



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

Caracterização funcional e mecânica de um pavimento betuminoso permeável em troço experimental

(Versão final após defesa)

Tiago da Silva Santos

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil
(Ciclo de Estudos Integrado)

Orientadora: Prof. Doutora Marisa Sofia Fernandes Dinis de Almeida

Covilhã, novembro de 2018

Aos meus pais e irmão, a quem devo tudo o que sou hoje.

Agradecimentos

A presente dissertação representa o culminar de uma etapa fundamental da minha vida, etapa esta que me trouxe ensinamentos fulcrais do ponto de vista pessoal e profissional. Chegado a esta fase quero deixar alguns agradecimentos a algumas pessoas e entidades que me proporcionaram um grande apoio e, sem as quais, este trabalho não seria alcançado com êxito.

Começo por agradecer à minha orientadora, Professora Doutora Marisa Sofia Fernandes Dinis de Almeida, por todo o apoio incondicional, por toda a disponibilidade, incentivo, dedicação e extraordinária capacidade de orientação. Quero também agradecer a sua amizade e os momentos de boa disposição durante a realização desta dissertação. Todas as palavras que lhe possa dedicar serão sempre poucas para lhe agradecer tudo o que fez por mim.

À Professora Doutora Cristina Maria Sena Fael por toda a ajuda prestada durante uma parte da realização desta dissertação, pelo seu incentivo, disponibilidade, amizade e por todos os ensinamentos durante os anos que frequentei o curso de Engenharia Civil.

A todos os docentes que marcaram o meu percurso académico, pelo seu enorme contributo na minha formação.

À Universidade da Beira Interior por ter sido a minha segunda casa e por todas as condições que me disponibilizou para a minha formação académica.

À Universidade do Minho pela ajuda na realização dos ensaios que serviram de base na presente dissertação.

Aos Srs. Albino, Félix e Luciano, técnicos do Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura, pela ajuda e boa disposição demonstrada na realização dos ensaios, mas também, pelos bons momentos partilhados ao longo destes anos.

Aos meus amigos, Rúben Marques, Diogo Coelho e Luís Moreira, por toda a amizade, lealdade e partilha de bons momentos durante o percurso académico.

Aos meus amigos, Tiago Duarte, Raquel Mouro e Jorge Vicente, por todos os momentos fantásticos que me proporcionaram durante estes anos.

Aos meus amigos, Diogo Macedo e Andreia Macedo, por toda a ajuda e amizade demonstrada durante o percurso académico.

À minha colega e amiga, Márcia Afonso, pela grande ajuda, amizade e apoio incondicional durante o desenvolvimento desta dissertação, sem ela nada seria possível.

À minha prima, Ana Silva, pelo seu companheirismo, amizade e grandes momentos de felicidade partilhados ao longo da vida.

À minha cunhada e aos meus sobrinhos, por todos os bons momentos, grande amizade e carinho demonstrados ao longo dos anos.

Ao meu irmão, o melhor amigo e companheiro que se pode desejar. Um grande obrigado por todos os ensinamentos e encorajamento ao longo da minha vida. Será sempre um exemplo de determinação que seguirei.

Aos meus pais, que são a razão de eu ter conseguido terminar esta etapa da minha vida com sucesso. Eles são a principal fonte de inspiração e carinho que me leva a atingir todos os meus objetivos. Um muito obrigado por todo o esforço e dedicação que me prestam todos os dias da minha vida.

A toda a minha família por todo o apoio e carinho.

À minha namorada, por todo o apoio, motivação, carinho, compreensão e ajuda. Agradeço-lhe toda a paciência que teve comigo durante a realização desta dissertação e todo o carinho que ofereceu ao longo destes anos.

A todos um muito obrigado.

Resumo

O crescimento da população em meio urbano leva a um aumento do número de habitações e, conseqüentemente, a uma ocupação excessiva dos solos. Esta ocupação faz com que aumentem as áreas impermeáveis levando ao aumento do escoamento superficial e respetiva diminuição da taxa de infiltração deste. Neste sentido, é necessário que o Homem crie soluções eficazes para resolver esta problemática podendo estas passar pela introdução de novas infraestruturas, os pavimentos permeáveis.

Esta dissertação pretende viabilizar a utilização dos pavimentos permeáveis através de um estudo experimental realizado do ponto de vista funcional e mecânico e assim, caracterizar o comportamento dos pavimentos permeáveis com uma dupla camada de mistura betuminosa drenante.

Nesta dissertação apresentam-se alguns trabalhos de outros autores sobre a capacidade de infiltração em pavimentos permeáveis, bem como sobre o tratamento de dados do ensaio do Defletómetro de Impacto em pavimentos convencionais.

Neste estudo mostram-se ainda os resultados obtidos pelos três ensaios realizados num troço experimental desenvolvido no concelho da Covilhã. Os ensaios realizados permitem avaliar a macrotextura, o atrito e a capacidade de carga do pavimento e denominam-se, respetivamente, de ensaio da Mancha de Areia, Pêndulo Britânico e Defletómetro de Impacto.

No que concerne aos ensaios de caracterização funcional, o ensaio da Mancha de Areia e do Pêndulo Britânico, os resultados obtidos são cumpridores dos valores mínimos exigidos pelo Caderno de Encargos Tipo Obra das Infraestruturas de Portugal, ex-Estradas de Portugal. Relativamente ao ensaio de caracterização mecânica realizado, o ensaio do Defletómetro de Impacto, concluiu-se após a retro-análise que os módulos de deformabilidade são inferiores aos dos pavimentos tradicionais.

Palavras-chave

FWD; Mancha de Areia; Pavimentos Permeáveis; Pêndulo Britânico

Abstract

Population growth in urban áreas leads to an increase in the number of habitations and, consequently, to an excessive land occupation. This occupation increases the impermeable areas, leading to an increase in surface runoff and a decrease in infiltration rate. Thus, it is necessary that humans creates effective solutions to solve this problem, which may involve the introduction of new infrastructures like permeable pavements.

This master thesis has the objective to make feasible the use of permeable pavements through an experimental study carried out from the functional and mechanical point of view and thus, characterize the behaviour of the permeable pavements with a double layer porous asphalt.

In this master thesis some researches of other authors about infiltration rate in permeable pavements are shown, as well as some works about the Falling Weight Deflectometer data treatment in conventional pavements.

This study also shows the results obtained by the tree tests performed in an experimental pavement developed in Covilhã. The tests allows the evaluation of the macrotexture, the friction and the load capacity of the pavement through of Mean Texture Depth, British Pendulum and Faliing Weight Deflectometer, respectively.

Concerning to the functional characterization tests, the Mean Texture Depth and British Pendulum, the results obtained are in compliance with the minimum values required by Caderno de Encargos Tipo Obra das Infraestruturas de Portugal, Ex Estradas de Portugal. In relation to the mechanical characterization test carried out, the Faliing Weight Defloctometer test, we can see that after retro-analysis procedure, the deformability modules are smaller than those for tradicional pavements.

Keywords:

FWD; Mean Texture Depth; Permeable pavements; British Pendulum;

Índice

Capítulo 1	1
1.1 Enquadramento temático	1
1.2. Objetivos do estudo	1
1.3 Organização do trabalho	2
Capítulo 2 – Estado de Arte sobre Pavimentos Permeáveis	3
2.1. Contextualização da utilização dos pavimentos permeáveis	3
2.2. Limitações e Benefícios	4
2.3. Estrutura dos pavimentos permeáveis	5
2.3.1. Camada de desgaste	5
2.3.2. Camada de base e sub-base	6
2.4. Sistemas de infiltração de pavimentos permeáveis	6
2.4.1. Sistema de infiltração total	8
2.4.2. Sistema de infiltração parcial	8
2.4.3. Sistema sem infiltração	9
2.5. Estudos de outros autores sobre os pavimentos permeáveis	10
2.5.1. Kumar <i>et al.</i> , (2016)	10
2.5.2. Drake <i>et al.</i> , (2014)	11
2.5.3. Trandem (2016)	13
Capítulo 3 - Desempenho Funcional e Mecânico dos Pavimentos	15
3.1. Introdução	15
3.2 Textura	16
3.2.1 Mancha de areia	18
3.2.2 Ensaios tecnológicos com equipamento a laser	22
3.2.2.1 Circular Texture Meter	22
3.2.2.2 Rugo	23
3.3 Atrito	23
3.3.1 Pêndulo Britânico	26
3.3.2 Grip-Tester	27
3.3.3 SCRIM	28
3.4 Regularidade	30
3.4.1 Regularidade Transversal	30
3.4.1.1 Régua	31

3.4.2 Regularidade Longitudinal.....	32
3.4.2.1 Perfilômetro a laser.....	34
3.5 Desempenho mecânico dos pavimentos	35
3.5.1 Equipamentos de ensaio	36
3.5.1.1 Viga Benkelman.....	37
3.5.1.2 Defletógrafo de Lacroix.....	38
3.5.1.3 Defletómetro de impacto (Falling Weight Deflectometer – FWD)	39
3.5.2 Processo de retro-análise.....	40
3.5.2.1 Módulos semente.....	41
3.5.2.2 Espessura das camadas	41
3.5.2.3 Camadas rígidas.....	42
3.5.2.4 Relação entre as camadas	42
3.5.2.5. Temperatura.....	43
3.5.3. Metodologias existentes	44
3.5.4. Estudos realizados com recurso ao defletómetro de impacto	47
Capítulo 4 - Trabalho Experimental.....	51
4.1. Descrição do local do trabalho experimental.....	51
4.2. Ensaio da Mancha de Areia	52
4.3. Pêndulo Britânico	54
4.4. Ensaio do Defletómetro de impacto - FWD	56
4.4.1. Deflexões obtidas e normalização.....	56
4.4.2. Tratamento dos resultados do ensaio FWD	58
Capítulo 5 - Considerações finais	69
5.1 Conclusões.....	69
5.2 Trabalhos futuros	70
Referências Bibliográficas	71
Acervo Normativo	75

Índice de figuras

Figura 2.1-Modelo da estrutura de um pavimento permeável (adaptado Trandem,2016).....	5
Figura 2.2 - Camadas do pavimento (adaptado de Tenreiro, 2016)	6
Figura 2.3 - Sistema de infiltração total (adaptado de Tenreiro, 2016)	8
Figura 2.4 - Sistema de infiltração parcial (Adaptado de Tenreiro, 2016)	9
Figura 2.5 - Sistema sem infiltração (Adaptado de Tenreiro, 2016)	9
Figura 2.6 - Percentagem da taxa de infiltração inicial para os três pavimentos durante os 4 anos de estudo (Kumar <i>et al.</i> , 2016)	11
Figura 2.7 - Percentagem da taxa de infiltração inicial para os três pavimentos durante os 3 anos de estudo (Drake et al. 2016)	12
Figura 2.8 - Diminuição da percentagem de água infiltrada ao longo do tempo (Adaptado de Trandem (2016)	14
Figura 3.1 - Gama de valores da textura (Menezes, 2008)	16
Figura 3.2 - Profundidade média da textura de uma superfície de um pavimento (Duarte, 2011)	18
Figura 3.3 - Material necessário para o ensaio da mancha de areia (Relhas, 2012)	19
Figura 3.4 - Realização do ensaio Mancha de areia no troço experimental	21
Figura 3.5 - Ctmeter (à esquerda) e zona de contacto do Ctmeter com o pavimento (à direita).....	22
Figura 3.6 - Rugo (À esquerda) e emissora de raios laser (À direita) (LCPC, 2004)	23
Figura 3.7 - Evolução do CAT num curto período de tempo (Pereira e Miranda, 1999)	24
Figura 3.8 - Evolução do CAT com o tráfego total acumulado, TTA (10 ⁶) (Pereira e Miranda, 1999)	25
Figura 3.9 - Pêndulo Britânico nos ensaios realizados no troço experimental	26
Figura 3.10 - Grip-Tester num ensaio (à esquerda) (EASA, 2010) e mecanismo do Grip-Tester (à direita) (Menezes, 2008)	27
Figura 3.11 - Equipamento SCRIM (à esquerda) e esquema do SCRIM (à direita) (Coutinho,2011; Alves, 2007).....	29
Figura 3.12 - Ensaio da régua para avaliação da irregularidade transversal (Maia, 2012)	31

Figura 3.13 - Perfilómetro a laser das Estradas de Portugal (Luz, 2011)	34
Figura 3.14 - Evolução das deflexões de pavimentos ao longo do tempo (Pereira & Miranda, 1999)	35
Figura 3.15 - Equipamentos utilizados para ensaios não destrutivos em pavimentos (Francisco, 2012)	36
Figura 3.16 - Desenho esquemático da viga Benkelman (Francisco, 2012)	37
Figura 3.17 - Camião de transporte do defletógrafo de Lacroix (à esquerda) e viga metálica (à direita) (Francisco, 2012)	38
Figura 3.18 - Ensaio do defletómetro de impacto (FWD) realizado no troço experimental ...	39
Figura 3.19 - Defletómetro de impacto e zonas de tensão em cada camada (Correia, 2014)	42
Figura 3.20 - Exemplo de iterações realizadas para ajustar os defletogramas calculados e medidos (Branco et al., 2011)	46
Figura 4.1 - Pavimento em estudo	51
Figura 4.2 - Representação em planta dos pontos do ensaio da Mancha de Areia	52
Figura 4.3 - Ensaio do Pêndulo Britânico realizado no pavimento	54
Figura 4.4 - Representação em planta dos pontos do ensaio FWD	56
Figura 4.5 - Dados da aplicação da carga no programa BISAR	58
Figura 4.6 - Exemplo de introdução de valores para o ponto de ensaio 1	59
Figura 4.7 - Exemplo de introdução de valores para o ponto de ensaio 2	59
Figura 4.8 - Distância dos geofones ao ponto de aplicação da carga no ponto 1	60
Figura 4.9 - Distância dos geofones ao ponto de aplicação da carga no ponto 2	60
Figura 4.10 - Relação entre as deflexões medidas e calculadas para o ponto 1 (iteração 2) .	62
Figura 4.11 - Relação entre as deflexões medidas e calculadas para o ponto 2 (iteração 2) .	62
Figura 4.12 - Relação entre as deflexões medidas e calculadas para o ponto 3 (iteração 1) .	63
Figura 4.13 - Relação entre as deflexões medidas e calculadas para o ponto 4 (iteração 2) .	63
Figura 4.14 - Mapa de temperaturas médias do ar do mês de Novembro 2017 (IPMA), consultado em https://www.ipma.pt (10/09/2018)	65
Figura 4.15 - Ábaco de Shell (Lopes,2009)	65

Índice de Quadros

Quadro 2.1 - Sistemas de pavimentos permeáveis (adaptado de Azzout et al., 1994)	7
Quadro 3.1 - Tipologia de superfícies (adaptado de INAC, 2012)	17
Quadro 3.2 - Valores mínimos de macrotextura superficial a obter em fases de obra com o método volumétrico da mancha em camadas de desgaste (Adaptado de CEEP, 2014)	20
Quadro 3.3 - Classificação da macrotextura com os resultados da Mancha de Areia (Adaptado de INAC,2012)	21
Quadro 3.4 - Valores mínimos de profundidade média de textura superficial a obter por lote em camadas de desgaste por medição em contínuo (CEEP, 2014).....	23
Quadro 3.5 - Valores do coeficiente de atrito pontual (Pendulum Test Value) (adaptado de CEEP,2014)	27
Quadro 3.6 - Valores para o coeficiente de atrito em contínuo (CEEP, 2014)	29
Quadro 3.7 - Critérios de regularidade para camadas em misturas betuminosas quando não se proceda à determinação de IRI.....	32
Quadro 3.8 - Valores admissíveis de IRI (m/km), calculados por troços de 100 metros (Adaptado CEEP,2014)	33
Quadro 3.9 - Valores admissíveis de IRI (m/km) calculados por troços de 100 metros em pavimentos reabilitados com espessura de misturas betuminosas igual ou inferior a 0,10 m (Adaptado CEEP,2014)	33
Quadro 3.10 - Classificação dos valores de IRI (Adaptado CEEP,2014)	33
Quadro 3.11 - Módulos de deformabilidade para camadas do pavimento (Adaptado de EP,1995)	45
Quadro 3.12 - Resultados obtidos para os módulos de deformabilidade após a retro-análise (Adaptado de Machado et. al.,(2013)	48
Quadro 3.13 - Dados comparativos da retro-análise para a A17 com recurso a vários programas de cálculo (adaptado de Correia e Picado-Santos, 2014).....	49
Quadro 3.14 - Dados comparativos da retro-análise para a A7 com recurso a vários programas de cálculo (adaptado de Correia e Picado-Santos, 2014).....	49
Quadro 4.1 - Resultados do ensaio da mancha de areia com equipamento da UM.....	53

Quadro 4.2 - Resultados do ensaio da mancha de areia com o equipamento da UBI	53
Quadro 4.3 - Resultados do ensaio do Pêndulo Britânico	55
Quadro 4.4 - Correção dos valores de temperatura de ensaio (Adaptado de EN 13036-4:2011)	55
Quadro 4.5 - Deflexões registadas durante o ensaio FWD	57
Quadro 4.6 - Normalização das deflexões	57
Quadro 4.7 - Valores das deformações calculadas pelo BISAR para todos os pontos	61
Quadro 4.8 - Cálculo do erro para cada iteração e ponto e respetivo RMSE Erro! Marcador não definido.	
Quadro 4.9 - Módulos de deformabilidade utilizados para o processo iterativo no programa BISAR	64
Quadro 4.10 - Módulos de deformabilidade para as várias camadas de todos os pontos ensaiados após o ajuste da temperatura	66

Lista de Acrónimos

ANAC (Ex-INAC)	Agência Nacional de Aviação Civil
EASA	European Aviation Safety Agency
EUA	Estados Unidos da América
FWD	Falling Weight Deflectometer
IFI	International Friction Index
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LID	Low Impact Development
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
PIARC	Permanent International Association of Road Congress
UBI	Universidade da Beira Interior
UM	Universidade do Minho
WSUD	Water Sensitive Urban Design
BBd	Betão betuminoso drenante
d_{ci}	Deflexão calculada para o ponto de ensaio i

d_{mi}	Deflexão medida para o ponto de ensaio i
D_n	Deflexão normalizada
E_{20}	Módulo de deformabilidade para a temperatura de referência de 20°C
E_g	Módulo da camada granular
E_s	Módulo da camada do solo de fundação
E_T	Módulo de deformabilidade para a temperatura T
F_{60}	Valor do coeficiente de atrito a uma velocidade de 60 km/h
GN	Grip Number
h_g	Espessura da camada
n	Deflexão para um ponto de ensaio
PA	Porous Asphalt
S	Velocidade de ensaio

Capítulo 1

1.1 Enquadramento temático

Nos tempos que decorrem enfrentamos uma problemática que assola principalmente as áreas urbanas, as cheias. É cada vez mais comum, durante as estações chuvosas, assistirmos a fenómenos de cheia em zonas habitacionais devido, essencialmente, à impermeabilização dos solos. Dado este problema, os pavimentos permeáveis surgem como uma medida de mitigação das cheias através da redução do escoamento superficial devido à sua capacidade de infiltração e armazenamento.

Para além das qualidades, dos pavimentos permeáveis, relacionadas com a capacidade de infiltração e conseqüente redução do volume de escoamento superficial, é também importante conhecer a sua eficácia relativamente ao seu comportamento funcional e mecânico e perceber se estes pavimentos se destacam como uma solução viável em detrimento dos pavimentos convencionais.

Os pavimentos permeáveis podem ter vários materiais à sua superfície, como é o caso de blocos de betão, betão poroso, blocos vazados ou mesmo misturas betuminosas drenantes, sendo a última solução objeto de estudo desta dissertação.

No sentido de incentivar o desenvolvimento acerca dos pavimentos permeáveis, realiza-se nesta dissertação um estudo acerca do comportamento funcional e mecânico destes. Nesta dissertação apresentar-se-ão os resultados dos ensaios da Mancha de Areia, do Pêndulo Britânico e do defletómetro de impacto, realizados num parque de estacionamento executado no concelho da Covilhã, e através destes, chegar a resultados que melhor classifiquem o comportamento dos pavimento permeáveis, e neste caso, dos pavimentos com uma dupla camada drenante à superfície.

1.2. Objetivos do estudo

O objetivo da realização desta dissertação é avaliar o comportamento funcional e mecânica de um pavimento permeável construído na Boidobra, no concelho da Covilhã, e perceber se este apresenta características vantajosas para a sua utilização.

