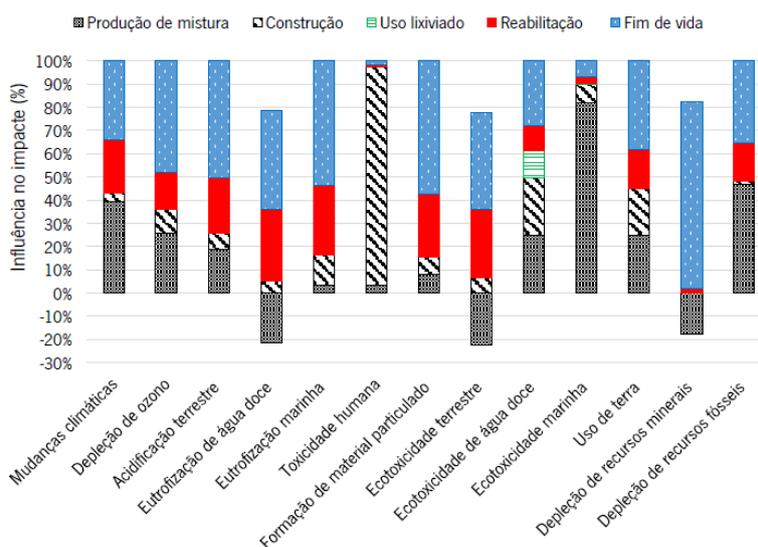


Figura 9 - Contribuição de cada fase nos impactes ambientais da mistura com material fresado (Nascimento, 2019)

Nascimento (2019) concluiu que a mistura contendo escória (ASIC) era a segunda melhor pois em várias categorias apresentou valores de impactes menores e até negativos em comparação com a mistura convencional. No entanto constatou-se que a categoria da toxicidade humana foi essencialmente influenciada pelo processo de construção, o que remete para que as misturas a quente projetam substâncias altamente nocivos para a saúde humana.

2.3. PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS

2.3.1. Requisitos técnicos para os materiais a utilizar nos pavimentos

Os atributos funcionais de um pavimento são essencialmente atribuídos à sua superfície. O acabamento da superfície e os materiais que nela são aplicados influenciam significativamente aspetos importantes e preocupantes para os utilizadores, tais como a aderência entre o pneu e o pavimento, a projeção de água em tempo de chuva, o desgaste dos pneus, o ruído no exterior e no interior do veículo, a comodidade e a estabilidade durante a circulação e a resistência ao rolamento (Rodrigues, 2015, Santos, 2010). No entanto as características dos materiais interferem nas características estruturais e consequentemente nas características funcionais.

No Caderno de Encargos das Estradas de Portugal (2014) e no manual de pavimentação da Cepsa (2006), consegue-se encontrar todos os requisitos e normas a seguir dependendo das características do pavimento que se queira construir, como o tipo de betume a utilizar e a percentagem de cada material a utilizar conforme a camada em que este se vai inserir. No entanto, na generalidade as características físicas e mecânicas relevantes dos agregados incluem o tamanho e granulometria, forma e angularidade, textura da superfície, permeabilidade, densidade, durabilidade, dureza, porosidade e resistência à abrasão (Fernandes, 2016, Nwakaire *et al.*, 2020).

Segundo o Caderno de Encargos, os agregados devem passar por uma serie de ensaios para ver se é plausível a sua inclusão em pavimentos rodoviários, nomeadamente, a percentagem de partículas esmagadas ou partidas e de partículas totalmente roladas nos agregados grossos; ensaio equivalente de areia; ensaio de azul de metileno; resistência à fragmentação do agregado grosso através do coeficiente Los Angeles; massa volúmica das partículas; absorção de água; resistência ao gelo e ao degelo e qualidade dos finos. No entanto existem características e ensaios que variam de acordo com as diferentes aplicabilidades (Estradas de Portugal, 2014).

2.3.2. Principais propriedades físicas e mecânicas de misturas betuminosas

Os pavimentos são dimensionados e construídos para cumprirem com requisitos mecânicos e funcionais. Nos pavimentos flexíveis, o pavimento mais aplicado em Portugal, estes requisitos são influenciados principalmente pela camada superficial que é constituída por material betuminoso. No entanto, o desempenho mecânico das misturas betuminosas depende essencialmente dos seus materiais, nomeadamente do tipo de betume e dos agregados, já o desempenho funcional relaciona-se com a distribuição granulométrica dos agregados (Neto *et al.*, 2006).

Quando se formula uma mistura betuminosa para aplicação em pavimentos rodoviários, é imprescindível definir as porções de agregados a utilizar. Para isso utilizam-se duas curvas de referência, designadas por fuso, essas curvas estabelecem o limite máximo e mínimo em que a curva granulométrica deve ficar compreendida para cada tamanho de agregado. Depois de definida a curva granulométrica e a mistura ser fabricada, pode-se determinar o teor em betume através do método Marshall. Para caracterizar corretamente uma mistura a nível laboratorial deve-se realizar ensaios para determinar as suas propriedades físicas, como a baridade aparente, a baridade máxima teórica e o volume de vazios, bem como as suas propriedades mecânicas, como a resistência à deformação permanente e ao fendilhamento por fadiga, o módulo de rigidez e a sensibilidade à água (Sampaio, 2012).

Os betumes de pavimentação convencionais obtidos pela refinação do petróleo, ou seja que não são modificados, necessitam de obedecer aos requisitos da Norma NP EN 12591, “Betumes e ligantes betuminosos – Especificações para betumes de pavimentação”, designadamente a requisitos de consistência de temperatura, durabilidade e viscosidade (Estradas de Portugal, 2014).

Em misturas betuminosas recicladas o tipo de ligante a adicionar deverá ser selecionado para que em conjunto com o betume envelhecido presente nas misturas recuperadas permita obter um ligante final que cumpra os requisitos/características preconizadas no projeto (Estradas de Portugal, 2014).

2.3.3. Desempenho de pavimentos com resíduos

Nascimento, Silva e Oliveira (2018) concluíram que elevadas taxas de incorporação de ASIC em misturas betuminosas tornava difícil o cumprimento definido no Caderno de Encargos das Estradas de Portugal relativamente ao volume de vazios, isto deve-se sobretudo a angulosidade e rugosidade do material (Viana, 2019). Também Kavussi e Qazizadeh (2014) são da mesma opinião, pois constataram que as misturas que são constituídas apenas por ASIC podem apresentar problemas de compactação, o que faz

com que estas misturas tenham um volume de vazios acima dos valores das recomendados, e um maior consumo de betume devido à forma angular e textura dos agregados.

Alvarenga et al. (2001) constataram que os pavimentos que são construídos com utilização de escórias processadas em camadas granulares detêm um comportamento que não é muito influenciado pela energia de compactação e teor em água. Estes materiais também apresentam módulos de deformabilidade superiores aos agregados naturais (Ferreira, 2010).

No que concerne a utilização de polímeros para modificação do betume, nomeadamente o betume modificado com borracha apresenta boa viscoelasticidade. Devido à ductilidade do ligante, as misturas produzidas com este tipo de betume modificado apresentam boa resistência à fadiga, à deformação permanente e à reflexão de fendas. Devido a estas características quando se utiliza betumes modificados com borracha para se fazer a reabilitação dos pavimentos é possível fazer uma redução na espessura da camada de reforço até 50%, o que garante uma competitividade económica.

Misturas betuminosas com BMB apresentam uma taxa de envelhecimento mais lenta. No entanto, estas misturas têm algumas desvantagens, nomeadamente, quanto ao tempo de espera para reabertura das estradas após a colocação. Se não for cumprido o tempo necessário para o arrefecimento das misturas, estas apresentam tendência para formação de rodeiras. Também é preciso ter cuidado com a temperatura de compactação pois se a temperatura estiver abaixo da adequada torna difícil a compactação, o que leva a uma elevada porosidade, que no caso de misturas abertas favorecem a sua desagregação superficial (Pais *et al.*, 2008).

Sousa *et al.* (1999) afirmam que as misturas que contêm betume modificado com borracha de pneus apresentam uma maior resistência as deformações permanentes e à fadiga, o que permite que os pavimentos construídos com este betume tenham espessuras da camada de desgaste mais reduzida. Estas vantagens não se ficam por aqui, pois estas misturas ajudam a retardar a transmissibilidade das fendas das camadas inferiores para a camada superior, camada de desgaste, devido a sua elasticidade.

Parent et al. (2003) compararam o desempenho mecânico de 5 misturas, uma de solo selecionado, duas de solo selecionado com 50% e 70% de brita e duas misturas de solo selecionado com 50% e 70% de ASIC, quando estes são utilizados em camadas de sub-base e base de pavimentos. Para se fazer esta comparação realizaram-se ensaios triaxiais cíclicos e ensaios CBR. Depois de analisados os dados concluiu-se que as misturas de solo que continham ASIC expunham valores de massa específica seca

máxima mais elevados, e um de teor em água ótimo mais baixo e apresentavam valores três vezes superiores aos da mistura de solo selecionado e o dobro na mistura solo-brita no ensaio CBR.

Também Lima *et al.* (2000) compararam o desempenho de dois pavimentos construídos com escórias de aciaria processadas e com agregados naturais. No primeiro usaram escórias de aciaria para a camada de base e sub-base e na camada de desgaste (com 2 cm) utilizou-se os materiais normalmente aplicados nesse tipo de camada. O outro pavimento foi construído com 100% de agregados naturais e a camada de desgaste tinha uma espessura de 13 cm. Deste pequeno estudo concluíram que ambos os pavimentos eram equivalentes e que os módulos reversíveis, alcançados por retro-análise, no pavimento que continha escórias processadas eram proximamente 3 a 4 vezes mais elevados, comparativamente com o pavimento dito convencional (Ferreira, 2010).

2.4. INDÚSTRIA 4.0

2.4.1. Revoluções industriais

A nível mundial, a população depara-se com novas tecnologias, mas o que é a tecnologia? Tecnologia pode ser definida através da sua origem grega, *tekhne + logia*, que relaciona a ciência com a engenharia.

O mundo já passou por 3 revoluções industriais, e hoje assiste-se à era da indústria 4.0, o que representa a quarta revolução (Figura 10). A indústria como hoje é conhecida, sofreu várias mudanças ao longo da história, crescendo sistematicamente de acordo com as novas descobertas e desenvolvimentos ao longo dos últimos séculos. Todas as revoluções caracterizaram-se por um grande avanço tecnológico, desafios e oportunidades e alguns inconvenientes (Santos *et al.*, 2018).

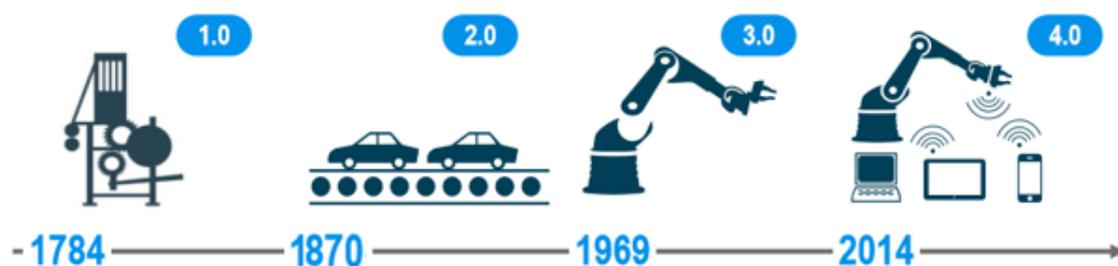


Figura 10 - As quatro revoluções industriais adaptado (Hoff, 2016)

A primeira revolução surgiu em Inglaterra no final do século XVIII com a invenção da máquina a vapor e mecanização das tarefas, a segunda caracterizou-se pela descoberta da energia elétrica e produção em massa, isto durante o final do século XIX, neste período surge o Fordismo, criado por Henry Ford, este movimento está relacionado com a produção e com o consumo em massa, foi em 1914 que a indústria automobilística se revolucionou, pois nesse ano Henry Ford exibiu a primeira linha de montagem automatizada. A terceira revolução ficou conhecida pela revolução informacional, visto que as grandes áreas desenvolvidas foram a eletrónica, informática, automação e telecomunicações, o que permitiu que surgissem os primeiros computadores, telemóveis e a automação e robotização de algumas linhas de montagem, no entanto áreas como a nanotecnologia e biotecnologia também foram desenvolvidas durante a segunda metade do século XX (Coelho, 2016). A 4ª revolução surgiu no início do século XXI com os sistemas ciber-físicos e sistemas inteligentes que possibilitam que as estruturas notifiquem as pessoas, através da colocação das informações em rede, na nuvem (*cloud*), isto só é possível através de sensores conectados via *wireless* (Borlido, 2017).

2.4.2. A quarta revolução industrial

Atualmente, a Sociedade não vive na era do facilitismo, mas numa época do digital em que tudo o que se quer saber está à distância de um clique. Todos os dias aparecem novos equipamentos, aplicações, plataformas e múltiplos *softwares* de gestão que auxiliam a descomplicar o dia-a-dia das empresas.

Quando se trata do conceito da Indústria 4.0, existem diversos conceitos e tecnologias inovadoras envolvidas nesta tendência global, tais como: sistemas cyber-físicos, *internet of things* (IoT), e de serviços (IoS), comunicação entre máquinas, automação industrial, equipamentos autónomos e inteligentes, dispositivos móveis inteligentes, *Big Data*, digitalização dos produtos e processos, tecnologias de computação visual como realidade virtual e aumentada, processamento de imagens 3D, interfaces de interação homem-máquina, *cloud computing*, manufatura aditiva e introdução de inteligência artificial (Kagermann *et al.*, 2013, Porter e Heppelmann, 2015, Santos, 2018).

Segundo Cozmiuc e Petrisor (2018), existem quatro pilares que criaram esta quarta revolução industrial são eles a interoperabilidade, transparência da informação, assistência técnica e decisões descentralizadas.

A interoperabilidade significa explorar a IoT para conectar pessoas, dispositivos, máquinas e robôs com o objetivo final de automatizar o máximo possível a fabricação, o chamado conceito de fábrica totalmente automática. O termo de transparência de informações destina-se ao conceito de Digital Twins, cópias

virtuais de objetos reais e enriquecimento do virtual com dados extraídos de sensores reais (Ceruti *et al.*, 2019). A assistência técnica consiste em dar o apoio aos operadores com informações que podem ser visualizadas quando necessário para resolver problemas em tempos curtos e cada vez mais apostar na substituição de humanos por máquinas ciberfísicas (Ceruti *et al.*, 2019), por fim, o conceito de decisões descentralizadas propõe máquinas inteligentes capazes de tomar decisões de forma automatizada, resolvendo paradoxos e problemas de planeamento complexos sem intervenção humana, onde o operador passa a ser um supervisor (Marcon *et al.*, 2017).

A quarta revolução industrial conduz a uma melhoria na eficiência e qualidade nos processos, ela caracteriza-se pela digitalização e impressão 3D, que facilita o desenvolvimento de protótipos de forma rápida, precisa e económica, cooperação homem-máquina, sistema de armazenamento e análise de dados, realidade virtual, monitorização de todos os produtos e processos. No entanto também apresenta inconvenientes, um dos principais é conseguir que todos os elementos da indústria desde fornecedores, produtores e clientes se adaptem ao mesmo tempo, ou seja invistam em simultâneo nas tecnologias que os permitem ficar ligados, a isto soma-se o crescente risco de crimes cibernéticos, a alta dependência tecnológica e a falta de pessoas qualificadas para lidar com a tecnologia (Borlido, 2017). No entanto, a indústria 4.0 traz inúmeras vantagens como o aumento da produção, menor custo de produção, aumento da produtividade, aumento da receita, informações relacionadas com os níveis de stock, alertas para problemas ou falhas, alterações nas ordens de produção, contribuindo para que as máquinas atuem cada vez menos com a intervenção do homem, otimização dos processos produtivos e diminuição dos erros e permite a tomada de decisões na hora adequada (Ribeiro, 2017).

Contudo, uma fábrica inteligente não pode trabalhar sozinha, existe uma necessidade de conexão entre outras fábricas inteligentes e produtos inteligentes, daí a tecnologia 4.0 ter 3 pilares essenciais para colmatar esses entraves (Figura 11). O primeiro, digitalização e integração de cadeias de valor verticais e horizontais, consiste no acompanhamento do produto durante todo o seu ciclo de vida desde a matéria prima, até chegar ao consumidor final (Ribeiro, 2017). Este processo ocorre através das redes de valor que utiliza as novas tecnologias para trocar e gerir informações entre os intervenientes do processo, permitindo uma colaboração mais estreita entre clientes, fornecedores e parceiros de negócios (Santos *et al.*, 2018). O segundo pilar é a digitalização de produtos e ofertas de serviços e o terceiro é o desenvolvimento de novos modelos de negócios digitais e plataformas de acesso ao cliente (Pwc, 2016).

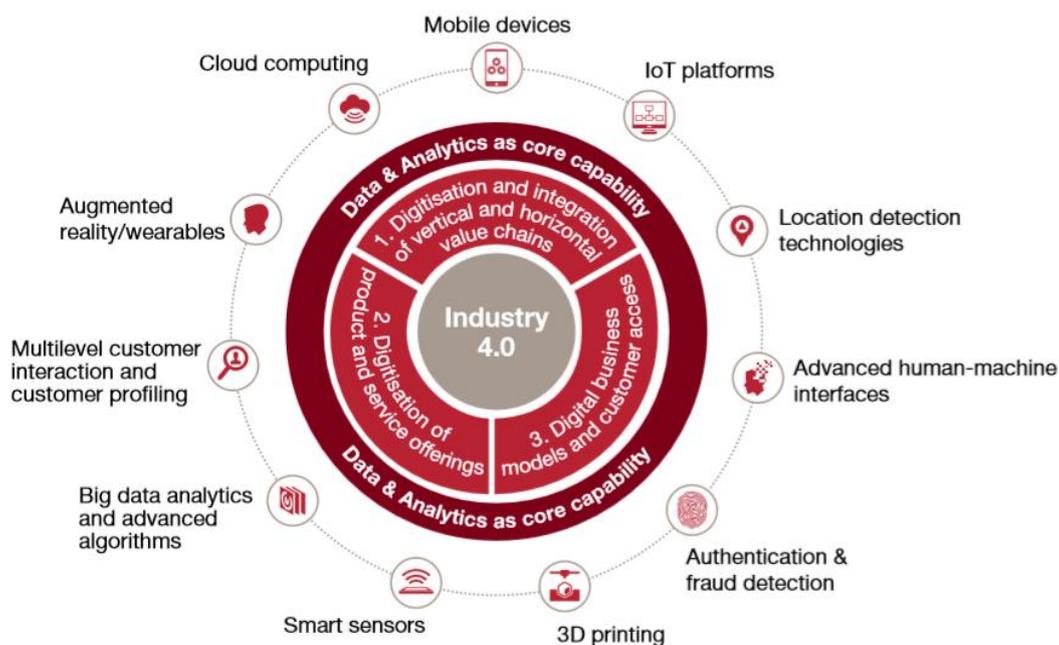


Figura 11 - Pilares da indústria 4.0 (Pwc, 2016)

As oportunidades de digitalização, integração e automação oferecidas permitem que as empresas colaborem tanto internamente, como externamente o que pode acarretar uma mudança radical na produtividade, bem como no design e na qualidade de construção (Pwc, 2016).

Internet of Things

IoT está relacionado com o facto de objetos físicos estarem ligados à internet através de dispositivos eletrónicos. Na atualidade, a IoT está presente no nosso quotidiano, a interligação entre os mundos digital e real tornou-se um facto, pois isto acontece desde o simples ato de usar o telemóvel para ligar qualquer eletrodoméstico a distância, rastrear uma encomenda ou saber se um avião está atrasado, verificar o estado de desgaste dos nossos equipamentos e se indispensável permitir que o próprio equipamento agende a sua manutenção. Com estes exemplos pode concluir-se que a IoT permite a comunicação entre equipamentos (*machine-to-machine*) sem intervenção humana, através da internet (Coelho, 2016).

Cloud computing

A *Cloud computing* surge da necessidade de as empresas já não conseguirem armazenar toda a informação dos produtos desde o início do seu processo (matéria prima) até este estar pronto para ser vendido ao consumidor (Borlido, 2017). A *cloud* permite armazenar quantidades massivas de informação, para além de conseguir ter a informação sempre atualizada e todas as pessoas com autorização acedem a ela em qualquer parte do mundo, de uma forma bastante simples e rápida (Apd, 2019). A *cloud computing* não é nada mais do que o compartilhamento de servidores que estão interligados por meio da Internet (Borlido, 2017, Gallo e Santolamazza, 2021).

Big Data Analytics

Big Data Analytics consiste na gestão e interpretação de todas as informações em tempo real, o que permite a tomada de decisões com precisão e confiança na hora adequada (Finogeev *et al.*, 2019, Gallo e Santolamazza, 2021). Na Figura 12 pode ver-se como se deve proceder à análise dos dados gerados pela *Big Data Analytics*.

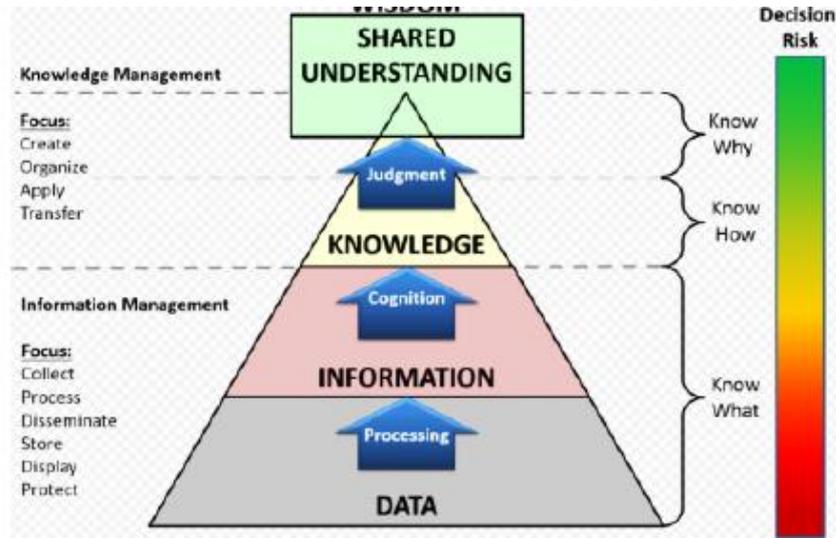


Figura 12 - Importância da *Big Data Analytics* (Coelho, 2016)

2.4.3. Tecnologias facilitadoras para a construção 4.0

A quarta revolução industrial conseguiu formar as indústrias inteligentes. A indústria inteligente (Figura 13) caracteriza-se essencialmente por 4 pilares, a *cloud*, uma análise de dados em tempo real, a IoT e a colocação de sensores. O seu grande objetivo é armazenar a maior quantidade de dados, processá-los e emitir alertas em tempo real, otimizando os custos e tempo.

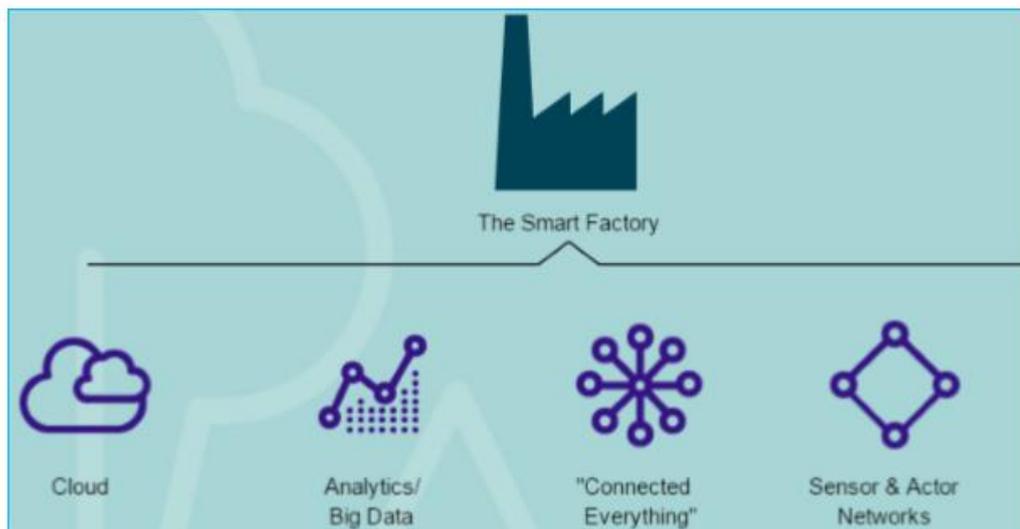


Figura 13 - Conceito de indústria inteligente

A tecnologia 4.0 traz inúmeras vantagens, daí as empresas adaptarem a Indústria 4.0 à Construção 4.0. Este é um dos setores que menos proveito tira da tecnologia, mas o paradigma está a mudar pois a digitalização traz inúmeras vantagens tais como: rápido acesso à informação, uma vez que ela esta toda concentrada na *cloud*, aumento da produtividade, pois como a informação esta toda concentrada permite evitar falhas e tomar decisões no tempo certo, diminuição de erros e falhas através do sensores instalados o que permite acompanhar a tarefa em tempo real; redução de custos, pois existem menos falhas e há um aumento de produção (Ribeiro, 2017).

Adicionalmente, existem outras tecnologias como a impressão 3D, realidade virtual, realidade aumentada, *digital twins*, manufatura aditiva e os sensores que se tornaram uma grande ajuda para as indústrias. Estas permitem que as empresas consigam cobrir toda a logística desde o projeto até ao objeto físico, vendo quais as etapas que se sucedem, visualizando como deveria ficar o objeto ao fim de determinada fase. As soluções acionadas por *drones* também tendem a tornar-se cada vez mais predominantes para a recolha de dados.

Digital Twins

Os *digital twins* - DT oferecem a possibilidade de se acompanhar o desempenho de produtos ou fábricas em diferentes contextos e reduzir a duração do processo de desenvolvimento do produto e da produção em contextos industriais. Isto é bastante útil pois num ambiente muitíssimo competitivo e altamente concentrado no tempo de chegada ao mercado esta ferramenta mostra-se bastante útil (Cugno *et al.*, 2021).

O DT incorpora uma imagem “virtual” da realidade constantemente sincronizada com o panorama real, o que permite analisar o modelo e fazer o paralelismo com a realidade (Semeraro *et al.*, 2021). O DT tem como objetivo criar modelos virtuais de alta-fidelidade.

O DT pode ser desenvolvido para cada fase do ciclo de vida do produto, absorvendo diferentes funções. Na fase de projeto pode ajudar os projetistas a formar e validar mais rapidamente os cenários futuros. Na fase de fabrico, o DT permite a simulação, estimando quais os materiais e quantidades necessárias em cada momento (Semeraro *et al.*, 2021).

As empresas aeroespaciais começaram a utilizar os DT para cumprir a meta de reduzir o tempo de inatividade. O uso de Digital Twins na aeronáutica permite a receção de avisos e previsões antecipadas, mas também preparar um plano de ações baseado em cenários simulados que consideram as condições climáticas, o desempenho do cenário e várias outras variáveis (Tuegel *et al.*, 2011).

O DT não é só utilizado na engenharia, também pode ser usado na área da saúde como a prevenção e gestão de doenças cardiovasculares usando tecnologia sem fio e sensores (Shengli, 2021).

Manufatura aditiva

A Manufatura Aditiva ou impressão 3D é um método no qual a fabricação de componentes é feita através da deposição camada por camada de material sobre uma base ou substrato ou sem ele (Lopes, 2016), decorrente de um controlo informático e automatizado, e que permite a obtenção de um objeto final planeado em ambiente virtual (Moreira, 2017). Um projeto CAD é preparado e as informações para cada camada são armazenadas em arquivos STL, também chamados de estereolitografia. A configuração envolve um computador que controla tudo, braços robóticos, ambiente de blindagem e sistemas de digitalização e gravação (Rasiya *et al.*, 2021).

Segundo Lopes (2016) o sistema de Impressão 3D desenrola-se de acordo com as seguintes etapas

- Concetualização;
- Elaboração tridimensional do objeto em plataforma CAD ou obtenção do mesmo a partir de um objeto real, com recurso a um scanner 3D;
- Conversão do ficheiro para o formato stl (stereolithography) ou amf (additive manufacturing format);
- Processamento do ficheiro, nesta fase o objeto é “fatiado”, cada camada contém a informação necessária para o ficheiro ser traduzido para linguagem G-code, para posteriormente a máquina interpretar e executar;
- Construção/impressão.

Na Figura 14 pode-se visualizar o fluxo do processo de impressão 3D.