A falta de informação referente a esta temática foi também um incentivo para a realização deste estudo, visto que há ainda muitas lacunas na regulamentação disponível bem como, poucos estudos sobre o comportamento funcional e mecânico sobre os pavimentos permeáveis.

Nesta dissertação são descritos também resultados de trabalhos de outros autores acerca da avaliação hidrológica dos pavimentos permeáveis. No que concerne à avaliação mecânica,

encontram-se apenas descritos resultados de autores sobre o ensaio do defletómetro de impacto, ainda que, em pavimentos convencionais.

Com este estudo pretende-se mostrar os resultados dos ensaios da Mancha de Areia, do Pêndulo Britânico e do defletómetro de impacto para avaliar o desempenho funcional e mecânico do pavimento permeável. Analisando a macrotextura (Mancha de Areia), o atrito (Pêndulo Britânico) e a capacidade de carga (Defletómetro de Impacto) é possível conhecer-se melhor como se comporta a camada superficial e as restantes camadas do pavimento em relação a estes parâmetros.

1.3 Organização do trabalho

O trabalho desenvolvido é constituído por cinco capítulos, que se descrevem nesta secção.

No presente capítulo, o capítulo 1, começa por se fazer um enquadramento temático desta dissertação e de seguida, apresentam-se os objetivos deste trabalho e a respetiva organização.

No capítulo 2, apresenta-se uma breve contextualização acerca dos pavimentos permeáveis onde são explicadas algumas das funcionalidades destes e a sua utilização em outros países. Nesse capítulo são também exemplificadas algumas limitações e benefícios dos pavimentos permeáveis, bem como a explicação da estrutura destes, desde a sua camada de desgaste à camada de base e sub-base. Apresentam-se também os tipos de sistemas de infiltração deste tipo de pavimentos e estudos de outros autores relacionados com o comportamento hidrológico dos mesmos.

O capítulo 3 traduz-se como um estado de arte acerca do comportamento funcional e mecânico dos pavimentos permeáveis. Inicialmente faz-se uma introdução acerca dos parâmetros que se pretendem avaliar, como a textura, o atrito e a capacidade de carga. De seguida são descritos estes parâmetros, onde se apresentam os ensaios da Mancha de Areia, do Pêndulo Britânico, do Defletómetro de Impacto e ainda outros ensaios que têm a mesma função mas que não foram utilizados neste estudo. Nesse capítulo são também apresentados quadros que contêm valores padrão segundo diferentes especificações e normas. No que concerne à explicação do ensaio do defletómetro de impacto, apresenta-se detalhadamente todo o processo de análise dos dados obtidos no pavimento, processo esse chamado de retro-análise. No fim desse capítulo apresentam-se trabalhos de outros autores relacionados com o tratamento de dados do defletómetro de impacto em pavimentos tradicionais.

No capítulo 4 apresentam-se os resultados do trabalho prático realizado em campo, onde também se encontram descritas as metodologias utilizadas nos ensaios da Mancha de Areia, do Pêndulo Britânico e do Defletómetro de Impacto.

No capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões deste trabalho, mas também sugestões para eventuais trabalhos futuros.

Capítulo 2 - Estado de Arte sobre Pavimentos Permeáveis

2.1. Contextualização da utilização dos pavimentos permeáveis

No presente capítulo aborda-se o tema sobre os pavimentos permeáveis que tem como objetivo clarificar a utilidade dos mesmos, bem como as melhorias que apresentam em relação aos pavimentos convencionais.

A população mundial tem aumentado progressivamente, sendo este um dos problemas causadores do acréscimo da quantidade de áreas impermeáveis nas cidades e consequente aumento do escoamento superficial (Kamali *et al.*, 2017; Kumar *et al.*, 2016; Rodriguez-Rojas *et al.*, 2018).

A problemática do crescimento populacional e respetiva ocupação excessiva do solo, interligada com as alterações climáticas, levam a um aumento da ocorrência de cheias por períodos mais longos (Afonso *et al.*, 2017).

Para combater a ineficácia dos pavimentos impermeáveis em infiltrar as águas pluviais, adotaram-se nos últimos anos medidas de mitigação que permitem escoar maiores quantidades da água. Desta forma, os pavimentos permeáveis contribuem de forma positiva na redução do escoamento superficial (Brattebo and Booth, 2003; Valeo and Gupta, 2018).

A utilização dos pavimentos permeáveis contribui para a minimização dos poluentes existentes no escoamento superficial e para um abastecimento dos lençóis freáticos através da sua eficaz capacidade de infiltração (Al-Rubaei *et al.*, 2015).

No que diz respeito ao desempenho hidrológico dos pavimentos permeáveis salientam-se três funções base. A primeira função está relacionada com a infiltração total das águas pluviais para eventos chuvosos com precipitações menores que 20 mm. A segunda função é fazer com que seja retardada a acumulação de águas provenientes de eventos chuvosos com precipitações entre 20 e 40 mm, e por fim, a terceira função, com o objetivo de diminuir as inundações à superfície para precipitações superiores a 40 mm. Note-se que, a terceira função é apenas válida caso o solo de fundação seja capaz de infiltrar água e encaminhar a mesma para um eventual lençol de água subterrâneo, caso contrário a água acumular-se-á na estrutura do pavimento e não haverá vazão suficiente, o que levará a um aumento do escoamento superficial. Caso se verifique esta situação pode-se recorrer à utilização de um sistema auxiliar que encaminhe parte da água para um local de armazenamento extra (Trandem, 2016 adaptado de Magnussen *et al.*, 2015).

Os pavimentos permeáveis têm vindo a ser utilizados nas últimas décadas como estratégias de tratamento das águas, conhecidas na Europa como SUDS (do inglês *Sustainable Urban Drainage Systems*), na Austrália como WSUD (do inglês *Water Sensitive Urban Design*) e nos EUA como LID (do inglês *Low Impact Development*) (Lucke *et al.*, 2014 ; Nichols *et al.*, 2014).

2.2. Limitações e Benefícios

Segundo Smith (2006) e Trandem (2016) existem vários benefícios e limitações associadas à utilização de pavimentos permeáveis. A listagem que se segue mostra vários benefícios e limitações:

Benefícios:

- Redução de 100% do escoamento superficial para eventos chuvosos com precipitações abaixo dos 20 mm;
- Abastecimento de lençóis freáticos e aquíferos quando o solo permite a infiltração da água;
- Redução dos poluentes na água infiltrada;
- Redução de custos associados ao sistema de recolha e tratamento de águas;
- Redução do risco de aquaplanagem;
- Diminuição do risco de formação de gelo à superfície do pavimento;
- Possibilidade de armazenamento e utilização da água infiltrada para diversos fins.

Limitações:

- Manutenção e limpeza com regularidade de modo a evitar a colmatção dos vazios do pavimento;
- Utilização do pavimento permeável em zonas de baixo tráfego dada a sua menor capacidade de carga;
- Avaliação do desempenho do pavimento permeável a médio/longo prazo através da monitorização de troços experimentais de forma a melhorar o processo construtivo de futuras aplicações.

2.3. Estrutura dos pavimentos permeáveis

No que concerne à constituição dos pavimentos permeáveis pode-se considerar que estes são formados por várias camadas que apresentam diferentes funcionalidades, da mesma forma como acontece com outro tipo de pavimentos. Relativamente aos permeáveis, como se percebe pela sua designação, estes devem ter níveis de porosidade mais elevados que os pavimentos tradicionais, como tal, as camadas de base e sub-base devem ter características semelhantes à camada de desgaste (Cahill *et al.*,2003).

Na figura 2.1 apresenta-se o modelo da estrutura de um pavimento permeável.

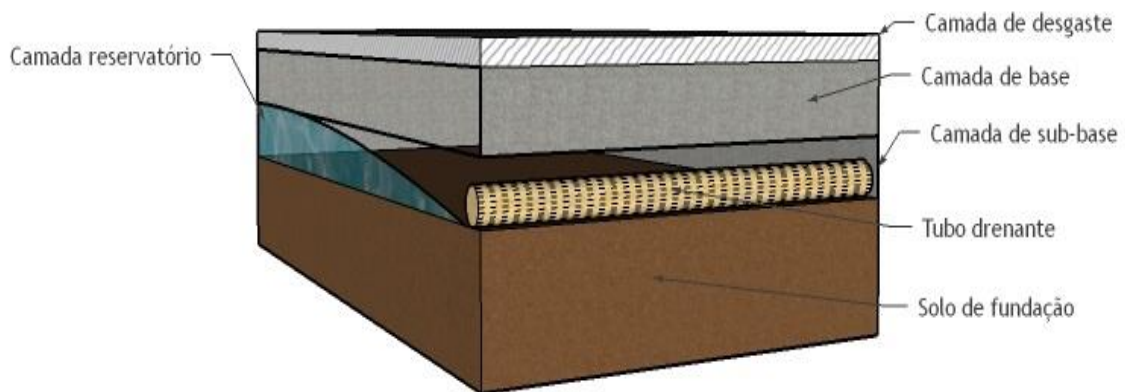


Figura 2.1-Modelo da estrutura de um pavimento permeável (adaptado Trandem,2016)

2.3.1. Camada de desgaste

Atualmente, os pavimentos permeáveis têm sido cada vez mais uma opção válida para combater inúmeras falhas relacionadas com a utilização de pavimentos convencionais. Trandem (2016) considera dois princípios básicos que caracterizam a camada de desgaste de um pavimento permeável. Em materiais como o asfalto poroso, betão poroso, relva ou cascalho a água infiltra-se diretamente, enquanto que em superfícies revestidas com os blocos de betão intertravados a água infiltra-se através dos espaços que existem na camada superficial.

Tenreiro (2016) considera que para definir o material a ser utilizado na camada de desgaste se deve ter em conta a sua capacidade de infiltração e o seu desempenho mecânico consoante a circulação de veículos a que o pavimento está sujeito.

2.3.2. Camada de base e sub-base

As camadas de base e sub-base são as camadas colocadas imediatamente abaixo da de desgaste. Estas têm como função, conferir maior espessura ao pavimento bem como encaminhar as cargas que são aplicadas à superfície até ao solo de fundação (Virgiliis, A., 2009). Estas camadas apresentam ainda uma outra funcionalidade, a de reservatório, nos casos dos pavimentos permeáveis.

Segundo Tenreiro (2016), a função de reservatório é assumida, de forma a que as águas pluviais drenadas à superfície sejam encaminhadas para um sistema de drenagem ou sejam infiltradas no solo.

Na figura 2.2 é apresentado um modelo que representa as camadas de um pavimento.

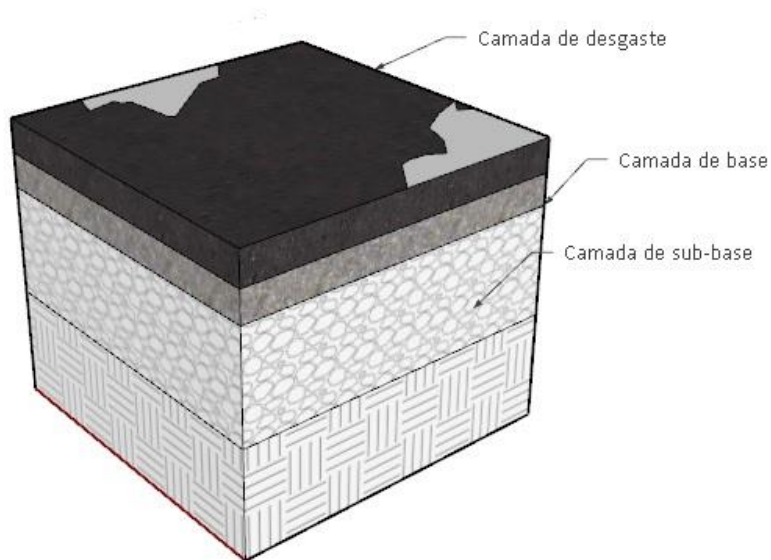


Figura 2.2 - Camadas do pavimento (adaptado de Tenreiro, 2016)

2.4. Sistemas de infiltração de pavimentos permeáveis

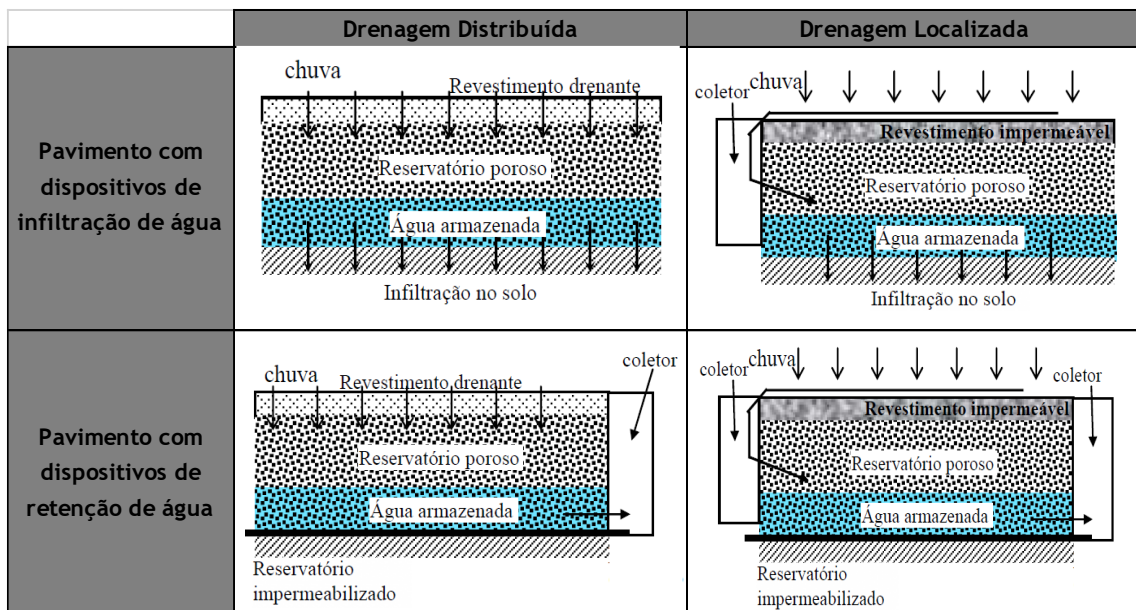
Os pavimentos permeáveis, tendo em conta a sua utilidade ao nível estrutural, podem considerar-se como estrutura reservatório. De acordo com Acioli (2005) estes pavimentos têm essa denominação devido às funções desempenhadas pela sua condição porosa pela qual são constituídos:

- Função mecânica, associada à estrutura do pavimento que permite suportar os carregamentos impostos pelo tráfego de veículos;

- Função hidráulica, que pela porosidade dos materiais, assegura a retenção temporária das águas, seja através de drenagem ou através da capacidade de infiltração do solo de fundação.

Segundo Azzout *et al.* (1994), os pavimentos encontram-se divididos em quatro tipos, os pavimentos com revestimento impermeável com ou sem infiltração no solo e os pavimentos com revestimento drenante com ou sem infiltração no solo. O quadro 2.1 mostra os diferentes tipos de pavimentos considerados:

Quadro 2.1 - Sistemas de pavimentos permeáveis (adaptado de Azzout et al., 1994)



Para os pavimentos com saída de água por encaminhamento, a água armazenada pode ser reutilizada para fins que recorram a água não potável (Acioli, 2005) como é o caso dos sistemas de regadio.

O funcionamento hidráulico dos pavimentos permeáveis baseia-se em três aspetos fundamentais (Pratt, 1999 citado por Tenreiro 2016):

- Entrada da água da chuva na estrutura do pavimento;
- Acumulação temporária da água no interior do pavimento;
- escoamento lento da água por infiltração no solo, por drenagem ou através de uma combinação de ambas as formas.

No que concerne à infiltração da água no solo através do pavimento, esta pode subdividir-se ainda em três sistemas referidos por Schueler (1987) como os sistemas de infiltração total, parcial ou sem infiltração.

Lin *et al.* (2014) classificam estes sistemas através das suas taxas de infiltração. Estes autores consideram que para os sistemas de infiltração total os valores estão compreendidos entre $0,1 \times 10^{-1}$ e 1×10^{-3} mm/s e para os de sistemas de infiltração parcial os valores variam entre $1,0 \times 10^{-3}$ e $1,0 \times 10^{-5}$ mm/s.

2.4.1. Sistema de infiltração total

Neste sistema de infiltração a única saída possível da água é através da sua infiltração no solo. Desta forma a estrutura do pavimento deve possuir uma camada reservatório suficientemente grande para que, em casos de chuvas intensas, essas águas pluviais possam ser armazenadas enquanto o solo infiltra outra parte da água (Acioli, 2005).

A figura 2.3 apresenta o exemplo do sistema de infiltração total.

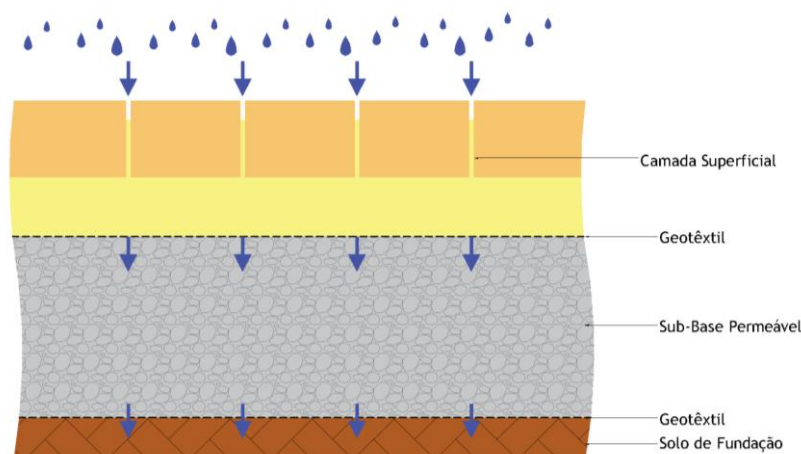


Figura 2.3 - Sistema de infiltração total (adaptado de Tenreiro, 2016)

2.4.2. Sistema de infiltração parcial

Quando a taxa de infiltração do solo não dá resposta à quantidade de água acumulada, é necessária a utilização de sistemas de drenagem auxiliares que encaminhem esta através de tubos perfurados drenantes. Estes tubos drenantes encontram-se instalados na camada imediatamente acima do solo de fundação e funcionam como uma saída da água armazenada evitando uma grande acumulação de água na camada de reservatório, possibilitando a renovação continuada desse espaço (Acioli, 2005). Na figura 2.4 apresenta-se um exemplo para o sistema de infiltração parcial.

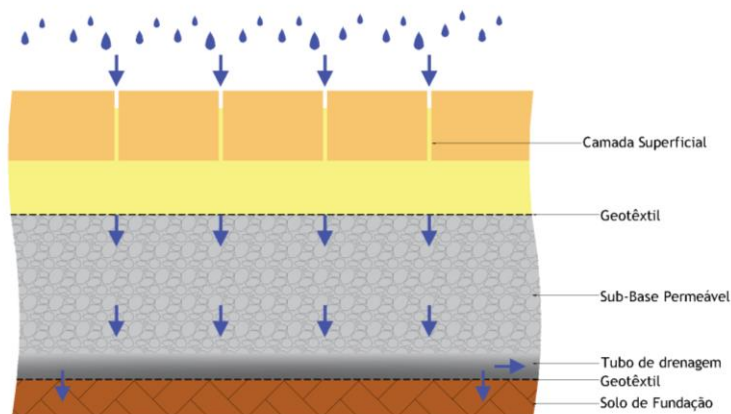


Figura 2.4 - Sistema de infiltração parcial (Adaptado de Tenreiro, 2016)

2.4.3. Sistema sem infiltração

Este sistema não possui qualquer tipo de infiltração, sendo que a água pode ser totalmente recolhida utilizando uma membrana impermeável e flexível. Este sistema é utilizado em situações em que o solo de fundação possui reduzida permeabilidade e uma inadequada capacidade de carga (Interpave, 2010 citado por Tenreiro, 2016). Em zonas contaminadas em que existe a possibilidade de infiltração de agentes poluentes para os aquíferos e lençóis de água subterrâneos estes sistemas também podem ser utilizados. Noutra perspetiva, a água captada pelo tubo de drenagem pode ser utilizada para outros fins, tais como em mecanismos de irrigação, águas sanitárias ou lavagem (Acioli, 2005). A figura 2.5 apresenta o exemplo de um sistema sem infiltração.

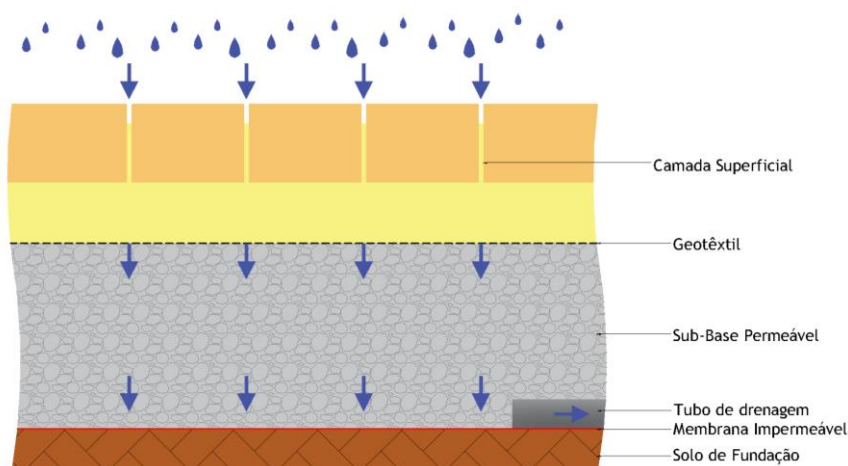


Figura 2.5 - Sistema sem infiltração (Adaptado de Tenreiro, 2016)

2.5. Estudos de outros autores sobre os pavimentos permeáveis

Durante alguns anos têm sido levados a cabo vários estudos sobre os pavimentos permeáveis e a sua respetiva capacidade de infiltração, uma das características mais importantes que pretende melhorar a resposta dos pavimentos ao flagelo criado pelo aumento da precipitação e conseqüente aumento do nível do escoamento superficial.

Tendo em conta esta necessidade de criar soluções sustentáveis para a sociedade atual, apresentam-se, neste subcapítulo, alguns estudos realizados por diversos autores sobre o desempenho hidrológico dos pavimentos permeáveis.

2.5.1. Kumar *et al.*, (2016)

Neste estudo, desenvolvido nos EUA, os autores analisaram o comportamento hidrológico de três tipos de pavimentos permeáveis, durante um período de quatro anos, construídos num parque de estacionamento com dimensões de 245,8 m × 82,1 m. Os pavimentos estudados tinham como camadas de desgaste, mistura betuminosa drenante, betão poroso e blocos de betão.

A constituição dos três pavimentos é semelhante, no entanto, apresenta algumas diferenças no que diz respeito à dimensão. O pavimento da mistura betuminosa drenante tem 10 cm na camada de desgaste, 30 cm na camada de base composta por agregados britados, onde se inclui um tubo perfurado drenante com 10 cm de diâmetro. Na separação entre esta camada e o solo de fundação existe uma manta de geotêxtil.

Relativamente ao pavimento de betão poroso, este apresenta uma camada de desgaste com 15 cm, 30 cm na camada de base composta por agregados britados, tubo perfurado drenante com 10 cm de diâmetro e uma manta geotêxtil.

Por fim, o pavimento com os blocos de betão, possui uma camada de desgaste com 20 cm, uma camada de preenchimento e regularização com 20 cm e 30 cm na camada de base composta por agregados britados, onde se inclui um tubo perfurado drenante com 10 cm de diâmetro e uma manta geotêxtil.

As conclusões obtidas por estes autores baseiam-se, essencialmente, na capacidade de infiltração dos pavimentos permeáveis executados no parque de estacionamento. Concluiu-se que, passados quatro anos da construção, a taxa de infiltração havia diminuído consideravelmente devido à colmatação dos vazios dos materiais. Na figura 2.6 apresentam-se os resultados obtidos para os diferentes pavimentos durante os quatro anos em análise.

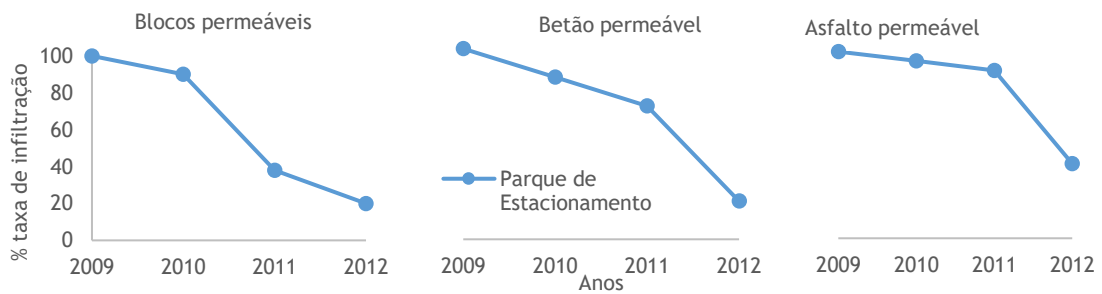


Figura 2.6 - Percentagem da taxa de infiltração inicial para os três pavimentos durante os 4 anos de estudo (Kumar *et al.*, 2016)

No sentido de apresentarem uma solução para o decréscimo da taxa de infiltração, os autores propõem a manutenção regular dos pavimentos através da utilização de máquinas com recurso a mecanismos de sucção ou jatos de água de alta pressão.

2.5.2. Drake *et al.*, (2014)

Drake *et al.*, (2014) realizaram uma investigação sobre o desempenho hidrológico em três pavimentos permeáveis com um sistema de infiltração parcial. Esta investigação decorreu em Ontário, Canadá durante 3 anos.

O local do estudo é composto por quatro células que contêm três pavimentos permeáveis e um pavimento impermeável com cerca de 230 m² cada e com capacidade para 8-10 lugares de estacionamento. Duas células foram construídas com blocos de betão intertravados, uma com betão permeável e outra com uma mistura betuminosa impermeável. Entre os pavimentos permeáveis construíram-se divisórias de betão que evitam a passagem do escoamento superficial de um pavimento para outro. As camadas que servem de reservatório são compostas por agregados de 19 mm e 60 mm e formam uma dupla camada com 40 cm de espessura.

Todos os pavimentos, e por se tratar de um sistema de infiltração parcial, possuem um tubo de drenagem que encaminha a água armazenada para uma caixa de recolha de águas.

Nos resultados apresentados pelos autores constatou-se que durante os meses de inverno o pavimento impermeável apresentou escoamento superficial, sendo este infiltrado pelos pavimentos permeáveis adjacentes, mesmo quando este escoamento aumentava devido ao derretimento da neve.

Segundo Drake *et al.* (2016) a diminuição do escoamento superficial tem implicações importantes no que diz respeito à qualidade da água. Uma vez que as águas pluviais se infiltram no pavimento, este funciona como um filtro para os agentes poluentes que possam estar

presentes na água infiltrada, impedindo eventuais contaminações dos lençóis freáticos e aquíferos.

Neste estudo comprovou-se que mesmo em solos de baixa permeabilidade, com um sistema de infiltração parcial, se consegue reduzir significativamente o volume de escoamento. Drake *et al.*, (2016) conseguiram com esta investigação uma redução do volume de escoamento em 43%.

Na figura 2.7 estão representados os gráficos com as variações da percentagem da taxa de infiltração ao longo dos três anos de estudo.

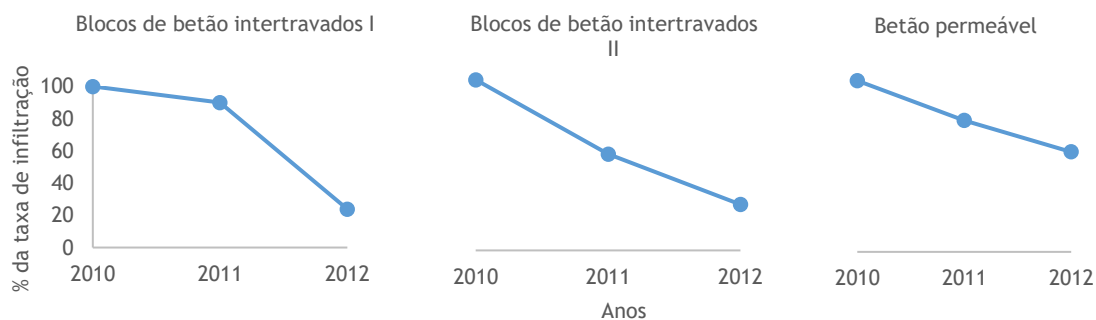


Figura 2.7 - Percentagem da taxa de infiltração inicial para os três pavimentos durante os 3 anos de estudo (Drake et al. 2016)

Nos gráficos apresentados pode constatar-se dois nomes semelhantes, os dos blocos de betão intertravados. Isto acontece porque, de facto, os autores possuem dois pavimentos com a mesma camada de desgaste no entanto fabricados por diferentes empresas, daí a diferença nos nomes atribuídos nesta dissertação e na perda da taxa infiltração inicial.

Como se pode constatar pelos gráficos apresentados na figura 2.7 a percentagem da taxa de infiltração inicial vai diminuindo com o passar dos anos, no entanto e segundo Drake *et al.* (2016), a capacidade destes pavimentos em infiltrar a água que escoa à superfície é notável e constitui assim uma solução viável para combater o excesso do escoamento superficial, mais ainda sendo estes auxiliados por sistemas de drenagem subterrânea da água infiltrada.

2.5.3. Trandem (2016)

A investigação desenvolvida por Trandem (2016) na Noruega pretende mostrar a eficácia dos pavimentos permeáveis com blocos de betão no tratamento do escoamento superficial. As medições realizadas pelo autor tiveram início em Maio de 2015 e terminaram em Maio 2016.

Nesta investigação foram construídas quatro zonas a serem testadas. Duas destas, denominadas por zona 1 e zona 2, têm 120 m² cada e são separadas por um canal drenante que coleta a água que não é infiltrada pelos pavimentos e a encaminha para um reservatório. Neste local foi medida a quantidade de água recolhida através do canal drenante.

As áreas abrangidas pelos pavimentos foram desenvolvidas para resistir a cargas elevadas provocadas pela circulação de pesados nessa zona. A espessura admitida no projeto para a secção da estrada foi de 75 cm. Estes 75 cm contemplam uma camada de desgaste de 10 cm com blocos de betão, uma camada de base de 15 cm com agregados britados, uma sub-base com 50 cm de agregados britados. Foi colocada uma geogrelha com o propósito de conferir maior resistência mecânica no pavimento.

O pavimento da zona 3 apresentado por Trandem tem uma área de 104 m² e infiltra a água proveniente de um pavimento impermeável com 1250 m². Numa das extremidades da zona 3 existe uma grelha pela qual escoam a água e onde é medida através de sondas. O pavimento tem menos 20 cm que os pavimentos das zonas 1 e 2 dada a menor afluência de tráfego neste local. Desta forma, o pavimento possui uma camada de desgaste de 10 cm de blocos de betão normal, uma camada de base de 15 cm com agregados britados, uma camada de sub-base de 30 cm com agregados britados e uma manta geotêxtil que separa esta camada do solo de fundação.

A zona 4 serve de monitorização artificial da capacidade de infiltração com o auxílio de um sistema de chuveiros que debitam o equivalente a 1000 l/s/ha. A composição deste pavimento não é descrita.

As medições feitas para as zonas 1 e 2 foram desenvolvidas entre Outubro de 2015 e Maio de 2016, e registaram-se valores do caudal, do nível do escoamento e da precipitação. O escoamento foi medido através de sensores instalados nas tubagens por onde a água não infiltrada se escoava.

As medições realizadas para a zona 3 foram feitas com recurso a outro canal onde também foram medidos os caudais, o nível do escoamento e da precipitação. Os dados recolhidos pelo autor acerca da precipitação e da água infiltrada pelo pavimento encontram-se representados na figura 2.8.

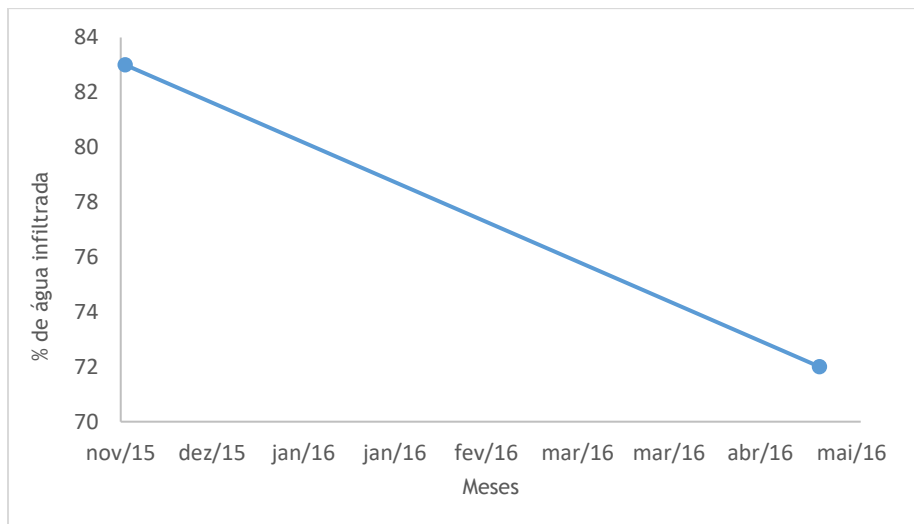


Figura 2.8 - Diminuição da porcentagem de água infiltrada ao longo do tempo (Adaptado de Trandem (2016))

Como se pode constatar pela figura 2.8 referente aos dados obtidos por Trandem (2016), a porcentagem de água infiltrada diminui com o tempo decorrido. Em Novembro de 2015 a porcentagem de água infiltrada foi cerca de 82 % e cerca de 6 meses depois a porcentagem de água infiltrada pelo pavimento na zona 3 foi de cerca de 72 %. Estes dados sugerem uma diminuição da capacidade de infiltração da água, no entanto, segundo o autor, esta é função do tempo de precipitação, da porcentagem de espaços vazios entre os blocos de betão em relação à área total do pavimento e também da área. Com isto podemos constatar que a diminuição da porcentagem de água infiltrada pode estar relacionada com a colmatação dos espaços vazios.

Capítulo 3 - Desempenho Funcional e Mecânico dos Pavimentos

3.1. Introdução

Um pavimento tem diversas funcionalidades e apresenta-se como sendo uma infraestrutura bastante importante no dia-a-dia da sociedade. O pavimento rodoviário tem como principais funções conferir segurança e conforto para o utilizador que circula nas estradas. De forma a garantir as condições necessárias para uma boa circulação devem ser tidas em conta características funcionais como a capacidade de drenagem de águas à superfície, a aderência e a regularidade geométrica do pavimento (Menezes, 2008).

Para além da preocupação com a avaliação funcional de um determinado pavimento, deve também ter-se em conta a avaliação mecânica do mesmo que se relaciona, essencialmente, com as iniciativas de conservação e reabilitação do pavimento (Couchinho, 2011). Segundo Pereira e Miranda (1999) a avaliação mecânica, relacionada com o desempenho mecânico, tem em conta as condições climatéricas e o tipo de tráfego.

Importa salientar que apesar de todas as preocupações do ponto de vista da idealização de um pavimento com boas condições para os utilizadores, seja do ponto de vista funcional e/ou estrutural, os condutores têm, também eles, uma função importante no que concerne à segurança na circulação nas estradas com a velocidade que praticam nas mesmas. Esse e outros fatores, como as características dos veículos, a sinalização e o traçado da estrada, fazem com que seja cada vez mais importante a escolha adequada e a correta execução dos pavimentos (Pinto, 2003).

Os pavimentos permeáveis posicionam-se como uma solução inovadora relativamente à absorção da água superficial, ainda que nos dias que decorrem não existam muitos estudos relacionados com a eficácia destes pavimentos do ponto de vista mecânico e a sua utilização em estradas com muito tráfego.

Alguns pavimentos possuem uma camada superficial porosa e outros, como o caso do pavimento apresentado neste estudo, possuem duas camadas porosas. Neste caso, a camada superficial de asfalto poroso por ser composta por agregados finos, reduz a entrada de sedimentos impedindo assim a obstrução da camada de agregados grossos, facilitando a infiltração da água.

Para uma melhor caracterização dos pavimentos relativamente ao estado funcional devem ser considerados alguns parâmetros de estado (Gonçalves, 2015). De acordo com Menezes (2008) estes parâmetros são a textura, o atrito e a regularidade transversal e longitudinal. Por outro lado, é ainda muito comum a visão do pavimento como uma plataforma estrutural, mesmo no

que diz respeito ao seu dimensionamento numa fase inicial, devendo ser considerada a avaliação da capacidade de carga do mesmo.

A textura e o atrito são duas características muito relevantes na abordagem aos pavimentos. Na execução de um determinado pavimento é fundamental conseguir que este tenha uma boa aderência, que permita um contacto eficaz entre o veículo e a estrada levando, desta forma, a uma redução da distância de travagem (Sardão, 2012).

3.2 Textura

A textura é uma das principais características do desempenho funcional dos pavimentos, sendo fundamental para a segurança e comodidade dos utilizadores. Esta característica é preponderante na conservação das vias pois está diretamente relacionada com a drenagem da água entre os pneumáticos e o pavimento e influencia também, indiretamente, a aderência entre os mesmos (Couchinho, 2011).

A avaliação da textura pode ser feita de acordo com diversas amplitudes e respetivos comprimentos de onda. A textura pode ser dividida em microtextura, macrotextura e megatextura. Na figura 3.1 podem ser visualizados os domínios das subdivisões da textura bem como as amplitudes e comprimentos de onda correspondentes às irregularidades do pavimento retratadas na norma ISSO 13473-2.

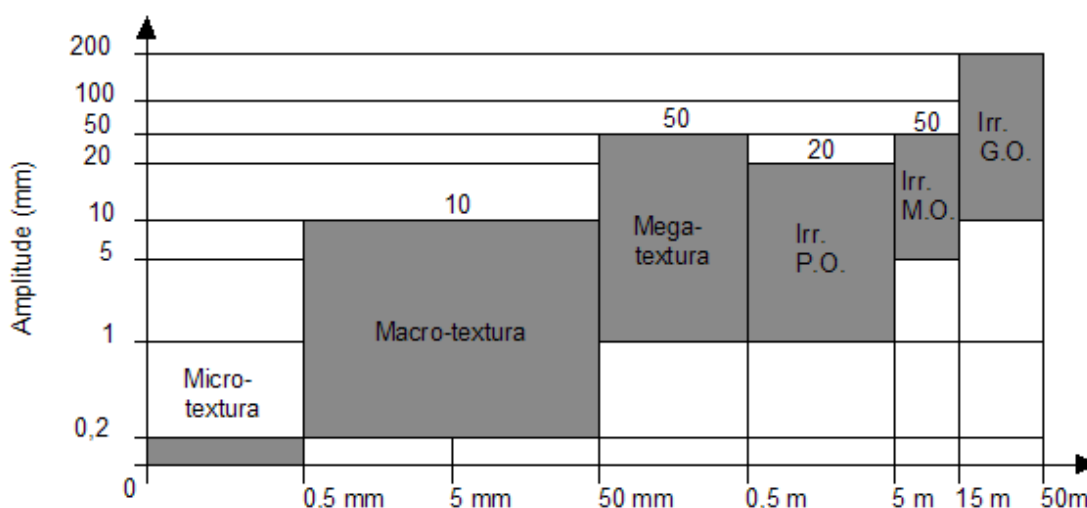


Figura 3.1 - Gama de valores da textura (Menezes, 2008)

Como se pode constatar pela figura 3.1, e no que diz respeito à gama de valores para a textura, estes estão compreendidos entre 1 µm (início da microtextura) e 500 mm (fim da megatextura).


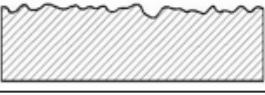


A microtextura encontra-se compreendida, para valores do comprimento de onda, entre 1 μm e 0,5 mm e para amplitudes verticais entre 1 μm e 0,2 mm (Pinto, 2003). Esta escala de textura pode analisar uma superfície que seja mais ou menos rugosa, pode ser identificada a olho nu por ser suficientemente lisa. A microtextura é fundamentalmente significativa para baixas velocidades ainda que, alguns autores considerem que também tem importância para todas as velocidades. Esta gama mais baixa da textura é função das propriedades das partículas dos agregados (Menezes, 2008).