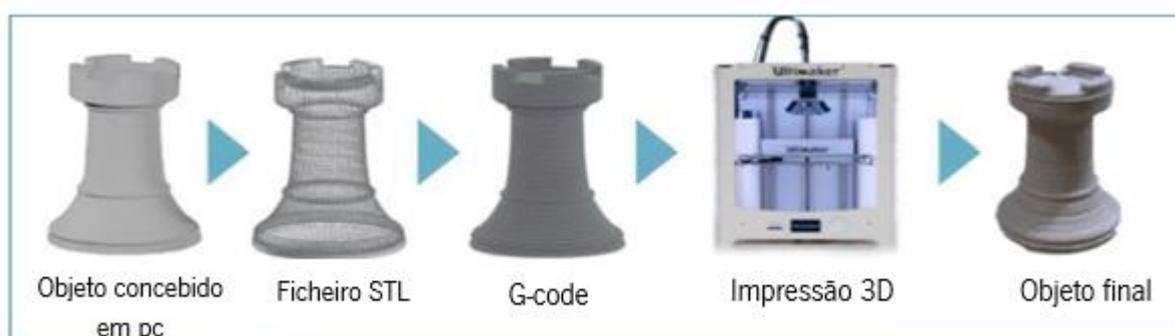


Figura 14 - Fluxo de trabalho da impressão 3D adaptado (Silva, 2020)

A impressão 3D é útil em vários setores desde a indústria, engenharia, passando pela medicina. Na biotecnologia e na medicina, pode ajudar na reconstituição e substituição de tecidos e até órgãos inteiros, o que de momento ainda não é possível com as tecnologias atualmente existentes (Santos, 2018). Neste momento a impressão 3D é mais utilizada para a criação de vasos sanguíneos artificiais, existem já vários estudos sobre a bio impressão de órgãos, mas neste campo ainda existe muito para explorar. As técnicas de nanolitografia e a fotolitografia permitem a criação de bio chips e biossensores (Rasiya *et al.*, 2021).

Outra área de aplicação da impressão 3D são setores da arquitetura e construção civil, onde é possível fabricar grandes estruturas e com geometrias complexas, sem a necessidade de moldes, num curto período de tempo através de impressoras com grandes dimensões (Santos, 2018). Com a impressão 3D, na construção civil consegue-se reduzir os custos de produção, os desperdícios e produzir estruturas mais leves, e com a capacidade de introduzir funcionalidades nas diversas camadas de uma forma simples, estas vantagens alinhadas com as já mencionadas tornam a impressão 3D extremamente funcional e útil na construção civil (Silva, 2021). Estas inovações na produção de elementos, de edifícios ou infraestruturas possibilitam que a área da construção avance para a Indústria 4.0 (Silva, 2021). Alguns dos materiais que conseguem ser impressos em 3D são o alumínio, o aço inoxidável, os polímeros, o titânio, os cerâmicos e o betão (Silva, 2020).

Realidade virtual VS Realidade aumentada

Estes tipos de realidade caracterizam-se por uma relação entre o Homem e a máquina, que envolve a computação gráfica, processamento de imagens e sons e inteligência artificial. Toda esta envolvente dá a sensação de presença no mundo virtual (Costa, 2020), ou seja, o utilizador é transportado para um ambiente fictício, fazendo com que a pessoa se abstraia da realidade, a este processo atribui-se o nome de experiência imersiva.

A realidade aumentada caracteriza-se por ser uma reprodução do mundo real, criada por um computador em que alguns elementos se sobrepõem ao mundo real. A realidade virtual teve o seu início nos videojogos, no entanto devido ao seu potencial demonstra ser bastante útil na engenharia e arquitetura (Costa, 2020). Esta realidade permite um maior equilíbrio entre o real e o virtual em oposição a realidade virtual que envolve o utilizador num ambiente totalmente virtual.

Juntando estas duas realidades ao mundo real elas acarretam incalculáveis vantagens para a área da construção e arquitetura, pois possibilitam que a construção de um edifício seja acompanhada desde a fase de projeto até a sua edificação, permitindo que o cliente visualize o protótipo final mesmo antes de

estar concluído e que acompanhe as várias etapas. Este acompanhamento do início ao fim da construção permite detetar precocemente alguns erros e conflitos nas diversas especialidades e consequentemente uma redução dos custos (Bouchlaghem *et al.*, 1996, Woksepp, 2007).

Um exemplo de realidade aumentada é o *Building Information Modelling*, BIM, (Figura 15), pois permite na fase de projeto acompanhar a modelação do espaço, as redes de abastecimento, esgotos, AVAC e detetar os seus requisitos funcionais e, na fase de construção, o planeamento e supervisão dos processos construtivos (Bouchlaghem *et al.*, 1996).

A realidade aumentada permite que o projeto final seja introduzido num terreno vazio ou com outros edifícios, isto permite ter noção do enquadramento paisagístico do edifício em construção. Como este é um método bastante visual permite que o utilizador, mesmo inexperiente, consiga detetar erros no modelo 3D do projeto (Behzadi, 2016, Costa, 2020).

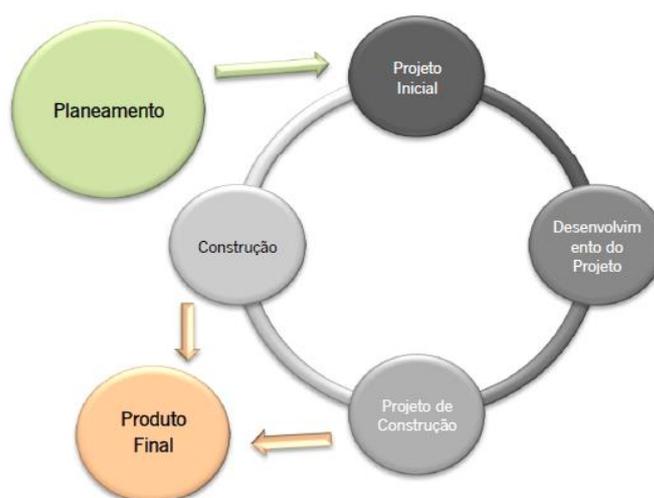


Figura 15 - Benefícios do BIM na construção (Costa, 2020)

2.5. SENSORIZAÇÃO NO ÂMBITO DO SISTEMA RODOVIÁRIO

Na atualidade, cada vez existem mais sensores, de menor dimensão e custo, aplicados a diferentes áreas, como na biologia, eletrónica, medicina e na engenharia (Palha, 2012). No entanto, estes não são restritos às grandes indústrias, cada vez mais no nosso dia-a-dia nos deparamos com a presença de sensores, como por exemplo o detetor de fumo alertando para um incêndio, sensores de pressão utilizados nos vidros do carro e sensores de movimento quando a luz das escadas do prédio se acende (Marques, 2013).

Os sensores têm provado ser essenciais para a automatização dos processos de manufatura, eles foram criados há mais de 60 anos. Eles são aplicados mundialmente em várias indústrias, pois proporcionam a monitorização do que sucede nas linhas de produção, sem a necessidade de qualquer contato físico, estes sensores denominam-se por sensores inteligentes (Marques, 2013). São denominados de sensores inteligentes, pois se estiverem integrados em interfaces de rede permite que eles possam formar as redes de sensores, que se ligados à *internet* permitem o acesso remoto aos sensores e aos atuadores.

Na área da engenharia são aplicados em várias indústrias, incluindo no sector da construção. Relativamente à área da construção civil, os sensores adquirem um papel importante na monitorização das estruturas, para obtenção de várias informações como é o caso do endurecimento do betão, o ganho de resistência no betão e o nível de oxidação do aço e medições das vibrações (Shin *et al.*, 2008), por isso já se aplicarem em grandes obras de arte, como o caso de pontes. No que concerne aos pavimentos rodoviários estes são aplicados para medir propriedades intrínsecas do material e fatores externos, como propriedades intrínsecas destaca-se a deformação e como fatores externos a medição de parâmetros climáticos, como é o caso da temperatura e humidade, e medições do tráfego (Palha, 2012).

Existem diversos tipos de sensores para uso na indústria, o sensor deve ser escolhido conforme o ambiente em que se vai enquadrar, pois existem fatores como o calor, a luz e a distância de aproximação que podem influenciar o seu desempenho. Existem sensores de pressão, sensores de nível, sensores de vazão e sensores de temperatura. Quanto ao princípio de operação os mais comuns são os magnéticos, ultrassônicos, capacitivos, fotoelétricos, e os indutivos.

Os principais sensores que se utilizam nos pavimentos são sensores medidores de pressão para quantificar de que forma as tensões são aplicadas no pavimento pelos veículos. Existem ainda extensómetros que permitem medir as deformações, tanto verticais como horizontais das camadas do pavimento e acelerómetros estes últimos são mais utilizados em linhas férreas. Nos pavimentos existem sensores externos que permitem monitorizar fatores climáticos como a temperatura, pluviosidade, humidade, velocidade do vento e radiação solar, estes sensores também tem grande importância, pois as condições climáticas influenciam bastante a durabilidade de um pavimento (Palha, 2012).

O principal obstáculo para a utilização generalizada de sensores prende-se com o facto de muitos deles necessitarem de energia, o que obriga ao uso de baterias ou sistemas solares (Di Graziano *et al.*, 2020).

Quanto ao modo de funcionamento, os sensores mais utilizados nos pavimentos são os piezoelétricos, pois estão aptos a produzir corrente elétrica como resposta a uma força mecânica aplicada neles (Palha,

2012). No entanto, essa energia não pode ser usada diretamente pelo sensor porque é caracterizada por picos de tensão inconstantes e a energia de um único evento não é suficiente para alimentar o sensor. A solução é acumular essa energia aleatória devido à pressão dos veículos e prever o momento oportuno para libertá-la (Di Graziano *et al.*, 2020). O efeito da piezoelectricidade foi descoberto em 1880 pelos irmãos Jacques e Pierre Curie (Costa, 2017). A palavra piezoelectricidade deriva da associação de duas palavras, *piezo* (pressão) + *eletricidade* (Palha, 2012). Em Portugal a aplicação de materiais piezoelétricos é essencialmente direcionada para a pesagem de veículos.

Contudo, existem outros sensores empregues nos pavimentos (Figura 16) que necessitam de ser alimentados a partir da berma, o que leva a que seja necessário fazer um corte no pavimento para a passagem dos fios, este tipo de instalações são caras e criam fragilidades no betuminoso, como os sensores de contagem de tráfego com bobinas indutoras Ghislain, 2011).

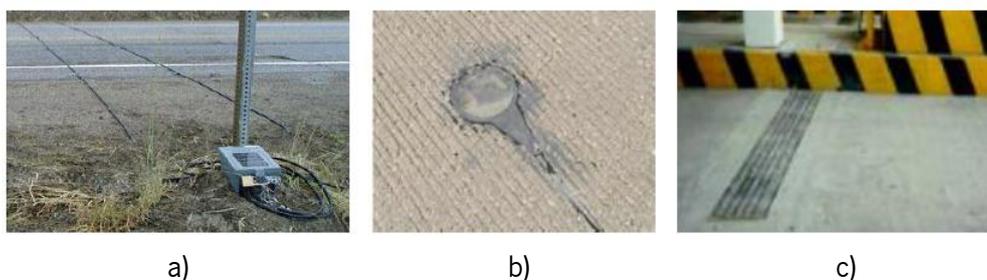


Figura 16 - Alguns tipos de sensores existentes nos pavimentos (Ghislain, 2011) : a) contador de carros com sensor pneumático, b) ligação dos sensores à berma, c) sensores piezoelétricos

Os sensores de contagem de tráfego com bobinas indutoras apresentam muitas desvantagens pois necessitam de um elevado consumo de energia, o que leva a que seja necessária uma ligação permanente à rede elétrica, necessita de manutenção regular, esta manutenção é morosa o que vai perturbar bastante o tráfego.

A vantagem dos sensores que são embutidos nos pavimentos é que não são influenciados pelas condições climáticas, o que permite que estejam em constante monitorização, pois assim não são afetados pelo nevoeiro, neve, temporais e baixa luminosidade (Ghislain, 2011).

Existem dois métodos de pesagem de veículos a pesagem dinâmica e a estática. Os sensores para esses efeitos podem ser colocados diretamente na superfície dos pavimentos sobre a forma de placas ou chapas, envolvidos nas camadas do pavimento ou nas estruturas de pontes e viadutos (Albano e Lindau, 2009). Se estes sensores forem colocados no pavimento e houver pelo menos dois sensores e com a distância entre eles conhecida é possível calcular a velocidade que os veículos passam.

A tecnologia de pesagem em movimento é uma das principais ferramentas para a monitorização dos veículos que passam numa determinada secção dos pavimentos. Pois estes sensores podem fornecer uma descrição completa da composição do tráfego, entre esses dados constam informações como número de eixos, distância entre eixos, comprimento do veículo, peso bruto total e peso por eixo, velocidade, data e hora de cada evento (Otto *et al.*, 2017). Estes dados são bastante importantes pois permitem uma melhor gestão dos pavimentos rodoviários, e no caso de se verificar sobretudo camiões com excesso de peso antecipar a evolução dos danos no pavimento e agendar as manutenções necessárias no momento adequado. O excesso de peso provoca danos severos na durabilidade dos pavimentos, o que compromete significativamente a segurança dos utentes (Otto *et al.*, 2017).

Já os sensores utilizados para a contagem do tráfego fornecem informações essenciais sobre as características do tráfego, como o tráfego médio diário anual, a composição do tráfego ou o volume de pico em um determinado período. Além disso, são bastante úteis para a concretização das matrizes de Origem e Destino (Souza de Abreu *et al.*, 2018).

Existem sensores que podem ser embebidos nas misturas betuminosas, dotando-as de uma capacidade sensitiva. No entanto, como as misturas são produzidas a altas temperaturas e necessitam de elevadas cargas de compactação é necessário verificar se os materiais resistem às condições de fabrico e compactação da mistura betuminosa, sem que a sua capacidade de deteção seja afetada (Di Graziano *et al.*, 2020, Palha, 2012). Um dos sensores que resiste bem a altas temperaturas são os sensores de fibra ótica, não necessitam de alimentação através da corrente elétrica, por isso evitam que sejam feitos rasgos nos pavimentos, para serem alimentados.

As fibras óticas permitem o envio de dados a altas velocidades e com perdas mínimas de sinal, isto através da reflexão da luz. Como as fibras permitem a emissão de dados de confiança e rapidamente, vieram revolucionar a transmissão de dados das telecomunicações (Marques, 2013).

A fibra ótica é constituída por um núcleo de fibra de vidro e por um revestimento de plástico (Figura 17), o revestimento serve para acondicionar o núcleo frágil, que é responsável pela condução da luz. A transmissão da luz só é possível pois, o índice de refração do material do núcleo é maior que o do material de revestimento (Marques, 2013).

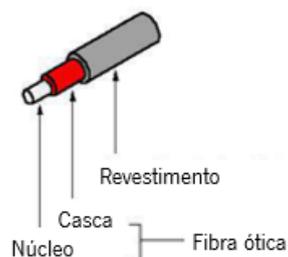


Figura 17 - Constituição da fibra ótica (Louzada, 2013)

As principais vantagens do uso de fibra ótica estão relacionadas com a sua capacidade de transmitir informações com muito menos perdas em relação aos cabos metálicos, e com bandas de transmissão muito maiores. No entanto existem outras características como seu baixo peso e pequenas dimensões, excelente resistência à corrosão, instalação simples e fácil manutenção, facilidade de incorporação em materiais compósitos, resistência a altas temperaturas e a possibilidade de multiplexagem em uma mesma fibra, ou seja, podem ser colocados vários sensores em diferentes posições e a possibilidade de criar redes de sensores, estas características torna-a bastante útil para desempenhar funções sensoriais (Costa, 2017, Louzada, 2013). No entanto, também apresentam desvantagens como o custo geralmente elevado de todos os componentes, fragilidade das fibras e dificuldade de conexão das fibras óticas (Rodrigues, 2011a).

No que diz respeito à monitorização estrutural na Engenharia Civil, os sensores de fibra ótica mais utilizados são os baseados em redes de Bragg. Estes sensores distinguem-se dos demais pois permitem a desmultiplicação, ou seja permitem recolher a informação em simultâneo de centenas de pontos através de uma única fibra ótica, permitindo deste modo respostas a variações de temperatura e de deformações com grande precisão (Silva, 2007).

Um objetivo importante no projeto de uma rede de sensores sem fios é produzir a quantidade máxima de informações com o número mínimo de sensores em um nível de erro aceitável e evitar quebra ou mau funcionamento. Deste ponto de vista, quanto mais próximo o sensor estiver da área danificada, melhor será a deteção (Di Graziano *et al.*, 2020). Os sensores de fibra ótica em conjunto com a IoT permitem monitorizar a resposta dinâmica do pavimento por um período relativamente longo, identificando deste modo de forma quase automática as anomalias do pavimento permitindo poupar tempo e dinheiro (Hou *et al.*, 2021). As informações obtidas pela fibra ótica incluem a deformação, tensão, deflexão, deslocamento e vibração, estes dados permitem uma intervenção atempada e com um custo mais reduzido. Estas variáveis são as mais importantes no que concerne a análise do dano

estrutural, mas quando se aplica em pavimentos entre as já mencionadas permite também obter informações relativas ao tráfego (Hou *et al.*, 2021).

2.6. MATERIAIS COM PROPRIEDADES SENSITIVAS

Com o progressivo aumento do número de edificações, indústrias e rodovias, os poluentes biológicos e químicos produzidos por estas atividades têm sido uma séria preocupação em todo o mundo (Khairudin *et al.*, 2020). O constante aumento da poluição ambiental, para além de provocar danos na nossa saúde, com ela advém as preocupações estéticas dos edifícios, como a presença de fungos ou queda de revestimentos nas fachadas (Graziani *et al.*, 2014).

Outra preocupação é o aumento do volume de tráfego e das condições climatéricas, pois os pavimentos betuminosos, cada vez estão sujeitos a mais cargas, e quando em serviço há já alguns anos ficam sujeitos a fendilhamento por fadiga. No início começam-se a formar micro fendas mas se estas não forem tratadas a tempo transformam-se em macro fendas que se desenvolvem progressivamente até ao aparecimento de covas no pavimento, que afetam adversamente o desempenho em serviço e a vida útil do pavimento (Ji *et al.*, 2021).

Com o objetivo principal de ter as melhores condições e a um menor custo surge a necessidade da criação de materiais inteligentes, que são capazes de se adaptar ou responder em função do meio em que estão inseridos e para o qual foram estudados e produzidos. Este tipo de tecnologia inteligente já se aplica em diversos contextos na construção civil, como a deteção de vibrações, deteção de danos estruturais, varejamento em edifícios e controlo de ruído (Palha, 2012).

Os sistemas inteligentes representam benefícios para uma sociedade acostumada ao conforto, exemplo disso é a possibilidade de ajustar a refletividade das janelas conforme as condições climatéricas, de modo a equilibrar a temperatura ambiente e a claridade presente no interior do edifício. No entanto estes benefícios não se ficam por aqui, e na área da Biomedicina, encontram-se outros exemplos, como o fabrico de pâncreas que conseguem fornecer dados em tempo real dos níveis de glicemia e que conforme os níveis de açúcar no sangue libertam a quantidade necessária de insulina (Marques, 2013, Rogers, 1993). Outra área em que estes materiais seriam úteis é na engenharia aeronáutica, em que as asas dos aviões, se fossem de materiais inteligentes, poderiam adaptar o seu formato em função de diversas variáveis tais como a pressão do ar e a velocidade a que voa de modo a poupar combustível (Palha, 2012) ou em aplicações marítimas em que fosse possível reduzir a vibrações (Marques, 2013, Rogers, 1993) .

Existem também têxteis inteligentes que são capazes de responder de forma controlada aos sinais do meio ambiente, estes materiais podem responder de forma direta ou indireta. Da forma direta pode-se observar mudanças de cor, forma e volume, já a forma indireta inclui mudanças a nível magnético, molecular ou elétrico. Um têxtil com estas características é o chamado SMM (Shape Memory Materials), ou seja, materiais com memória de forma, estes materiais podem reagir com a corrente elétrica, energia solar, energia magnética, isto tudo devido a produção de calor que é gerada através das mudanças de temperatura verificadas no nosso corpo (Monteiro, 2014).

Autorregeneração

O envelhecimento é um processo químico e físico natural pelo qual o material betuminoso passa. Estas alterações devem-se as condições atmosféricas, como a humidade e as mudanças de temperatura. Devido as radiações UV o material betuminoso sofre oxidação, o que agrava ainda mais o seu envelhecimento. Estes fatores acrescidos das cargas inerentes ao tráfego, causam fendas que a longo prazo originam o aparecimento de covas, desagregação de material e infiltração da água nas camadas mais profundas (Tian *et al.*, 2020). Até agora as técnicas que se aplicavam para evitar estes danos eram técnicas passivas, ou seja aplicavam-se tratamentos como preenchimento das fendas após o aparecimento do problema, hoje, já se estudam métodos que intervenham preventivamente. Um desses métodos são as microcápsulas, adicionadas à mistura betuminosa que por adesão ao betume são incapazes de se expandir ou contrair antes que as fendas ocorram, o que leva ao seu rebentamento e libertação de um rejuvenescedor presente no seu interior (Lu *et al.*, 2021).

As microcápsulas (Figura 18) consistem numas micropartículas constituídas por 70% de óleo. Quando ocorrem microfendas no betuminoso, as microcápsulas em torno das fendas rompem-se e libertam o agente cicatrizante como se pode ver na Figura 19 (Su *et al.*, 2013, Tian *et al.*, 2020). O cicatrizante libertado pelas cápsulas espalha-se pela mistura, o que conduz a que o betume reduza a sua viscosidade na imediação do rompimento da capsula, tornando assim possível o betume preencher as microfendas (Loureiro, 2021).

Estas técnicas reduzem a quantidade de novos materiais necessários na conservação do pavimento diminuem o tempo necessário para as ações de conservação, as emissões de poluentes e gases de efeito estufa e aumentam a segurança rodoviária e a vida útil do pavimento (Zhang *et al.*, 2018).

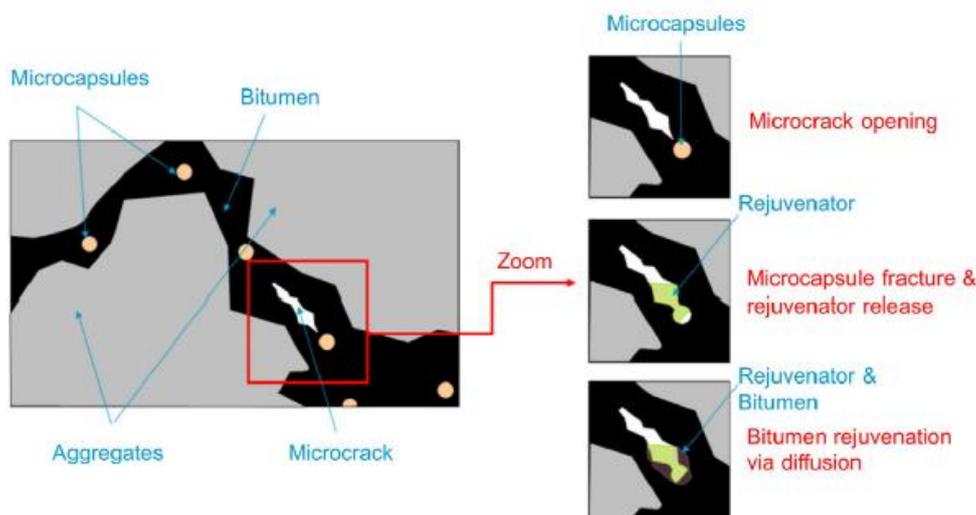


Figura 18 - Funcionamento das microcápsulas adaptado (Lu *et al.*, 2021)

No entanto esta tecnologia ainda apresenta alguns entraves pois tem que se garantir que as microcápsulas permaneçam estáveis por anos ou mesmo décadas, até ser necessária a libertação do agente reparador. Su (2020), Ji *et al* (2021) e Lu *et al* (2021) afirmam que para isso devem cumprir alguns requisitos, designadamente:

- (i) as microcápsulas devem ter propriedades termomecânicas elevadas para manterem a integridade após a produção e compactação da mistura betuminosa;
- (ii) A reação entre os materiais da casca e o rejuvenescedor tem que ser inerte;
- (iii) A estrutura da casca é compacta para proteção máxima do rejuvenescedor ou tem poros mínimos para permitir a libertação sustentada por um longo tempo;
- (iv) As microcápsulas devem ser estáveis durante o uso e armazenamento;
- (v) As microcápsulas devem ser constituídas por substâncias que não sejam tóxicas para o solo;
- (vi) O rejuvenescedor e o material do núcleo devem ter alta permeabilidade.

Outro dos métodos é o aquecimento por indução eletromagnética (Figura 19) que consiste em dar propriedades eletromagnéticas às misturas betuminosas através da adição de materiais com essas propriedades como é o caso das fibras de aço, aparas de aço e nanotubos de carbono, quando se aplica uma corrente. Este aquecimento tem por base a formação de um campo magnético, quando se aplica uma corrente alternada numa bobina que deverá ser instalada por cima do pavimento, este processo segue a lei de Faraday. O campo magnético produzido gera correntes nos aditivos (com propriedades eletromagnéticas), o que leva a que estes aqueçam seguindo os princípios da lei de Joule. Estas correntes levam ao aumento de temperatura nos aditivos, o que faz com que o betume naquela proximidade aqueça, reduzindo a viscosidade e preenchendo assim as microfendas existentes (Loureiro, 2021).

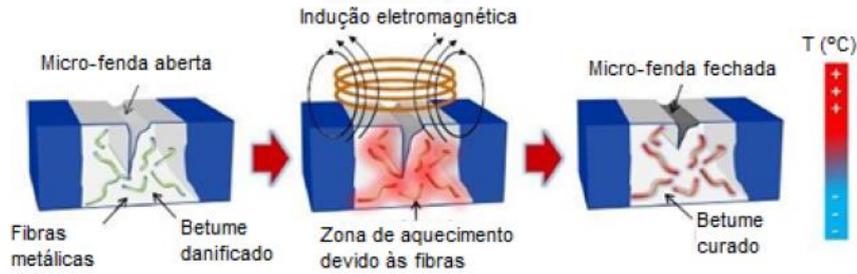


Figura 19 - Regeneração por aquecimento por indução eletromagnética (Loureiro, 2021)

Segundo diversos estudos científicos este é um tema em que a sua taxa de sucesso não é igual em todos os casos, pois existem diferentes taxas de adição de materiais com capacidades eletromagnéticas. A temperatura de aquecimento, a frequência e a potência da corrente elétrica são alguns dos parâmetros que levam a que os resultados obtidos não sejam positivos em todos os estudos. 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 (Loureiro, 2021).

Autolimpeza

A urbanização levou ao desenvolvimento de edifícios e arranha-céus que utilizaram o vidro como fachada, estas fachadas requerem limpeza periódica devido à adesão de poeira da poluição das cidades. Anteriormente, os métodos de limpeza tradicionais dependiam de trabalho humano eram muito dispendiosos para além de perigosos (Khairudin *et al.*, 2020). No entanto, não só as fachadas de vidro que sofrem com a poluição aérea, os revestimentos das fachadas, como tijolos e tintas também sofrem. De forma a mitigar esses efeitos está-se a produzir materiais “autolimpantes” que utilizam a tecnologia de nano-revestimento, esta é uma das técnicas promissoras que podem ser aplicadas na fachada do edifício para evitar sua deterioração, bem como para manter a atratividade e a estética do edifício, protegendo as superfícies contra possíveis danos causados pela penetração de água, musgo, algas e sujidade (Grebler *et al.*, 2010).

Um dos materiais em que se tem apostado nos últimos anos para tratamento de autolimpeza é o dióxido de titânio (TiO_2). Este elemento químico consegue acelerar a degradação de muitos contaminantes orgânicos, devido às suas propriedades fotocatalíticas. Devido à sua fotoestabilidade química, baixo custo e a sua não toxicidade, este material tem sido amplamente aplicado no setor industrial (Graziani *et al.*, 2014, Silva, 2013).

O revestimento autolimpante pode ser dividido em duas categorias principais, que são revestimentos hidrofóbicos e hidrofílicos. Ambos os revestimentos são autolimpantes pela ação da água. O revestimento hidrofílico, que tem o ângulo de contato com a água inferior a 90° , fará com que a água que flui nele se

espalhe uniformemente por toda a superfície do revestimento e remova a sujidade e as impurezas presentes nele. Enquanto isso, a água que flui no revestimento hidrofóbico com ângulo de contato com a água de mais de 90° forma gotículas na superfície. As gotas deslizam sobre a superfície enquanto carregam os contaminantes com elas. Existem revestimentos hidrofílicos que utilizam óxidos de metal que possuem efeito antibacteriano e assim a sujidade é decomposta quimicamente com a exposição à radiação (Ganesh *et al.*, 2011).

No que concerne aos vidros, as partículas de dióxido de titânio são incorporadas na superfície da lâmina de vidro usando um método de revestimento por imersão (Khairudin *et al.*, 2020), já nas tintas existem duas formas de autolimpeza a hidrofobicidade e hidrofiliidade já referidas (Silva, 2013). Por fim, nos tijolos existem duas maneiras principais de atribuir propriedades de autolimpeza, o primeiro é dar-lhes um caráter hidrofóbico para proteger a superfície de contaminações e a outra forma é dar-lhes propriedades fotocatalíticas, estas últimas permitem a decomposição dos contaminantes presentes na sua superfície (Janus e Zajac, 2019).

Nanotecnologia

A nanotecnologia pode ser utilizada em materiais para isolamento térmico, em revestimentos como tintas e vidros com a função de autolimpeza, vestuário, revestimentos anti grafiti, anti mancha, anti gelo, anti embaciamento e antibacterianos, iluminação, sensores de temperatura, pressão e humidade, purificação do ar, em materiais estruturais como o aço, o betão, a madeira, vidros, polímeros e misturas betuminosas, melhorando a resistência, a flexibilidade, promovendo a redução do volume e peso, o aumento da durabilidade e a redução das perdas térmicas no caso do edifícios (Oliveira, 2012).

Nos betões e argamassas as nanopartículas mais utilizadas são a Nano- SiO_2 , a Nano- Fe_2O_3 , a Nano- Al_2O_3 e a Nano- TiO_2 . No cimento os mais utilizados são os nanotubos de carbono e as nanofibras de polipropileno. O Nano- TiO_2 é utilizado para a autolimpeza, anti-embaciamento e efeito bactericida e para purificação do ar (Oliveira, 2012).

Nos têxteis os nanomateriais são utilizados para desenvolver características têxteis desejadas, tais como a resistência à abrasão, durabilidade, repelência à água e óleo, retardância à chama, propriedades antimicrobiana, proteção UV, autolimpeza, entre outras. Os nanomateriais mais utilizados nos têxteis são a prata (Ag), o dióxido de silício (SiO_2), dióxido de titânio (TiO_2), óxido de zinco (ZnO), óxido de alumínio (Al_2O_3), quitosano, nanoargilas (principalmente montmorillonita), nanotubos de carbono e negro de carbono, dependendo da funcionalidade que se pretende conferir ao substrato têxtil (Rodrigues, 2017).

Algumas das funções possíveis com a introdução de nanomateriais nos têxteis são a deteção de gases tóxicos como dióxido de nitrogênio (NO_2), amônia (NH_3), sulfato de hidrogênio e monóxido de carbono e monitorizar o corpo humano. Para detetar gases nocivos, os têxteis devem demonstrar alta condutividade e flexibilidade mecânica. Entre os vários materiais condutores, um grafeno estruturado em favo de mel é um nanomaterial de carbono bidimensional bem conhecido, adequado para a fabricação de sensores de gás com suas excelentes propriedades, como alta condutividade elétrica, resistência mecânica, estabilidade química, estabilidade térmica (Lee *et al.*, 2021).

Os nanomateriais são usados em pavimentos para modificar as propriedades do betume. Estudos apontam que as características das nanopartículas, como a sua grande superfície específica, podem ter efeitos de escala no desenvolvimento das propriedades reológicas do betume e do pavimento betuminoso, funcionando também como modificadores para betume quando são adicionadas pequenas percentagens. Os nanomateriais podem aumentar a capacidade de carga do pavimento e diminuir fendas por fadiga durante a vida útil do pavimento (Caputo *et al.*, 2020). No entanto, os nanomateriais não servem só para modificar o betume, ou aumentar as propriedades características dos pavimentos, permitem aos pavimentos terem aplicações multifuncionais, como remoção de neve e gelo, autodeteção da integridade do pavimento, autorregeneração (aquecimento por indução) e captação de energia (Wang *et al.*, 2016). Para se conseguir remover a neve e o gelo é necessário tornar o pavimento condutivo, pois através da introdução de corrente elétrica o pavimento aquece e derrete a neve. Esta característica permite que no inverno a neve e gelo sejam removidos sem a necessidade aplicação de produtos químicos ou a utilização de máquinas, o que implica uma grande quantidade de mão de obra, para além de os químicos criarem efeitos adversos na estrutura do pavimento, permite também fazer a monitorização integral da estrutura (Zhao *et al.*, 2011), pois quando houver alguma anormalidade a rede condutiva interna é alterada, o que afeta seu comportamento elétrico, como a resistividade elétrica, servindo isto como um alerta. No entanto, outros investigadores utilizam outras variáveis para terem dados mais concretos sobre o que está a afetar o sistema, como a reatância, impedância, capacitância e a resistência elétrica de superfície para caracterizar o comportamento de deteção (Han *et al.*, 2015).

Várias investigações foram feitas e indicam que a utilização de nanomateriais dispersos na matriz do betão ou do betuminoso como, fibras de aço, aparas de aço, fibras de carbono, nanotubos de carbono e produtos de grafite e escória de aço de modo a formarem uma extensa rede condutiva melhora significativamente a condutividade elétrica (Han *et al.*, 2015, Wang *et al.*, 2016).

Foi feito um estudo no mercado chinês que indica que o custo do betão condutivo com fibras de aço e produtos de grafite é cerca de 4-6 vezes maior do que o betão comum. Também concluíram que o betão com fibras de carbono tem melhor desempenho em relação à resistência à compressão e durabilidade do que o betão com fibras de aço e produtos de grafite, mas o custo é muito mais alto. Em comparação com o betão comum, a complexidade da construção do betão condutivo também resulta num custo mais elevado. Portanto, a seleção de métodos e tecnologias de degelo depende altamente dos fatores geográficos, económicos e ambientais de projetos práticos (Zhang *et al.*, 2009).

Existem outros nanomateriais que podem ser adicionados aos pavimentos para melhorar as suas propriedades intrínsecas, alguns desses nanomateriais são a nano-sílica e nano-argila e a nano-cal hidratada. A caulinite tem sido usada para melhorar a estabilidade ao armazenamento de betumes modificados com polímeros. A adição de nano-argila aumenta a rigidez, a resistência à tração indireta, a estabilidade Marshall, mas diminuiu a resistência à fadiga a temperaturas baixas (Iskender, 2016).

Na Tabela 1 apresentam-se alguns exemplos de aplicação de nanomateriais.

Tabela 1 - Exemplos de aplicação de nanomateriais

Material usado	Objetivo do estudo	Quantidades	Autores
Nanotubos nano-argila	Aditivos de reforço para o betume	Nanotubos - 0,5% nano-argilas 3% peso de betume	(Santagata <i>et al.</i> , 2015)
TiO ₂ , oxido de zinco, Carbonato de cálcio, Grafite	Avaliação dos danos por humidade em asfalto modificado com nanotubos de carbono	-	(Mamun e Arifuzzaman, 2018)
Nanotubos	Efeito do nanotubo de carbono no desempenho do betume	0,4%; 0,75%; 1,5%; 2,25% peso da mistura	(Ashish e Singh, 2019)
Fibras de carbono	degelo do pavimento através de fibras de carbono	até 3 % do volume da mistura	(Sassani <i>et al.</i> , 2018)
Nanotubos	Melhorar a deformação permanente utilizando nanotubos	0,5%; 1%; 1,5%; 2% do peso de betume	(Ismael <i>et al.</i> , 2021)
Nanofibras de carbono	Resistência elétrica do betão com nanofibras de carbono	Até 2,5% do volume de aglutinante	(Gao <i>et al.</i> , 2009)
Carboxyl multi-wall Nanotubos de carbono	Nanotubos de carbono para monitorização do tráfego	-	(Han <i>et al.</i> , 2009)
Carboxyl multi-wall Nanotubos de carbono	Introdução de NTC em pavimento de betão para deteção do tráfego	1% do peso de cimento	(Han <i>et al.</i> , 2012)
Fibras de carbono Grafite	Comparação entre pasta de cimento e mástique asfáltico modificado com materiais com propriedades elétricas	Fibras de carbono - até 2,5 % Grafite - 5%	(Arabzadeh <i>et al.</i> , 2019)
Fibras de carbono Grafite	Mástique de asfalto eletricamente condutor	Fibras de carbono - até 2,5 % Grafite - 5%	(Arabzadeh <i>et al.</i> , 2018)

Um dos problemas que existe aquando da produção de um pavimento condutor é heterogeneidade da mistura, sendo necessário o efeito de ponte para formar uma rede condutora (Figura 20).

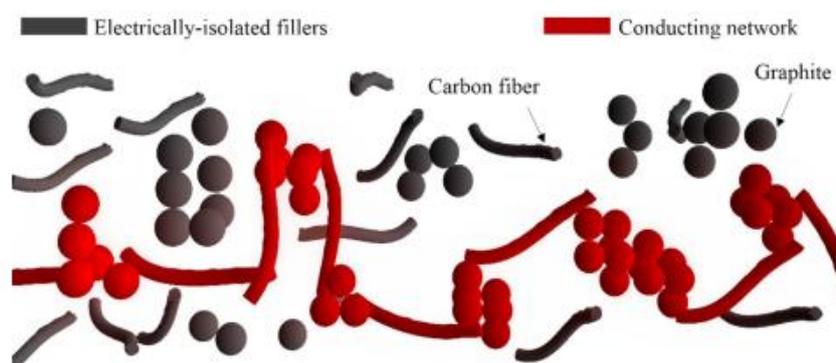


Figura 20 - Efeito ponte (Arabzadeh *et. al*, 2018)

3. MATERIAIS E METODOLOGIAS UTILIZADAS

3.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo é explanada toda a campanha experimental, desde a caracterização dos materiais, ensaios realizados adjacentes à formulação das misturas. A primeira etapa deste trabalho laboratorial consistiu numa pesquisa na área de medição de condutividades, ensaios e metodologias utilizados, para além de se fazer uma pesquisa bibliográfica com ensaios desta natureza já realizados para se poderem adaptar ao tema de estudo, como a percentagem de materiais condutivos a adicionar às misturas betuminosas e técnicas de medição da resistividade/condutividade.

A segunda fase constituiu na caracterização dos fileres e agregados a utilizar. Para isso fez-se a análise granulométrica dos agregados e os alguns ensaios de caracterização dos fileres, em particular, o azul-de-metileno, a massa volúmica e os vazios de Rigden.

A terceira fase consistiu na formulação de 11 mástiques diferenciados pela percentagem de material condutor que cada mástique contém, compreendendo também o estudo da sua condutibilidade e como esta era afetada pela temperatura e pela frequência. Estes mástiques foram produzidos com a razão ligante- filer de 1:1 em peso. De seguida compararam-se os mástiques com uma mistura convencional AC14 e outra de ASIC com material fresado. Depois elaboram-se duas novas misturas, iguais as primeiras, mas em que em 10% dos finos foram substituídos por grafite. Por fim foi analisado, com a câmara termográfica, se o material aquecia quando sujeito a uma determinada corrente elétrica.

3.2. MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais utilizados foram o pó de grafite Cond PG1600 da empresa ProGraphite GmbH, o pó de ASIC foi fornecido pela empresa DST Group, assim como os agregados graníticos, os de ASIC e o filer comercial calcário. Todos os materiais fornecidos pela empresa DST Group foram fornecidos no âmbito do projeto de copromoção RENEW em curso, com a participação de ambas as instituições. O betume utilizado foi o betume 35/50 da Galp Energia fornecido também pela empresa DST Group, com as especificações apresentadas na Tabela 2. Este betume foi selecionado por se tratar do betume convencional mais utilizado em Portugal.

Tabela 2 - Especificações técnicas do betume 35/50

Características	Método de ensaio	Unidades	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 ISSO 2592	°C	≥ 240
Solubilidade	EN12592	%	≥ 99,0
Índice de penetração	EN 12591- Anexo A	-	-1,5 a +0,7
Temperatura de fragilidade de Fraass	EN 12593	°C	≤ -5
Viscosidade cinemática a 135 ° C	EN 12595	mm ² /s	≥ 370
Teor em parafinas	EN 12606-2	%	≤ 4,5

3.3. CARACTERIZAÇÃO DOS FÍLERES

3.3.1. Análise Granulométrica

A análise granulométrica consiste na peneiração da amostra do material seco por uma coluna de peneiros dispostos de cima para baixo com a abertura da malha por ordem decrescente (Figura 21a). Com este ensaio consegue-se saber qual a massa do material que fica retido em cada peneiro e com isso calcular a sua percentagem em relação à massa total da amostra (Figura 21b). Depois com a massa retida em cada peneiro é possível criar a curva granulometria (Figura 22) Este ensaio foi realizado conforme a norma NP-EN 933-1 de 2014, os materiais ensaiados foram os fileres, pó de ASIC e pó de grafite. A amostra utilizada tinha uma massa de 200 g e utilizaram-se peneiros com uma abertura inferior à do peneiro 4 mm.

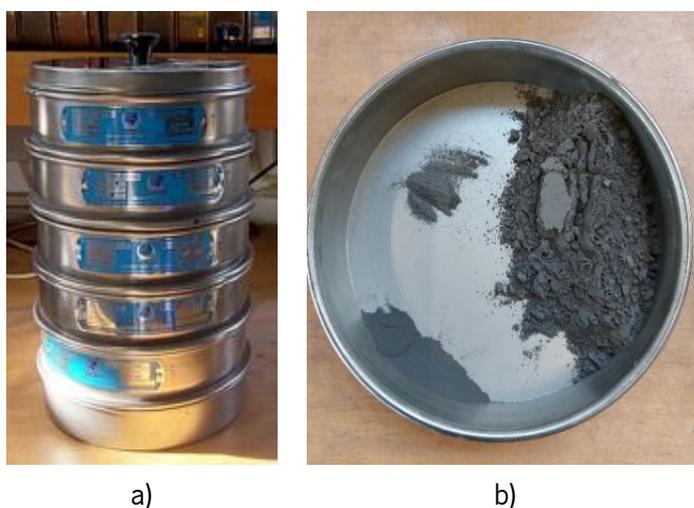


Figura 21 - Análise granulométrica: a) coluna de peneiros b) granulometria do pó

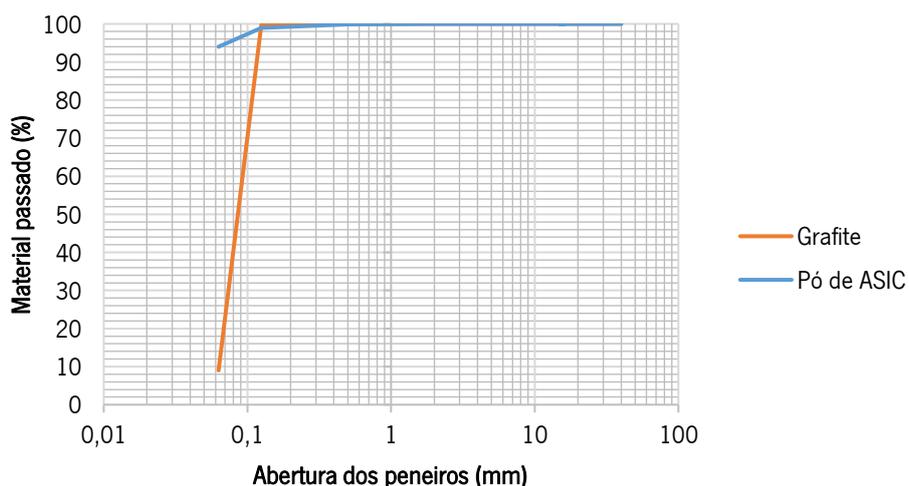


Figura 22 - Curva granulométrica dos fileres utilizados

3.3.2. Determinação da superfície específica (Método Blaine)

A determinação da superfície específica do filer foi realizada segundo a norma NP EN 196-6:2010. Esta é uma característica importante, pois quanto maior for o seu valor maior é a quantidade de betume adsorvida. Começou-se por colocar a amostra dentro da célula (Figura 23c) de modo que se conseguisse criar uma massa de material compactado (Figura 23d). De seguida lubrificou-se a abertura do manómetro para se garantir uma junta estanque, colocou-se a célula com o bujão, abriu-se a torneira e elevou-se o líquido manométrico a marca superior, a seguir fechou-se a torneira e esperou-se que o líquido estabilizasse, retirou-se o bujão da célula (Figura 23b) e o líquido começou a descer, quando este passou pela segunda marca pôs-se o cronómetro a contar e só se parou o cronómetro quando o líquido manométrico chegou a terceira marca. No final do ensaio registou-se a temperatura a que o ensaio foi realizado, a massa colocada na célula e o tempo que o líquido demorou a percorrer a distância entre as duas marcas.

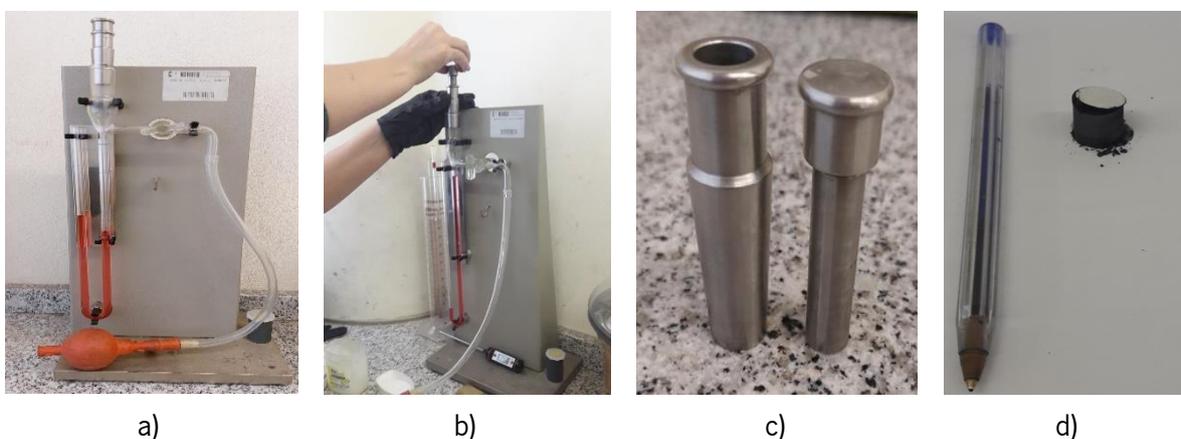


Figura 23 - Ensaio de Blaine: a) equipamento utilizado para o ensaio, b) colocação da célula e do bujão no equipamento, c) célula e bujão, d) massa de material compactado

3.3.3. Determinação da massa volúmica dos fileres pelo método do picnómetro

A determinação da massa volúmica dos fileres foi definida pela norma NP EN 1097-7:2008, tendo para o devido efeito sido utilizado um picnómetro submetido a vácuo.

Para a realização deste ensaio, primeiramente procedeu-se à pesagem da massa do picnómetro vazio e depois colocou-se a amostra de filer no picnómetro que consta na norma e registou-se a massa do picnómetro com a amostra (Figura 24a). O segundo passo consistiu em adicionar água destilada a 25 °C ao picnómetro, até esta cobrir a amostra e colocou-se o picnómetro em vácuo durante 30 minutos (Figura 24b). Repetiu-se o processo para os três picnómetros. Findado esse período os picnómetros são colocados em banho-maria a 25 °C durante 1 hora (Figura 24c). Por fim encheu-se o picnómetro até a marca da sua capacidade, secou-se o picnómetro e registou-se a massa do picnómetro com a amostra e a água.

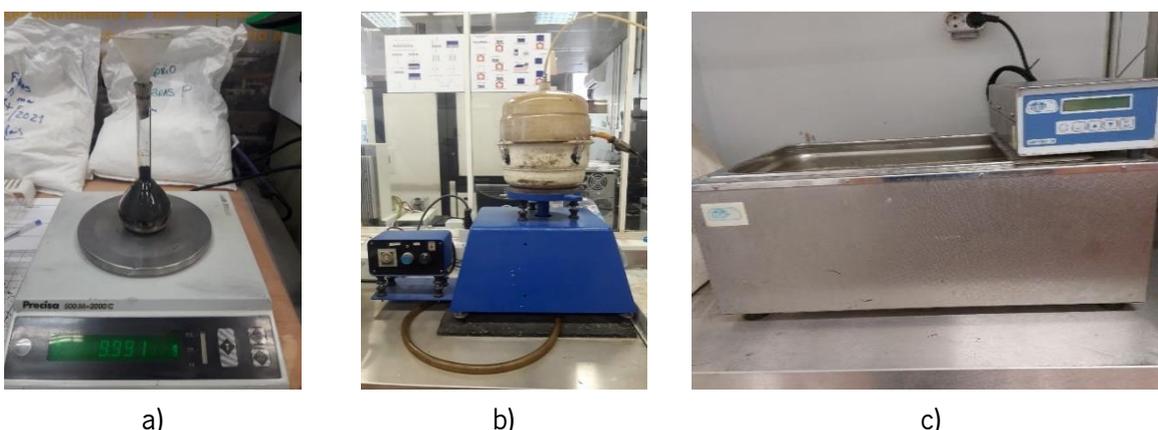


Figura 24 - Equipamentos utilizados para a determinação da massa volúmica: a) Pesagem da amostra, b) equipamento de vácuo, c) banho maria

A massa volúmica é calculada através de 4 variáveis, são elas a massa do picnómetro vazio, a massa do picnómetro com a amostra, a massa do picnómetro com amostra e cheio de água e a massa do picnómetro cheio só com água.

3.3.4. Determinação da massa volúmica do filer pelo método Le Châtelier

Este ensaio foi realizado de acordo com a norma LNEC E-64-1979 e consiste em fazer a gasolina subir até um determinado nível.

Para realizar este ensaio inicialmente colocou-se gasolina no balão até um nível compreendido entre as graduações 0 e 1 e arrolhou-se, de seguida colocou-se o recipiente em água a 20°C e aguardou-se que a temperatura estabilizasse (Figura 25a). Após estabilizada a temperatura retira-se o balão e mede-se o

volume inicial, por fim deita-se a amostra de filer através de um funil, com cuidado para não ficar depositado nas paredes do balão e para evitar a formação de bolhas de ar, até a gasolina subir e ficar situada na escala dos 18 aos 24 ml (Figura 25b). No final volta-se a arrolhar e a colocar o balão em água para a temperatura estabilizar novamente e mede-se o volume final (Figura 25c). Sabendo a massa introduzida no balão e o volume inicial e final calcula-se a densidade.

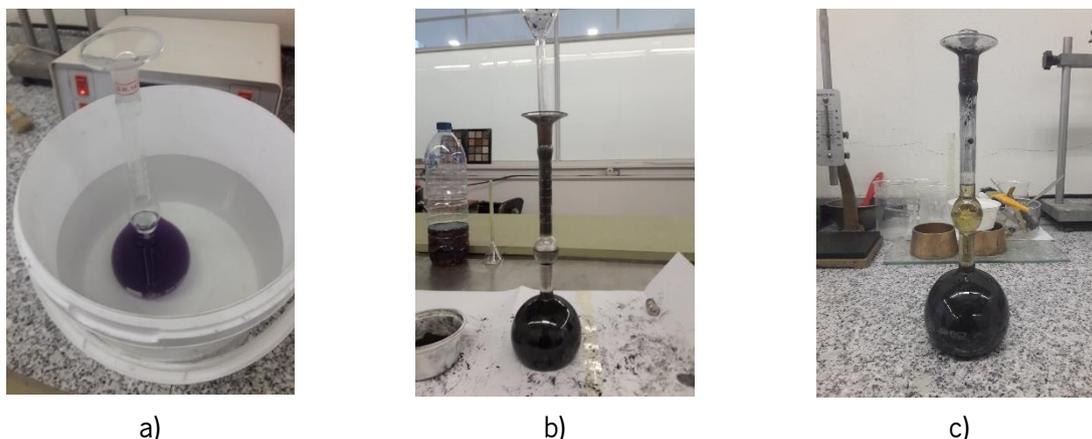


Figura 25 - Ensaio de Le Châtelier: a) Gasolina em repouso após se ter enchido até a marca 1, b) execução do ensaio, até a gasolina subir aos valores adequados c) medição do volume final após repouso da gasolina

3.3.5. Determinação dos vazios do filer seco compactado (Ensaio de Rigden)

A determinação dos vazios do filer através do ensaio de Rigden foi regido pela norma NP EN 1097-4:2012. Este ensaio é útil pois o comportamento do mástique é influenciado pelo volume de vazios, pois o betume tende a preencher estes vazios.

Inicialmente começou-se por colocar o papel de filtro e o mergulhador no cilindro vazio (Figura 26a) e mediu-se e a altura inicial (H_0) do conjunto com um paquímetro, de seguida pesou-se o cilindro com o papel de filtro e registou-se a massa inicial (m_0). O passo seguinte consiste em colocar 10 g do filer no cilindro. Se o filer for pouco denso e não permitir colocar as 10 g, realiza-se o ensaio com o cilindro cheio de filer, coloca-se o papel de filtro por cima da amostra e introduz-se o mergulhador fazendo uma ligeira pressão para este entrar em contacto com o filer. Por fim coloca-se o conjunto móvel nas colunas guias, eleva-se o conjunto até ao batente superior e depois deixa-se cair em queda livre até a base, o ensaio fica concluído ao fim de 100 elevações (Figura 26b). No fim das 100 repetições mede-se a altura do mergulhador com o paquímetro em 4 posições e faz-se a média, tendo assim a altura final (H_f).

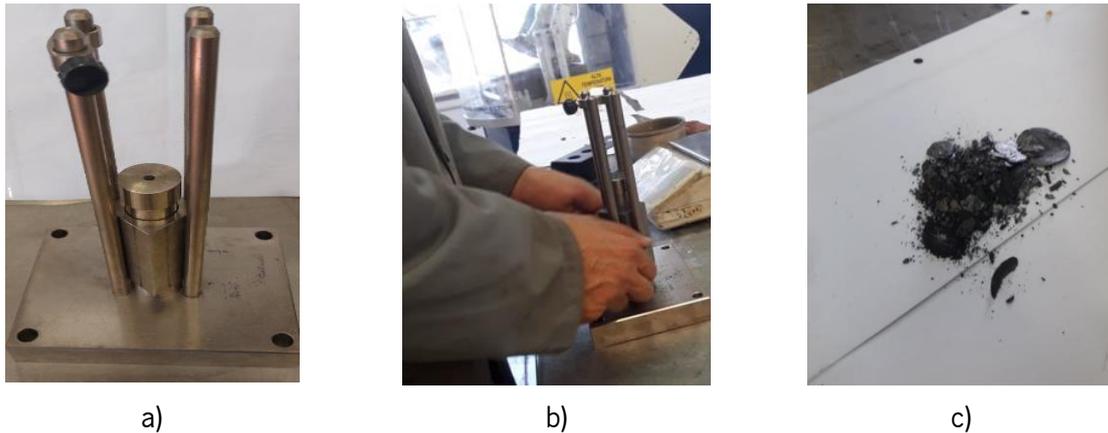


Figura 26 - Ensaio de Rigden: a) equipamento utilizado em repouso, b) execução do ensaio, c) aspeto final do filler depois de retirado do molde

3.3.6. Azul de metileno

Este ensaio pretende avaliar a presença de materiais argilosos, pois estes materiais tendem a expandir na presença da água o que compromete a qualidade das misturas a aplicar no pavimento. Este ensaio foi realizado segundo a norma NP EN 933-9:2011 Anexo A.

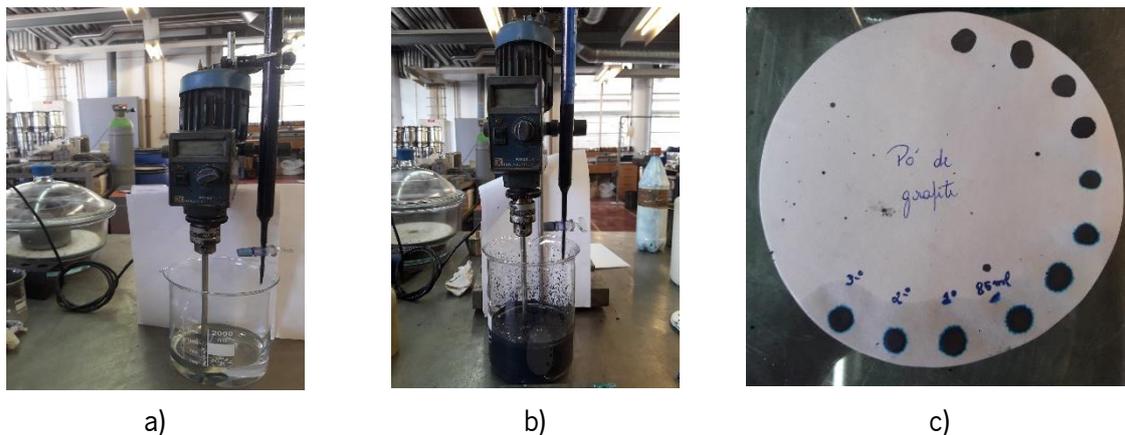


Figura 27 - Etapas do ensaio de Azul-de-metileno : a) colocação dos 500 ml de água no gobelet, b) adição da solução de azul-de-metileno ao material, c) verificação da existência da auréola

Para a realização deste ensaio preparou-se a solução de azul de metileno seguindo as recomendações preconizadas pela norma NP EN 933-9:2011 Anexo C e realizou-se a calibração da caulinite segundo o anexo D da mesma norma.