A microtextura pode ser avaliada através do ensaio do pêndulo britânico mas apenas para simulações a velocidades elevadas (95 km/h) (INAC, 2012), algo que não foi determinado pelos ensaios nesta dissertação.

Relativamente à macrotextura, esta enquadra-se entre valores, de comprimento de onda, que variam de 0,5 mm e 50 mm e amplitudes verticais de 0,2 mm e 10 mm (Pinto, 2003; Menezes, 2008). A macrotextura relaciona-se com a rugosidade da superfície do pavimento, que afeta a capacidade do mesmo em drenar a água que escoar à superfície, evitando desta forma fenómenos de aquaplanagem, deformações e desgaste dos pneumáticos, o ruído proveniente do contato entre pneu e pavimento, o consumo de combustíveis, bem como as características antiderrapantes. Segundo Fontes (2009) existem ainda outras melhorias relacionadas com a macrotextura dos pavimentos, exemplo disso é a melhoria da visibilidade e das propriedades óticas dos mesmos, com a diminuição do efeito de spray causado pelo contato do pneu com o pavimento em alturas de precipitação em que aparece algum escoamento superficial. A macrotextura pode ser classificada como grosseira e fina e consegue-se avaliar a olho nu (Couchinho, 2011).

No quadro 3.1 pode ver-se como é feita a classificação do tipo de textura da superfície de um pavimento com recurso às características da micro e da macrotextura.

Quadro 3.1 - Tipologia de superfícies (adaptado de INAC, 2012)

Microtextura	Macrotextura	Superfície	Tipo de textura
Rugosa	Aberta		Rugosa e Aberta
	Fechada		Rugosa e Fechada
Pólida ou Lisa	Aberta		Pólida e Aberta
	Fechada		Pólida e Fechada

Pela análise do quadro 3.1 pode assim considerar-se a superfície de um pavimento como uma resultante da combinação da micro e macrotextura. Desta forma, podem classificar-se as camadas de desgaste em relação ao tipo de textura como rugosa e aberta, rugosa e fechada, polida e aberta, polida e fechada (Relhas, 2012).

A megatextura enquadra-se entre valores que variam de 50 mm a 500 mm de comprimento de onda e amplitudes verticais que vão de 1 mm a 50 mm (Menezes, 2008; Pinto, 2003). Esta característica não é por norma avaliada e pode influenciar a estabilidade de condução, a comodidade, o desgaste dos veículos, o ruído provocado pelo contacto entre os pneumáticos e o pavimento e o aumento da distância de travagem (Relhas, 2012). A megatextura é por isso considerada como o resultado de degradações e deformações da camada de desgaste e está compreendida entre os comprimentos de onda da macrotextura e os defeitos de regularidades (Menezes, 2008).

Para avaliar a textura podem ser utilizados vários métodos, que abordam dois parâmetros, avaliar a profundidade média da textura (PMT ou MTD - do inglês *Mean Texture Depth*), ou utilizando métodos de ensaios tecnológicos que permitem avaliar a profundidade média do perfil (PMP ou MPD - do inglês *Mean profile depth*) (Freitas, 2008).

Vários ensaios podem ser realizados com o objetivo de avaliar a textura superficial de um pavimento. Destes ensaios destacam-se a mancha de areia e os ensaios tecnológicos com recurso a tecnologia a laser.

3.2.1 Mancha de areia

O ensaio da mancha de areia, ensaio de medida pontual, utiliza-se para determinar a profundidade média da textura (PMT ou MTD) da superfície da camada de desgaste e pode ser utilizado em qualquer pavimento a ser executado (Alves, 2007). Segundo Menezes (2008), a macrotextura é determinada entre uma superfície plana de referência e a superfície de um pavimento. Na figura 3.2 pode ver-se uma representação da MTD num pavimento.

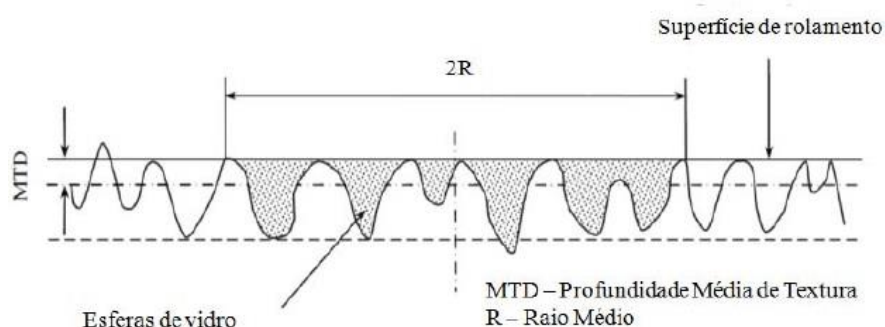


Figura 3.2 - Profundidade média da textura de uma superfície de um pavimento (Duarte, 2011)

Para garantir uma correta execução do ensaio da mancha de areia, é descrita uma metodologia na norma europeia EN 13036-1:2010 (*Road and airfield surfasse characteristics - Test methods - Part 1: Measurement of pavement surfasse macrotexture depth using a volumetric patch technique*) que regulamenta todo o processo do ensaio. Segundo esta, podem ser utilizados dois materiais distintos, esferas de vidro ou areia. Neste último caso, deverá proceder-se à normalização da areia através do estudo da sua granulometria pela percentagem de material passado nos peneiros normalizados.

Os materiais a serem utilizados são um disco circular com uma superfície de espalhamento em borracha dura, um recipiente com um volume de 25 cm³, material de limpeza e uma régua com um comprimento mínimo de 300 mm, como se pode observar na figura 3.3.

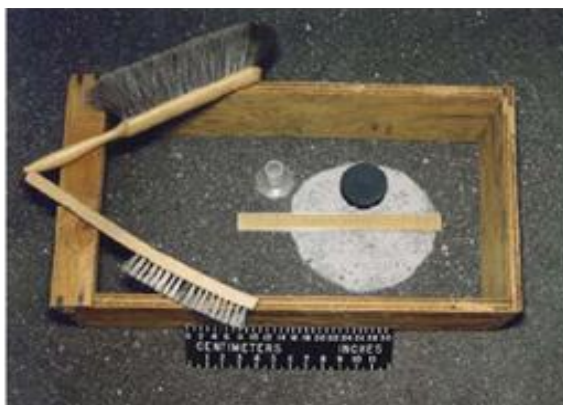


Figura 3.3 - Material necessário para o ensaio da mancha de areia (Relhas, 2012)

A metodologia do ensaio consiste em espalhar um volume de areia conhecido com granulometria padronizada (90% de passados no peneiro 0,25 mm e retido no peneiro 0,18 mm) no ponto que se pretende ensaiar. A superfície do pavimento deve estar limpa e seca e posteriormente deve ser utilizado um disco e espalhar a areia de forma a obter uma superfície circular. Este processo termina assim que as irregularidades do pavimento estejam preenchidas e não seja possível aumentar mais a área de espalhamento. Posteriormente, deve medir-se o diâmetro do círculo com o material espalhado em 2 a 4 locais com o mesmo espaçamento entre si.

O ensaio deve ser repetido, pelo menos, quatro vezes e posteriormente deve proceder-se à realização de uma média dos diâmetros obtidos aquando do espalhamento da areia. Conhecendo os valores das médias dos pontos ensaiados pode calcular-se a profundidade média da textura de acordo com a equação 3.1.

$$MTD = \frac{4V}{\pi D^2} \quad (3.1)$$

Sendo:

V - Volume de material espalhado (mm³);

D - Diâmetro médio do círculo obtido depois do espalhamento do material (mm);

MTD - *Mean texture depth*, profundidade média da textura (mm).

A norma europeia EN 13036-1:2010 refere que o ensaio que avalia a MTD tem limites de aplicabilidade de 0,25 mm a 5 mm e que a superfície da camada de desgaste à base de uma mistura betuminosa a quente deve apresentar uma macrotextura homogénea, uniforme e isenta de segregações. Os resultados obtidos devem estar em conformidade com os valores mínimos indicados pelo Caderno de Encargos Tipo Obra das Estradas de Portugal (CEEP).

O quadro 3.2 mostra os valores mínimos da profundidade média da textura imposta pelo caderno de encargos.

Quadro 3.2 - Valores mínimos de macrotextura superficial a obter em fases de obra com o método volumétrico da mancha em camadas de desgaste (Adaptado de CEEP, 2014)

Requisitos/Propriedades	Unidade	Utilização
		PA12,5
Especificações de utilização		Determinação da profundidade de textura pelo método volumétrico (MTD)
MTD - profundidade média da textura	mm	≥ 1,2

Para o caso de estudo da presente dissertação e pela análise do quadro 3.2 pode-se constatar que para camadas de desgaste à base de misturas betuminosas porosas a profundidade média da textura deve ser maior ou igual a 1,2 mm.

O ensaio da mancha de areia não estabelece uma relação perfeita entre a ligação (atrito) pneu-pavimento, no entanto serve como um bom indicador do seu potencial valor principalmente para estradas com velocidades elevadas, tendo em conta que este ensaio constitui uma medida direta da macrotextura da superfície da camada de desgaste do pavimento (Gonçalves, 2015).

Na figura 3.4 pode ver-se um exemplo da realização do ensaio da Mancha de Areia no troço experimental em estudo nesta dissertação.



Figura 3.4 - Realização do ensaio Mancha de areia no trecho experimental

A macrotextura pode ser classificada de diferentes formas dependendo dos valores obtidos através do ensaio da Mancha de Areia como se pode ver através do quadro 3.3.

Quadro 3.3 - Classificação da macrotextura com os resultados da Mancha de Areia (Adaptado de INAC,2012)

Profundidade da macrotextura	Classificação da Macrotextura
MTD < 0,25 mm	Muito fechada
0,25 mm < MTD < 0,40 mm	Fechada
0,40 mm < MTD < 0,76 mm	Medianamente fechada
0,76 mm < MTD < 1,14 mm	Medianamente aberta
1,14 mm < MTD < 1,20 mm	Aberta
MTD > 1,20 mm	Muito aberta

3.2.2 Ensaios tecnológicos com equipamento a laser

Os sensores laser utilizados para a observação superficial do pavimento constituem um método tridimensional. Com um plano de referência estipulado são medidos pontos da superfície e obtém-se, dessa forma uma precisão de observação previamente definida (Branco *et al.*, 2006 citado por Alves, 2007). O feixe que é emitido pelo laser atinge a superfície do pavimento e é refletido. Se houver uma divergência em relação à distância de referência é detetada uma descontinuidade que pode ser entendida como uma degradação. Os sensores de laser são limitados no que diz respeito à abrangência da largura do pavimento, o que necessariamente pode conduzir a uma omissão de diversas degradações. Dada esta limitação, por norma, são efetuados ensaios nas zonas das rodeiras externas de cada via (Alves, 2007). A avaliação da textura do pavimento pode ser efetuada recorrendo a vários equipamentos laser como o *Circular Texture Meter* e o *Rugo*.

3.2.2.1 Circular Texture Meter

Este equipamento utiliza a tecnologia laser para determinar características de macrotextura de um pavimento num determinado ponto e pode ser usado em ensaios laboratoriais ou *in situ*. O *Circular Texture Meter* utiliza um laser que analisa um círculo de 284 mm de diâmetro ou uma circunferência com um perímetro de 892 mm, sendo estas figuras geométricas divididas em oito segmentos de 112 mm e a partir dessa divisão obtém-se uma aproximação do valor da profundidade média do perfil (MPD) com a média das oito profundidades obtidas (Alves, 2007). Quando se inicia a medição, o braço roda sendo registado o valor da altura da textura num *software* (Pinto, 2003). Na figura 3.5 pode ver-se o equipamento do *Circular Texture Meter*.



Figura 3.5 - Ctmeter (à esquerda) e zona de contacto do Ctmeter com o pavimento (à direita)

A profundidade média do perfil (MPD) deve cumprir os valores mínimos contemplados no CEEP (2014) e reger-se segundo a norma NP EN ISO 13473-1:2011 (Caracterização da textura do pavimento a partir de perfis da superfície Parte 1: Determinação da profundidade média do perfil).

Quadro 3.4 - Valores mínimos de profundidade média de textura superficial a obter por lote em camadas de desgaste por medição em contínuo (CEEP, 2014)

Requisitos/Propriedades	Unidade	Utilização
		PA12,5 (BBd)
Especificidades de utilização		Valores de MPD por trechos de 100 metros
MPD - profundidade média do perfil	mm	$\geq 1,25$

3.2.2.2 Rugo

O Rugo avalia a macrotextura superficial em contínuo de um pavimento com velocidade limite de 57 km/h e de acordo com o fluxo normal de tráfego (LCPC, 2004). Este equipamento é fixado a um veículo e regista, em tempo real e continuamente, a distância entre o emissor laser e o pavimento ao mesmo tempo regista os resultados obtidos (Pinto, 2003). Neste ensaio o pavimento deve estar seco e limpo para que a informação recolhida não seja afetada (Alves, 2007). Na figura 3.6 mostra-se o equipamento do Rugo.



Figura 3.6 - Rugo (À esquerda) e emissora de raios laser (À direita) (LCPC, 2004)

3.3 Atrito

Um dos parâmetros mais importantes para a segurança dos utilizadores é o atrito que existe na ligação entre os pneumáticos de um veículo e a superfície de um pavimento. Este fator torna-se ainda mais preponderante quando a superfície do pavimento se encontra molhada (Alves, 2007).

A falta de aderência do veículo em relação ao pavimento é uma das principais causas de acidentes rodoviários e está também associado à velocidade de circulação. Se o pavimento

possuir boa aderência, a distância de paragem diminui e torna-se mais simples manter a trajetória e a velocidade em qualquer circunstância (Pinto, 2003).

Segundo Pinto (2003) o atrito é um parâmetro que, ao longo do tempo, pode perder as suas condições de funcionamento, por efeito das características do pavimento (tipo e estado), por ação dos utilizadores pela velocidade de circulação e estado dos pneus, mas também devido às condições atmosféricas adversas como a chuva, a neve ou o vento.

O atrito de um pavimento pode ser caracterizado através da análise de dois parâmetros, conhecidos por coeficiente de atrito longitudinal (CAL) e coeficiente de atrito transversal (CAT). O CAL está relacionado com a distância de paragem e o CAT com a segurança de circulação numa curva (Sardão *et al.*, 2013). É evidente a clara importância destes parâmetros na segurança rodoviária, no entanto, é o coeficiente de atrito transversal que mais influência tem sobre a velocidade de circulação e respetiva ocorrência de acidentes rodoviários (Pereira e Miranda, 1999).

Para Alves (2007) o coeficiente de atrito é uma característica que evolui a curto e a longo prazo. Este autor, citando Branco *et al.*, (2006), refere que o coeficiente de atrito diminui a curto prazo por influência da chuva, uma vez que, quando começa a chover, a água se mistura com as poeiras acumuladas à superfície do pavimento, formando uma pasta fluida e fina que leva à diminuição repentina do coeficiente de atrito. Passados alguns minutos, dependendo do estado em que se encontra o pavimento e da intensidade da chuva, a pasta que se formou anteriormente vai sendo removida pela própria chuva e pela passagem de veículos, o que leva a um ligeiro aumento do coeficiente de atrito. Assim que cessa o período de precipitação, a água começa a ser evaporada e escoada pelo pavimento e o coeficiente de atrito retorna ao seu valor normal. Na figura 3.7 está representada a variação do atrito a curto prazo.

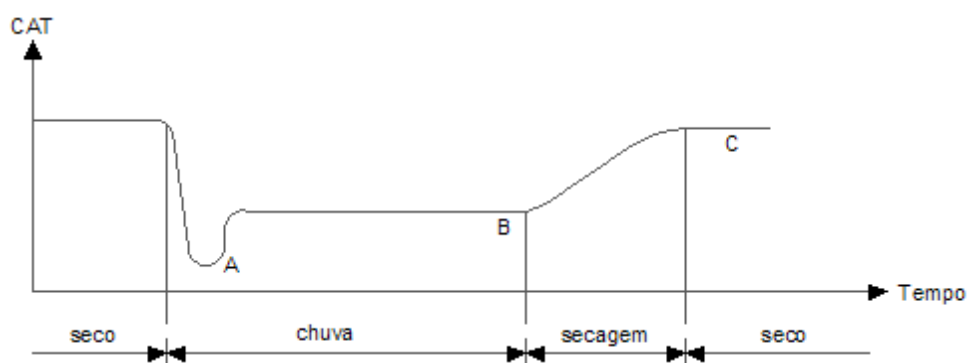


Figura 3.7 - Evolução do CAT num curto período de tempo (Pereira e Miranda, 1999)

Do ponto de vista da modificação do coeficiente de atrito a longo prazo, o autor refere que esta acontece devido à degradação do pavimento, e quando este estado é muito avançado, há um aumento da macrotextura que, inevitavelmente, faz com que aumente o coeficiente de atrito. Na figura 3.8 está representada a variação do atrito a longo prazo.

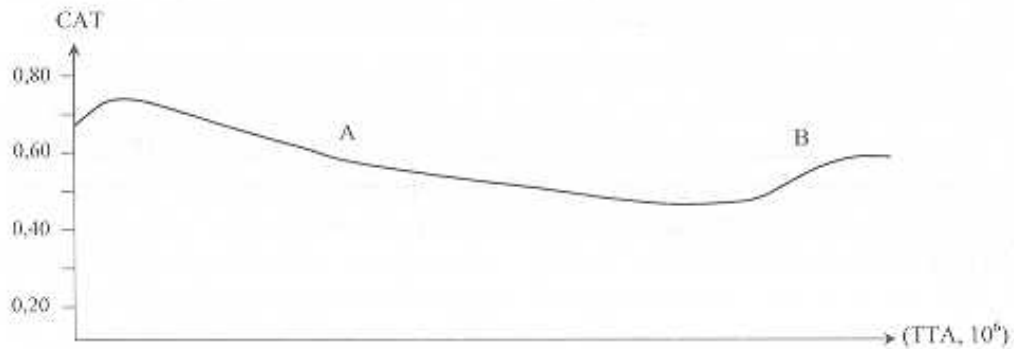


Figura 3.8 - Evolução do CAT com o tráfego total acumulado, TTA (10⁶) (Pereira e Miranda, 1999)

Para avaliar o atrito nos pavimentos é comum a utilização de equipamentos específicos com condições padronizadas, e por norma, os ensaios são realizados sobre o piso molhado (Duarte, 2011). O objetivo de se realizarem os ensaios com piso molhado é simular o que acontece entre a passagem de um veículo e o seu contacto com a superfície do pavimento em eventos chuvosos. Em situações como estas, o atrito decresce rapidamente trazendo assim maiores dificuldades aos condutores, prejudicando a boa circulação dos veículos.

Segundo Pereira & Miranda (1999) existem três métodos para medir o atrito numa superfície de desgaste. Os autores referem que para medir o atrito pontual não é necessária a utilização de pneu, para o atrito longitudinal em contínuo utiliza-se o pneu bloqueado e para medir o atrito transversal em contínuo deve-se utilizar o pneu livre.

Basicamente, os ensaios realizados para determinar o atrito consistem na passagem de uma roda ou deslizador sobre o pavimento, com velocidade constante ou variável (Pinto, 2003).

De seguida apresentam-se os ensaios para a medição pontual, longitudinal e transversal, o pêndulo britânico, o *Grip-Tester* e o SCRIM, respetivamente.

3.3.1 Pêndulo Britânico

O Pêndulo Britânico é um equipamento que permite medir o atrito pontual num determinado local de forma a conseguir avaliar a energia que é absorvida pelo equipamento em contacto com o pavimento (Pereira & Miranda, 1999).

O Pêndulo Britânico trata-se de um equipamento portátil que segue a norma EN 13036-4:2011 (*Road and airfield characteristics. Test methods. Method for measurement of slip/skid resistance of a surface: The pendulum test*). O ensaio consiste no deslizamento de um pêndulo sobre o pavimento humedecido e durante o movimento realizado por este, existe perda de energia que serve como medida de atrito e é registada numa escala graduada (Couchinho, 2011). Na figura 3.9 está representado o equipamento do Pêndulo Britânico utilizado no troço experimental.