Na execução deste ensaio colocou-se 30 g da amostra passadas no peneiro 0,0125 mm em 500 ml de água destilada, se a amostra não reagir com o azul de metileno adiciona-se 30 g de caulinite, e agitou-se durante 5 minutos (Figura 27a).

De seguida foi-se adicionando 5 ml de azul-de-metileno (Figura 27b) de cada vez e por cada adição esperava-se um minuto, findado esse tempo recolhia-se uma gota da suspensão com a ajuda de uma

bureta e colocava-se no papel de filtro (Figura 27c). A adição de azul-de-metileno é feita até aparecer uma auréola persistente azul-clara com cerca de 1 mm, atingido este ponto continua-se com a agitação sem adicionar mais solução corante retira-se 5 gotas com intervalos de um minuto para ver se a auréola persiste, se desaparecer tem que se voltar a adicionar azul-de-metileno. No final do ensaio ao volume utilizado, quando se usa caulinite retira-se o volume correspondente a caulinite obtendo assim o volume de azul-de-metileno utilizado pela amostra.

3.4. CARACTERIZAÇÃO DO BETUME

3.4.1. Penetração a 25°C

Este ensaio (Figura 28) serve para determinar a classe de penetração do betume, este é um parâmetro que se usa para intitular o tipo de betume e pelo qual os países europeus se regem para classificarem os betumes. O objetivo deste ensaio é determinar a consistência do betume a 25 °C, medindo a profundidade a que uma agulha padrão, com 100 g de massa, penetra no betume durante 5 segundos, esta medição é feita em décimas de milímetro. Este ensaio foi regido pela norma EN 1426:2017.

Para a execução deste ensaio foi necessário encher uma cápsula específica com betume, deixar o betume arrefecer, até solidificar e depois colocar no banho maria a 25 °C durante 1 hora. Foram efetuadas 3 penetrações separadas no mínimo 10 mm entre si e do bordo da cápsula, no momento em que inicia a penetração a ponta da agulha deve estar na superfície do betume, como resultado deste ensaio considera-se a média dos resultados de 3 penetrações. Para este ensaio utilizou-se um penetrómetro da marca Controls 81-B0101/D.



Figura 28 - Ensaio de penetração do betume

3.4.2. Temperatura de amolecimento

Este ensaio é vulgarmente conhecido por anel e bola, como o nome técnico indica, permite determinar a temperatura de amolecimento do betume, ou seja, a temperatura à qual o betume perde a sua estabilidade, o que leva ao aumento da sua deformação. Este ensaio foi realizado segundo a norma EN 1427:2017, para isso colocou-se o betume em dois anéis próprios, depois de frio, com uma espátula aquecida removeu-se o excesso de betume de modo a ficar alinhado com a superfície do anel. De seguida coloca-se uma bola em cada anel e o conjunto é colocado no suporte dentro do gobelet, juntamente com um agitador no fundo do gobelet para ajudar a homogeneizar a temperatura da água. Depois de todos os equipamentos necessários estarem prontos, estes são colocados no frio até a água atingir a temperatura de 5 °C. O último passo depois de a água chegar aos 5°C consiste em fazer aquecer a água com uma taxa de variação a 5 °C/minuto (Figura 29a). Com o aumento da temperatura, o betume torna-se mais mole e com o peso da bola este deforma-se Figura 29b). O ensaio termina no momento em que o betume atinge a parte inferior do suporte, nesse momento regista-se a temperatura da água. Uma nota importante a ter na execução deste ensaio é que ele só é válido se a diferença de temperatura entre a queda de betume dos dois anéis for inferior a 1 °C para temperaturas de amolecimento inferiores a 80 °C e inferior a 2 °C se a temperatura de amolecimento for superior a 80 °C.

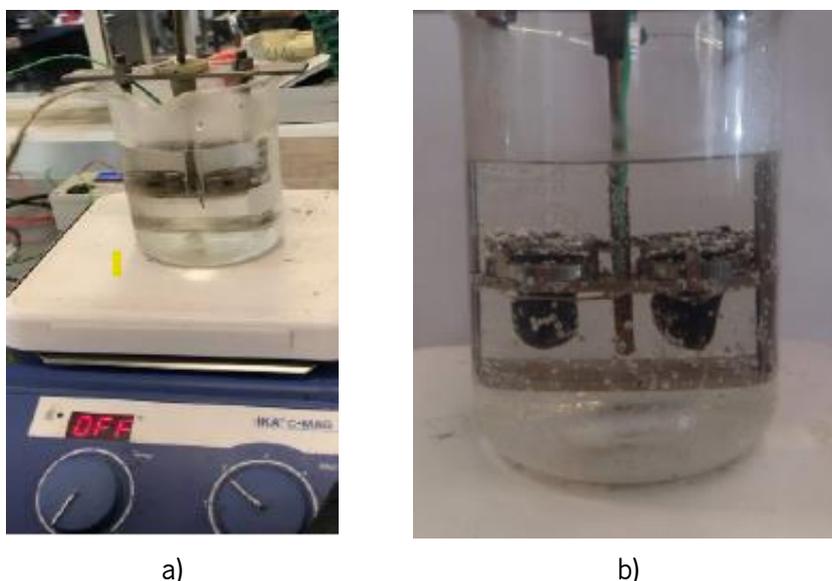


Figura 29 - Ensaio de temperatura de amolecimento: a) início do ensaio, b) durante o ensaio

3.4.3. Viscosidade dinâmica

Para a realização deste ensaio utilizou-se um viscosímetro rotacional Brookfield (Figura 30) e a norma EN 13302:2018. Este ensaio permite determinar a viscosidade ou a fluidez/resistência à deformação do betume a temperaturas acima de 100 °C. Esta temperatura é considerada como a de referência. A

viscosidade do betume é medida através do torque necessário para que o eixo rotativo mantenha a velocidade angular constante quando imerso na amostra cilíndrica preenchida com betume. O torque é proporcional à viscosidade do betume, o que significa que quanto maior for a viscosidade, maior será o torque necessário para manter o eixo a uma velocidade constante.



Figura 30 - Equipamento utilizado no ensaio de viscosidade

O ensaio começou a temperatura de 100 °C e terminou a 200 °C, para se atingir a temperatura final realizaram-se incrementos de 10 °C, estes incrementos foram feitos quando o torque para cada temperatura estabilizava. Para cada temperatura fez-se mais do que uma medição. De realçar que todo o processo foi monitorizado com um sistema de aquisição computadorizado.

3.5. Formulação, produção e moldação dos provetes de mástique

Para este trabalho experimental foram produzidos 11 mástiques com diferentes materiais condutores e em diferentes percentagens, como se pode ver na Tabela 3. Os mástiques foram realizados na razão filler-betume de 1:1 em peso, exceto as fibras que foram adicionadas em relação ao volume de betume e depois convertidas para massa. A percentagem utilizada de fibras foi 2,5% do volume de betume, tendo-se optado por esta quantidade de acordo com os valores observado na literatura, os quais variam entre 0,25% e 2,5% em volume (Arabzadeh *et.al*, 2018, Arabzadeh *et.al*, 2019). A percentagem de incorporação de grafite encontrado na bibliografia situa-se entre 4 e 7% (Arabzadeh *et.al*, 2018). No presente trabalho optou-se por utilizar incorporações de 5% e 10%.

Tabela 3 - Composição dos mástiques para 750 g de betume

Mástiques	Grafite (g)	ASIC (g)	Filer comercial (g)	Fibras de aço (g)
100 % filer comercial	-	-	750	-
95 % filer +5% grafite	37,5	-	712,5	-
90% filer + 10 % grafite	75	-	675	-
90% filer + 5% ASIC +5% grafite	37,5	37,5	675	-
80% filer + 10% ASIC +10% grafite	75	75	600	-
95 % filer +5% ASIC	-	37,5	712,5	-
90% filer + 10 % ASIC	-	75	675	-
97,5% filer + 2,5% fibras	-	-	607,10	142,9
92,5 filer + 5% grafite + 2,5% fibras	37,5	-	569,6	142,9
87,5 filer + 5% grafite + 5% ASIC+2,5% fibras	37,5	37,5	532,10	142,9
92,5 filer +5% grafite +2,5% ASIC 2,5% fibras	37,5	37,5	569,6	142,9

Os provetes fabricados têm as medidas 4x4x16 cm. Na Figura 31 (a) pode ver-se o agitador utilizado para misturar os fileres e o betume, na Figura 31 (b) os moldes utilizados e na Figura 31 (c) os provetes já moldados.



a)



b)



c)

Figura 31 - Equipamentos utilizados para a produção de provetes de mástique; a) agitador utilizado para a execução dos mástiques, b) moldes utilizados para os provetes, c) mástique nos moldes

3.6. Avaliação da condutividade dos mástiques em estudo

Depois dos provetes fabricados, procedeu-se à medição da sua condutividade elétrica. Estas medições foram realizadas em corrente alternada (AC) e contínua (DC). Em AC efetuou-se um varrimento de frequências entre 1 kHz e 1MHz com uma corrente de 5 V, para isso utilizou-se um equipamento da marca HIOKI, modelo 3532-50 LCR HITESTER. Por sua vez, em DC variou-se a corrente entre os 0 e os

64,4 V, para este propósito utilizou-se uma fonte dupla (AXIO modelo AX-30005L-3) ligada em série com um multímetro digital KEYSIGHT 34450. A medições foram feitas para temperaturas dos provetes de 5 °C e 25 °C. Na Figura 32a) pode ver-se o Hi TESTER e na Figura 32b) a fonte dupla e o multímetro.



Figura 32 - Aparelhos utilizados para as medições da condutibilidade: a) Hi Tester, b) multímetro digital e fonte dupla

Em AC para além da condutividade foi também medida a impedância e o ângulo da impedância. Para a medição das condutividades (Figura 33b) utilizaram-se dois elérodos de cobre e pasta de grafite (Figura 33a) para melhorar a interface entre o provete e os elérodos.

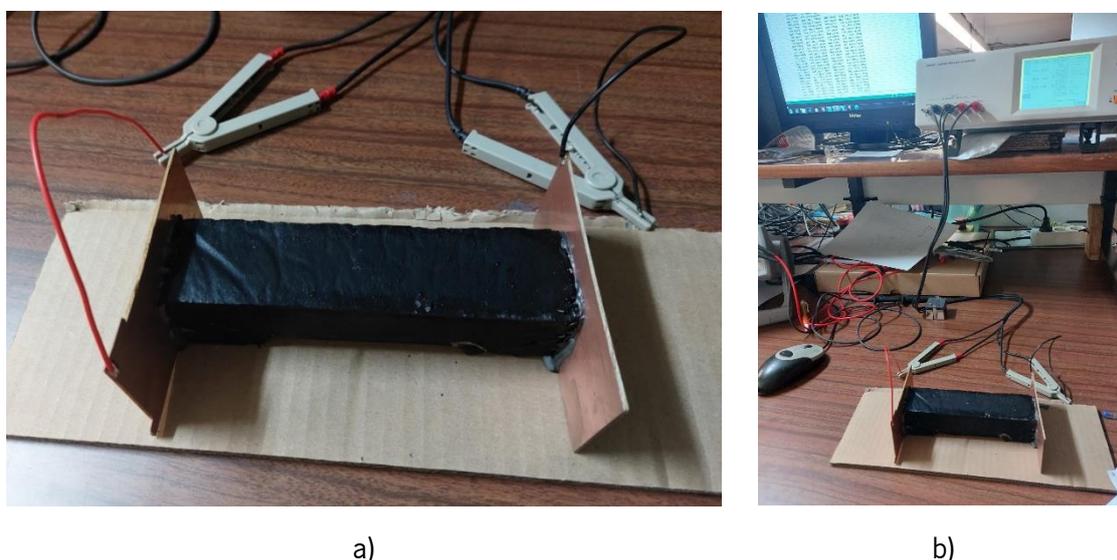


Figura 33 - Medição de condutibilidade elétrica: a) acoplagem dos elérodos; b) ligação ao Hi-Tester

3.7. Estudo e formulação das misturas betuminosas

Após o estudo das condutibilidades dos mástiques elaboraram-se 4 misturas, como esta dissertação tem por base o estudo das condutibilidades e a aplicação de resíduos da construção ou de outras indústrias,

executou-se uma mistura betuminosa convencional (AC14), e uma mistura betuminosa denominada de ASIC onde se fez uma substituição de uma percentagem de agregados graníticos por ASIC e material fresado (MF), esta mistura contém 19% de MF, 62,5% de ASIC e 14,5% de agregados convencionais, estas percentagens referem-se ao volume total da mistura. De seguida produziram-se mais duas misturas idênticas às já mencionadas, onde 10% dos finos (passados no peneiro de 0,063 mm) foram substituídos por grafite, pois como se apresenta no Capítulo 4, o mástique contendo 10% de grafite foi o que apresentou uma resistividade inferior.

Para se determinar a percentagem de cada fração a incorporar na mistura, primeiro começou-se por proceder a análise granulométrica do material, tal como no filer este ensaio foi realizado conforme a norma NP-EN 933-1: 2014.

Para se ter uma amostra representativa do agregado a utilizar é necessário fazer o esquartelamento da amostra (Figura 34) até se obter a massa desejada. O esquartelamento consiste na colocação do material em forma circular e da divisão em 4 frações idênticas, com a separação entre as frações bem nítida, após esta divisão existem 2 frações que são descartadas (fração B) e as restantes são juntas novamente (fração A), repete-se o processo até se obter a massa de amostra desejada, esta massa varia consoante a dimensão máxima do agregado.

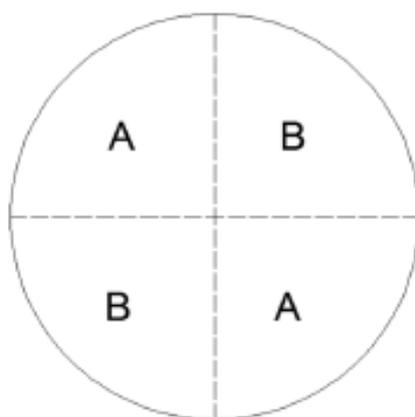


Figura 34 - Esquema do esquartelamento da amostra

Depois de concluída a granulometria dos materiais utilizou-se o fuso granulométrico que aparece na (Figura 35) para se definir a curva granulométrica das misturas, de modo que esta se situe entre o fuso mínimo e o fuso máximo. O fuso utilizado como referência foi o fuso granulométrico da mistura AC 14 surf (BB).

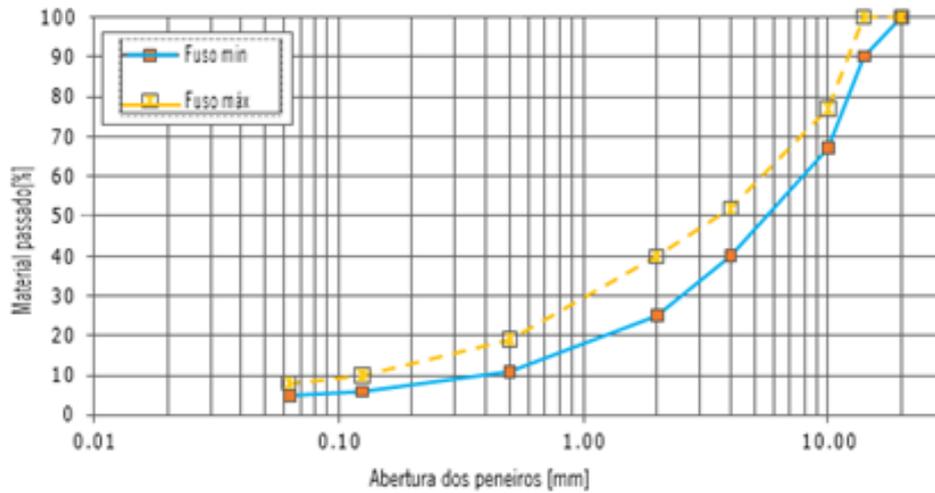


Figura 35 - Fuso de referência utilizado

3.7.1. Preparação das misturas

Para a execução das misturas (Figura 36), primeiramente colocaram-se os agregados da mistura, a panela e a hélice da panela na estufa a temperatura de 190°C para os agregados secarem, o betume foi aquecido a 160°C, a grafite e o material fresado foram adicionados a mistura à temperatura ambiente. Em seguida, já com os agregados secos e quentes fez-se a pesagem de cada fração dos agregados e colocaram-se na panela misturadora, colocando os agregados de dimensão maior no fundo e os de dimensão menor no cima. Estes materiais foram misturados durante um minuto para fazer a homogeneização dos agregados, após os agregados estarem bem envolvidos adiciona-se o betume e mistura-se até que os agregados fiquem completamente envolvidos nele.



Figura 36 - Preparação da mistura

Após o fabrico da mistura é necessário proceder a compactação da laje, para isso colocou-se a mistura no molde de forma homogénea, findado este passo procedeu-se a colocação do molde no Roller Compactor (Figura 37) e procedeu-se a sua compactação.



Figura 37 - Roller Compactor

Findada a compactação é necessário descofrar o molde e deixar a laje (Figura 38) arrefecer a temperatura ambiente para depois ser cortada, conseguindo-se assim obter 4 vigas por laje.



Figura 38 - Lajes da mistura de ASIC e AC14 com grafite

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos em cada um dos métodos utilizados no presente estudo, bem como a sua análise detalhada.

4.1. RESULTADOS DO ENSAIOS DO BETUME

A Tabela 4 inclui os resultados do ensaio de penetração e temperatura de amolecimento. Da observação dos resultados pode-se concluir que os valores de ambos os ensaios estão dentro dos parâmetros expectáveis, de acordo com a ficha técnica do betume apresentada no Capítulo 3.2, pois no ensaio de penetração, os valores deviam situar-se no intervalo de 35 a 50 décimas de milímetro. Por sua vez, a temperatura de amolecimento, devia variar entre 50 e 58°C, para além de não se verificar mais de 1°C de diferença entre a temperatura de amolecimento das duas amostras, o que torna o ensaio válido.

Tabela 4 - Resultados do ensaio de penetração e temperatura de amolecimento

	Penetração (décimas de milímetro)		Temperatura de amolecimento (°C)	
	Amostra A	Amostra B	Amostra A	Amostra B
	37,5	36,9		
	36,4	36,3	51,1	50,8
	35,6	37,9		
Média	36,8		51	

Relativamente ao ensaio de viscosidade dinâmica, os resultados obtidos (Figura 39) confirmam a tendência normal de redução de viscosidade com o aumento de temperatura e permitem determinar a temperatura ideal de mistura para o betume em estudo (correspondente a uma viscosidade de 200 cP). Para o betume usado neste trabalho, a temperatura deverá rondar os 160 °C.

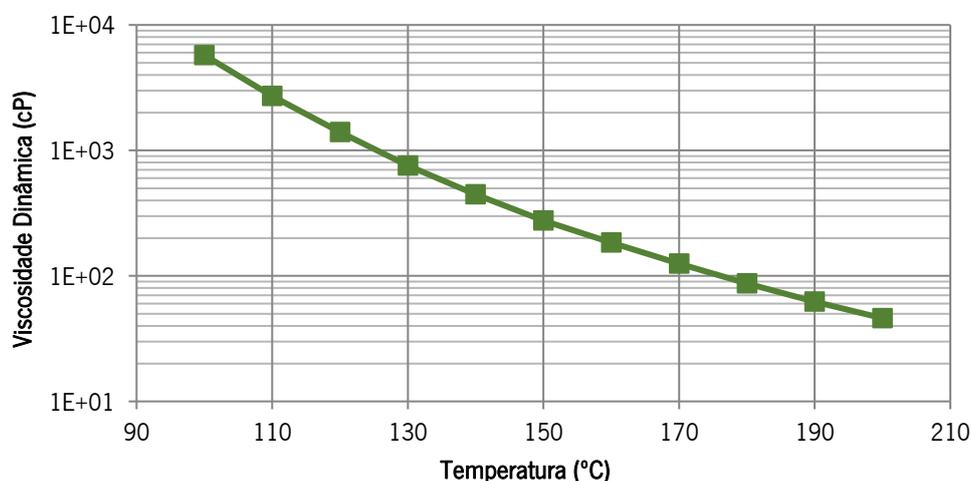


Figura 39 - Variação da viscosidade do betume com a temperatura

4.2. RESULTADOS DAS PROPRIEDADES FISICAS DOS FÍLERES

A Tabela 5 apresenta os resultados dos ensaios de massa volúmica através do método do picnómetro, massa volúmica com o balão de Le Chatelier, volume de vazios com ensaio de Rigden, superfície específica através do ensaio de Blaine e valor de Azul-de-metileno para a grafite.

Tabela 5 - Ensaio da Grafite

Massa Volúmica Picnómetro (Mg/m ³)	Massa Volúmica Le Chatelier (Mg/m ³)	Volume vazios Rigden (%)	Superfície específica (cm ² /g)	Azul-de-metileno (g/kg)
2,31			3935	
2,32	2,81	62,2	4338	4,5
2,34	2,78	63,5	4546	

Com estes ensaios pode-se concluir que a grafite tem uma massa volúmica média pelo método do picnómetro de 2,32 Mg/m³ e de 2,80 Mg/m³ pelo balão de Le Chatelier, um volume de vazios médio de 62,9%, uma superfície específica média de 4273 cm²/g e um valor de azul-de-metileno de 4,5 g/kg.

A Tabela 6 apresenta os resultados dos ensaios de massa volúmica através do método do picnómetro, massa volúmica com o balão de Le Chatelier, volume de vazios com ensaio de Rigden, superfície específica através do ensaio de Blaine e valor de Azul-de-metileno para o Pó de ASIC.

Tabela 6 - Ensaio do pó de ASIC

Massa Volúmica Picnómetro (Mg/m ³)	Massa Volúmica Le Chatelier (Mg/m ³)	Volume vazios Rigden (%)	Superfície específica (cm ² /g)	Azul-de-metileno (g/kg)
3,75			7185	
3,80	3,96	37,1	6924	15,67
3,65	3,84	37,6	6242	

Pode-se concluir que o pó de ASIC tem uma massa volúmica média pelo método do picnómetro de 3,73 Mg/m³ e de 3,9 Mg/m³ pelo balão de Le Chatelier, um volume de vazios médio de 37,4% e uma superfície específica média de 6784 cm²/g. Para o ensaio azul-de-metileno e segundo o caderno de encargos, o pó de ASIC não cumpre os requisitos, pois este valor devia ser inferior a 10.

A Tabela 7 apresenta os resultados dos ensaios de massa volúmica através do método do picnómetro, massa volúmica com o balão de Le Chatelier, volume de vazios com ensaio de Rigden, superfície específica através do ensaio de Blaine e valor de Azul-de-metileno, mas desta vez para o filer comercial.

Tabela 7 - Ensaio do Filer Comercial

Massa Volúmica Picnómetro (Mg/m ³)	Massa Volúmica Le Chatelier (Mg/m ³)	Volume vazios Rigden (%)	Superfície específica (cm ² /g)	Azul-de-metileno (g/kg)
2,70			6902	
2,84	2,72	36,3	7005	9,5
2,75	2,76	35,1	7500	

Seguindo o raciocínio anterior conclui-se que o filer comercial tem uma massa volúmica média pelo método do picnómetro de 2,76 Mg/m³ e de 2,74 Mg/m³ pelo balão de Le Chatelier, um volume de vazios médio de 35,7% e uma superfície específica média de 7136 cm²/g.

4.3. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Analisando as curvas granulométricas dos diversos materiais e juntando tudo numa só curva, de modo a cumprir o fuso granulométrico, determinaram-se as percentagens de cada fração que constam da Tabela 8.

Tabela 8 - Composição das misturas betuminosas produzidas

Agregado	AC 14	AC 14 com grafite	ASIC	ASIC com grafite
ASIC 12/16	-	-	23,10	23,10
ASIC 5/12	-	-	25	25
ASIC 0/5	-	-	14,5	14,5
Pó 0/4	31,2	31,2	14,5	14,5
Granito 10/14	7,1	7,1	-	-
Granito 10/14	19	19	-	-
Granito 4/10	37	37	-	-
Mat. Fresado	-	-	18,9	18,9
Filer comercial	5,8	5	4	3,4
Grafite	-	-0,8	-	-0,6

4.4. COMPORTAMENTO ELÉTRICO DAS MISTURAS DESENVOLVIDAS

Nesta secção vai-se a analisar os dados obtidos a partir das medições das resistividades dos mástiques. O primeiro passo para se fazer a análise dos resultados foi fazer a homogeneização dos resultados, embora os provetes dos mástiques fossem todos do mesmo tamanho e converter a resistência em Ω (Ohms) em resistência em $\Omega \times \text{cm}$ (Ohms \times cm), para isso utilizou-se a seguinte fórmula (Arabzadeh *et al.*, 2019):

$$\rho = \frac{R \times S}{L} \quad (1)$$

Em que ρ é a resistividade elétrica volumétrica ($\Omega \times \text{cm}$), R é a resistência elétrica (em Ω), S é a área da secção de contacto com os elétrodos (em cm^2) e L a distância entre os elétrodos (em cm).

A análise das resistências foi realizada no domínio das frequências, o domínio das frequências consiste na análise de uma função ou um sinal em relação à frequência, este foi o método utilizado pois definiu-se uma frequência mínima e uma máxima e os dados foram analisados nesse intervalo.

4.4.1. Influência dos constituintes dos mástiques desenvolvidos em corrente alternada

Grafite

Na Figura 40 pode observar-se que para frequências abaixo de 55000 Hz, 5% de grafite consegue ter melhor resultados em termos de resistência a passagem da corrente do que o filer comercial. No entanto, dessa frequência até a frequência de 1 MHz, 5% de grafite e o filer comercial tem comportamento similar à passagem da corrente. Por este gráfico podemos concluir que a adição de grafite consegue diminuir a resistividade do material, no entanto só a partir de 5% essa adição tem efeito, respetivamente, na escala de frequência onde se fez o estudo.

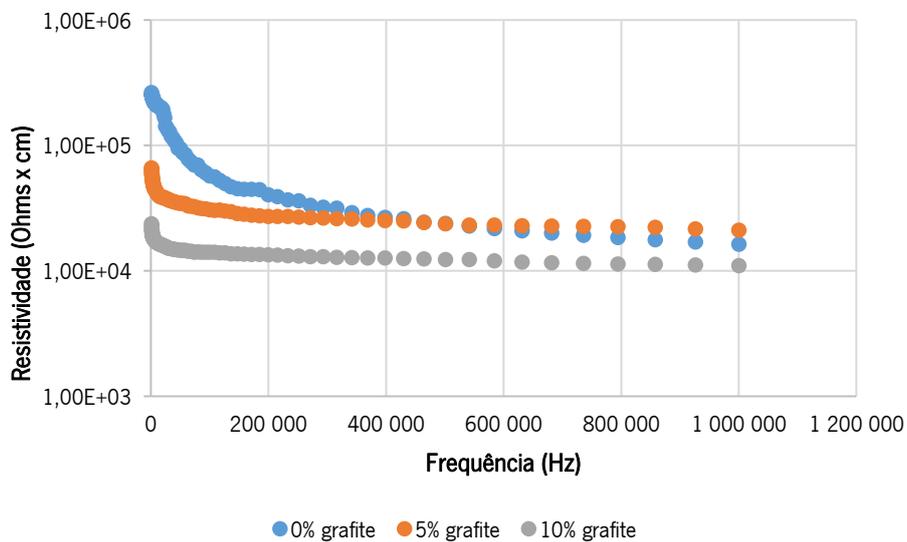


Figura 40 - Comportamento da grafite

Na Figura 41 pode-se observar em qual dos mástiques produzidos a grafite tem mais influência para duas frequências distintas, nomeadamente, 1kHz e 1 MHz.

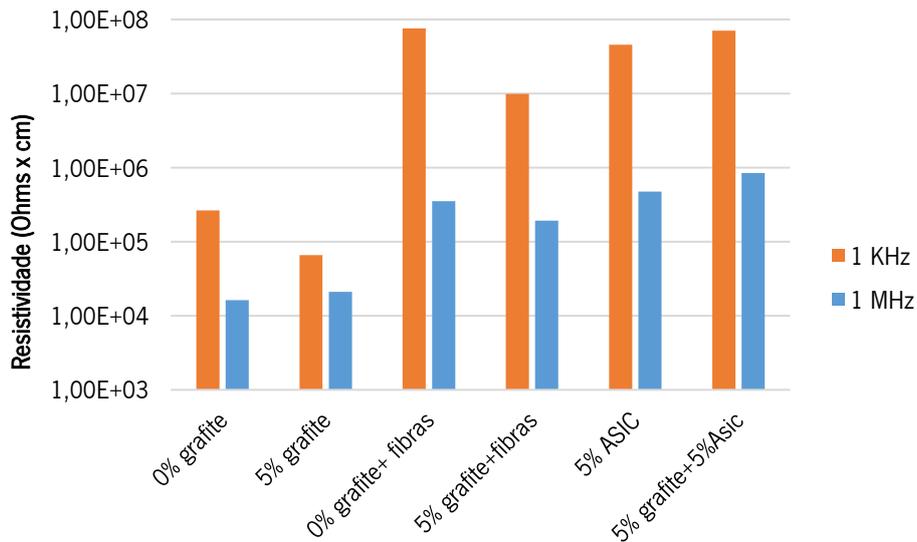


Figura 41 - Influência da grafite nos restantes mástiques

Conclui-se que a grafite junto com as fibras (5% grafite + fibras) afeta positivamente o mástique (0% grafite + fibras), pois verifica-se uma diminuição de uma ordem de grandeza de $7,57 \times 10^7 \Omega \times \text{cm}$ para $9,92 \times 10^6 \Omega \times \text{cm}$, na frequência de 1 kHz. Quando se junta grafite ao filer comercial (calcário), mástique denominado de 0% grafite, também se faz notar o seu efeito positivo, já o mesmo não se verifica quando se junta grafite ao ASIC pois a resistividade aumenta ligeiramente. A presença ou ausência de grafite é mais denotada na frequência mais baixas, nomeadamente, a de 1 kHz.

ASIC

Na Figura 42 verifica-se que a introdução de ASIC em pó conduz a uma condutibilidade mais reduzida do que os mástiques exclusivamente com filer comercial, pois para o varrimento de frequências utilizadas durante os ensaios, as curvas de ASIC encontram-se sempre acima da curva do filer. Adicionalmente, pode concluir-se que a introdução de percentagens mais elevadas de ASIC, i.e. 10%, conduz a condutibilidades mais reduzidas quando comparadas com percentagens mais reduzidas, ou mesmo com as curvas de referência sem a utilização de ASIC, i.e. 100% filer comercial. Visto que o ASIC é um remanescente da indústria da siderurgia, contendo partículas de minério de ferro era de esperar um efeito de redução na resistividade.

Uma outra conclusão que se retira é que a resistividade dos mástiques que contêm 5% e 10% de ASIC é muito próxima o que leva a querer que a condutividade do ASIC não se altere muito independentemente da percentagem que for incorporada.

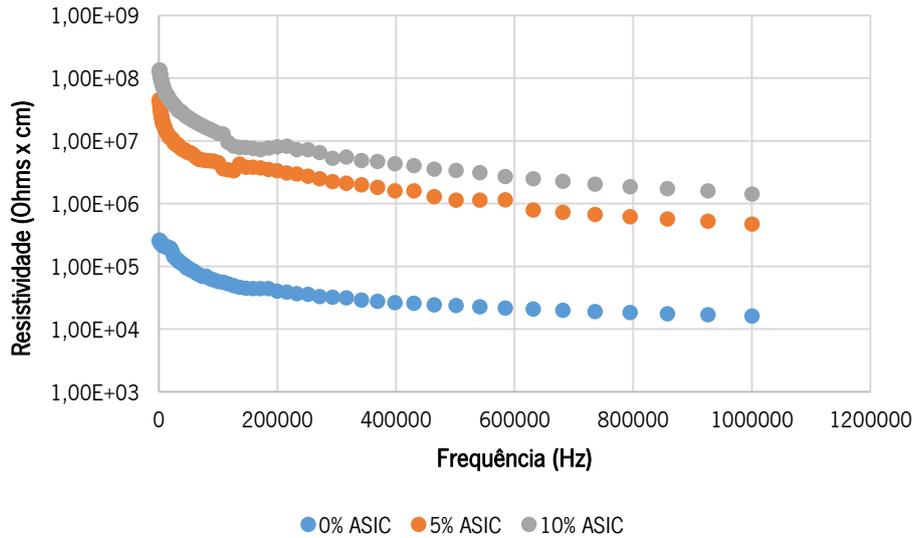


Figura 42 - Efeito da adição de ASIC

Na Figura 43 pode observar-se a influência do ASIC nos restantes mástiques.

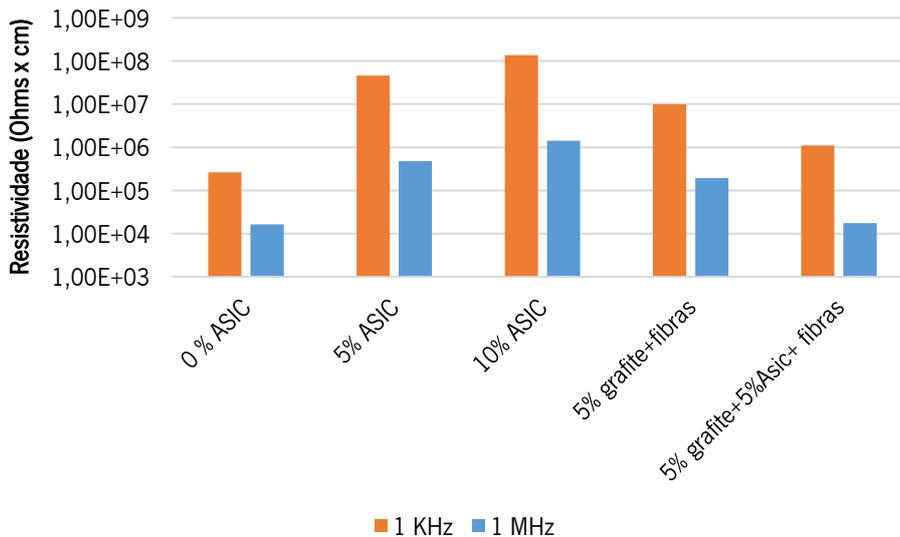


Figura 43 - Influência do ASIC nos restantes mástiques

O único mástique estudado e ensaiado onde o ASIC afeta positivamente o seu desempenho no que concerne ao melhoramento da capacidade condutiva do material é quando se adiciona 5% de ASIC ao mástique que contém 5% de grafite e fibras pois comparando os valores da resistividade ($\Omega \times \text{cm}$), esta reduz cerca de uma ordem de grandeza, nas duas frequências analisadas. Já nos mástiques correspondendo às séries 0% ASIC, 5% de ASIC e 10% de ASIC, era de esperar que com a maior percentagem de ASIC, o mástique tivesse melhor comportamento a passagem da corrente, o que não se verificou e isto deve-se a uma maior resistência do ASIC à passagem da corrente, o que significa que o filer comercial (calcário), mencionado como 0% ASIC tem melhor condutividade do que o ASIC, pois 5% de ASIC faz disparar a resistividade ($\Omega \times \text{cm}$) em duas grandezas.

Efeito conjunto da grafite e do ASIC

Na Figura 44 apresenta-se o comportamento que o material tem quando se adiciona 5% de grafite ao ASIC. Desta análise pode-se concluir que durante grande parte das frequências analisadas o seu comportamento é muito semelhante, no entanto consegue-se perceber que até perto dos 600 KHz a adição dos dois materiais tem melhor comportamento e que acima de 600 kHz o mástique que contém apenas 5% de ASIC apresenta melhores resultados.

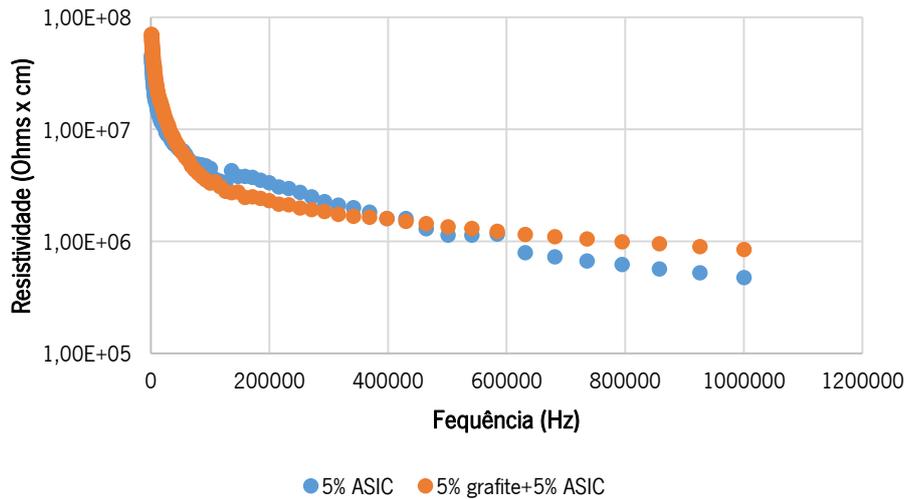


Figura 44 - Influência da adição de 5% de grafite ao ASIC

Na Figura 45 é analisada a influência da adição de grafite ao ASIC, mas desta vez numa percentagem superior à anterior (10%). Pode-se constatar que esta adição faz cair bruscamente o valor da resistividade ($\Omega \times \text{cm}$) do material ao longo da gama de frequências estudadas (essa queda ronda as duas ordens de grandeza).

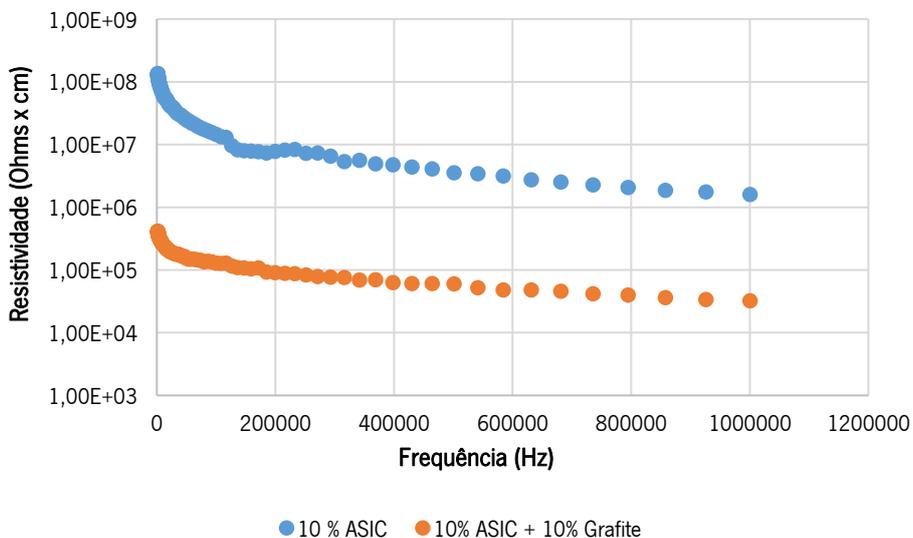


Figura 45 - Influência da adição de 10 % de grafite ao ASIC

Da análise da Figura 44 e Figura 45 pode-se concluir que 5% de grafite não consegue anular o efeito prejudicial do ASIC, mas que 10% de grafite consegue anular e até reduzir bastante a resistividade do mástique contendo 10% de ASIC, isto acontece porque a grafite tem grande diferença na resistividade, ou seja quanta mais quantidade de grafite mais baixa é a resistividade (Figura 40) e já com o ASIC a diferença de resistividade entre 5% e 10% é quase nula (Figura 42).

No gráfico seguinte (Figura 46) continua a ver-se qual a influência que o ASIC e a grafite têm quando adicionados no mesmo mástique. E logo à partida percebe-se que a adição de 5% de ASIC a 5% de grafite agrava bastante a resistividade do material, tornando-o menos condutivo, pois durante toda a medição a curva dos 5% ASIC + 5% grafite situa-se bastante acima da de 5% grafite.

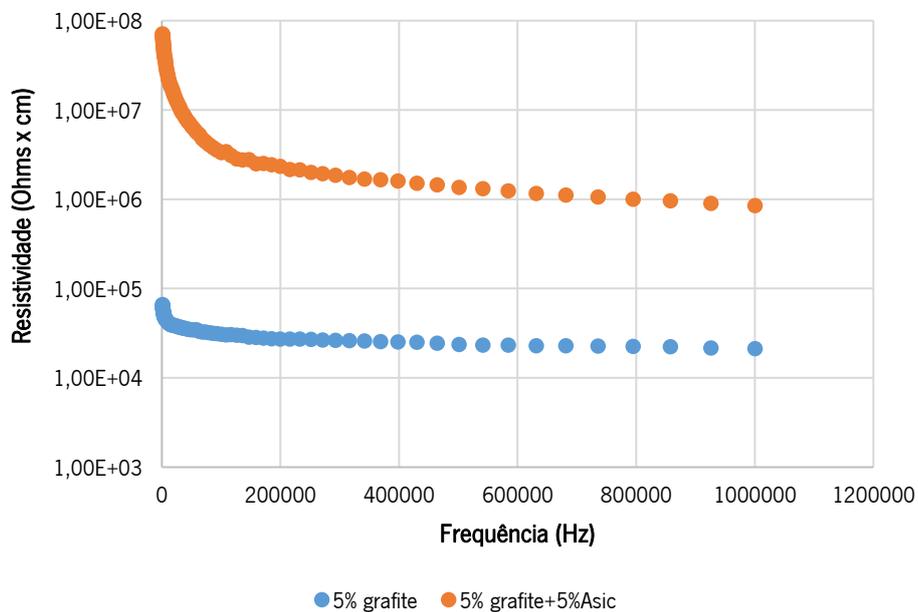


Figura 46 - Influência da adição de 5% de ASIC à grafite

Na Figura 47 ainda continua a analisar-se a influência da adição de ASIC à grafite e observa-se que enquanto a série de 10% grafite + 10% de ASIC tem uma descida acentuada da resistividade ($\Omega \times \text{cm}$), a série de 10% de grafite a partir dos 200 kHz tem um comportamento praticamente constante com o aumento da frequência, verifica-se também que a diferença na resistividade entre as séries vai diminuindo com o aumento da frequência.

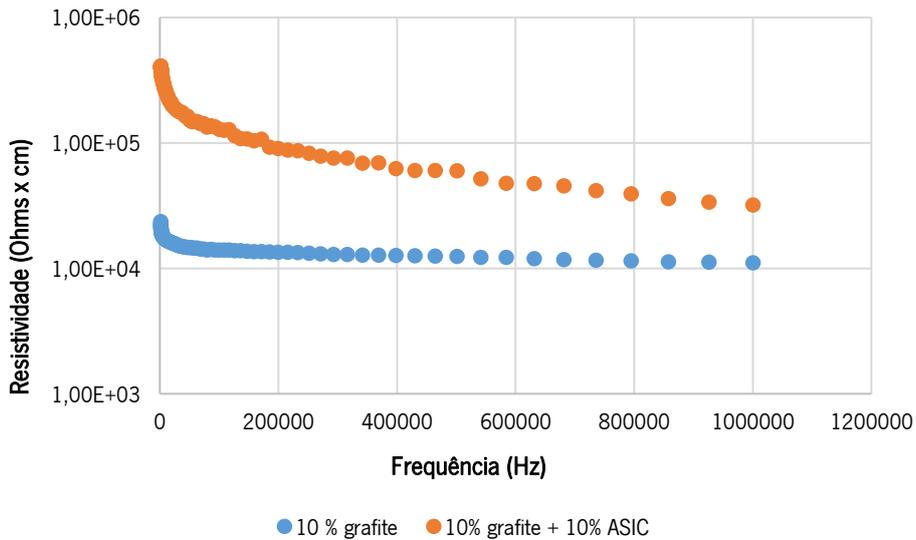


Figura 47 - Influência da adição de 10% de ASIC à grafite

Como já referido, o pó de ASIC tem resistência significativa à passagem da corrente elétrica. Isso é novamente denotado neste gráfico (Figura 48) pois quando se adiciona 5% de grafite + 5% de ASIC a resistividade elétrica dispara. No entanto quando se adiciona 10% de grafite com 10% de ASIC, a resistividade destes já fica mais próxima do filer comercial, o que denota um efeito contrário entre a adição de grafite e a adição de ASIC na resistividade dos mástiques.

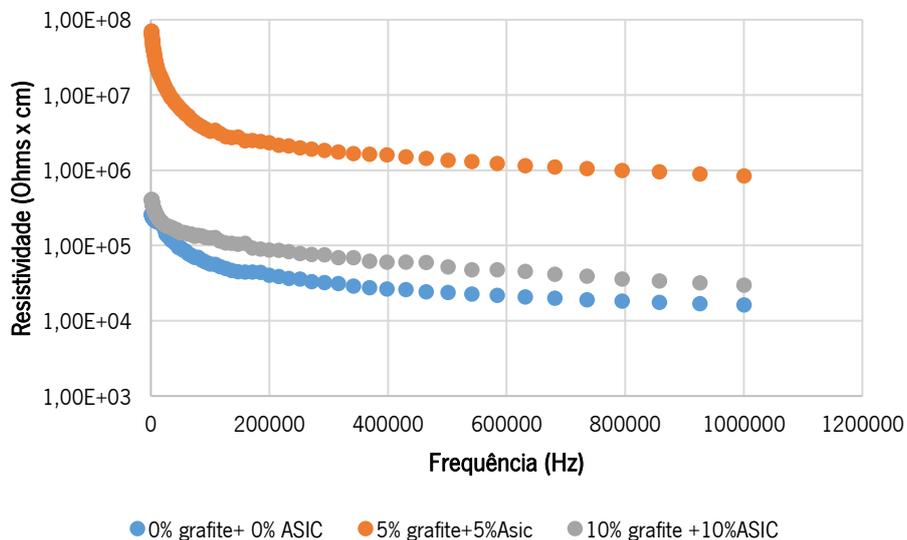


Figura 48 - Influência da adição de diferentes percentagens de ASIC e grafite

Inclusão de fibras metálicas discretas

Na Figura 49 é possível verificar que quando se adiciona 2,5% de ASIC e grafite às fibras metálicas, este mástique tem um comportamento ligeiramente melhor do que o mástique que contém apenas fibras, no que concerne a adição de 5% de ASIC e grafite, este tem uma queda brusca na resistividade em

frequências mais baixas (até aos 80 kHz) e depois até ao final das medições a sua resistividade oscila muito pouco sendo quase constante para as últimas frequências medidas.

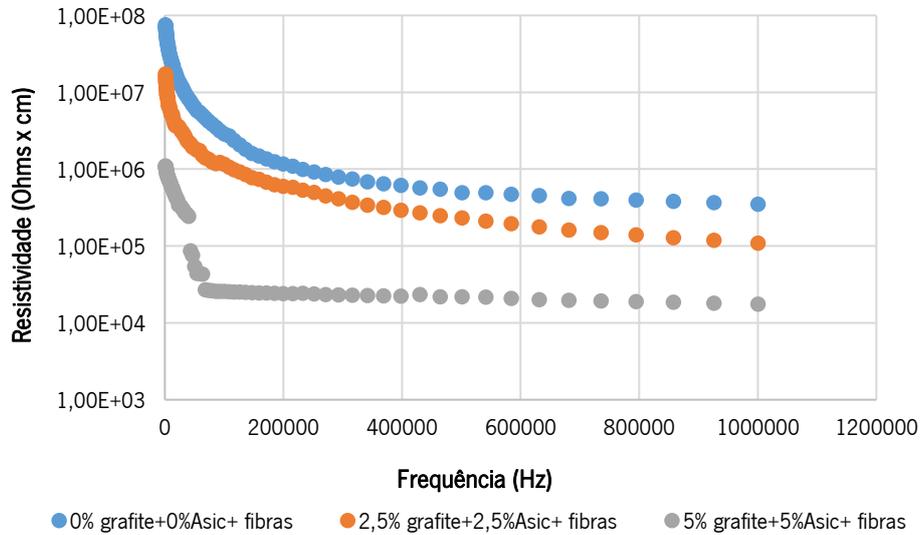


Figura 49 - Influência da adição de diferentes percentagens de ASIC e grafite na presença de fibras

Na Figura 50 pode-se ver como as fibras afetam a condutibilidade da grafite do ASIC e do filer. A presença de fibras no mástique que contem 5% de grafite afeta o seu comportamento negativamente pois a resistividade aumenta mais de duas ordens de grandeza e no filer o seu comportamento é semelhante pois aumenta a resistividade em 2 ordens de grandeza, já no mástique contendo ASIC e grafite a presença das fibras é positiva pois reduz a resistividade em quase duas ordens de grandeza, este valores de resistividade referem-se à frequência de 1 kHz. Verifica-se também que este aumento ou redução da resistividade se faz notar mais para a frequência de 1 MHz.

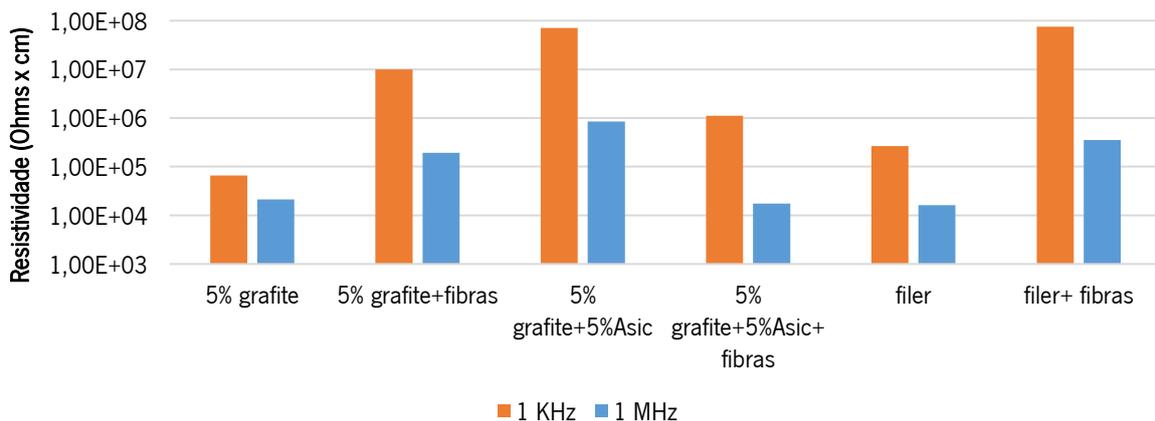


Figura 50 - Influência da adição de fibras aos diferentes materiais

4.4.2. Influência dos constituintes dos mástiques desenvolvidos em corrente continua

A medição da resistividade em corrente continua foi feita registando a voltagem (volts) a que se fazia o ensaio e a intensidade (mili-amperes), depois dividindo um pelo outro (V/I) consegue-se obter a

resistência, à qual se aplicou a Equação 1 para converter a resistência elétrica (em Ω) em resistividade volumétrica (em $\Omega \times \text{cm}$). Genericamente com o aumento da voltagem a resistividade tende a diminuir.

Grafite

Na Figura 51 pode observar-se que, em corrente continua, a adição de 5% de grafite não é o suficiente para ter menor resistividade do que o filer comercial (calcário) denominado por 0% grafite. No entanto, para a voltagem de 64,4 volts este já se aproxima bastante do filer comercial. No que se refere aos 10% grafite, este tem um comportamento paralelo aos 0% grafite, mantendo sempre uma diferença na resistividade ($\Omega \times \text{cm}$) de cerca de metade da resistividade do mástique contendo 0% de grafite.

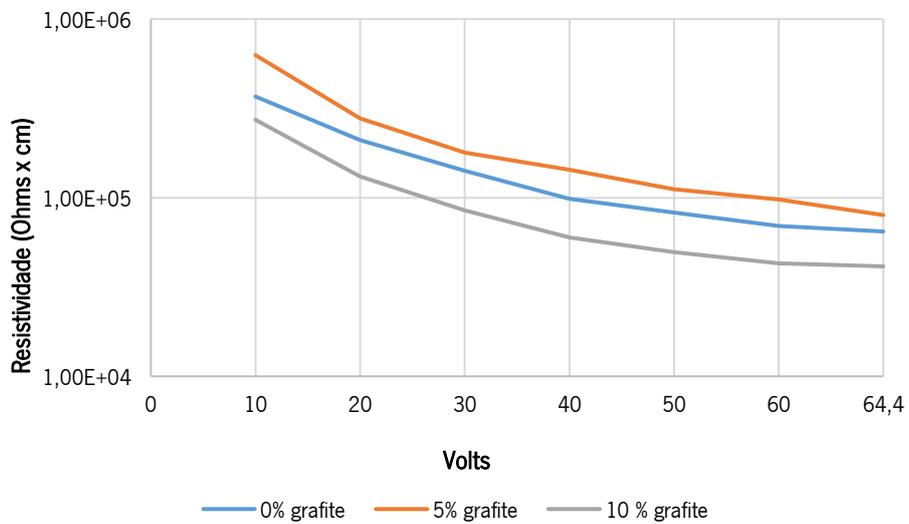


Figura 51 - Comportamento das diferentes percentagens de grafite quando sujeitas a corrente continua

No gráfico abaixo (Figura 52) pode-se observar em qual dos mástiques produzidos a grafite tem mais influência.

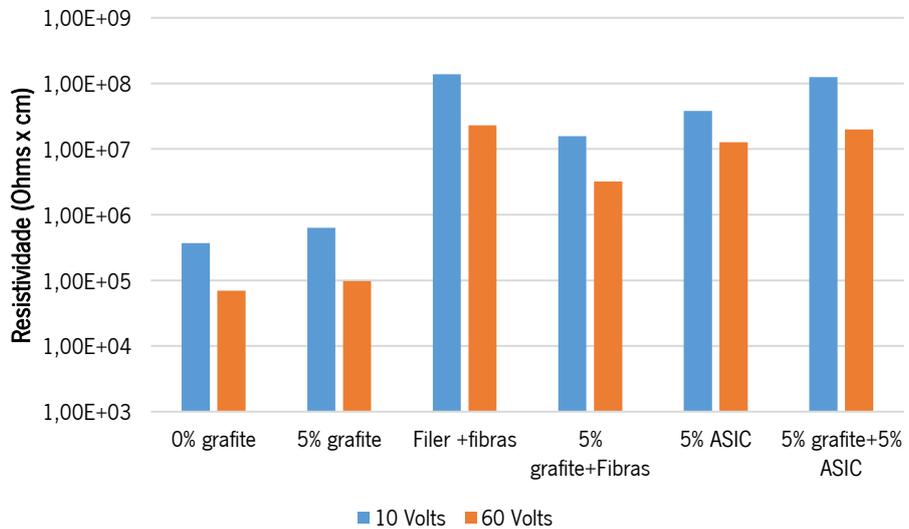


Figura 52 - Influência da grafite nos restantes mástiques quando sujeitos a corrente continua

Conclui-se que, junto com as fibras, a grafite afeta positivamente a resistividade do mástique, pois verifica-se uma diminuição de uma ordem de grandeza de $1,39 \times 10^8 \Omega \times \text{cm}$ para $2,30 \times 10^7 \Omega \times \text{cm}$, para os 10 volts, mas o mesmo acontece para os 60 volts. Já o mesmo não se verifica quando se junta grafite ao ASIC pois a resistividade aumenta. No entanto, esse aumento é mais perceptível para os 10 volts. Quando se junta grafite ao filer comercial denominado de 0% grafite, também se faz notar o seu efeito negativo e esse resultado é mais notado para voltagem de 10 volts.

ASIC

Na Figura 53 verifica-se que o ASIC tem pior condutividade do que o filer comercial pois para as voltagens utilizadas, as curvas de ASIC encontram-se sempre acima da curva do filer, mais uma vez é denotada a reduzida condutividade do ASIC. No entanto, as 3 curvas mantem-se sempre paralelas ao longo das voltagens utilizadas no ensaio, o que significa que a influência da voltagem na resistividade é igual nos três mástiques estudados.

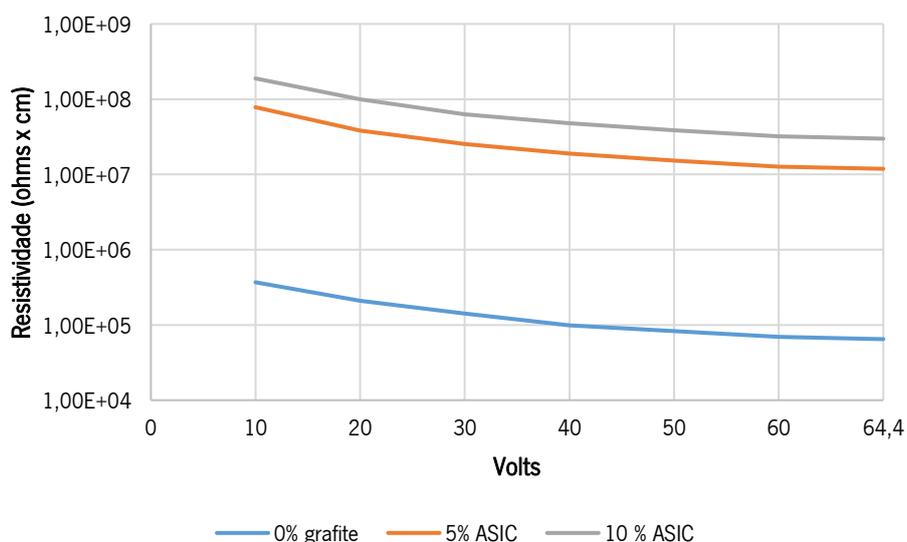


Figura 53 - Comportamento nas diferentes percentagens de ASIC em corrente continua

No seguinte gráfico (Figura 54) pode observar-se a influência do ASIC nos restantes mástiques quando sujeitos a corrente continua.