Figura 3.9 - Pêndulo Britânico nos ensaios realizados no troço experimental

O equipamento permite ao utilizador simular a travagem do pneu de um veículo a 50 Km/h sobre um pavimento molhado (Duarte, 2011). Com este ensaio obtêm-se valores de PTV (*Pendulum test value*) que indiretamente representam os valores do atrito longitudinal entre o pavimento e os pneumáticos. Assim, quanto maiores forem os valores de PTV, maior será a resistência que o pavimento oferece à passagem da borracha do equipamento e maior será a energia perdida por este (Alves, 2007). Segundo o CEEP (2014), os valores admissíveis para o coeficiente de atrito, registado pelo Pêndulo Britânico, devem ser superiores a 60.

No quadro 3.5 apresentam-se os requisitos a ser cumpridos no ensaio do Pêndulo Britânico de acordo com o CEEP (2014).

Quadro 3.5 - Valores do coeficiente de atrito pontual (Pendulum Test Value) (adaptado de CEEP,2014)

Requisitos/Propriedades	Unidade	Utilização
Especificidades de utilização		Ensaio com o pêndulo britânico; Deslizador grande com borracha CEN; Escala C
Coeficiente de atrito pontual (Pendulum Test Value)	PTV	≥60

3.3.2 Grip-Tester

O *Grip-Tester* é um equipamento que mede o valor do coeficiente de atrito longitudinal, de forma contínua, entre o pneu normalizado e o pavimento (Menezes, 2008). Este ensaio faz uma medição do coeficiente de atrito com recurso a um pneu normalizado instalado num reboque (Duarte, 2011). A roda central que mede o coeficiente de atrito apresenta uma rotação retardada e atua com uma taxa de deslizamento de 15%, sendo que este equipamento pode atingir velocidades até 100 km/h (Couchinho, 2011). O ensaio do *Grip-Tester* realiza uma medição das forças de arrastamento verticais e horizontais (Pinto, 2003). Na figura 3.10 pode ver-se o aspeto do reboque do ensaio.



Figura 3.10 - Grip-Tester num ensaio (à esquerda) (EASA, 2010) e mecanismo do Grip-Tester (à direita) (Menezes, 2008)

O reboque do *Grip-Tester* é acoplado a um veículo onde são recolhidos os dados do coeficiente de atrito (carga/resistência à rotação) através de um sistema informático denominado de *Grip Number* (Menezes, 2008).

O veículo que reboca o *Grip-Tester* possui um depósito de água com capacidade para 500 litros, que cria uma lâmina de água com uma temperatura entre 5°C e 25°C e 0,50 mm (Alves, 2007). Para uma correta interpretação dos resultados, o ensaio é habitualmente realizado a uma velocidade de 50 km/h, apesar de o equipamento permitir a medição a velocidades mais elevadas (Duarte, 2011).

A PIARC (*Permanent International Association of Road Congress*) definiu um Índice Internacional de Atrito conhecido como *IFI* (*International Friction Index*) que engloba o coeficiente de atrito medido a 60 km/h (F_{60}) e o parâmetro S_p que se relaciona com a textura, por existirem vários métodos de medição de atrito num pavimento que dependem da macrotextura e da velocidade de ensaio, sendo desta forma possível homogeneizar os parâmetros que caracterizam o pavimento (Couchinho, 2011).

Com as medições, o coeficiente de atrito é calculado e registado automaticamente, onde o *Grip Number* representa a média do número de leituras instantâneas num determinado comprimento de teste (Menezes, 2008). Segundo a norma BS 7941-2:2000 (*Methods for measuring the skid resistance of pavement surfaces. Test method for measurement of surface skid resistance using the Grip-Tester braked wheel fixed slip device*) os valores de *Grip Number* (GN) variam de 0 a 1,2 GN.

A equação 3.2 mostra como determinar o *IFI*.

$$IFI = F_{60} = 0,0821 + 0,9104 \times GN \times e^{\frac{(0,15S-60)}{S_p}} \quad (3.2)$$

Onde:

GN - Grip Number - resulta do quociente entre a força vertical (F_v) e a força horizontal (F_h);

S - Velocidade de ensaio;

F_{60} - Valor do coeficiente de atrito a uma velocidade de 60 km/h;

S_p - Constante de velocidade de referência.

3.3.3 SCRIM

O SCRIM (*Sideway Force Coefficient Routine Inspection Machine*) é um equipamento utilizado para medir o coeficiente de atrito em contínuo, neste caso o coeficiente de atrito transversal (Pereira & Miranda, 1999). Este equipamento permite realizar o ensaio com velocidades que vão desde os 20 km/h aos 100 km/h (Alves, 2007).

O SCRIM está inserido na estrutura de um camião que possui um condutor e um controlador, sendo que, ao condutor é permitido controlar a medição e inserir dados durante o percurso de ensaio (Couchinho, 2011).

Da mesma forma que no *Grip-Tester*, o SCRIM possui um reservatório de grandes dimensões e tem o objetivo de criar uma lâmina de água com 0,50 mm à frente da roda de teste (Alves, 2007). O SCRIM tem ainda um pneu de borracha liso que se movimenta verticalmente e é independente do movimento do camião (EASA, 2010).



Figura 3.11 - Equipamento SCRIM (à esquerda) e esquema do SCRIM (à direita) (Coutinho,2011; Alves, 2007)

A roda utilizada para o ensaio localiza-se a meio do veículo do lado da faixa a medir e encontra-se inclinada 20° em relação ao eixo longitudinal do camião, sendo esta aplicada no pavimento com uma determinada carga previamente conhecida e podendo ser levantada quando não está a ser utilizada. Durante a medição surge uma força de atrito R, gerada na zona de contacto entre o pneu e pavimento, perpendicular ao plano de rotação da roda. O CAT pode determinar-se sabendo que atua uma carga de 200 kg sobre a roda de medição. O parâmetro CAT é calculado através do quociente entre a força N (ação transversal) e a força R (reação vertical) (Pereira & Miranda, 1999).

Segundo o CEEP (2014) existem valores que devem ser cumpridos para os equipamentos de medição em contínuo, estes são apresentados no quadro 3.6.

Quadro 3.6 - Valores para o coeficiente de atrito em contínuo (CEEP, 2014)

Requisitos/Propriedades	Unidade	Utilização	
		Equipamento tipo SCRIM (BS 7941-1)	Equipamento tipo GRIP TESTER (BS 7941-2)
Especificidades de utilização		Valor médio por lote. Medição em contínuo a 50 km/h e com uma película de água com 0,5 mm de espessura	
Coeficiente de atrito à velocidade de 50 km/h	-	≥ 0,50	≥ 0,60

3.4 Regularidade

Três importantes aspetos como a economia, a segurança e o conforto para os utilizadores de um pavimento rodoviário estão relacionados com o perfil longitudinal e transversal do mesmo (Sayers & Karamilhas, 1998). A regularidade superficial trata-se de uma propriedade funcional que influencia o condutor diretamente, devido a estar associada a fatores económicos, de comodidade e de segurança. A esta regularidade superficial estão associadas as irregularidades que são originadas pela aplicação e compactação descuidadas dos materiais, pela circulação de veículos e pela reduzida capacidade de suporte da camada de fundação e respetivas deformações.

As irregularidades do pavimento têm diversas consequências para o veículo e para o utilizador. Do ponto de vista económico salientam-se as consequências como o aumento do consumo de combustível e a deterioração dos pneus dada a diminuição das características estruturais do pavimento. Relativamente à comodidade, esta varia consoante o comportamento do condutor durante a sua condução. Depende ainda dos hábitos de condução, da distância do percurso, do tempo de paragem, bem como das velocidades praticadas pelos condutores (Couchinho, 2011).

No que concerne à segurança de circulação, as irregularidades do pavimento podem provocar falta de aderência quando o piso se encontra molhado e levar ao fenómeno de hidroplanagem e perda do controlo da trajetória do veículo. As irregularidades podem provocar perda de atenção e perceção da estrada por parte do condutor (Pinto, 2003).

3.4.1 Regularidade Transversal

O perfil transversal do pavimento é muito importante para a avaliação da qualidade do pavimento. As irregularidades nesta situação influenciam a segurança na condução e o conforto, de modo grave quando o piso se encontra molhado, e de modo muito grave com a formação de geada e gelo (Menezes, 2008).

A deformação transversal é medida através da profundidade máxima das rodeiras que fornece informação da qualidade estrutural (Menezes, 2008). Estas rodeiras surgem devido aos assentamentos no pavimento causados pelas falhas de projeto, pela passagem dos veículos ou pelos materiais utilizados e respetiva construção surgindo, conseqüentemente, zonas onde se pode eventualmente acumular água (Pereira & Miranda, 1999).

Para avaliar as irregularidades podem ser utilizados equipamentos como a régua, do tipo geométrico, ou recorrer a equipamentos com tecnologia laser ou ultrassons como o PALAS. A utilização da régua é a única metodologia de avaliação que está prevista no CEEP (2014).

3.4.1.1 Régua

O principal objetivo deste ensaio é determinar as deformações transversais causadas pela passagem dos rodados dos veículos, analisando a profundidade máxima do cavado das rodeiras (Maia, 2012). Este ensaio é regulamentado pela norma BS EN 13036-7:2003 (*Road and airfield surfasse characteristics. Test methods. Irregularity measurement of pavement courses. The straightedge test*). Na figura 3.12 encontra-se representado o ensaio da Régua para avaliar a irregularidade transversal.



Figura 3.12 - Ensaio da régua para avaliação da irregularidade transversal (Maia, 2012)

A régua a ser utilizada deve ser de metal, desempenada e com um comprimento 3 m. A superfície a ser analisada deve estar limpa para uma correta avaliação. O cavado da rodeira relaciona-se com a medida da maior flecha quando se coloca a régua transversalmente, a meio do local que se pretende ensaiar (Alves, 2007).

Se for necessário obter resultados com maior rigor poderá ser utilizado um transversoperfilógrafo, uma vertente da régua de 3 m que possui um sistema de aquisição informático que gera a medição (Pereira & Miranda, 1999).

Segundo o CEEP (2014) a regularidade da camada deve ser avaliada em diversos pontos distanciados por 25 m e utilizando uma régua fixa, no caso de se avaliar a regularidade transversal, ou uma régua móvel, no caso de se avaliar a regularidade longitudinal. Os valores regulamentados pelo CEEP (2014) encontram-se no quadro 3.7.

Quadro 3.7 - Critérios de regularidade para camadas em misturas betuminosas quando não se proceda à determinação de IRI

Requisitos/Propriedades	Unidade	Utilização	
		Camada de desgaste	1ª camada e seguintes subjacentes à camada de desgaste
Especificidades de utilização		Avaliação da irregularidade por meio de régua de 3 metros com um espaçamento de 25 m	
Irregularidades máximas	mm	≤ 4	≤ 8

3.4.2 Regularidade Longitudinal

No panorama da regularidade existe sempre uma discrepância entre o perfil executado e o de projeto (Luz, 2011). Estas discrepâncias são consideradas como uma irregularidade geométrica do pavimento que condicionam a drenagem, a qualidade de circulação e a dinâmica do veículo.

A irregularidade longitudinal afeta negativamente a vida do pavimento, causando desconforto aos condutores. Pereira & Miranda (1999) consideram que se pode analisar a irregularidade longitudinal sob dois aspetos: o aspeto físico e o aspeto geométrico. Relativamente ao primeiro aspeto, todos os defeitos da superfície podem provocar vibrações nos veículos. No que diz respeito ao aspeto geométrico, considera-se que a irregularidade longitudinal é o conjunto dos desnivelamentos da superfície do pavimento em relação ao perfil longitudinal teórico.

Por forma a caracterizar as condições de irregularidade do pavimento foi criado um Índice de Irregularidade Internacional (IRI - do inglês *International Roughness Index*). Este exprime com clareza a irregularidade da superfície de um pavimento ao longo de um troço a ser avaliado e representa o impacto na resposta do veículo (Luz, 2011). O IRI foi desenvolvido com o objetivo de recriar, através de um modelo matemático, a maneira como reage um pneu na suspensão de um veículo às irregularidades que surgem na superfície de um pavimento com uma velocidade de 80 km/h (Alves, 2007). As irregularidades detetadas são registadas em sistema informático, com utilização do perfil longitudinal para calcular o IRI, baseado nos deslocamentos acumulados da simulação da suspensão, a dividir pela distância percorrida. Os resultados exprimem-se em m/km (Pereira & Miranda, 1999). Apesar da utilização deste sistema, nos últimos anos adotaram-se novos métodos e equipamentos para uma melhor abordagem das irregularidades dos pavimentos, como é o caso dos perfilómetros a laser.

O CEEP apresenta algumas normas que devem ser tidas como referência na abordagem ao IRI. A medição da irregularidade longitudinal deverá ser efetuada ao longo da rodeira externa, ou ao longo das duas rodeiras de cada lote ensaiado. Os valores de IRI são calculados em troços de

100 m, sendo que, o valor médio obtido para esses 100 m será o que representará esse trecho. É aconselhável que os resultados apresentem o perfil longitudinal da superfície e os valores do IRI em trechos de 100 m para que, com maior facilidade, se possam identificar as deficiências no pavimento e conhecer melhor a sua localização para futuras intervenções.

Nos quadros 3.8, 3.9 e 3.10 apresentam-se as várias classificações do IRI impostas pelo CEEP (2014).

Quadro 3.8 - Valores admissíveis de IRI (m/km), calculados por trechos de 100 metros (Adaptado CEEP,2014)

Requisito/Propriedade		Unidade	Utilização		
Especificidades de utilização			Percentagem da extensão do lote		
			50%	80%	100%
Valores admissíveis de IRI	Camada de desgaste	m/km	≤ 1,5	≤ 2,5	≤ 3,0
	1ª camada sob a camada de desgaste		≤ 2,5	≤ 3,5	≤ 4,5
	2ª camada e seguintes sob a camada de desgaste		≤ 3,5	≤ 5,0	≤ 6,5

Quadro 3.9 - Valores admissíveis de IRI (m/km) calculados por trechos de 100 metros em pavimentos reabilitados com espessura de misturas betuminosas igual ou inferior a 0,10 m (Adaptado CEEP,2014)

Requisito/Propriedade		Unidade	Utilização		
Especificidades de utilização			Percentagem da extensão do lote		
			50%	80%	100%
Valores admissíveis de IRI	Camada de desgaste	m/km	≤ 2,0	≤ 3,0	≤ 3,5

Quadro 3.10 - Classificação dos valores de IRI (Adaptado CEEP,2014)

Muito Bom	Excede largamente os parâmetros exigidos
Bom	Cumprir os parâmetros exigidos exceção feita à percentagem da extensão do traçado com valores inferiores a 3,0 e 3,5, que deverá ser superior ou igual a 95%
Razoável	Cumprir os parâmetros exigidos, exceção feita às percentagens de extensão do traçado com valores inferiores a 1,5 e 2,0, e 3,0 e 3,5, onde se admitem respectivamente as percentagens de 40 e 90
Medíocre	

	Não cumpre as exigências anteriores (razoável), mas apresenta valores de IRI de 1,5; 2,5 e 3,0 e 2,0, 3,0 e 3,5 em percentagens do traçado superiores a 15, 60 e 85, respetivamente
Mau	Não cumpre os parâmetros exigidos nas classificações anteriores

3.4.2.1 Perfilómetro a laser

Este equipamento mede os desvios altimétricos da superfície do pavimento em relação a um perfil ideal (Menezes, 2008). Através do perfil longitudinal podem calcular-se vários índices de regularidade superficial do pavimento como é o caso do índice de irregularidade longitudinal (LNEC, 2005).

O perfilómetro a laser permite um levantamento automático da irregularidade longitudinal e transversal ao longo de um perfil longitudinal, e por essas razões a utilização deste equipamento traz vantagens.



Figura 3.13 - Perfilómetro a laser das Estradas de Portugal (Luz, 2011)

Como se pode constatar pela figura 3.13, o equipamento possui uma barra na dianteira do veículo, em alumínio, com lasers que fazem o levantamento do perfil da superfície do pavimento em alinhamentos paralelos ao sentido do deslocamento do veículo. O laser possui uma frequência de 65 kHz e tem capacidade para medir a profundidade média do perfil (MPD) bem como a profundidade média da textura (MTD) (LNEC, 2005).

O sistema que mede o deslocamento do veículo contém um transdutor acoplado a uma das rodas do veículo que acompanha de forma precisa a velocidade e a distância percorrida (Menezes, 2008). Os acelerómetros medem a aceleração vertical do veículo e os movimentos verticais do mesmo, para que os resultados obtidos sejam calibrados tendo em conta estes fatores (Luz, 2011).

3.5 Desempenho mecânico dos pavimentos

Para caracterizar a capacidade mecânica de um pavimento geralmente é observada a deformação vertical da superfície do pavimento que se considera como uma resposta do mesmo a uma determinada carga aplicada (Pereira & Miranda, 1999).

O dimensionamento de um pavimento novo ou a avaliação mecânica de um que está em utilização, tendo como objetivo o reforço da sua capacidade de carga, é realizado através da criação de um modelo de comportamento estrutural que tem em conta as propriedades dos materiais que constituem o pavimento, bem como as características das solicitações deste e as condições climáticas do local em estudo (Machado, 2012).

As deformações que se podem observar na superfície dos pavimentos, conhecidas como deflexões, permitem um melhor conhecimento da qualidade mecânica do pavimento, seja das camadas granulares, seja do solo de fundação (Pereira & Miranda, 1999).

Com o decorrer dos anos, o pavimento vai sofrendo desgaste superficial devido às condições climáticas e à passagem de veículos. Para além deste desgaste à superfície, as deflexões tendem a aumentar, no entanto, com o passar dos anos, estas tendem a estabilizar durante o tempo em que o pavimento se encontra em serviço. No final de vida do pavimento as deflexões sofrem de novo um acréscimo, como se pode observar na figura 3.14 (Francisco, 2012).

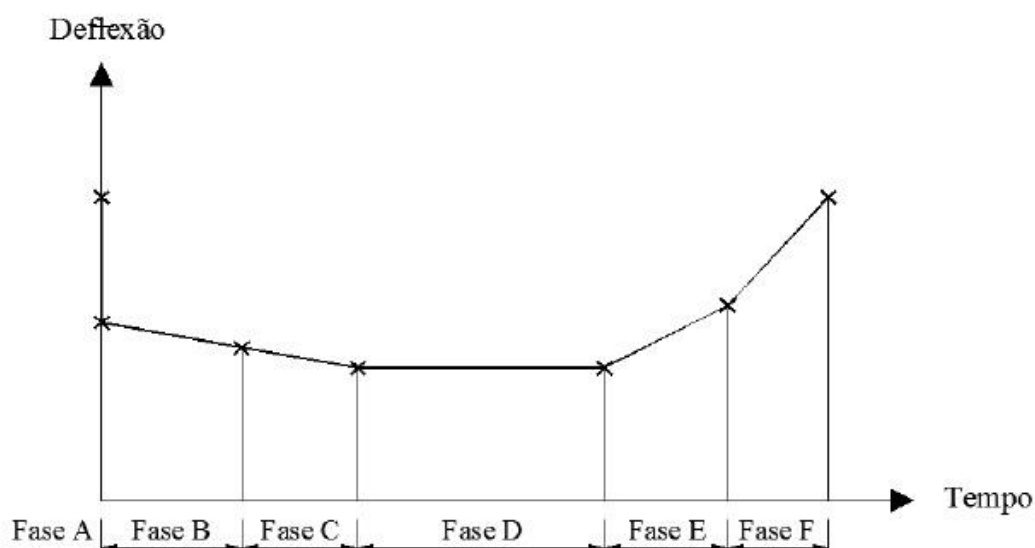


Figura 3.14 - Evolução das deflexões de pavimentos ao longo do tempo (Pereira & Miranda, 1999)

Para avaliar as deformações do pavimento e respetiva capacidade estrutural existem diversos equipamentos, designados por defletómetros ou defletógrafos, como o defletómetro de impacto (FWD - do inglês *Falling Weight Deflectometer*), a viga Benkelman e o defletógrafo de Lacroix (Pereira & Miranda, 1999).

3.5.1 Equipamentos de ensaio

Para avaliar a qualidade mecânica do pavimento e caracterizar o seu respetivo comportamento a esse nível o tipo de ensaio a utilizar pode dividir-se em ensaios destrutivos e não destrutivos. Nos primeiros são retiradas amostras (carotes) para se caracterizar as mesmas em laboratório, com o objetivo de avaliar a resistência estrutural das camadas do pavimento, conhecer a sua espessura e proceder a uma identificação dos materiais constituintes. No segundo caso, nos ensaios não destrutivos, são utilizados equipamentos que avaliam a capacidade de carga do pavimento e medem as deflexões do pavimento. Estes equipamentos permitem obter uma bacia de deflexões de cada ponto ensaiado através da aplicação de uma carga pontual ou rolante (Francisco, 2012).

Os equipamentos que usam cargas pontuais são denominados como defletómetros e medem a deflexão num ponto devido ao impacto criado por uma massa que cai sobre o pavimento. Os equipamentos que usam cargas rolantes, aplicadas por um eixo característico de um veículo pesado que induz forças sobre o pavimento, simulam ações semelhantes à passagem do tráfego (Francisco, 2012).

A figura 3.15 ilustra os diferentes tipos de ensaios não destrutivos utilizados em pavimentos.

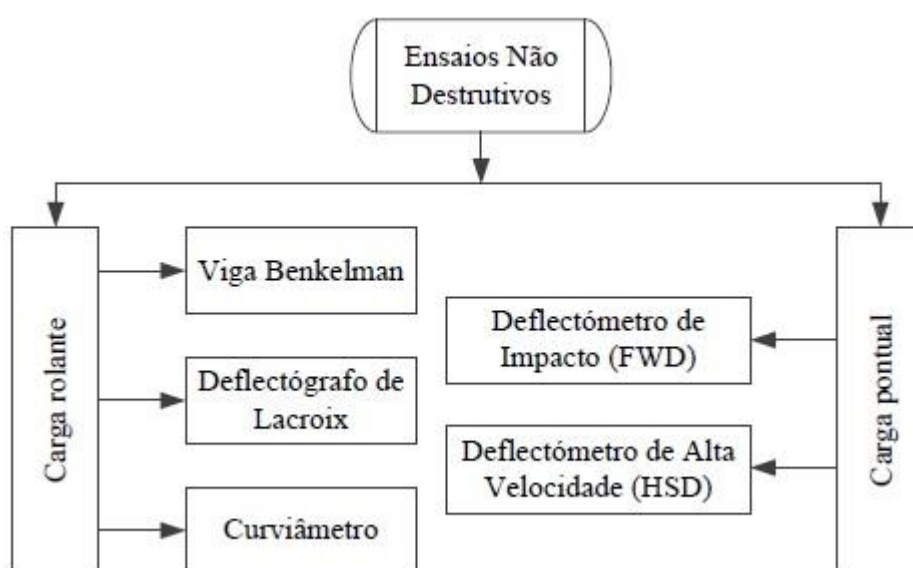


Figura 3.15 - Equipamentos utilizados para ensaios não destrutivos em pavimentos (Francisco, 2012)

3.5.1.1 Viga Benkelman

A viga Benkelman permite medir a deflexão de um pavimento pela aplicação de uma carga quase estática com o auxílio do pneu de um veículo pesado. Este equipamento, apresentado na figura 3.16, é constituído por uma base com um estrutura metálica rígida que se apoia sobre o pavimento durante o ensaio, mantendo-se fixa durante o mesmo e possui uma viga que gira em torno de um eixo solidário com a base e apoia-se sobre o pavimento numa das extremidades (ponta apalpadora) (Pereira & Miranda, 1999).

A medição da deflexão é feita por um transdutor de deslocamentos que se encontra sobre a viga. A distância relativa do percurso é medida por um instrumento semelhante ligado ao rodado do camião, sendo que a resposta do comportamento do pavimento é medida na descarga (Machado, 2012).

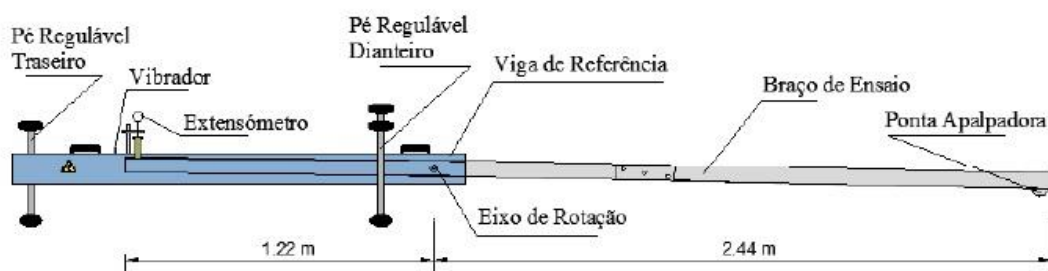


Figura 3.16 - Desenho esquemático da viga Benkelman (Francisco, 2012)

Segundo Pereira & Miranda (1999) os ensaios podem ser realizados em dois ciclos, o “ensaio de carga e descarga” e o “ensaio de descarga”.

A viga Benkelman tem três métodos distintos de operar, o método do retrocesso, o da linha de influência e o da recuperação. Os pontos em comum destes três procedimentos baseiam-se na posição da ponta apalpadora e a velocidade a que são executados os ensaios, de 2 a 3 km/h. Assim, o rodado duplo deve estar posicionado de tal forma que o deslocamento efetuado pelo camião, ao executar o ensaio àquela velocidade, chegue à ponta apalpadora e se realize um movimento perpendicular em que a ponta se posicione entre o rodado (Francisco, 2012).

No que concerne ao método do retrocesso, as medições das deflexões realizam-se para os pontos que distam da viga de Benkelman de -1,00, 0,00 e 8,00 metros. O camião é colocado inicialmente a 8 m da ponta apalpadora e regista a deflexão nesse ponto, posteriormente, desloca-se até chegar ao ponto de leitura 0,00 m e regista a deflexão máxima nesse ponto. Depois de registar os valores para esses dois pontos desloca-se até chegar ao ponto dos -1,00 m e nesse momento inverte o sentido de marcha e continua o seu movimento, no sentido oposto

ao desenvolvimento da viga até chegar novamente ao ponto de leitura inicial de 8,00 m (Francisco, 2012).

O método da linha de influência, conhecido como sendo um ensaio de descarga, utiliza como pontos de leitura -1,00, 0,00, 0,25, 0,50, 1,00, 2,50, 3,70 e 5,00 metros. O ensaio inicia-se no ponto -1,00 m e o movimento desenrola-se no sentido ao desenvolvimento da viga até chegar aos 5,00 m. Durante o tempo que decorre o ensaio, o veículo pesado nunca interrompe a sua ação e, durante esta, vão sendo recolhidas todas as deflexões dos pontos ensaiados. (Francisco, 2012).

No que diz respeito ao método da recuperação, os pontos de leitura são -1,00, 0,00, 0,25, 2,50, 3,70 e 5,00 metros. Este método é realizado da mesma forma que o da linha de influência sendo que a única diferença entre eles são as deflexões medidas (Francisco, 2012).

3.5.1.2 Defletógrafo de Lacroix

Dadas as limitações da viga Benkelman e com o objetivo de se obterem melhores resultados para a capacidade estrutural do pavimento, foi criado em França um equipamento no LCPC (do francês - *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*) que realiza medições resultantes da aplicação de uma carga quase estática dos rodados do eixo traseiro de um veículo pesado. O Defletógrafo de Lacroix é constituído por um camião com um chassis normal ou longo, de dois eixos com uma carga de 130 kN como se encontra representado na figura 3.17. Possui ainda um quadro metálico situado na parte de baixo do camião que apoia sobre o pavimento em quatro pontos, com dois braços captadores que contêm duas vigas de medição que transformam o deslocamento de rotação destes braços em sinal eletrónico. O equipamento inclui ainda dois inclinómetros que medem o raio de curvatura da linha de influência, um termómetro que mede a temperatura superficial do pavimento e um sistema que faz aquisição e tratamento de dados (Pereira & Miranda, 1999).



Figura 3.17 - Camião de transporte do defletógrafo de Lacroix (à esquerda) e viga metálica (à direita) (Francisco, 2012)

3.5.1.3 Defletómetro de impacto (Falling Weight Deflectometer - FWD)

O defletómetro de impacto (FWD) é um equipamento integrado num atrelado e que mede deflexões do pavimento em resposta à aplicação de cargas.

No interior do veículo que reboca o atrelado encontram-se instalados equipamentos eletrónicos nos quais é permitido ao utilizador controlar o ensaio e o registo dos resultados. Este equipamento, através de sensores instalados, consegue também fazer a medição das temperaturas (Machado, 2012).

Para além do sistema eletrónico que compõe o interior do veículo, existe um sistema mecânico que constitui o reboque do FWD. Neste está incluída uma massa que atua sobre um eixo vertical numa estrutura metálica e um conjunto de amortecedores, que transmitem a carga aplicada através de uma placa rígida de 300 mm ou 400 mm de diâmetro. O equipamento possui ainda vários geofones, no máximo nove, que medem a resposta do pavimento à aplicação da carga vertical. No que diz respeito à carga aplicada, esta varia de 30 e 240 kN e a sua velocidade de aplicação simula a passagem de um veículo a 60-80 km/h (Pereira & Miranda, 1999).

O ensaio é realizado com o veículo parado e são realizados pelo menos dois impactos em cada ponto que se pretende ensaiar, sendo que o primeiro *drop* serve para se ajustar a placa de carga ao pavimento.

O FWD permite ao utilizador saber qual o comportamento das camadas constituintes do pavimento em relação a uma determinada carga aplicada. Deste ensaio resultam as deflexões medidas em cada geofone sendo que, depois de obtidas, cabe ao utilizador realizar uma retro-análise para chegar a uma relação entre deflexões calculadas e medidas que lhe permita chegar aos módulos de deformabilidade das camadas do pavimento.

Na figura 3.18 pode-se visualizar o equipamento do ensaio FWD utilizado para o estudo desta dissertação.



Figura 3.18 - Ensaio do defletómetro de impacto (FWD) realizado no troço experimental

3.5.2 Processo de retro-análise

A retro-análise trata-se de um procedimento que permite a estimativa *in situ* dos módulos de deformabilidade do pavimento. Para se iniciar a retro-análise é feito o levantamento das deflexões do pavimento usualmente através do FWD que traduz a resposta do pavimento quando este é solicitado por uma carga. Posteriormente ao levantamento das deflexões, é necessário o conhecimento da constituição do pavimento em análise, nomeadamente da espessura das suas camadas e respetivos coeficientes de Poisson, de forma a obter com maior rigor os módulos de deformabilidade (Correia, 2014).

Depois de se obterem as bacias de deflexões da superfície do pavimento, a retro-análise é realizada com vista à determinação dos módulos de deformabilidade de cada camada constituinte do pavimento, onde se poderá efetuar o ajuste entre as bacias das deflexões reais obtidas durante o ensaio do FWD e as bacias de deflexões calculadas através dos programas de cálculo. O ajuste dos valores das deflexões medidas e calculadas é feito através de um processo iterativo que termina assim que o utilizador considere que a diferença entre os valores dessas deflexões seja suficientemente reduzido.

Para verificar se o ajuste foi bem realizado pelos programas pode recorrer-se ao *Root Mean Square Error* (RMSE), que se apresenta na equação 3.3:

$$\text{RMSE (\%)} = \left(\sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \left(\frac{d_{ci} - d_{mi}}{d_{mi}} \right)^2} \right) \times 100 \quad (3.3)$$

Onde:

n - deflexão para um ponto de ensaio i;

d_{ci} - deflexão calculada para o ponto de ensaio i (m/m);

d_{mi} - deflexão medida no ponto de ensaio i.

No que concerne à aplicação da retro-análise devem ser levados em conta vários fatores que por vezes podem condicionar a análise das deflexões. O utilizador deverá ter em atenção os dados introduzidos nos programas de cálculo denominados por “módulos semente”, as espessuras das camadas, a interdependência entre elas, bem como o efeito da temperatura para o cálculo dos módulos de deformabilidade das camadas do pavimento.

3.5.2.1 Módulos semente

Os módulos semente surgem no início do processo da retro-análise e incluem a espessura das camadas, o número de iterações realizadas, os módulos para cada camada, bem como os critérios de convergência adotados pelo programa computacional utilizado (Guido-Simm, 2007).

Efetuar duas análises das mesmas deflexões de um pavimento com valores “semente” de módulos de deformabilidade distintos pode levar também a soluções distintas no ajuste das bacias de deflexão no processo iterativo realizado com o auxílio dos programas computacionais. O utilizador poderá evitar esta discrepância entre várias abordagens das deflexões tendo um conhecimento apropriado das camadas do pavimento e introduzir valores “semente” adequados, estipulando limites para os módulos calculados ao longo das várias iterações. Tendo estes aspetos em conta, o utilizador consegue evitar os valores obtidos com uma boa aproximação matemática e percentagens de erro reduzidas mas pouco realistas fisicamente, no que diz respeito aos materiais que constituem o pavimento (Correia, 2014).

Quanto mais próximos forem os valores “semente” introduzidos dos módulos de deformabilidade reais mais facilmente será realizado o processo de convergência para a solução final, logo, menos iterações terão de ser realizadas para se obterem resultados adequados através dos programas de cálculo.

3.5.2.2 Espessura das camadas

O conhecimento da espessura das camadas que constituem o pavimento é essencial para se efetuar a retro-análise. Quando se pretendem analisar os módulos de deformabilidade das camadas de um pavimento novo torna-se simples atribuir espessuras às diversas camadas nos programas computacionais. Esta situação não acontece quando se pretende analisar um pavimento com alguns anos de utilização onde, inevitavelmente, existirá algum desgaste e consequentemente uma alteração da espessura das camadas.

Quando não se conhecem verdadeiramente as espessuras das diversas camadas pode-se recorrer a ensaios destrutivos, como a sondagem à rotação, através da qual se extraem tarolos que permitem a identificação da espessura das camadas betuminosas, ou poços para uma identificação minuciosa das camadas granulares e do solo de fundação. Habitualmente é também utilizado o *Ground Penetrating Radar* (GPR), método não destrutivo, que permite uma análise do pavimento em profundidade, estimando as espessuras das camadas e a variação em toda a sua extensão (Correia, 2014).

Através destes ensaios é possível identificar as interfaces entre as várias camadas de materiais diferentes como as de betão betuminoso e camada granular ou da camada granular com o solo de fundação.

3.5.2.3 Camadas rígidas

Considerar a existência de camadas rígidas em detrimento do solo de fundação como uma camada infinita tem influência nos cálculos realizados pelos programas de retro-análise. Quando se considera uma camada rígida admite-se que abaixo desta não existe quase nenhuma contribuição para as deflexões medidas durante o ensaio à superfície do pavimento (Correia, 2014).

Com o ensaio FWD são impostas tensões ao pavimento provocadas pelo peso do próprio equipamento que faz com que surjam deformações dos vários materiais do pavimento e através destas são calculadas as deflexões. Como tal, as deflexões superficiais medidas a uma certa distância da aplicação da carga são o resultado das deformações dos materiais do pavimento na zona de tensões (Rohde & Scullion, 1990).

Em suma, considerando a existência de solo de fundação, os geofones do FWD medem o valor do assentamento da superfície do pavimento nessa zona, ou seja, o primeiro geofone mede a deformação total do conjunto das camadas incluindo a camada superficial, a camada granular e o solo de fundação, enquanto que, o último geofone regista apenas a deformação que diz respeito ao solo de fundação. A figura 3.19 representa esquematicamente esta situação.

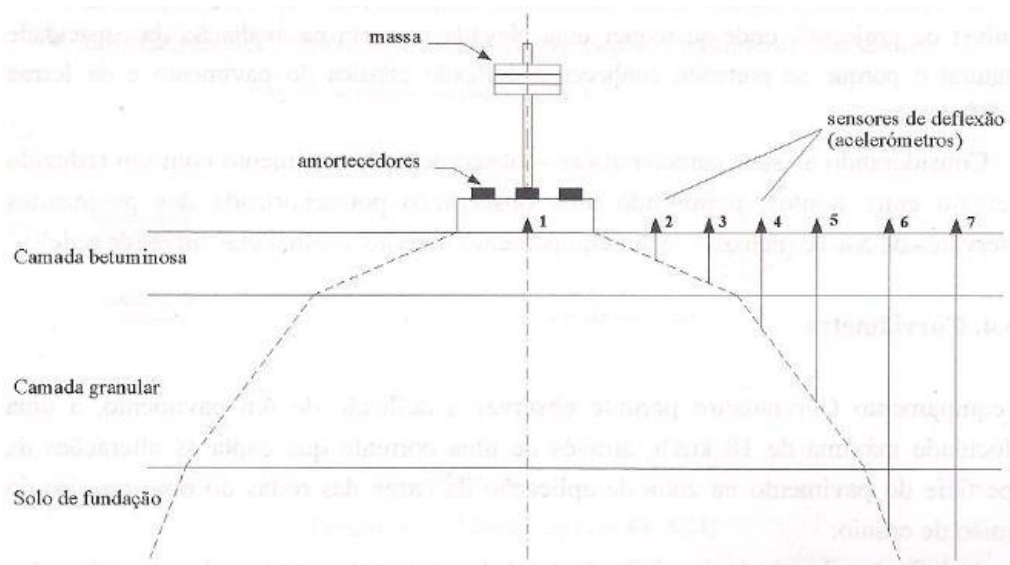


Figura 3.19 - Defletómetro de impacto e zonas de tensão em cada camada (Correia, 2014)

3.5.2.4 Relação entre as camadas

O objetivo dos programas de retro-análise é calcular deflexões que se aproximem das deflexões medidas pelo FWD. Para se conseguir chegar a uma relação aproximada entre estas deflexões é muito importante reconhecer que os materiais que constituem as camadas do pavimento apresentam algumas divergências, no entanto, é fundamental entender que apesar destas, os

módulos de deformabilidade das camadas apresentam uma relação de interdependência traduzida pela expressão 3.4.

$$E_g/E_s = 0,2 \times h_g^{0,45} \quad (3.4)$$

Onde:

E_g - módulo da camada granular (MPa);

h_g - espessura da camada (mm);

E_s - módulo da camada do solo de fundação (MPa).

Claessen *et al.*, (1977) citado por Correia (2014) referem que o valor da parcela $0,2 \times h_g^{0,45}$ deve estar entre 1,5 e 4. Não deve ser inferior a 1,5 porque isso significaria que a camada superior não seria mais resistente que a inferior, e por outro lado, não deve ser superior a 4 pois a resistência seria demasiado elevada, algo que só seria possível em condições muito controladas no processo de execução.

É de salientar a importância da interdependência entre as camadas e adotar valores coerentes para os módulos de deformabilidade já que os programas de cálculo têm uma preocupação essencialmente matemática no que concerne aos ajustes dos dados medidos e calculados. Cabe assim ao utilizador ter um conhecimento aprofundado sobre o pavimento e respetivas camadas para aliar este conhecimento ao entendimento matemático dos programas computacionais para garantir ajustes realistas do ponto de vista físico.

3.5.2.5. Temperatura

A temperatura tem influência sobre o pavimento, principalmente nas camadas superficiais betuminosas, o que leva a uma variação dos módulos de deformabilidade das mesmas. No Inverno, devido às baixas temperaturas, os módulos de deformabilidade são mais baixos que no Verão, verificando-se que com o aumento das temperaturas a rigidez das camadas betuminosas vai diminuindo, levando desta forma a módulos mais baixos.

Por norma, durante o ensaio FWD a temperatura das camadas do pavimento é medida e pode ser tida em conta pelos programas de retro-análise. Visto que os módulos de deformabilidade nesses programas se baseiam nas deflexões medidas durante o ensaio com o efeito da temperatura, estes devem ser corrigidos após a retro-análise para a temperatura de serviço através da equação 3.5 desenvolvida pelo LNEC em 2005 (Amorim 2013).

$$E_T = (1,635 - 0,0317 \times T) \times E_{20} \quad (3.5)$$

Onde:

T - temperatura nas camadas betuminosas durante o ensaio (°C);

E_T - módulo de deformabilidade para a temperatura T (MPa);

E_{20} - módulo de deformabilidade para a temperatura de referência de 20° C (MPa).

Para obter a temperatura é necessário recorrer aos dados de institutos de meteorologia e estimar a temperatura média do ar num determinado período. Sabendo essa temperatura é possível, através do ábaco de Shell, chegar à temperatura de serviço a utilizar na equação 3.5.