O único mástique onde o ASIC afeta positivamente o seu desempenho no que concerne ao melhoramento da capacidade condutiva do material é quando se adiciona 5% de ASIC ao mástique que contém 5% de grafite e fibras pois comparando a resistividade ($\Omega \times \text{cm}$), esta reduz quase uma ordem de grandeza, isto nos 10 volts. Já quando se compara os 0% de ASIC com os 5% de ASIC é notório o efeito prejudicial desta adição. A diferença de voltagem não se faz representar tanto como noutras variáveis já estudadas.

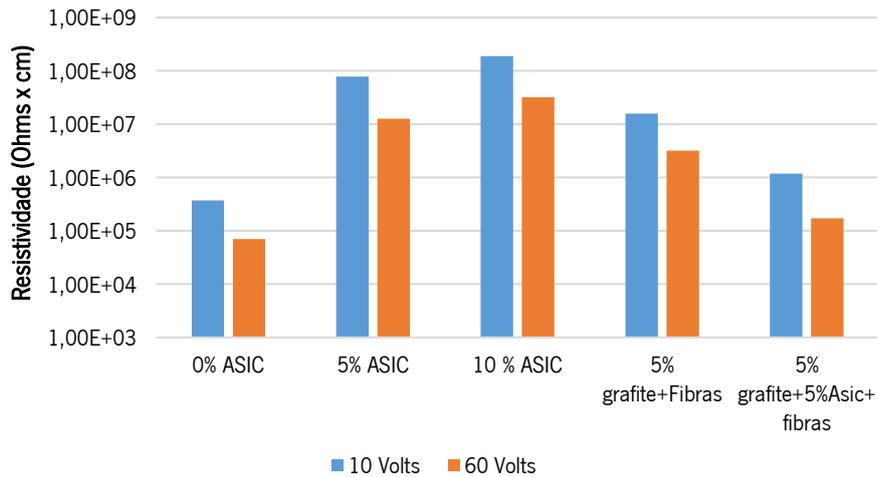


Figura 54 - Influência da presença de ASIC nos mástiques quando sujeitos a corrente continua

Efeito conjunto da grafite e do ASIC

Nestes gráficos podemos ver qual o efeito da adição de grafite ao ASIC (Figura 55). Desta análise conclui-se que quando se adiciona 5% de grafite ao ASIC o novo mástique tem um comportamento mais gravoso em termos de resistividade ao longo de todas as voltagens estudadas. Já quando se analisa a adição de 10% de grafite a 10% de ASIC esta adição tem um efeito vantajoso, mas ao contrário dos outros mástiques, este não apresenta uma variação significativa tem entre as diferentes voltagens em vez de ter a tendência a diminuir a resistividade com o aumento da voltagem.

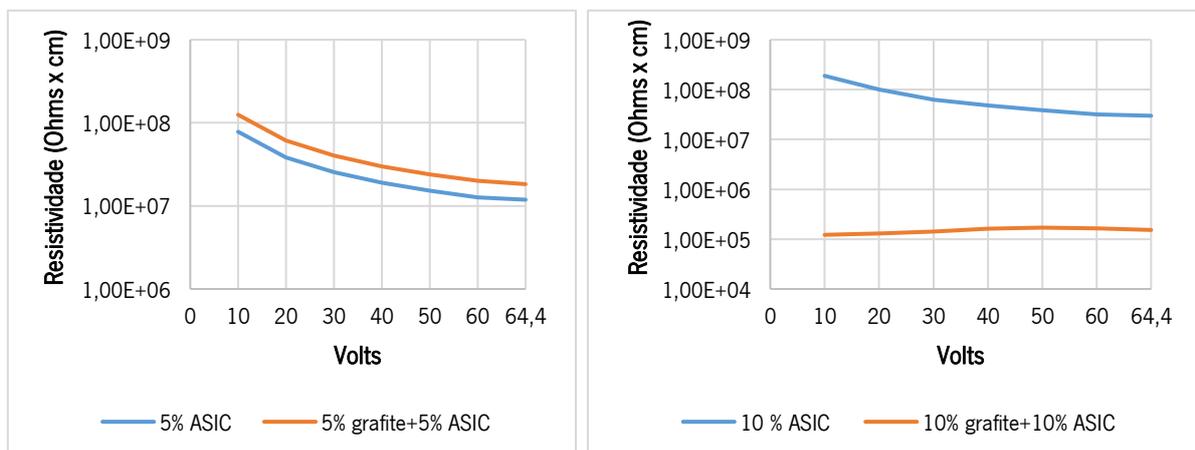


Figura 55 - Verificação da influência da adição de grafite ao ASIC

Na mesma linha de pensamento, analisou-se qual a influência da adição de ASIC à grafite. Em ambos os gráficos (Figura 56) é perceptível que adição de ASIC à grafite tem um efeito negativo porque em ambos os gráficos a resistividade aumenta, e como referido acima o mástique contendo 10% de ASIC e 10% de grafite não segue a tendência dos outros mástiques, também é perceptível que para voltagens entre os 10 e 20 volts apresenta resistividades mais baixas do que o mástique contendo só 10% de grafite, mas acima dos 20 volts, esta tendência inverte-se.

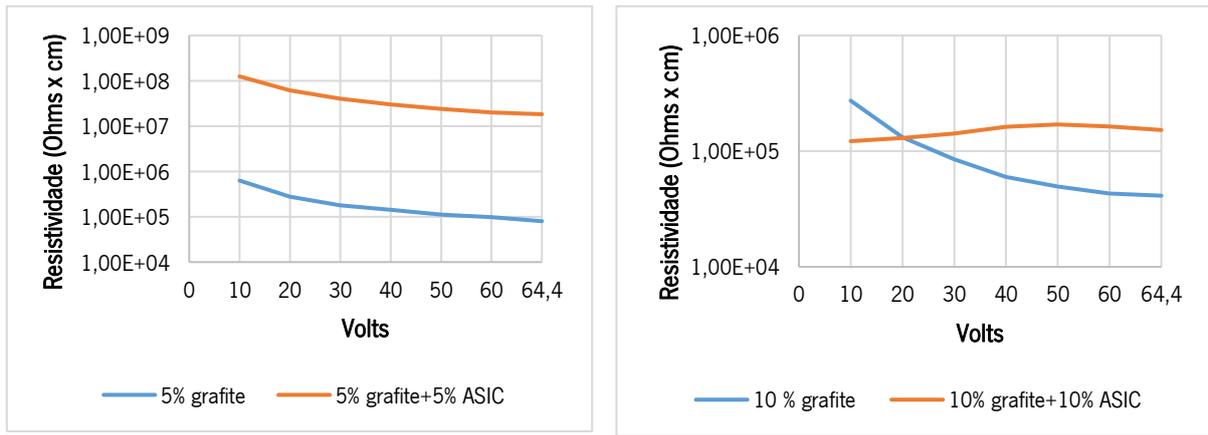


Figura 56 - Influência da adição de ASIC à grafite

Da análise das 3 series em que se adiciona em igual percentagem de grafite e ASIC em 0%, 5% e 10% (Figura 57) consegue-se verificar que estas adições agravam a resistividade elétrica do filer, denominado por 0% de ASIC+0% grafite. Para voltagens entre os 10 e 30 volts o mastique contendo 10% de grafite e 10% de ASIC apresenta menor resistividade que o mastique contendo só filer, mas depois dos 30 volts até aos 64,4 volts é o filer comercial que apresenta menor resistividade, ou seja, é o que cria menor oposição a passagem da corrente elétrica.

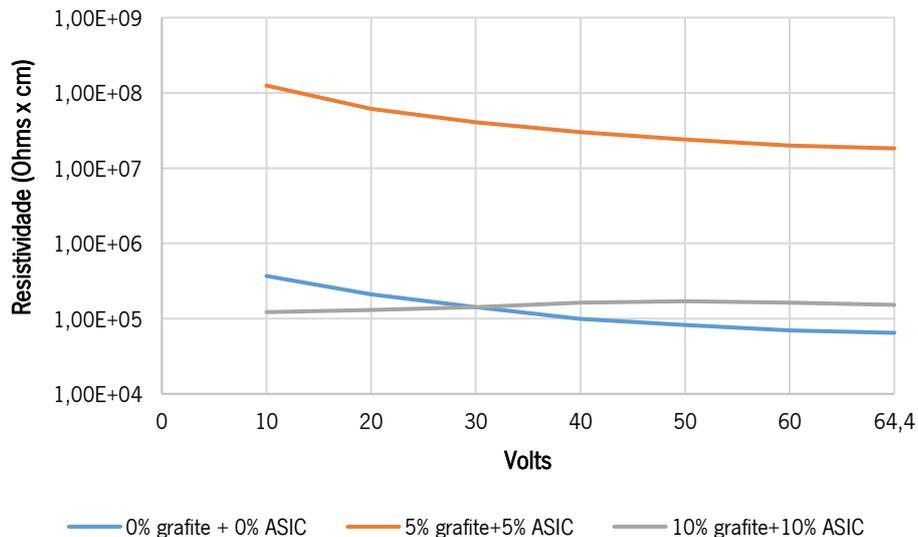


Figura 57 - Influência da adição de ASIC e grafite na mesma quantidade em corrente continua

Ao avaliar o efeito da adição conjunta de grafite e pó de ASIC às fibras metálicas (Figura 58), verifica-se que, dos 10 aos 50 volts, o mástique que inclui as percentagem de 0% e 5 % de ASIC e grafite apresentam um comportamento paralelo. Ambas as misturas que contem ASIC e grafite tem uma menor resistividade ao logo de todas as voltagens medidas em relação ao mastique contendo apenas filer, conclui-se também que o mástique que contem 2,5 % de ASIC e grafite apresenta uma diminuição da resistividade quase sempre de duas ordens de grandeza em relação ao mástique que contém 5% de ASIC e 5% de grafite.

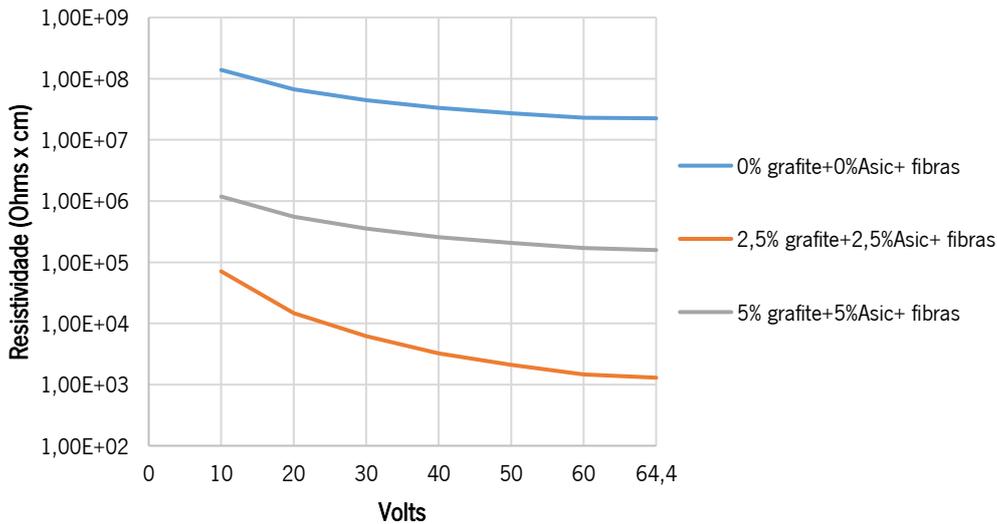


Figura 58 - Efeito conjunto da grafite e do ASIC na presença de fibras

Inclusão de fibras metálicas discretas

Na Figura 59 pode observar-se como as fibras afetam a condutibilidade da grafite, do ASIC e do filer. A presença de fibras no mástique que contem 5% de grafite e no filer afeta o seu comportamento negativamente pois a resistividade aumenta, já no mástique contendo ASIC e grafite a presença das fibras é positiva pois reduz a resistividade em quase duas ordens de grandeza, tanto para os 10 volts como para os 60 volts. Aqui novamente verificamos que o aumento, ou diminuição da resistividade não é muito afetada pela voltagem utilizada, pois quer para os 10 quer para os 60 volts esse aumento é similar.

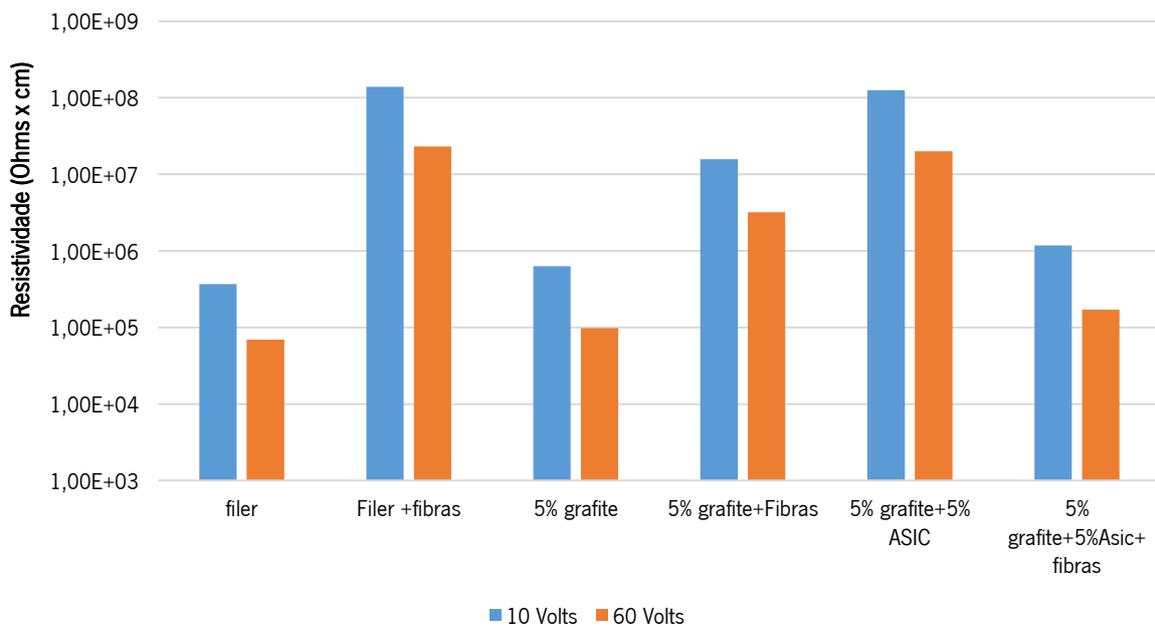


Figura 59 - Efeitos na resistividade com a introdução de fibras para corrente continua

4.4.3. Influência do tipo de corrente

Analisando as secções 4.4.1 e 4.4.2 é possível retirar algumas conclusões, tais como se o material apresenta menor resistividade em corrente alternada ou continua e quais as principais diferenças no comportamento do material estando sujeito a corrente continua ou alternada.

Grafite

Da análise dos gráficos Figura 40 e Figura 51 onde consta a comparação de mástiques contendo apenas grafite e em diferentes percentagens, uma diferença que salta à vista é que 5% de grafite tem pior comportamento quando submetida a corrente continua.

Outra diferença observada quando se compara mástiques sem grafite e mástiques aos quais foi adicionada grafite, foi a de que quando se adiciona 5% de grafite ao filer em corrente continua, esta aumenta a resistividade do filer enquanto na corrente alternada a presença de grafite diminuía resistividade do filer.

ASIC

Analisando os gráficos Figura 42 e Figura 53 conclui-se que a corrente aplicada aos mástiques contendo 0%, 5% e 10% de ASIC sendo alternada ou continua não influencia as suas resistividades pois o mástique com 10% de ASIC continua a ter a maior resistividade, seguido do de 5% ASIC e por fim o de 0% ASIC. Quanto a sua influência nos restantes mástiques, continua a ser negativa quando se adiciona ASIC ao filer e positiva quando se adiciona ASIC ao mástique contendo 5% de grafite e fibras. Com estas análises reforça-se a ideia de que o tipo de corrente não influencia a resistividade dos mástiques com ASIC.

Efeito conjunto da grafite e do ASIC

Quando se adiciona 10% de grafite ao ASIC este mantém com resistividade superior os 10% ASIC em ambas as correntes (Figura 45 e Figura 55).

Quando se se adiciona 5% de ASIC a 5% de grafite (Figura 46 e Figura 56) este mantém o comportamento nos dois tipos de corrente, mantendo os 5% de ASIC + 5% de grafite com a resistividade mais elevada, mas quando se analisa a adição de 10% de ASIC a 10% de grafite (Figura 47 e Figura 56) as resistividades já se alteram, embora seja apenas para as voltagens mais baixas, enquanto na corrente alternada o mástique que contém 10% de ASIC e igual quantidade de grafite apresenta resistividades mais elevadas durante toda a análise das frequência de estudo, na corrente continua entre os 10 e 20 volts tem menor resistividade do que o mástique contendo apenas 10% de grafite, depois dos 20 volts até aos 64,4 volts volta a ter o comportamento equivalente ao da corrente alternada.

Com base nos gráficos das Figura 48 e Figura 57 pode analisar-se a influência de adicionar grafite e ASIC nas mesmas quantidades em percentagens de 0%, 5% e 10%. Novamente, como referido no paragrafo anterior a única diferença que existe é que na corrente continua dos 10 aos 30 volts o mástique com 10% de grafite e 10% de ASIC tem menor resistividade do que o mástique que contém 0% de ambos os materiais, a partir dos 30 volts o comportamento passa a ser igual ao da corrente alternada em que o mástique que inclui 5% de cada material tem a resistividade mais elevada, seguido do que contém 10% de cada material e por fim o que apresenta melhor condutividade é o que é composto apenas por filler, contendo 0% de grafite e ASIC.

Por fim será analisado o comportamento dos mástiques contendo 2,5% e 5% de grafite e ASIC com igual percentagem de cada material, mas contendo também fibras (Figura 49 e Figura 58). A única diferença que se encontra é que na corrente alternada o mástique contendo 2,5% de grafite e de ASIC e fibras tinham resistividade superior ao mástique contendo 5% de ASIC +5% de grafite+ fibras e na corrente continua esta ordem inverte-se, continuando o material contendo apenas a fibras com resistividade superior em ambos os tipos de corrente.

Inclusão de fibras metálicas discretas

Neste tópico será analisado o comportamento das fibras consoante o tipo de corrente aplicada. Tal como acontece no caso do ASIC conclui-se que o tipo de corrente, alternada ou continua não influencia o comportamento dos mástiques com fibras, pois analisando os gráficos (Figura 50 e Figura 59) conclui-se que as fibras continuam a ter influência positiva quando se adiciona fibras ao mástique contendo 5% de ASIC e 5% de grafite e negativa nos restantes independentemente do tipo de corrente analisada.

4.4.4. Influência da frequência

Na Figura 60 onde são analisados os extremos do varrimento de frequências utilizado pode-se concluir que a condutibilidade aumenta com o aumento da frequência, pois para frequências mais altas a resistividade ($\Omega \times \text{cm}$) diminui, o que significa que a corrente consegue passar melhor. Outra conclusão retirada da análise do gráfico é que nos mástiques que contêm ASIC, fibras, ou os dois em conjunto, essa diminuição da resistência consegue ser cerca de duas ordens de grandeza abaixo, já quando o mástique é só constituído por grafite essa diminuição já é na mesma ordem de grandeza.

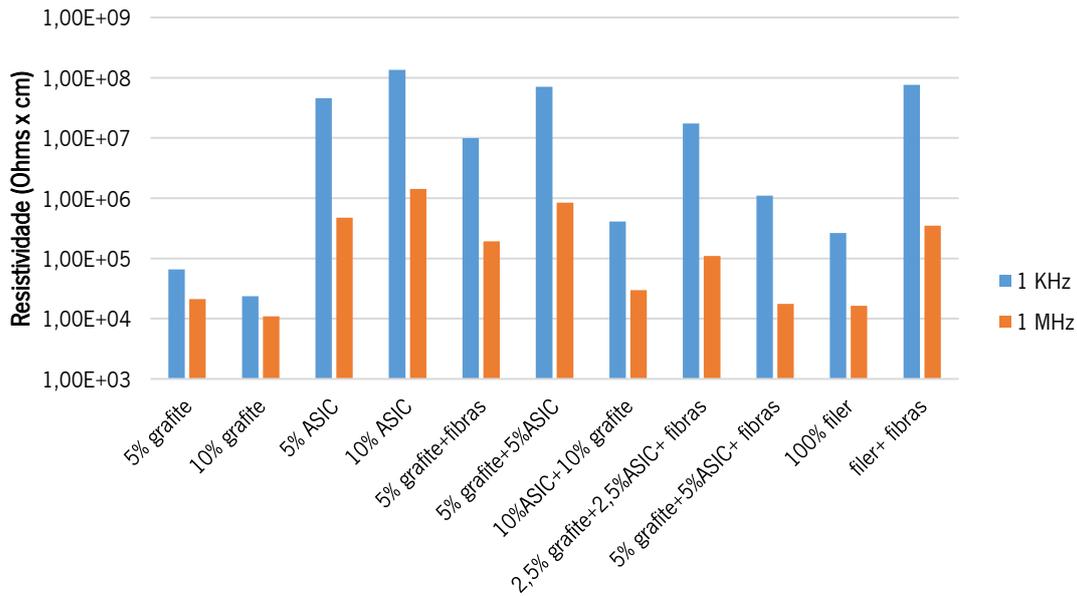


Figura 60 - Influência da frequência nos mástiques produzidos

4.4.5. Influência da voltagem

A influência da voltagem (Figura 61) foi efetuada para 10v, 20v, 30v, 40v, 50v, 60v e 64,4v e ao longo de todas as medições verificou-se que os materiais utilizados tendiam a diminuir a sua resistividade com o aumento da voltagem, com exceção do mástique com 10% de ASIC+10% de grafite, que sofre ligeiras flutuações. Na figura seguinte, para as voltagens de 10 e 60 volts, observa-se que o mástique contendo 2,5% de grafite + 2,5% ASIC + fibras é o que verifica maior redução, os restantes diminuem todos em percentagens muito semelhantes, excetuando o mástique contendo 10% de ASIC + 10% de grafite que sofre um ligeiro aumento na sua resistividade, passando de $1,22 \times 10^5$ para $1,63 \times 10^5 \Omega \times \text{cm}$.

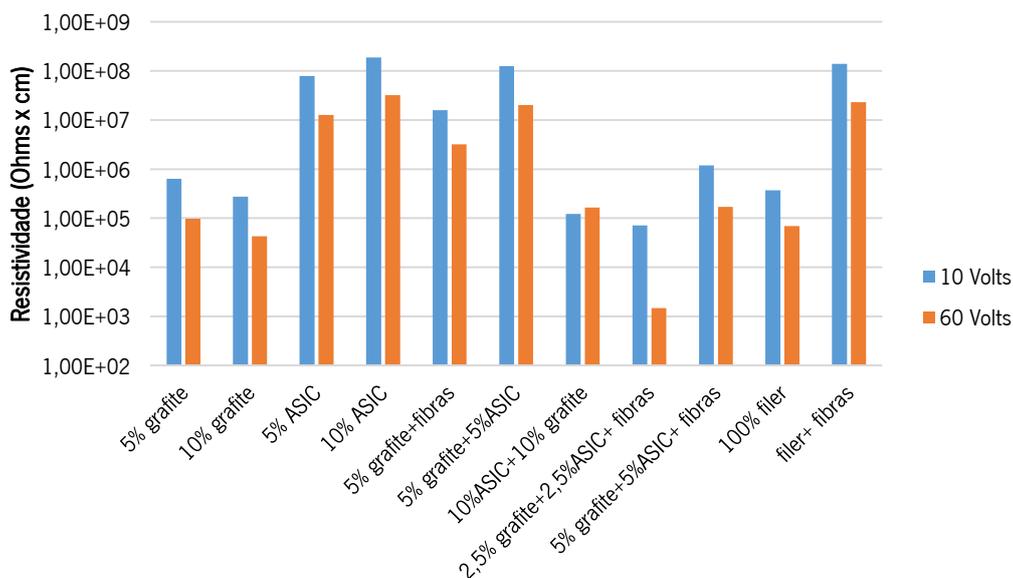


Figura 61- Influência da voltagem na resistividade

Na Figura 62 pode-se comprovar as ligeiras flutuações na resistividade do mástique com 10% grafite + 10% ASIC com o aumento da voltagem.

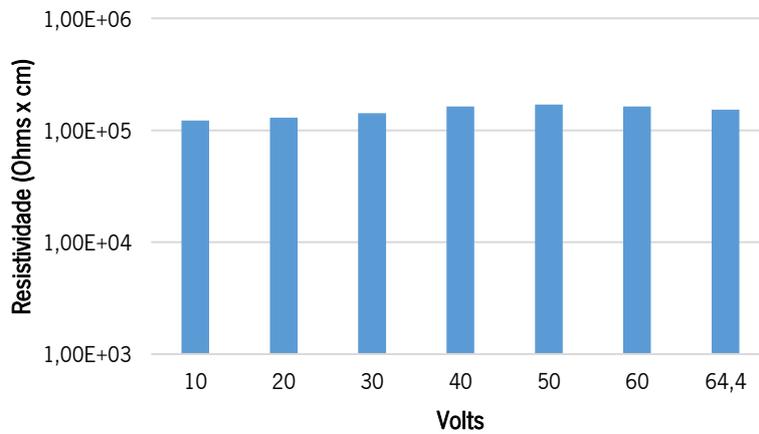


Figura 62 - Influência da voltagem no mástique contendo 10% grafite+10% ASIC

4.4.6. Influência da temperatura do provete

Nesta secção serão analisados os efeitos da temperatura na condutividade (Figura 63). Para isso é feita a comparação entre as temperaturas de 5°C e de 20°C. Da análise exaustiva dos dados observou-se que todas as resistividades ($\Omega \times \text{cm}$) descem com o aumento da temperatura exceto no mástique com 5% de grafite + 5% de ASIC para a frequência de 1KHz. Este comportamento de aumento ou diminuição da resistividade com a variação da temperatura tem a ver com a movimentação dos eletrões e se o material é condutor ou isolante.

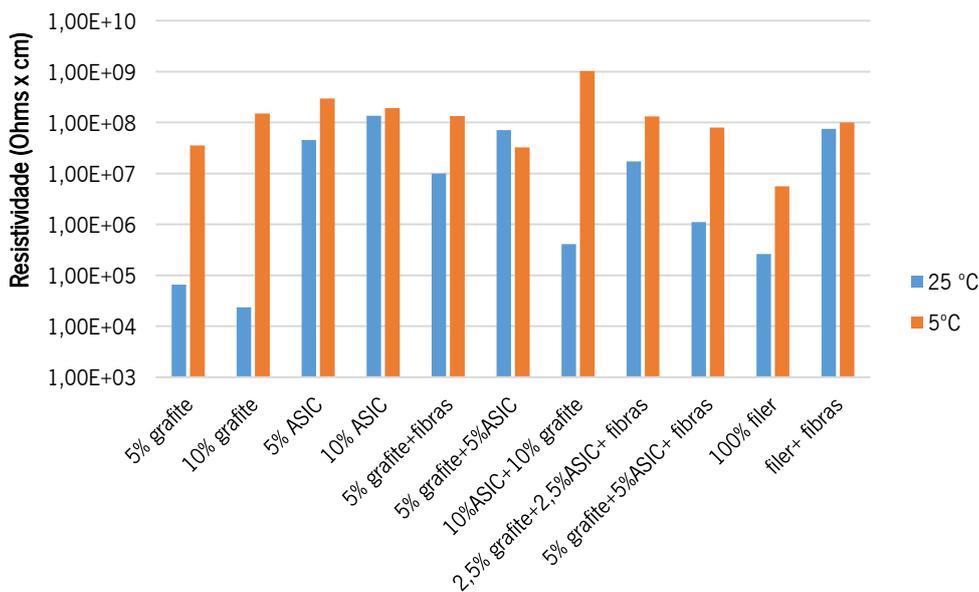


Figura 63 - Influência da temperatura para a frequência de 1 KHz

Analisando a Figura 64 para a frequência de 1MHz verifica-se que todas as variáveis em estudo diminuem a resistividade com o aumento da temperatura, com exceção do mástique com 10% de ASIC (que aumenta ligeiramente) e o do filer + fibras (que tem uma ligeira diminuição).