3.5.3. Metodologias existentes

Existem várias metodologias que são utilizadas para estimar os módulos de deformabilidade dos pavimentos através do processo de retro-análise. Existe uma abordagem tradicional, onde se estimam os trechos uniformes, no que à capacidade de carga diz respeito, seguidamente da identificação física do pavimento na zona mais representativa. No desenvolvimento deste trabalho esta não será uma etapa a ser cumprida pois o caso de estudo trata-se de um estacionamento, logo os trechos são pequenos comparativamente a trechos de estrada e não requerem esta análise. Nesta abordagem, adota-se ainda a utilização do programa BISAR da Shell para se chegar aos valores dos módulos de deformabilidade das camadas do pavimento através de um processo iterativo. Uma outra abordagem seria utilizar programas de retro-análise, ELMOD e o Modulus, que utilizam diretamente os dados do FWD, no entanto, estes não serão descritos neste trabalho uma vez que não foram utilizados no seu desenvolvimento.

3.5.3.1. Abordagem tradicional

Depois de obtidos os dados do ensaio do defletómetro de impacto (FWD) pode dar-se início ao processo de retro-análise propriamente dito. Como se havia explicado em 3.5.3, neste processo não se efetuará divisão de trechos dada a dimensão reduzida do caso de estudo abordado neste trabalho.

Inicialmente, deverá proceder-se à normalização das deflexões, uma vez que durante os ensaios é normal haver pequenas variações na força aplicada, que podem dever-se às características do pavimento ensaiado ou mesmo do próprio equipamento de ensaio. Como tal, após a normalização das deflexões, chegar-se-á a uma força comum a todos os ensaios realizados, o que permite uma melhor comparação de resultados (Correia, 2014).

A normalização das deflexões é dada pela equação 3.6:

$$D_n = D_m \times \frac{F_p}{F_m} \quad (3.6)$$

Onde:

D_n - deflexão normalizada (μm);

D_m - deflexão medida (μm);

F_p - força padrão (kN);

F_m - força medida (kN)

Posteriormente à normalização das deflexões, o utilizador deverá introduzir todos os dados necessários no programa BISAR (*Bitumen Stress Analysis in Roads*) tais como, a espessura das camadas, as deflexões normalizadas e realizar todas as iterações necessárias para encontrar uma solução conveniente para o ajuste das deflexões calculadas pelo programa e as deflexões medidas pelo FWD.

O programa computacional BISAR calcula deslocamentos, tensões e extensões num pavimento em que atua uma carga vertical distribuída de forma uniforme numa área circular de raio r , permitindo desta forma simular as condições do ensaio FWD (Correia, 2014).

Para o programa fazer uma correta análise deverão ser introduzidos os dados de ensaio como o raio da placa de carga, a amplitude da carga aplicada e a posição dos geofones durante o ensaio. Posto isto, o utilizador deve introduzir as espessuras das camadas, os coeficientes de Poisson e os módulos de deformabilidade estimados. Posteriormente a esta introdução de dados pelo utilizador, o BISAR calcula as deformações “teóricas” obtidas, permitindo desta forma a comparação com os valores medidos no ensaio.

O quadro 3.11 apresenta alguns valores normalmente utilizados para os módulos de deformabilidade das camadas de um pavimento, no entanto será previsível que para o caso de estudo desta dissertação os módulos de deformabilidade sejam ligeiramente diferentes dos apresentados no quadro.

Quadro 3.11 - Módulos de deformabilidade para camadas do pavimento (Adaptado de EP,1995)

Camada	Módulo de deformabilidade (Mpa)
Betão betuminoso	7000 a 9000 (T=15°C) 5000 a 6000 (T=20 °C) 3000 a 4000 (T=25°C)
Betão betuminoso fendilhado	500 a 1000
Agregado tratado com cimento	10000 a 20000
Solo-cimento	1000 a 5000
Base granular britada	150 a 300
Sub-base granular britada	100 a 200
Solos selecionados	60 a 100

No que concerne a outros parâmetros a ter em conta na abordagem tradicional deve-se também considerar o coeficiente de Poisson. Quaresma (1985) propõe utilizar 0,35 para camadas betuminosas e 0,30 para camadas granulares. Já para a fundação, MACOPAV considera valores do coeficiente de Poisson de 0,4 como ideais.

Depois de serem inseridos todos os parâmetros necessários é permitido ao utilizador realizar todas as iterações até o programa chegar a uma convergência dos valores calculados com os medidos no ensaio do defletómetro de impacto.

Na figura 3.20 pode verificar-se o resultado da abordagem realizada para a determinação dos módulos de deformabilidade das camadas do pavimento, onde se relacionam as distâncias dos geofones ao centro da placa com as deflexões.

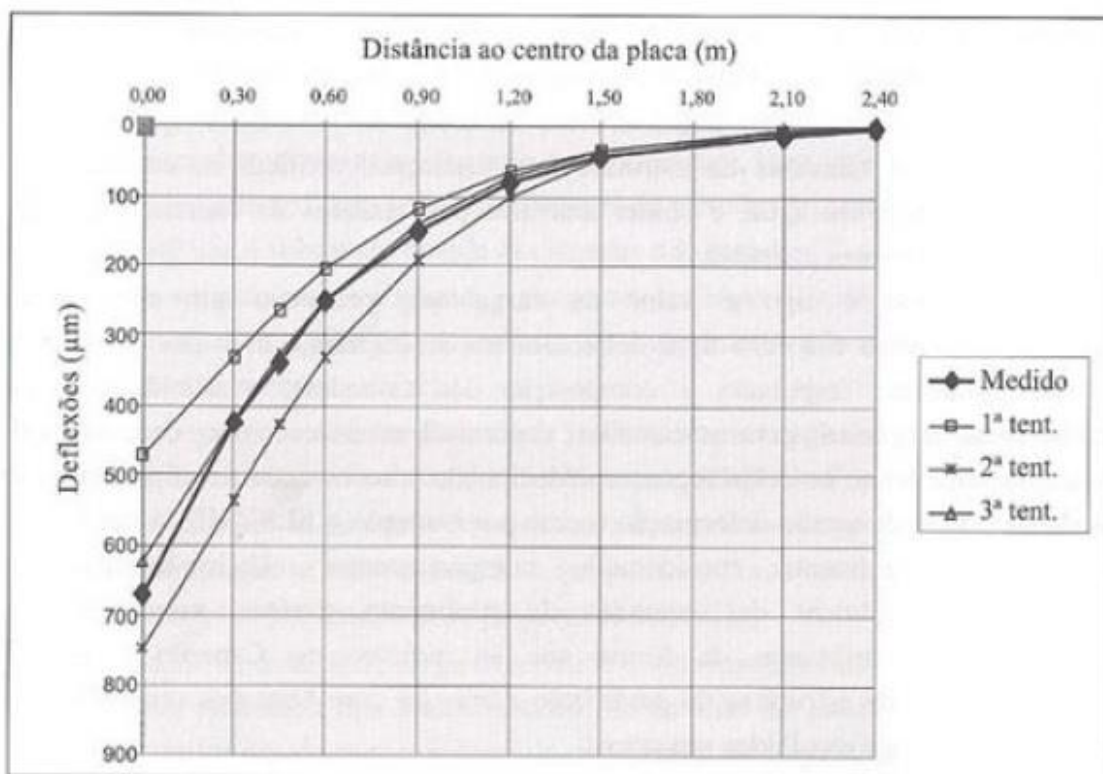


Figura 3.20 - Exemplo de iterações realizadas para ajustar os defletogramas calculados e medidos (Branco et al., 2011)

3.5.4. Estudos realizados com recurso ao defletómetro de impacto

3.5.4.1 Machado *et al.*, 2013

Neste estudo construíram-se quatro estruturas de pavimento à escala real, três delas de misturas betuminosas e uma de material granular. O objetivo desta investigação foi relacionar a força aplicada em cada ensaio com os impactos criados nos diferentes pavimentos. Estes possuem diferentes materiais e espessuras.

Os ensaios não destrutivos foram desenvolvidos por dois equipamentos disponibilizados pelo LNEC, o defletómetro de impacto (FWD) e o defletómetro de impacto portátil (DIP). Depois de obtidas as deflexões medidas realizou-se a retro-análise com recurso ao programa de cálculo linear elástico (BISAR) de forma a obter as deflexões calculadas e chegar a uma conclusão sobre o módulo de elasticidade de cada camada.

As autoras denominaram as estruturas de células e estas são compostas da seguinte forma. A célula 1 é composta por 0,3 m de material granular granítico na primeira camada, na segunda camada contém 0,3 m de material granular calcário e 2,20 m de solo de fundação. A célula 2 tem 0,11 m de mistura betuminosa, 0,3 m de material calcário e 2,40 m de solo de fundação. A célula 3 possui 0,05 m de mistura betuminosa, 0,2 m de material calcário, 0,3 m de material calcário e 2,05 m de solo de fundação. Por fim, a célula 4 é constituída por 0,14 m de mistura betuminosa, 0,20 m de agregado calcário e 2,25 m de solo de fundação. Cada célula tem 2,0 m × 5,0 m e os ensaios foram realizados em dois alinhamentos que distavam entre si de 50 cm e em cada um desses alinhamentos realizaram-se, em 5 pontos distintos, os ensaios que se localizavam a 0,90 m, 1,75 m, 2,65 m, 3,55 m e 4,30 m da margem de cada célula.

Durante os ensaios realizados foram aplicadas cargas de 25, 50, 75, 90, 120 kN para o ensaio do FWD.

Machado *et al.*, (2014) apresentam os resultados dos módulos de deformabilidade obtidos apenas para a célula 2 uma vez que estes foram semelhantes aos que obtiveram para as outras células. No quadro 3.12 resume-se a informação disponibilizada pelos autores.

Depois de obtidos estes resultados, as autoras constataram que nas camadas à base de material granular (célula 1) houve um aumento do módulo de deformabilidade da primeira camada condizente com o aumento da força de ensaio, ao contrário do que aconteceu relativamente às camadas com misturas betuminosas (células 2,3,4), em que o módulo diminuiu com o aumento da força aplicada nos ensaios.

Em suma, os pavimentos com uma camada de desgaste à base de material granular apresentam respostas diretamente proporcionais ao acréscimo de carga relativamente ao módulo de

deformabilidade da primeira camada, desta forma, e nestes casos, dado o comportamento não linear destas camadas, o aumento da força aplicada em ensaios deverá ser um aspeto a ter em conta na avaliação mecânica.

Quadro 3.12 - Resultados obtidos para os módulos de deformabilidade após a retro-análise (Adaptado de Machado *et. al.*, (2013))

Força aplicada (kN)	Módulos (Mpa)	Distância (m)				
		0,9	1,75	2,65	3,55	4,3
25	E1	5000	5000	5000	3000	5000
	E2	3000	6000	6000	3000	2000
	E3	500	500	500	800	1000
	E4	1500	1500	1500	1500	1500
50	E1	8000	5000	6000	4000	8000
	E2	2000	5000	5000	2000	2000
	E3	500	500	500	800	1000
	E4	1500	1500	1500	1500	1500
75	E1	6000	7000	7000	4000	6000
	E2	4000	5000	5000	5000	3000
	E3	400	400	500	500	800
	E4	1500	1500	1500	1500	1500
90	E1	5000	6000	6000	3000	5000
	E2	3000	4000	4000	4000	3000
	E3	500	500	500	600	800
	E4	1000	1000	1600	1500	1500
120	E1	3000	4000	5000	2000	4000
	E2	4000	4000	4000	4000	3000
	E3	500	500	500	600	700
	E4	1000	1000	1600	1500	1500

3.5.4.2 Correia & Picado-Santos, 2014

O trabalho desenvolvido por estes autores teve como objetivo comparar as soluções obtidas por programas de cálculo como o *ELMOD* e o *MODULUS*, utilizados internacionalmente nos processos de retro-análise, com as soluções tradicionais obtidas em Portugal com recurso ao programa *BISAR* e verificar quais os parâmetros a ter em conta aquando da sua aplicação.

O estudo desenvolvido por Correia e Santos (2014) foi realizado em duas estradas com pavimentos flexíveis, a A17 e a A7. Para analisar o comportamento mecânico dos pavimentos destas estradas foi utilizado o ensaio do defletómetro de impacto. Os ensaios realizados com este equipamento foram efetuados com uma carga de 65 kN e uma placa com diâmetro de 300

mm, sendo que os geofones se encontravam distanciados de 0.0, 0.3, 0.45, 0.6, 0.9, 1.2, 1.5, 1.8 e 2.1 metros em relação ao centro de aplicação da carga. Os dados do defletómetro de impacto foram recolhidos ao longo de 25 Km para a A17 e ao longo de 8 Km para a A7.

O pavimento da A17 é constituído estruturalmente por 4 cm de betão betuminoso drenante, 5 cm de betão betuminoso de regularização, uma camada de 15 cm de macadame betuminoso e uma camada de agregado britado com 30 cm.

Em relação à A7, a estrutura do pavimento é constituída por 3 cm de microbetão betuminoso rugoso, 5 cm de betão betuminoso de regularização, uma camada com 9,5 cm de macadame betuminoso e uma camada com 20 cm de agregado britado de granulometria extensa (ABGE).

Depois de realizada a retro-análise, onde se realizaram várias iterações para obter uma aproximação entre os valores das deflexões medidas no campo pelo defletómetro de impacto e os calculados pelos programas, os autores chegaram aos módulos de deformabilidade para as várias camadas constituintes dos pavimentos em análise e compararam os resultados obtidos.

Os resultados comparativos dos módulos de deformabilidade obtidos pelos vários programas apresentam-se nos quadros 3.13 e 3.14.

Quadro 3.13 - Dados comparativos da retro-análise para a A17 com recurso a vários programas de cálculo (adaptado de Correia e Picado-Santos, 2014)

Camada do pavimento	Módulo de deformabilidade (MPa)		
	MODULUS	ELMOD	BISAR
Betão betuminoso	9352	10709	10000
Macadame betuminoso	10371	13383	13000
ABGE	379	220	260
Fundação	103	100	100
Camada rígida	5000	5463	2000

Quadro 3.14 - Dados comparativos da retro-análise para a A7 com recurso a vários programas de cálculo (adaptado de Correia e Picado-Santos, 2014)

Camada do pavimento	Módulo de deformabilidade (MPa)		
	MODULUS	ELMOD	BISAR
Betão betuminoso	1034	1578	1500
Macadame betuminoso	1526	1578	1500
ABGE	186	141	150
Fundação	77	81	80
Camada rígida	770	849	3000

Depois de obterem os resultados os autores constataram que os módulos de deformabilidade registados com a utilização do ELMOD e do MODULUS foram superiores aos obtidos através da abordagem tradicional usada em Portugal usando o BISAR, devido ao facto daqueles dois programas calcularem uma média para todas as estações e apresentarem esses valores como um resultado final ao utilizador. Com o BISAR, é apenas utilizada a estação mais representativa baseada na abordagem do percentil 85 do trecho mais condicionante e, desta forma, a estimativa dos módulos de deformabilidade apresenta mais conservadorismo do que através da média realizada pelos outros programas.

Independentemente dos programas utilizados Correia e Santos (2014) salientam a importância de não se utilizar camadas muito finas, impor limites aos módulos calculados, considerar o efeito da temperatura e simular no programa a existência de uma camada rígida abaixo da fundação. Estes, segundo os autores, são fatores a ter em conta na abordagem a esta temática de modo a obter as melhores soluções.

Em suma, com este trabalho, concluiu-se que, tanto a abordagem tradicional utilizada em Portugal como a abordagem com os programas de cálculo automático podem ser uma maneira viável de chegar a resultados fiáveis, apesar de a abordagem tradicional conferir um maior controlo relativamente às relações entre as camadas e uma maior precisão nos resultados obtidos.

Capítulo 4 - Trabalho Experimental

4.1. Descrição do local do trabalho experimental

A investigação desenvolvida nesta dissertação foi realizada num parque de estacionamento situado no concelho da Covilhã (Portugal). Na Figura 4.1 apresenta-se o local do trabalho experimental no parque de estacionamento que é constituído por 3 lugares que ocupam uma área de 37,5 m² com 2,5 × 5 m cada. O pavimento permeável foi executado no mês de Agosto de 2017 e a sua caracterização foi realizada cinco meses após essa data sem ser efetuada qualquer atividade de limpeza do mesmo. Sendo que o pavimento se insere numa área de lazer, acredita-se que este seja utilizado essencialmente por veículos ligeiros o que leva à diminuição da desagregação da camada superficial.



Figura 4.1 - Pavimento em estudo

O pavimento utilizado possui uma característica distinta em relação aos pavimentos permeáveis mais usuais. Este pavimento apresenta na sua camada mais superficial uma dupla camada drenante (DCD) de uma mistura betuminosa com agregados finos à superfície com 3 cm de espessura e com agregados grossos imediatamente depois desta com 4 cm de espessura, permitindo desta forma ao pavimento ter uma função equivalente à de um filtro que dificulta a passagem de sedimentos para as camadas subjacentes, reduzindo assim a colmatção dos espaços vazios do pavimento. Para além da DCD com um total de 7 cm, o pavimento é constituído por uma camada de regularização de agregados graníticos 5/15 com 9 cm de espessura e uma camada reservatório de 25 cm de espessura com agregados graníticos 15/25.

No desenvolvimento desta investigação foram realizados alguns ensaios para caracterizar o pavimento do ponto de vista funcional e mecânico. Neste capítulo apresentam-se os resultados

do ensaio da mancha de areia para avaliar a textura do pavimento, do pêndulo britânico para avaliar o atrito e do defletómetro de impacto para avaliar a capacidade de carga.

4.2. Ensaio da Mancha de Areia

Na realização deste trabalho, no que concerne à Mancha de Areia, foram realizados dois ensaios distintos. Um dos ensaios foi realizado com o equipamento da Universidade do Minho (UM) com recurso a esferas de vidro e outro com equipamento da Universidade da Beira Interior (UBI) com recurso a areia devidamente normalizada. Os ensaios foram desenvolvidos de acordo com a norma EN 13036-1: 2010 (*Road and airfield surface characteristics - Test methods - Part 1: Measurement of pavement surface macrotexture depth using a volumetric patch technique*) com o objetivo de avaliar a macrotextura do pavimento como referido em 3.2.

Para o ensaio da mancha de areia foram divididos os estacionamentos em 3 secções e para cada uma delas foram realizados ensaios em dois pontos distintos. Na figura 4.2 mostra-se a posição dos locais de ensaio no pavimento. Na secção 3 que abrange os pontos de ensaio 3.1 e 3.2 encontrava-se um veículo estacionado, no entanto, foi possível a realização dos ensaios da Mancha de areia.

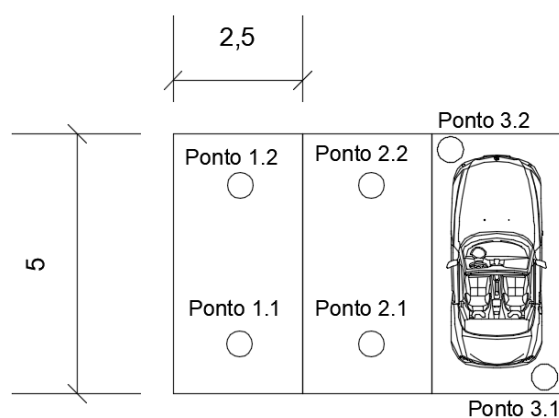


Figura 4.2 - Representação em planta dos pontos do ensaio da Mancha de Areia

No quadro 4.1 apresentam-se os resultados do ensaio da mancha de areia realizado com o equipamento da UM. Para cada ponto ensaiado foram medidos 4 diâmetros calculando-se a sua média para posteriormente se calcular o MTD através da equação 3.1.

Segundo o CEEP (2014) todos os valores resultantes do ensaio da mancha de areia para camadas de desgaste de misturas betuminosas porosas (PA 12,5) devem ser superiores a 1,2 mm como se apresentou no quadro 3.2. Como se pode constatar pelo quadro 4.1 todos os valores obtidos para os diversos pontos ensaiados são superiores a 1,2 mm, logo a média resultante desses

valores é também superior a 1,2 mm. Desta forma, os resultados conseguidos para avaliar a macrotextura são cumpridores dos valores que se encontram preconizados no CEEP (2014).

Quadro 4.1 - Resultados do ensaio da mancha de areia com equipamento da UM

Nº da Secção	Nº do Ponto	V (mm ³)	Diâmetro da mancha (mm)				Média	MTD (mm)
1	1.1	58032	218,0	210,0	215,0	224,0	216,8	1,6
	1.2		195,0	197,0	200,0	210,0	200,5	1,8
2	2.1		210,0	216,0	216,0	216,0	214,5	1,6
	2.2		193,0	198,0	199,0	194,0	196,0	1,9
3	3.1		189,0	209,0	202,0	204,0	201,0	1,8
	3.2		189,0	215,0	197,0	206,0	201,8	1,8
Média (MTD)								1,8

Na EN 13036-1: 2010 é referido que a MTD possui limites de aplicabilidade entre 0,25 mm e 5 mm. Neste caso, como se pode verificar, os resultados obtidos através do ensaio encontram-se também abrangidos pelos valores admissíveis, segundo a norma europeia, para misturas betuminosas a quente.