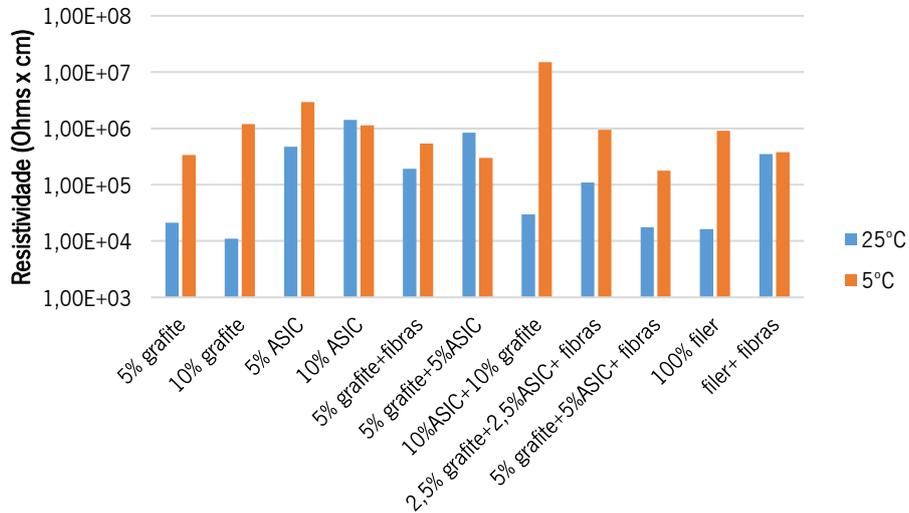


Figura 64 - Influência da temperatura para a frequência de 1 MHz

Na Figura 65 apresentam-se os resultados obtidos para os mástiques contendo fibras, 10% de ASIC e 5% de grafite em função da temperatura e da frequência.

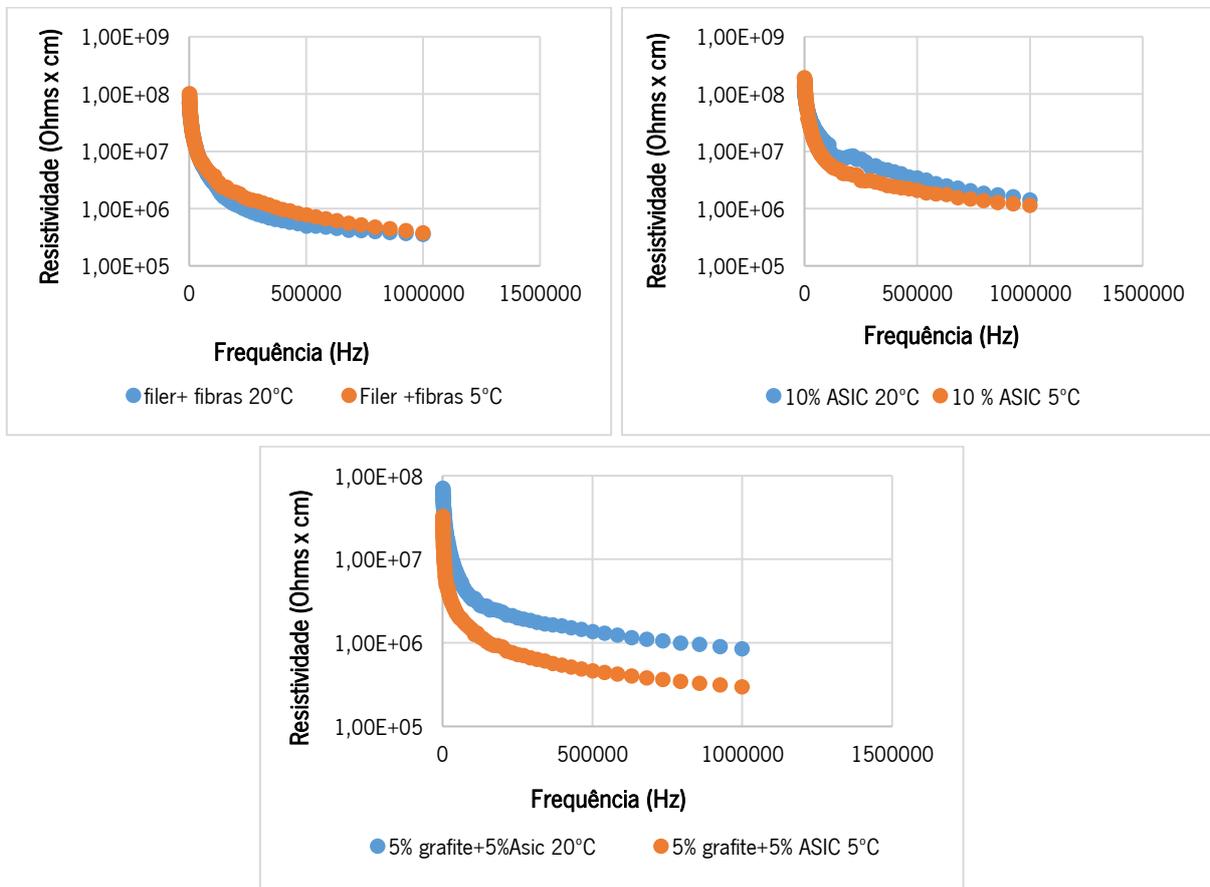


Figura 65 - Comportamento dos mástiques perante diferentes temperaturas

4.4.7. *Análise da temperatura do provete quando sujeito a passagem de corrente*

Quando se fez passar uma corrente com uma diferença de potencial de 30 volts durante 5 minutos não se notou deformações em nenhum dos provetes, e só o mástique contendo 10% de ASIC aumentou a sua temperatura, cuja medição foi realizada com uma câmara termográfica (Figura 66).



Figura 66 - Verificação do aquecimento dos provetes

Nas imagens da Figura 67 pode-se verificar que o mástique que contém 10% de ASIC aumentou em 1°C a sua temperatura quando se fez passar 30 volts durante 5 minutos.

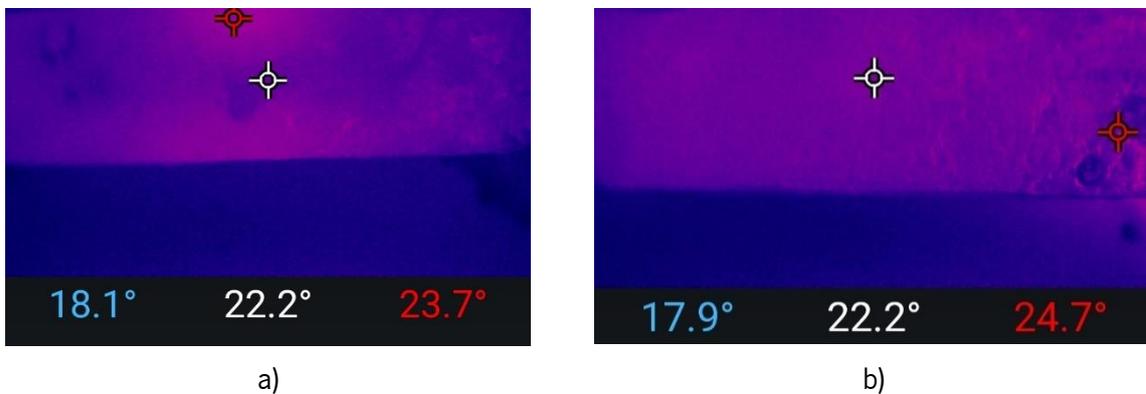


Figura 67 - Aquecimento registado no mástique que contém 10% de ASIC: a) t= 0 min; b) t=5 min

4.4.8. *Análise comparativa da resistividade dos mástiques e de misturas betuminosas*

Neste subcapítulo serão comparadas as resistividades dos mástiques com a mistura betuminosa de referência AC14 e com a mistura betuminosas com agregados de ASIC e posteriormente serão comparadas estas duas misturas com uma mistura AC14 e de ASIC em que se substituiu 10% do material fino por grafite. Esta opção de escolha de substituir 10% do material fino por grafite foi tida em conta depois da análise dos resultados dos mástiques e de se concluir que esta opção é a que traz resultados mais promissores. No entanto, esta vai ser confirmada ou refutada mais adiante. De seguida são

mostrados alguns gráficos onde se consegue ver que alguns mástiques desenvolvidos têm comportamentos idênticos às duas misturas betuminosas analisadas.

Comparação dos mástiques com as misturas de referência

Os gráficos abaixo mostram a comparação entre os mástiques e as misturas de referência para a corrente alternada. No que concerne a mistura de ASIC (Figura 68), os mástiques estudados 5% de grafite + fibras, filer + fibras e 2,5% grafite + 2,5 % ASIC + fibras têm um comportamento bastante idêntico ao dessa mistura, sendo que o mástique produzido apenas com filer + fibras se começa afastar das curvas de referência a partir dos 400 kHz, acabando por ter uma resistividade superior.

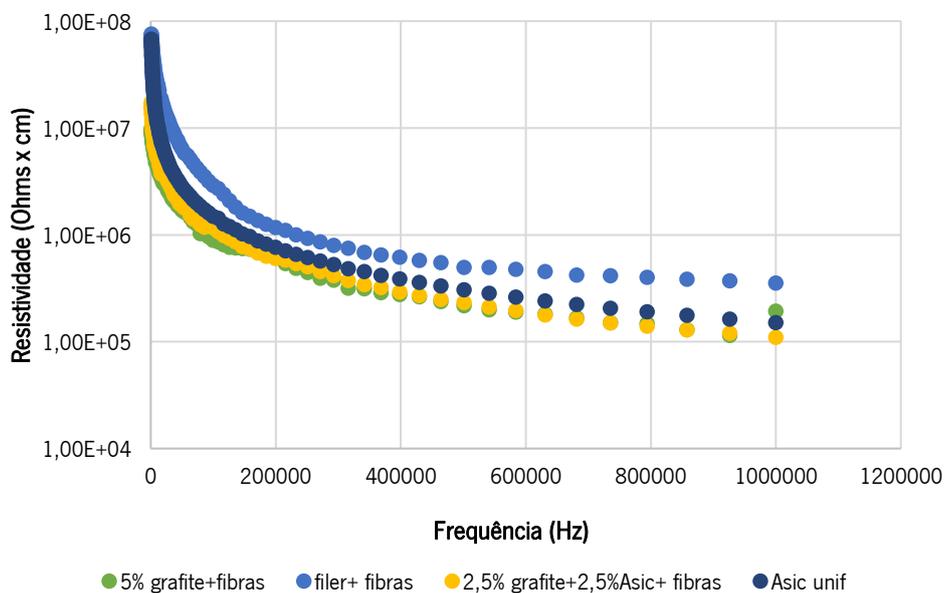


Figura 68 - Mástiques com comportamento idêntico à mistura de referência ASIC

Já na mistura AC14 (Figura 69) os que tem o comportamento idêntico são o mástique que inclui 5% de ASIC e o mástique que contém a mesma percentagem de grafite e ASIC (5%). Se o mástique que contém 5% de ASIC para frequência mais baixas tem um comportamento similar ao da mistura AC14, a partir dos 600 kHz essa semelhança deixa de ser tão perceptível, o mástique começa afastar-se da curva de referência acabando depois por ter uma resistividade inferior dos 600 kHz até ao 1 MHz. Já o mástique com 5% de grafite e 5% de ASIC passa a ter um comportamento mais próximo para frequências a partir de 400 kHz.

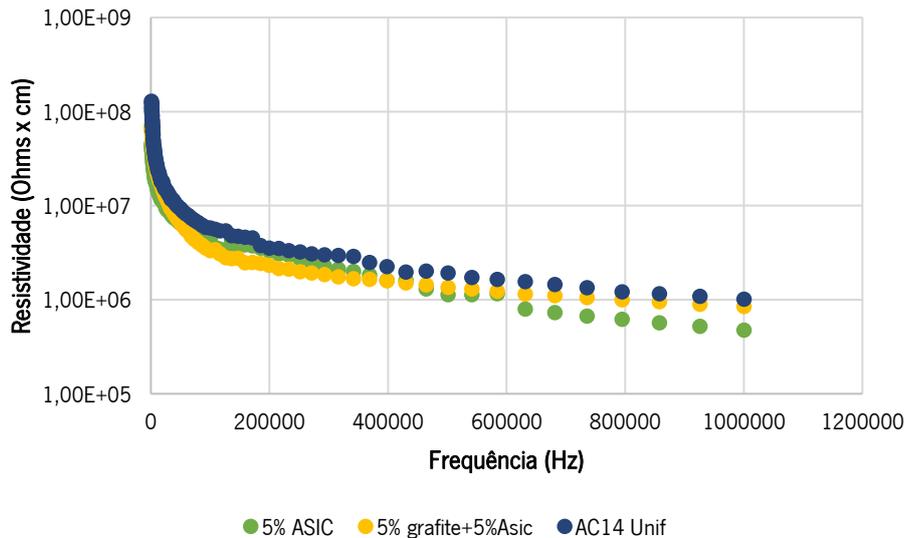


Figura 69 - Mástiques com comportamento idêntico à mistura referência AC14

Comparação entre as misturas de referência

De seguida são comparadas as misturas AC14 e ASIC para corrente alternada e corrente contínua. Na corrente alternada (Figura 70) é bastante perceptível que ao longo das frequências utilizadas durante o ensaio (1kHz até 1MHz) a mistura de ASIC apresenta menor resistividade ($\Omega \times \text{cm}$), ou seja, é mais fácil a corrente atravessar o material. No entanto, para frequências mais baixas, perto do 1kHz o comportamento das duas misturas é muito parecido.

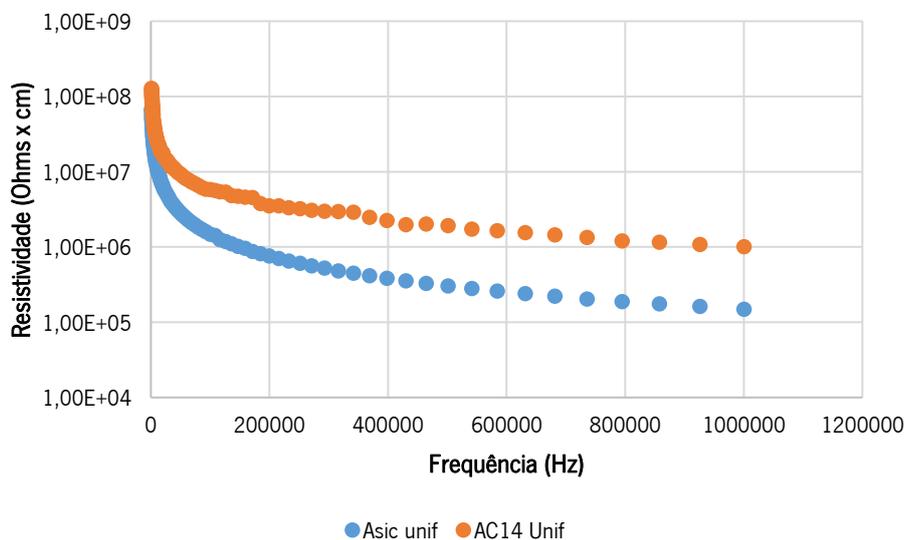


Figura 70 - Comparação das misturas de referência para corrente alternada

Se na corrente alternada a diferença de resistividades entre as misturas era perceptível, já na corrente contínua essa diferença é quase nula (Figura 71), pelo que se pode concluir que a mistura de ASIC apresenta melhor comportamento à passagem da corrente elétrica quando é submetida a corrente alternada.

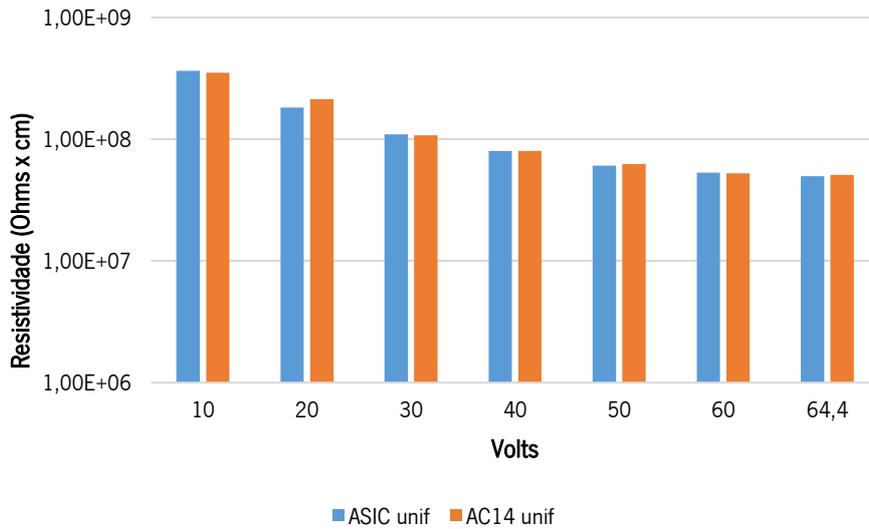


Figura 71 - Comparação das misturas de referência para corrente continua

Comparação das misturas de referência com as misturas contendo 10% dos finos substituídos por grafite

Na Figura 72 é possível observar que a introdução de 10% de grafite na mistura AC 14 tem uma influência positiva pois ao longo de todas as frequências analisadas consegue ter uma resistividade inferior à da mistura convencional.

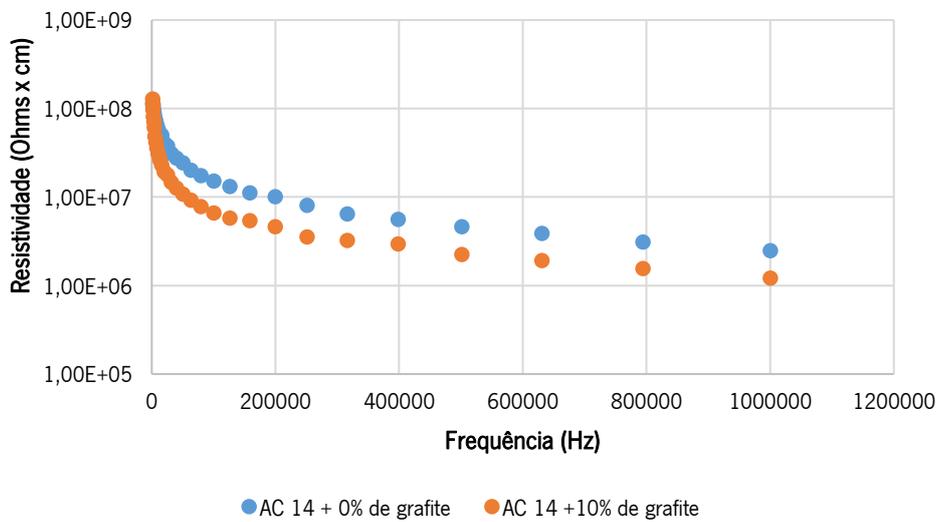


Figura 72 - Influência de 10% de grafite na mistura AC 14

De seguida (Figura 73) apresenta-se os resultados medidos entre as misturas com ASIC, podendo observar-se o mesmo efeito de redução da resistividade quando se incorpora os 10% de grafite.

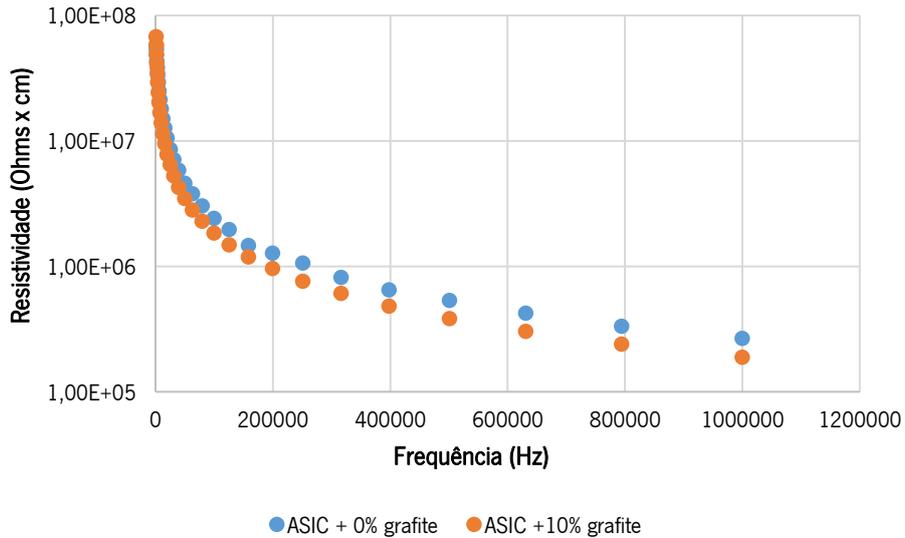


Figura 73 - Influência de 10% de grafite na mistura de ASIC

De entre as quatro misturas estudadas a que combina a introdução de grafite com os agregados de ASIC é aquela que apresenta a menor resistividade ao longo de todas as voltagens analisadas, como se pode observar pela análise da Figura 74.

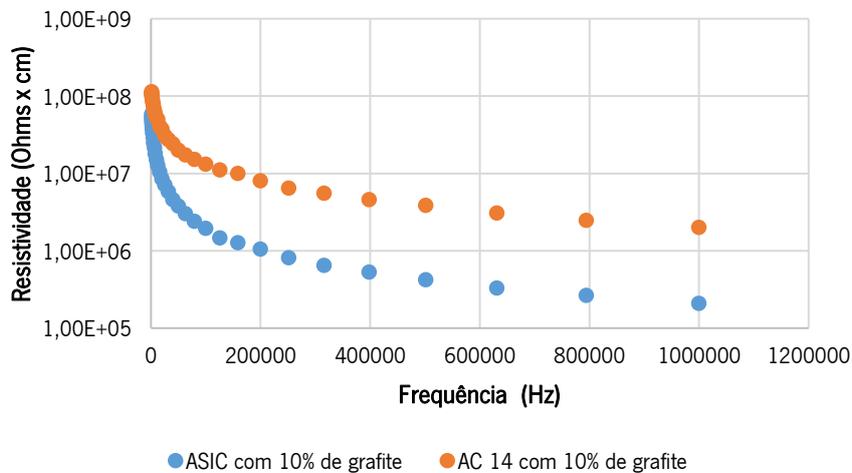


Figura 74 - Comparação entre as mistura de ASIC e AC 14 contendo grafite

Nos dois gráficos apresentados na Figura 75 e na Figura 76, compara-se o comportamento das misturas de referência com as misturas contendo grafite em corrente contínua.

Quer para a mistura de controlo AC14, quer para a mistura com agregados de ASIC verifica-se um efeito positivo da adição de grafite às misturas, pois a sua resistividade diminui ao longo de todas as voltagens analisadas.

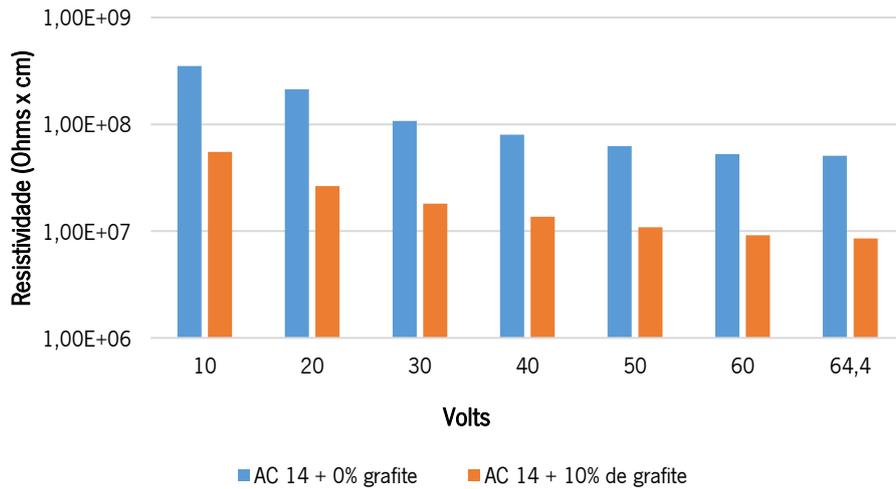


Figura 75 - Comparação entre a mistura AC 14 com e sem grafite em corrente contínua

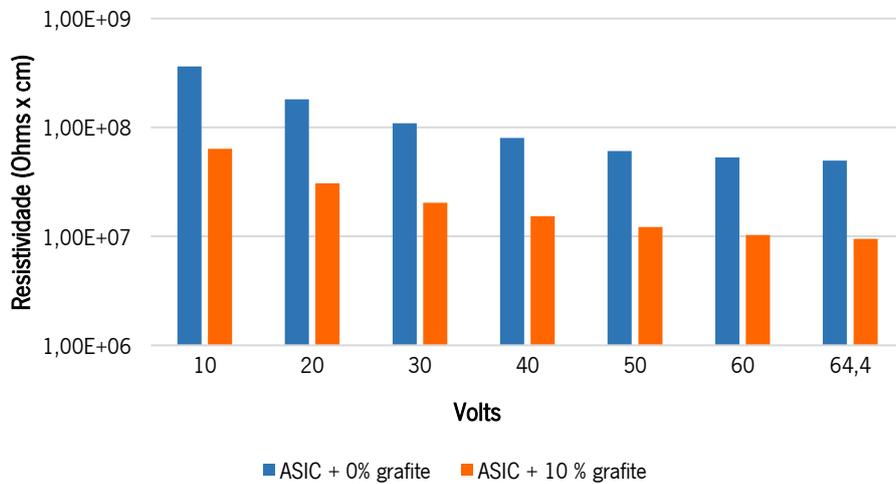


Figura 76 - Comparação entre a mistura ASIC com e sem grafite em corrente contínua

Quando se compara as misturas de ASIC e AC14 com grafite em corrente continua (Figura 77) verifica-se que a mistura AC 14 apresenta uma ligeira diminuição da resistência, o que equivale a um ligeiro aumento da condutividade da mistura face à mistura com agregados de ASIC.

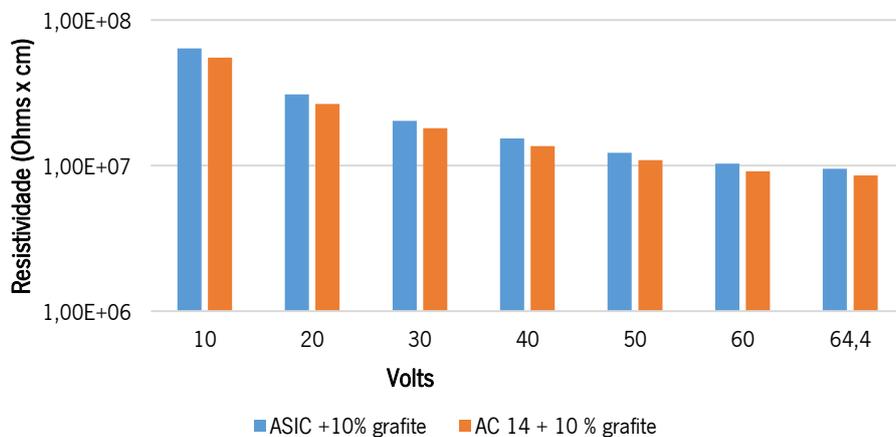


Figura 77 - Comparação entre a mistura AC 14 e ASIC ambas com grafite em corrente contínua

Na Figura 78 pode-se verificar que a condutibilidade da mistura AC 14 contendo grafite é melhorada quando se aplica voltagens mais baixas (em vez de 5 volts aplica-se 1 volt), ficando equivalente à mistura de ASIC com grafite, quando a esta se aplicam 5 volts. Para a mistura de ASIC também se verifica uma alteração no comportamento quando se aplica diferentes voltagens, mas no sentido contrário. De referir que estas voltagens se referem a corrente alternada.

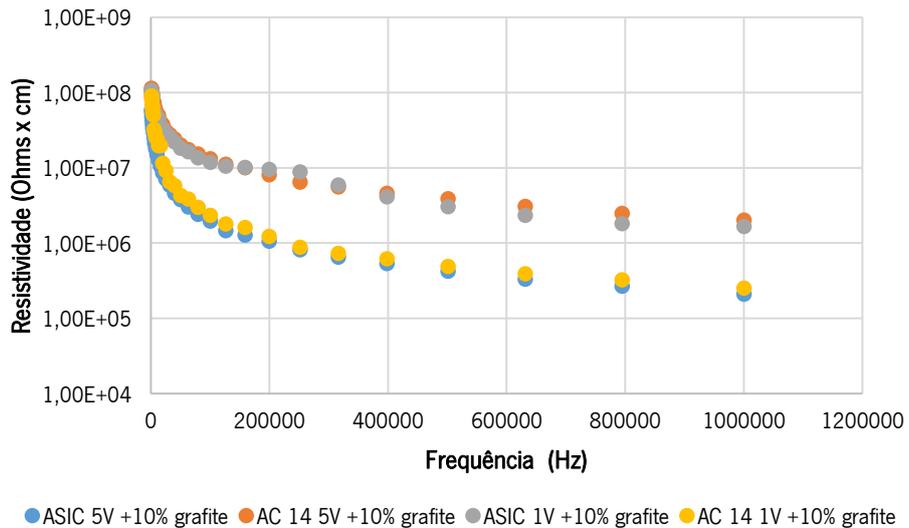


Figura 78 - Diferença de comportamentos na resistividade quando aplicadas diferentes voltagens em corrente alternada

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. CONCLUSÕES

Esta dissertação tinha como objetivo primordial o estudo da inclusão de resíduos da construção e demolição ou provenientes de outras indústrias aos quais foram adicionados materiais com propriedades condutivas, de forma a dotar os pavimentos rodoviários de propriedades sensitivas.

Depois de uma extensa revisão da literatura, deu-se início a uma campanha experimental, em que foram produzidos 11 mástiques com a razão betume-filer de 1:1 em peso. Estes mástiques continham diferentes percentagens dos materiais que se consideravam ter propriedades condutivas, nomeadamente, a grafite, o pó de ASIC e as fibras metálicas. Durante os trabalhos de laboratório, teve-se alguma dificuldade em garantir a homogeneização da dispersão das fibras no betume para os mástiques que incluem fibras, e como o betume não é um material condutivo é necessário que as fibras fiquem bem dispersas para se garantir a formação de “pontes”, o que permite que exista continuidade da condutividade da corrente elétrica ao longo de todo o provete.

De seguida foram analisados os resultados de resistividade elétrica dos mástiques produzidos e selecionou-se o que apresentou os menores valores de resistividade para a fase seguinte, na qual se produziram 4 misturas betuminosas, uma com agregados convencionais, outra com agregados de ASIC e material fresado e as outras duas com composição idêntica às primeiras, mas em que se substituiu uma parte do filer por um material com propriedades condutivas (grafite).

Neste trabalho analisou-se também as propriedades do betume e concluiu-se que este cumpria com os requisitos para a sua classe 35/50.

Quanto aos ensaios de resistividade conclui-se que o pó de ASIC tem uma reduzida condutividade da corrente elétrica, que a temperatura a que o provete está quando é sujeito ao ensaio tem influência no seu comportamento em relação à condutividade. Alguns provetes aumentaram a sua resistividade elétrica e outros diminuíram com o aumento da temperatura do provete, isto deve-se ao facto da mistura ter um coeficiente térmico positivo, o que leva ao aumento da sua resistividade com o aumento da temperatura, ou então um coeficiente térmico negativo que que a resistividade diminui com o aumento da temperatura. O tipo de corrente, alternada ou contínua produz diferentes efeitos nos mástiques estudados, à exceção do pó de ASIC, que não altera a sua resistividade com os diferentes tipo de

corrente. Deste estudo conclui-se que a grafite tem um efeito positivo na redução da resistividade dos materiais. No entanto, não se conseguiu chegar a resultados perto dos da literatura.

Quando se analisou o aquecimento dos provetes durante a passagem de corrente, com recurso a uma camara termográfica, verificou-se que esse aquecimento foi praticamente nulo. Isto pode dever-se ao facto de se ter aplicado uma voltagem baixa e segundo Garcia *et al* (2009) a geração de calor está diretamente relacionada com a resistividade, ou seja, altas resistividades geram um baixo aumento da temperatura, ou seja, a taxa de conversão de energia em calor é pequena.

5.2. TRABALHOS FUTUROS

Tendo em consideração os resultados e as conclusões obtidas com o presente trabalho, pode referir-se que é possível continuar a investigar a influência deste tipo de materiais condutivos no comportamento de misturas betuminosas. Assim, para além de incluir outros materiais no estudo realizado, será importante avaliar o efeito que a inclusão destes materiais pode ter no comportamento mecânico das misturas.

Adicionalmente, poderá ser interessante avaliar o efeito combinado da incorporação de vários materiais condutores em misturas betuminosas que não foi possível estudar durante esta dissertação. Também poderá ser interessante analisar a influência da presença deste tipo de materiais no aquecimento das misturas, avaliando a sua capacidade de promover a autorregeneração das mesmas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AdNormas (2019). *A reciclagem das areias de fundição*, <https://saneamentobasico.com.br/outros/geral/reciclagem-areias-fundicao/>.
- Alaka, H.A., Oyedele, L.O. (2016). High volume fly ash concrete: The practical impact of using superabundant dose of high range water reducer, *Journal of Building Engineering*, Vol. 8, pp. 81-90.
- Albano, J.F., Lindau, L.A. *Revisando as tecnologias para pesagem de veículos*.
- APA (2018a). *Gestão de Resíduos de Construção & Demolição, Sessões Regionais de Ambiente - CCCDR LVT*, Lisboa.
- APA (2018b). *Resíduos de Construção e Demolição-Resultados 2018 – Taxa de Valorização*.
- Apd (2019). *Vantagens e desvantagens do cloud computing*, <https://www.apd.pt/vantagens-e-desvantagens-do-cloud-computing/>.
- Arabzadeh, A., Sassani, A., Ceylan, H., Kim, S., Gopalakrishnan, K., Taylor, P.C. (2019). Comparison between cement paste and asphalt mastic modified by carbonaceous materials: Electrical and thermal properties, *Construction and Building Materials*, Vol. 213, pp. 121-130.
- Arulrajah, A., Mohammadinia, A., Maghool, F., Horpibulsuk, S. (2019). Tire derived aggregates as a supplementary material with recycled demolition concrete for pavement applications, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 230, pp. 129-136.
- Austroroads (2019). *Guide to Pavement Technology Part 4D: Stabilised Materials*.
- Azevedo, A.F.F.L.C. (2002). *Betões de elevado desempenho com incorporação de cinzas volantes*, Universidade do Minho.
- Basar, H.M., Deveci Aksoy, N. (2012). The effect of waste foundry sand (WFS) as partial replacement of sand on the mechanical, leaching and micro-structural characteristics of ready-mixed concrete, *Construction and Building Materials*, Vol. 35, pp. 508-515.
- Behzadi, A. (2016). *Using Augmented and Virtual Reality Technology in the Construction Industry*.
- Borlido, D.J.A. (2017). *Indústria 4.0 – Aplicação a Sistemas de Manutenção*, Universidade do Porto.
- Bouchlaghem N., Thorpe A. , Liyanage, I.G. (1996). *Virtual Reality applications in the UK's construction industry*.
- Butera, S., Trapp, S., Astrup, T.F., Christensen, T.H. (2015). Soil retention of hexavalent chromium released from construction and demolition waste in a road-base-application scenario, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 298, pp. 361-367.
- Caputo, P., Porto, M., Angelico, R., Loise, V., Calandra, P., Oliviero Rossi, C. (2020). Bitumen and asphalt concrete modified by nanometer-sized particles: Basic concepts, the state of the art and future perspectives of the nanoscale approach, *Advances in Colloid and Interface Science*, Vol. 285, pp. 102283.

- Ceruti, A., Marzocca, P., Liverani, A., Bil, C. (2019). Maintenance in aeronautics in an Industry 4.0 context: The role of Augmented Reality and Additive Manufacturing, *Journal of Computational Design and Engineering*, Vol. 6 (4), pp. 516-526.
- Chen, K., Wang, J., Yu, B., Wu, H., Zhang, J. (2020). Critical evaluation of construction and demolition waste and associated environmental impacts: A Scientometric analysis, *Journal of Cleaner Production*.
- Chen, M.-z., Lin, J.-t., Wu, S.-p., Liu, C.-h. (2011). Utilization of recycled brick powder as alternative filler in asphalt mixture, *Construction and Building Materials*, Vol. 25 (4), pp. 1532-1536.
- Coelho, P.M.N. (2016). *Rumo à Indústria 4.0*, Universidade de Coimbra.
- Correia, A., S.Ferreira, A.Roque, A.Cavalheiro *Agregados Siderúrgicos Inertes para a Construção. Um novo material de construção*, Universidade do Minho.
- Correia, A., S.Ferreira, Roque, A., Cavalheiro, A. (2010). *Agregados Siderúrgicos Inertes para a Construção. Um novo material de construção*, Universidade do Minho.
- Costa, I., Pinheiro, L., Vilar, F., Lobo, H., Pinto, C., Vaz, A.S., Carvalho, A. (2017). Liderar a Transição - Plano de Ação para a Economia Circular em Portugal (2017-2020).
- Costa, J.O., Borges, P.H.R., dos Santos, F.A., Bezerra, A.C.S., Van den bergh, W., Blom, J. (2020). Cementitious binders and reclaimed asphalt aggregates for sustainable pavement base layers: Potential, challenges and research needs, *Construction and Building Materials*, Vol. 265, pp. 120325.
- Costa, S.D.P. (2017). *Avaliação do uso de transdutores de pressão piezoelétricos em extrusão*, universidade do minho.
- Costa, T.J.N. (2020). *Aplicação de metodologias BIM/VR no betão pré-fabricado*, Universidade do Minho.
- Cozmiuc, D., Petrisor, I. (2018). Industrie 4.0 by Siemens: Steps Made Today, *Journal of Cases on Information Technology (JCIT)*, Vol. 20 (2), pp. 30-48.
- Cugno, M., Castagnoli, R., Büchi, G. (2021). Openness to Industry 4.0 and performance: The impact of barriers and incentives, *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 168, pp. 120756.
- Cunha, C.M. (2010). *Reciclagem de Pavimentos Rodoviários Flexíveis Diferentes Tipos de Reciclagem*, Instituto Superior de Engenharia Lisboa.
- de Vries, M., de Boer, I.J.M. (2010). Comparing environmental impacts for livestock products: A review of life cycle assessments, *Livestock Science*, Vol. 128 (1), pp. 1-11.
- Deco-Proteste (2015). *Reciclar pneus*; <https://www.deco.proteste.pt/auto/automoveis/dicas/reciclar-pneus>.
- Di Graziano, A., Marchetta, V., Cafiso, S. (2020). Structural health monitoring of asphalt pavements using smart sensor networks: A comprehensive review, *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, Vol. 7 (5), pp. 639-651.
- E-Civil *Resíduos de construção e demolição*; <https://www.ecivilnet.com/dicionario/o-que-e-rcd.html>

- E-Civil *Significado de pavimento semi-rígido*; <https://www.ecivilnet.com/dicionario/o-que-e-pavimento-semi-rigido.html>.
- eCycle (2011). *De onde vêm e o que são os plásticos*; <https://www.ecycle.com.br/de-onde-vem-e-o-que-sao-os-plasticos/>.
- ENEA (2018). *Estratégia europeia sobre plásticos*; <https://enea.apambiente.pt/content/estrat%C3%A9gia-europeia-sobre-pl%C3%A1sticos?language=pt-pt>.
- Environmental, H. (2021). *ASIC agregados artificiais materiais avançados para um mundo sustentável*; <https://www.ecoasic.com/pt/>.
- Fernandes, A.C.M. (2016). *Pavimentos para estradas de baixo tráfego*, Instituto Superior Técnico Lisboa.
- Fernandes, G.F.L. (2012). *Utilização de Resíduos de Construção e Demolição como Materiais de Construção de Pavimentos Rodoviários*, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra.
- Ferreira, C.I.S. (2013). *Resíduos de construção e demolição-Índices de produção*, Universidade do Porto.
- Ferreira, S.M.R. (2010). *Comportamento mecânico e ambiental de materiais granulares - Aplicação às escórias de aciaria nacionais*, Universidade do Minho.
- Finogeev, A., Finogeev, A., Fionova, L., Lyapin, A., A.Lychagin, K. (2019). Intelligent monitoring system for smart road environment, *Journal of Industrial Information Integration*, pp. 15-20.
- Francisco, A.P.S. (2012). *Comportamento Estrutural de Pavimentos Rodoviários Flexíveis*, Instituto Politécnico de Bragança.
- Freire, N.A. (2018). *Resíduos de construção e de demolição: Redução da geração através da metodologia de P+L*, Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- Gallo, T., Santolamazza, A. (2021). Industry 4.0 and human factor: How is technology changing the role of the maintenance operator?, *Procedia Computer Science*, Vol. 180, pp. 388-393.
- Ganesh, V.A., Raut, H.K., Nair, A.S., Ramakrishna, S. (2011). A review on self-cleaning coatings, *Journal of Materials Chemistry*, Vol. 20.
- García, Á., Schlangen, E., van de Ven, M., Liu, Q. (2009). Electrical conductivity of asphalt mortar containing conductive fibers and fillers, *Construction and Building Materials*, Vol. 23 (10), pp. 3175-3181.
- Ghislain, P.M.H. (2011). *Sistema de contagem de tráfego e classificação automática de veículos, em tempo real sem fios*, Instituto Superior de Engenharia Lisboa.
- Gonçalves, P.C.M. (2007). *Betão com Agregados Reciclados- Análise comentada da Legislação Existente*, Instituto Superior Técnico de Lisboa.
- Graziani, L., Quagliarini, E., Bondioli, F., D'Orazio, M. (2014). Durability of self-cleaning TiO₂ coatings on fired clay brick façades: Effects of UV exposure and wet & dry cycles, *Building and Environment*, Vol. 71, pp. 193-203.

- Grebler, S., Fiedeler, U., Simkó, M., Gzásó, A., Nentwich, M. (2010). *Self-cleaning, dirt and water-repellent coatings on the basis of nanotechnology*, Institute of Technology Assessment of the Austrian Academy of Sciences, 20.
- Han, B., Ding, S., Yu, X. (2015). Intrinsic self-sensing concrete and structures: A review, *Measurement*, Vol. 59, pp. 110-128.
- Hou, Y., Li, Q., Zhang, C., Lu, G., Ye, Z., Chen, Y., Wang, L., Cao, D. (2021). The State-of-the-Art Review on Applications of Intrusive Sensing, Image Processing Techniques, and Machine Learning Methods in Pavement Monitoring and Analysis, *Engineering*, Vol. 7 (6), pp. 845-856.
- Huang, Y., Bird, R.N., Heidrich, O. (2007). A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 52 (1), pp. 58-73.
- InIR (2009). *Diretivas para a Conceção de Pavimentos - Critérios de Dimensionamento*.
- Iskender, E. (2016). Evaluation of mechanical properties of nano-clay modified asphalt mixtures, *Measurement*, Vol. 93, pp. 359-371.
- Jamshidi, A., Hamzah, M.O., Kurumisawa, K., Nawa, T., Samali, B. (2016a). Evaluation of sustainable technologies that upgrade the binder performance grade in asphalt pavement construction, *Materials & Design*, Vol. 95, pp. 9-20.
- Jamshidi, A., Kurumisawa, K., Nawa, T., Igarashi, T. (2016b). Performance of pavements incorporating waste glass: The current state of the art, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 64, pp. 211-236.
- Janus, M., Zając, K. (2019). Self-cleaning efficiency of nanoparticles applied on facade bricks, *Nanotechnology in Eco-efficient Construction (Second Edition)*, p. 591-618, Woodhead Publishing.
- Ji, X., Li, J., Hua, W., Hu, Y., Si, B., Chen, B. (2021). Preparation and performance of microcapsules for asphalt pavements using interfacial polymerization, *Construction and Building Materials*, Vol. 289, pp. 123179.
- Kagermann, H., Wahlster, W., Helbig, J. (2013). Recommendation for implementing the strategic initiative industrie 4.0.
- 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.
- Khairudin, A., Shahiza Shaharuddin, A., Farhan Hanafi, M., Sapawe, N. (2020). Study of self-cleaning superhydrophobic surface based on titanium dioxide nanomaterial, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 31, pp. A63-A66.
- Kinuthia, J.M., Nidzam, R.M. (2011). Towards zero industrial waste: Utilisation of brick dust waste in sustainable construction, *Waste Management*, Vol. 31 (8), pp. 1867-1878.
- Kowalski, K.J., Król, J., Radziszewski, P., Casado, R., Blanco, V., Pérez, D., Viñas, V.M., Brijse, Y., Frosch, M., Le, D.M., Wayman, M. (2016). Eco-friendly Materials for a New Concept of Asphalt Pavement, *Transportation Research Procedia*, Vol. 14, pp. 3582-3591.

- Lee, S.W., Jung, H.G., Jang, J.W., Park, D., Lee, D., Kim, I., Kim, Y., Cheong, D.Y., Hwang, K.S., Lee, G., Yoon, D.S. (2021). Graphene-based electronic textile sheet for highly sensitive detection of NO₂ and NH₃, *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 345, pp. 130361.
- Legret, M., Odie, L., Demare, D., Jullien, A. (2005). Leaching of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons from reclaimed asphalt pavement, *Water Research*, Vol. 39 (15), pp. 3675-3685.
- Lopes, G.T.F. (2016). *Exploração das possibilidades da impressão 3D na construção*, Faculdade de engenharia-Universidade do Porto.
- Loureiro, C.D.A. (2021). *Utilização de resíduos siderúrgicos como elemento potenciador de soluções de reparação de pavimentos*, Universidade do minho.
- Louzada, D.R. (2013). *Detecção e caracterização de danos estruturais através de sensores a rede Bragg e Redes Neurais Artificiais*, Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- Lu, T., Li, B., Sun, D., Hu, M., Ma, J., Sun, G. (2021). Advances in controlled release of microcapsules and promising applications in self-healing of asphalt materials, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 294, pp. 126270.
- Marcon, P., Zezulka, F., Vesely, I., Szabo, Z., Roubal, Z., Sajdl, O., Gescheidtova, E., Dohnal, P. (2017). *Communication technology for industry 4.0*, 2017 Progress In Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS), p. 1694-1697.
- Maré, F.L. (2011). *História das Infra-Estruturas Rodoviárias*, Universidade do Porto.
- Marques, B. (2013). *Monitorização da integridade de laminados de carbono/epoxy com sensores ópticos embebidos*, Universidade da Beira Interior.
- Miranda, R.F.M. (2014). *Estudo da Modificação de Betumes com Polímeros Reciclados*, Universidade do Minho.
- Monteiro, S.F. (2014). *Fibras têxteis como parte da proteção e sobrevivência militar*, Academia militar.
- Moreira, J.P.A. (2017). *Impressão 3D em medicina dentária*, Universidade de Coimbra.
- Nascimento, L.P.d. (2019). *Avaliação do impacte ambiental da utilização de resíduos em materiais de pavimentação rodoviária*, Universidade do Minho.
- Neto, S.A.D., Farias, M.M.F., Pais, J.C. (2006). Comportamento mecânico de misturas betuminosas de graduação descontínua *13^a Reunião de Pavimentação Urbana*, Maceió/AL- Brasil.
- Nwakaire, C.M., Yap, S.P., Onn, C.C., Yuen, C.W., Ibrahim, H.A. (2020). Utilisation of recycled concrete aggregates for sustainable highway pavement applications; a review, *Construction and Building Materials*, Vol. 235, pp. 117444.
- Oliveira, H.J.R. (2012). *Contributos da Nanotecnologia para a sustentabilidade dos materiais de construção*, Universidade do Minho.
- Oliveira, J.R.M., Pereira, P.A.A., Santos, L.G.P. (2011). *A importância da existência de um sistema de gestão*.

- Omran, A., Tagnit-Hamou, A. (2016). Performance of glass-powder concrete in field applications, *Construction and Building Materials*, Vol. 109, pp. 84-95.
- Otto, G.G., Simonin, J.-M., Piau, J.-M., Cottineau, L.-M., Chupin, O., Momm, L., Valente, A.M. (2017). Weigh-in-motion (WIM) sensor response model using pavement stress and deflection, *Construction and Building Materials*, Vol. 156, pp. 83-90.
- Pacheco, A.E.L.e. (2012). *Estudo da viabilidade da utilização de escórias de aciaria (ASIC) em betão denso*, Universidade do Porto.
- Pacheco, E. (2004). *Alteração das acessibilidades e dinâmicas territoriais na Região Norte: expectativas, intervenções e resultantes*, Universidade do Porto.
- Packaging (2021). *Taxa de reciclagem de vidro situa-se nos 76% na Europa*.
- Pais, J.C., Pereira, P.A.A., Azevedo, M.C.M. (2000). 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. 627-637.
- Pais, J.C., Pereira, P.A.A., Gardete, D., Minhoto, M.J.C. (2008). O comportamento de misturas com betume modificado com borracha, *5º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia*, Maputo-Moçambique.
- Palha, C.A.O.F. (2012). *Desempenho de materiais piezoeléctricos para aplicações rodoviárias*, Universidade do Minho.
- 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.
- Pereira, P.M., Vieira, C.S. (2013). *Resíduos de Construção e Demolição. Um estado de arte visando a sua valorização em Trabalhos Geotécnicos*, Universidade do Porto.
- Perera, S., Arulrajah, A., Wong, Y.C., Horpibulsuk, S., Maghool, F. (2019). Utilizing recycled PET blends with demolition wastes as construction materials, *Construction and Building Materials*, Vol. 221, pp. 200-209.
- Plati, C. (2019). Sustainability factors in pavement materials, design, and preservation strategies: A literature review, *Construction and Building Materials*, Vol. 211, pp. 539-555.
- Porter, M.E., Heppelmann, J.E. (2015). How smart connected products are transforming companies, *Harvard Business Review*.
- Portugal, E.d. (2014). *Caderno de Encargos Tipo de Obra- Pavimentação- Características dos materiais*.
- Portugal, I.d. (2021). <https://www.infraestruturasdeportugal.pt/pt-pt/rede-rodoviaria-ip>.
- Pwc (2016). *Insustry 4.0 : Building the digital enterprise*.
- Rasiya, G., Shukla, A., Saran, K. (2021). Additive Manufacturing-A Review, *Materials Today: Proceedings*.

- Reis, N.F.d.S. (2009). *Análise Estrutural de Pavimentos Rodoviários Aplicação a um Pavimento Reforçado com Malha de Aço*, Instituto Superior Técnico de Lisboa.
- Ribeiro, J.M. (2017). *O Conceito da Indústria 4.0 na Confeção: Análise e Implementação*.
- Ribeiro, R.M.C.d.A.M. (2014). *Reutilização de misturas betuminosas fresadas em pavimentos rodoviários*, Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- Rodrigues, C.F.G. (2011a). *Monitorização de estruturas de engenharia civil apoiada em soluções de fibra óptica*, Faculdade de engenharia da universidade do Porto.
- Rodrigues, D.M.P. (2015). *Caracterização da Fundação de Pavimentos com os resultados do ensaio com Penetrometro Dinâmico Ligeiro*, Instituto Politécnico de Bragança.
- Rodrigues, J.L.A. (2011b). *Conceção de Pavimentos Rígidos*, Universidade do Porto.
- Rodrigues, J.M. (2017). *Desenvolvimento de metodologias para avaliação de nanomateriais incorporados em diferentes substratos têxteis*, Universidade do Minho.
- Rodrigues, R.M.d.S. (2012). *Análise da Aplicação do Betume Modificado com Borracha em Portugal*, Universidade Nova Lisboa.
- Rogers, C.A. (1993). Intelligent Material Systems – The Dawn of a New Materials Age, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 4 (1), pp. 4-12.
- Sampaio, J.M.S. (2012). *Influência das propriedades das misturas betuminosas na resistência ao rolamento*, Universidade do Minho.
- Sánchez, J.A.S., Morcillo, A.B., Siller, A.G., Barreno, I.P., Victorio, M.d.M.C., Miguel, R.M.S. (2006). *Manual de pavimentação -Cepsa*.
- Santos, B., Alberto, A., Lima, T., Santos, B. (2018). Indústria 4.0 : Desafios e oportunidades, *Revista Produção e Desenvolvimento*, Vol. 4.
- Santos, J.M.R.d. (2010). *Materiais Utilizados na Construção de Pavimentos Rodoviários*, Universidade de Aveiro.
- Santos, R.C. (2018). *Proposta de modelo de avaliação de maturidade da Indústria 4.0*, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra.
- Saride, S., Avirneni, D., Challapalli, S. (2016). Micro-mechanical interaction of activated fly ash mortar and reclaimed asphalt pavement materials, *Construction and Building Materials*, Vol. 123, pp. 424-435.
- Semeraro, C., Lezoche, M., Panetto, H., Dassisti, M. (2021). Digital twin paradigm: A systematic literature review, *Computers in Industry*, Vol. 130, pp. 103469.
- Shengli, W. (2021). Is Human Digital Twin possible?, *Computer Methods and Programs in Biomedicine Update*, Vol. 1, pp. 100014.
- Shin, S.W., Qureshi, A.R., Lee, J.-Y., Yun, C.B. (2008). Piezoelectric sensor based nondestructive active monitoring of strength gain in concrete, *Smart Materials and Structures*, Vol. 17.

- Silva, A.C.P. (2020). *Exemplos de aplicação de Impressão 3D na Construção*, Faculdade de engenharia do Porto.
- Silva, G.C.A. (2021). *Topological optimization of structures produced through 3D printing of fiber reinforced cementitious materials*, Universidade do Minho.
- Silva, J.D.C. (2013). *Estudo de tintas autolimpantes e purificadoras*, Universidade do Minho.
- Silva, M.T.P. (2007). *Estudo de novas aplicações da fibra de carbono nos materiais de construção*, Universidade do Minho.
- Souza de Abreu, V.H., González Silva, P.H., Ribeiro, G., Orrico, R., Gomes, H., Perim, L. (2018). *Técnicas Heurísticas e um Branch-And-Cut para o Problema de Localização de Sensores de Tráfego com Limitações quanto ao Número de Sensores e de Faixas Observadas*.
- Su, J.-F. (2020). Self-healing pavements using microcapsules containing rejuvenator: from idea to real application, *Eco-Efficient Pavement Construction Materials*, p. 249-314, Woodhead Publishing.
- Su, J.-F., Qiu, J., Schlangen, E. (2013). Stability investigation of self-healing microcapsules containing rejuvenator for bitumen, *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 98 (6), pp. 1205-1215.
- Teodoro, N.F.G. (2011). *Contribuição para a Sustentabilidade na Construção Civil: Reciclagem e Reutilização de Materiais*, Instituto Superior Técnico Lisboa.
- Território, M.d.A.e.d.O.d. (2011). *Decreto-Lei n.º 73/2011*.
- Tian, Y., Zheng, M., Li, P., Zhang, J., Qiao, R., Cheng, C., Xu, H. (2020). Preparation and characterization of self-healing microcapsules of asphalt, *Construction and Building Materials*, Vol. 263, pp. 120174.
- Tokede, O.O., Whittaker, A., Mankaa, R., Traverso, M. (2020). Life cycle assessment of asphalt variants in infrastructures: The case of lignin in Australian road pavements, *Structures*, Vol. 25, pp. 190-199.
- Tuegel, E.J., Ingrassia, A.R., Eason, T.G., Spottswood, S.M. (2011). Reengineering Aircraft Structural Life Prediction Using a Digital Twin, *International Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 2011, pp. 154798.
- ValorPneu (2019). Relatório anual de atividades da Valorpneu.
- Vargas, P.M.R. (2013). *Aplicação de betão britado reciclado em misturas betuminosas para camadas de base*, Instituto Superior Técnico Lisboa.
- Vassiglass (2017). *Tipo de vidros*, <https://vasiglass.pt/tipos-de-vidro-caracteristicas-acessorios/>.
- Vasudevan, R., Velkennedy, R., Sekar, A.R.C., Sundarakannan, B. (2010). Utilization of Waste Polymers for Flexible Pavement and Easy Disposal of Waste Polymers, *Internacional Journal of Pavement Research and Technology*, Vol. 3, pp. 34-42.
- Viana, B.M.A. (2019). *Soluções integradas e complementares para otimizar a utilização de subprodutos industriais em pavimentação*, Universidade do Minho.
- Wang, H., Yang, J., Liao, H., Chen, X. (2016). Electrical and mechanical properties of asphalt concrete containing conductive fibers and fillers, *Construction and Building Materials*, Vol. 122, pp. 184-190.

- Woksepp, S. (2007). *Virtual Reality in Construction- Tools, Methods and Processes*, Luleå University of technology.
- Worldsteel (2021). *World Steel in figures 2021*; <https://www.worldsteel.org/media-centre/press-releases/2021/world-steel-in-figures-2021.html>.
- Yang, Q., Yin, H., He, X., Chen, F., Ali, A., Mehta, Y., Yan, B. (2020). Environmental impacts of reclaimed asphalt pavement on leaching of metals into groundwater, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 85, pp. 102415.
- Yazoghli-Marzouk, O., Vulcano-greullet, N., Cantegrit, L., Friteyre, L., Jullien, A. (2014). Recycling foundry sand in road construction–field assessment, *Construction and Building Materials*, Vol. 61, pp. 69-78.
- Yoshitake, I., Ueno, S., Ushio, Y., Arano, H., Fukumoto, S. (2016). Abrasion and skid resistance of recyclable fly ash concrete pavement made with limestone aggregate, *Construction and Building Materials*, Vol. 112, pp. 440-446.
- Zhang, J., Debendra, K.D., Peterson, R. (2009). Selection of Effective and Efficient Snow Removal and Ice Control Technologies for Cold-Region Bridges, *Civil, Environmental and Architectural Engineering*, Vol. 3 (1), pp. 1-14.
- Zhang, X.-L., Guo, Y.-D., Su, J.-F., Han, S., Wang, Y.-Y., Tan, Y.-Q. (2018). Investigating the electrothermal self-healing bituminous composite material using microcapsules containing rejuvenator with graphene/organic hybrid structure shells, *Construction and Building Materials*, Vol. 187, pp. 1158-1176.
- Zhao, H., Wu, Z., Wang, S., Zheng, J., Che, G. (2011). Concrete pavement deicing with carbon fiber heating wires, *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 65 (3), pp. 413-420.
- Zou, G., Zhang, J., Liu, X., Lin, Y., Yu, H. (2020). Design and performance of emulsified asphalt mixtures containing construction and demolition waste, *Construction and Building Materials*, Vol. 239, pp. 117846.