No que concerne aos resultados obtidos através da utilização do equipamento da UBI, estes apresentam ligeiras diferenças em relação aos resultados apresentados anteriormente, que se devem, essencialmente, ao facto de se ter utilizado areia normalizada em substituição das esferas de vidro.

Seguidamente apresentam-se, no quadro 4.2, os valores obtidos para o ensaio da mancha de areia com equipamento da UBI.

Quadro 4.2 - Resultados do ensaio da mancha de areia com o equipamento da UBI

Nº da Secção	Nº ponto	V (mm ³)	Diâmetro da mancha (mm)				Média	MTD (mm)
1	1.1	60000	190	205	193	194	195,5	2,0
	1.2		200	180	192	190	190,5	2,1
2	2.1		193	178	190	182	185,8	2,2
	2.2		205	195	201	202	200,8	1,9
3	3.1		200	180	190	182	188	2,2
	3.2		190	180	190	185	186,3	2,2
Média (MTD)								2,1

Analisando os resultados apresentados no quadro 4.2 pode concluir-se que estes, tal como os apresentados anteriormente, cumprem com os requisitos impostos pelo CEEP (2014) pois todos os valores são superiores a 1,2 mm e consequentemente uma média também superior a esse valor. Relativamente ao intervalo de valores estipulado pela EN 13036-1: 2010, todos os pontos

apresentam uma profundidade média da textura compreendida entre 0,5 mm e 5 mm tal como é exigido pela norma.

Através dos resultados obtidos, seja com o equipamento da UM ou da UBI, pode-se classificar a macrotextura do pavimento em estudo como muito aberta como referido pela tabela 3.1 apresentada no Capítulo 3. Tendo em conta estes resultados, considera-se que a capacidade do pavimento em infiltrar água é bastante eficiente, o que por si só, revela grande eficácia no combate ao fenómeno da hidroplanagem.

4.3. Pêndulo Britânico

O ensaio do Pêndulo Britânico foi realizado segundo a norma EN 13036-4: 2011 (*Road and airfield surface characteristics - Test methods - Part 4: Method for measurement of slip/skid resistance of a surface - The Pendulum Test*). Os locais de ensaio foram subdivididos em três, que correspondem ao número de estacionamentos do pavimento. Nessas três secções foram realizados ensaios em dois pontos distintos em cada uma delas para averiguar a resistência ao atrito do pavimento. O esquema do ensaio é o mesmo que o representado na figura 4.2. Na figura 4.3 apresenta-se um exemplo das medições realizadas com o Pêndulo Britânico e no quadro 4.3 apresentam-se os resultados obtidos nas várias secções.



Figura 4.3 - Ensaio do Pêndulo Britânico realizado no pavimento

Quadro 4.3 - Resultados do ensaio do Pêndulo Britânico

Nº da secção	Nº do Ponto	u1	u 2	u 3	u 4	u 5	Temp. da água (°C)	PTV	PTV _{CORR}	PTV _{CORR} MÉDIO
1	1.1	68	68	67	67	67	12,0	67	65	67
	1.2	72	71	70	70	70	13,5	71	68	
2	2.1	68	68	66	66	65	15,3	67	64	64
	2.2	67	67	67	66	66	13,4	67	64	
3	3.1	68	67	68	68	68	14,5	68	66	67
	3.2	72	71	70	69	69	15,6	70	69	

Como se pode verificar no quadro 4.3 foram realizados cinco ensaios em cada ponto e para cada um deles foi feita a média dos valores obtidos, resultando os valores de PTV. Posteriormente e segundo a EN 13036-4:2011 as médias obtidas em cada ponto devem ser corrigidas para a temperatura de 20°C. No quadro 4.4 apresentam-se os valores de correção para diversos valores de temperatura medidos no ensaio.

Quadro 4.4 - Correção dos valores de temperatura de ensaio (Adaptado de EN 13036-4:2011)

Temperatura Medida [° C]	Correção para o valor medido
40	+3
30	+2
20	0
15	-2
10	-3
5	-5

Os valores resultantes do ensaio do Pêndulo Britânico são bastante semelhantes entre si como se pode constatar pela análise do quadro 4.3.

Segundo o CEEP (2014), tal como apresentado no quadro 3.4 no capítulo 3, os valores admissíveis para o coeficiente de atrito pontual devem ser superiores a 60. Os resultados obtidos são cumpridores deste parâmetro estabelecido pelo Caderno de Encargos pois todos os valores apresentados no quadro 4.3 são superiores a 60. À luz dos resultados pode-se concluir que em relação ao atrito do pavimento em condições adversas, com o piso molhado, este apresenta condições de segurança adequadas.

4.4. Ensaio do Defletómetro de impacto - FWD

Para avaliar a capacidade de carga do pavimento realizou-se o ensaio do defletómetro de impacto (FWD). Depois de executado o ensaio e recolhidas as deformações do pavimento procedeu-se à retro-análise com o auxílio do programa BISAR com vista à obtenção dos valores dos módulos de deformabilidade das várias camadas que constituem o pavimento. O ensaio foi realizado em quatro pontos distintos, sendo que um dos lugares de estacionamento não pode ser analisado dada a presença de um veículo que se encontrava estacionado no local.

A figura 4.4 mostra os pontos em que foram realizados os ensaios. Os pontos 1, 2, 3 e 4 representam os ensaios desenvolvidos sobre a superfície do pavimento.

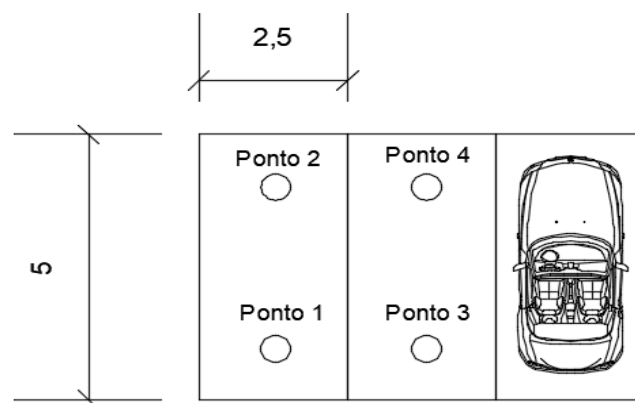


Figura 4.4 - Representação em planta dos pontos do ensaio FWD

De seguida apresentam-se detalhadamente todos os processos desenvolvidos na análise dos resultados obtidos no ensaio do FWD.

4.4.1. Deflexões obtidas e normalização

Após a realização do ensaio FWD em todos os pontos apresentados na figura 4.4 obtiveram-se, através do sistema computacional do equipamento, os valores das deflexões registadas em todos os geofones que se encontram numerados de D1 a D9. No quadro 4.5 apresentam-se os dados fornecidos durante o ensaio.

Quadro 4.5 - Deflexões registadas durante o ensaio FWD

ID Estação	ID Ensaio	Força [kN]	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
1	1	25,82	537,90	262,40	132,60	73,00	20,80	11,60	13,00	10,20	5,20
1	2	39,89	858,30	427,50	225,30	116,20	40,80	26,50	20,30	17,50	15,20
1	3	57,43	1261,00	617,90	325,50	169,20	52,40	31,90	29,30	24,80	13,50
2	4	25,57	403,50	230,50	141,00	82,40	26,90	15,10	14,10	11,80	9,30
2	5	39,36	630,30	362,70	221,50	131,30	50,10	27,70	19,80	18,30	15,50
2	6	57,18	929,50	524,20	321,60	191,50	72,50	40,90	31,40	27,80	22,20
3	7	26,05	497,80	279,20	165,90	96,40	33,50	14,90	16,80	128,80	148,60
3	8	39,83	779,80	438,60	262,90	152,30	52,00	23,30	24,60	168,90	191,50
3	9	57,59	1168,30	650,90	388,40	226,20	74,40	31,90	46,40	244,20	292,90
4	10	25,50	541,70	264,30	150,50	85,50	27,60	17,60	12,60	12,50	9,30
4	11	39,32	840,50	418,80	243,70	138,90	48,30	27,60	21,30	19,00	15,80
4	12	56,83	1210,40	605,80	354,00	204,00	68,80	41,10	31,50	28,40	23,60

As deflexões registadas durante o ensaio do FWD não foram todas contabilizadas uma vez que o primeiro ensaio em cada ponto analisado serve como uma calibração do equipamento. Como tal, optou-se por analisar as deflexões do segundo ensaio de cada ponto como se pode observar no quadro 4.5, onde esses pontos se encontram assinalados com uma cor cinza.

No quadro 4.5 é também visível que para as estações 1 e 3 não foram analisadas todas as deflexões registadas pelos geofones visto que o afastamento destes em relação ao centro de aplicação da carga era de 1,50 m para o geofone D7, 1,80 m para o geofone D8 e 2,10 m para o geofone D9, como tal estes estavam apoiados fora do pavimento e os seus resultados foram desprezados. Para as estações 2 e 4 foram analisadas todas as deflexões registadas no equipamento.

Após a escolha das deflexões a serem estudadas procedeu-se à normalização das mesmas para a força padrão de 40 kN que se apresentam no quadro 4.6.

Quadro 4.6 - Normalização das deflexões

ID Estação	ID Ensaio	Força [kN]	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
1	1	25,82	833,31	406,51	205,42	113,09	32,22	17,97	20,14	15,80	8,06
1	2	39,89	860,67	428,68	225,92	116,52	40,91	26,57	20,36	17,55	15,24
1	3	57,43	878,29	430,37	226,71	117,85	36,50	22,22	20,41	17,27	9,40
2	4	25,57	631,21	360,58	220,57	128,90	42,08	23,62	22,06	18,46	14,55
2	5	39,36	640,55	368,60	225,10	133,43	50,91	28,15	20,12	18,60	15,75
2	6	57,18	650,23	366,70	224,97	133,96	50,72	28,61	21,97	19,45	15,53
3	7	26,05	764,38	428,71	254,74	148,02	51,44	22,88	25,80	197,77	228,18
3	8	39,83	783,13	440,47	264,02	152,95	52,22	23,40	24,70	169,62	192,32
3	9	57,59	811,46	452,09	269,77	157,11	51,68	22,16	32,23	169,61	203,44
4	10	25,50	849,73	414,59	236,08	134,12	43,29	27,61	19,76	19,61	14,59
4	11	39,32	855,04	426,04	247,91	141,30	49,14	28,08	21,67	19,33	16,07
4	12	56,83	851,94	426,39	249,16	143,59	48,43	28,93	22,17	19,99	16,61

Através da equação 3.6 apresentada no Capítulo 3 efetuaram-se os cálculos da normalização das deflexões demonstrando-se de seguida o restante processo de retro-análise desenvolvido com o auxílio do programa BISAR.

4.4.2. Tratamento dos resultados do ensaio FWD

Depois da normalização das deflexões introduziram-se os dados necessários no programa BISAR para realizar a retro-análise. Na figura 4.5 mostram-se os dados inseridos inicialmente que dizem respeito à aplicação da carga.

Number of Systems (1-10): 1

System Description: 1

Use Standard Dual Wheel?

Mode of Load: 2 - Load and Radius

No of Circular Loads (1-10): 1

Load Number	Vertical Load (kN)	Radius (m)	X Coordinate (m)	Y Coordinate (m)	Horizontal Load (kN)	Shear Direction (degr.)
1	40,000	0,1500	0,0000	0,0000	0,000	0,0

Figura 4.5 - Dados da aplicação da carga no programa BISAR

Na figura 4.5 pode-se visualizar a força da carga aplicada de 40 kN, mas também o raio da placa com 0,15 m. Depois de introduzidos os dados iniciais procedeu-se à inserção da espessura das camadas, dos coeficientes de *Poisson* e dos módulos de deformabilidade introduzidos através de um processo iterativo. Nas figuras 4.6 e 4.7 podem ver-se os exemplos adotados para os pontos de ensaio 1 e 2, respetivamente. No ponto 5 da coluna *Layer Number*, pode constatar-se uma diferença na espessura dessa camada que diz respeito à fundação do pavimento. A espessura dessa camada é passível de alterações por não se conhecer o seu valor real. Através da modificação dos módulos de elasticidade pretende-se chegar a uma melhor aproximação entre as deflexões medidas e calculadas. Os valores dos coeficientes de *Poisson* foram explicados anteriormente no capítulo 3.

Number of Systems (1-10): 1

System Description: 1

Loads Layers Positions

Full Friction Between Layers?

Save Retrieve

No of Layers (1-10): 6

Layer Number	Thickness (m)	Modulus of Elasticity (MPa)	Poisson's Ratio
1	0,030	8,50E+02	0,35
2	0,040	8,50E+02	0,35
3	0,090	6,00E+02	0,35
4	0,250	3,00E+01	0,35
5	2,000	2,50E+02	0,40
6		3,00E+02	0,30

Figura 4.6 - Exemplo de introdução de valores para o ponto de ensaio 1

Number of Systems (1-10): 1

System Description: 2

Loads Layers Positions

Full Friction Between Layers?

Save Retrieve

No of Layers (1-10): 6

Layer Number	Thickness (m)	Modulus of Elasticity (MPa)	Poisson's Ratio
1	0,030	1,21E+03	0,35
2	0,040	1,22E+03	0,35
3	0,090	9,50E+02	0,35
4	0,250	4,00E+01	0,35
5	1,500	2,00E+02	0,40
6		3,00E+02	0,30

Figura 4.7 - Exemplo de introdução de valores para o ponto de ensaio 2

Foram também introduzidas as posições dos geofones em relação ao centro de aplicação da carga do equipamento como se pode ver pelas figuras 4.8 e 4.9, que retratam os exemplos para os pontos 1 e 2. As coordenadas inseridas segundo o eixo X são diferentes devido à localização dos pontos de ensaio, ou seja, os geofones do ponto 1 apenas se encontram sobre o pavimento até à distância de 1,20 m, os restantes saíam fora dos limites do pavimento, como tal não foram considerados. Em relação ao ponto 2, foram considerados todos os geofones pois a posição deste ponto de ensaio estava localizada de tal forma que todos eles apoiavam sobre a superfície do pavimento. O esquema da posição dos pontos de ensaio pode ser analisado na figura 4.4.

Number of Systems (1-10): 1

System Description: 1

Positions

Select Positions for Standard Dual Wheel

No of Position Entries (1-10): 6

Position Number	X Coordinate (m)	Y Coordinate (m)	Z (depth) Coordinate (m)	Layer No
1	0,0000	0,0000	0,0000	1
2	0,3000	0,0000	0,0000	1
3	0,4500	0,0000	0,0000	1
4	0,6000	0,0000	0,0000	1
5	0,9000	0,0000	0,0000	1
6	1,2000	0,0000	0,0000	1

Figura 4.8 - Distância dos geofones ao ponto de aplicação da carga no ponto 1

Number of Systems (1-10): 1

System Description: 2

Positions

Select Positions for Standard Dual Wheel

No of Position Entries (1-10): 9

Position Number	X Coordinate (m)	Y Coordinate (m)	Z (depth) Coordinate (m)	Layer No
1	0,0000	0,0000	0,0000	1
2	0,3000	0,0000	0,0000	1
3	0,4500	0,0000	0,0000	1
4	0,6000	0,0000	0,0000	1
5	0,9000	0,0000	0,0000	1
6	1,2000	0,0000	0,0000	1
7	1,5000	0,0000	0,0000	1
8	1,8000	0,0000	0,0000	1
9	2,1000	0,0000	0,0000	1

Figura 4.9 - Distância dos geofones ao ponto de aplicação da carga no ponto 2

Após a demonstração da introdução dos dados iniciais no BISAR mostram-se de seguida exemplos de resultados obtidos pelo programa de cálculo para cada ponto ensaiado. Estes resultados foram obtidos através do processo iterativo realizado, que consistia na inserção de módulos de deformabilidade para cada camada e na análise dos valores obtidos, comparando estes com os fornecidos pelo equipamento durante o ensaio, ou seja, criando uma aproximação entre os valores medidos e os valores calculados.

Os valores apresentados no quadro 4.7 foram calculados pelo programa BISAR através da introdução dos módulos de deformabilidade para cada camada. Para cada ponto são apresentadas apenas três iterações apesar de terem sido realizadas inúmeras iterações para se chegar a resultados admissíveis. Na coluna identificada com “distância” estão representadas as posições dos geofones e nas colunas representadas por “It.1, It.2 e It.3” estão apresentados os valores das deflexões teóricas calculadas. Através das deflexões calculadas com o auxílio do

BISAR foi possível, em comparação com as deflexões medidas após a normalização, calcular o erro tal como se apresentou na equação 3.3 do capítulo 3. Os espaços em branco que se podem visualizar no quadro 4.7 estão relacionados com o facto de apenas terem sido contabilizadas seis deformações registadas pelos primeiros seis geofones para esses pontos, tendo em conta que os restantes saíram do pavimento e os seus resultados terem sido desprezados tal como foi explicado anteriormente. Os valores calculados do erro em cada ponto e do RMSE (do inglês *Root mean square error*) apresentam-se no quadro 4.8.

Quadro 4.7 - Valores das deformações calculadas pelo BISAR para todos os pontos

Distância (m)	Deflexões calculadas (μm)											
	Ponto 1			Ponto 2			Ponto 3			Ponto 4		
	It. 1	It. 2	It. 3	It. 1	It. 2	It. 3	It. 1	It. 2	It. 3	It. 1	It. 2	It. 3
0	861,8	854,2	876,6	661	632,8	667,8	802,2	795,8	864,9	879	874,2	867,9
0,3	406,5	407,4	409,7	344	337,8	379,3	406,5	419,7	450,8	398,4	424	419,6
0,45	229,1	231,8	229,4	211	211,1	244,9	244	261	275,7	221,3	244,8	241
0,6	122,8	125,9	122,4	125,9	128,1	151,4	140,6	157,5	161,7	119,6	135,2	131,6
0,9	39,4	42	39,5	49	50,5	56,9	48	60,2	56,8	42,3	44,9	41,4
1,2	24,4	26,4	25	28,3	28,5	27,9	23,7	31,3	27,8	27,1	25,9	23,6
1,5				22,6	22,4	20,8				23	22,1	22,5
1,8				19,4	19,2	18,4				19,7	19,5	19
2,1				16,7	16,7	16,4				16,8	16,8	16,7

Distância	Erro Ponto 1			Erro Ponto 2			Erro Ponto 3			Erro Ponto 4		
	it. 1	it. 2	it. 3	it. 1	it. 2	it. 3	it. 1	it. 2	it. 3	it. 1	it. 2	it. 3
0	0,13	0,76	1,85	3,19	1,22	4,25	2,44	1,62	10,44	2,80	2,24	1,50
0,3	5,46	5,22	4,63	7,15	9,12	2,90	8,36	4,95	2,35	6,94	0,48	1,53
0,45	1,41	2,60	1,54	6,68	6,63	8,80	8,20	1,16	4,42	12,02	1,27	2,87
0,6	5,39	8,05	5,05	5,98	4,16	13,47	8,78	2,97	5,72	18,14	4,51	7,37
0,9	3,83	2,66	3,57	3,90	0,81	11,77	8,79	15,28	8,77	16,17	9,44	18,70
1,2	8,89	0,64	6,28	0,53	1,24	0,90	1,28	33,76	18,80	3,62	8,42	18,98
1,5				12,33	11,33	3,38				6,14	1,98	3,83
1,8				4,30	3,23	1,09				1,91	0,88	1,74
2,1				6,03	6,03	4,13				4,54	4,54	3,92
RMSE (%)	4,80	4,00	4,03	6,21	5,81	7,10	6,52	15,32	9,98	8,62	4,54	8,13

Como se pode constatar, pelos valores apresentados no quadro 4.8, o RMS obtido para os pontos de ensaio é bastante satisfatório uma vez que ronda os 5% o que significa que foram conseguidas boas aproximações entre as deflexões calculadas e medidas. Nas figuras 4.10, 4.11, 4.12, 4.13 e 4.14 apresentam-se os exemplos de aproximação entre as deflexões calculadas e medidas para as iterações com melhores valores de RMS, assinaladas a verde no quadro 4.8.

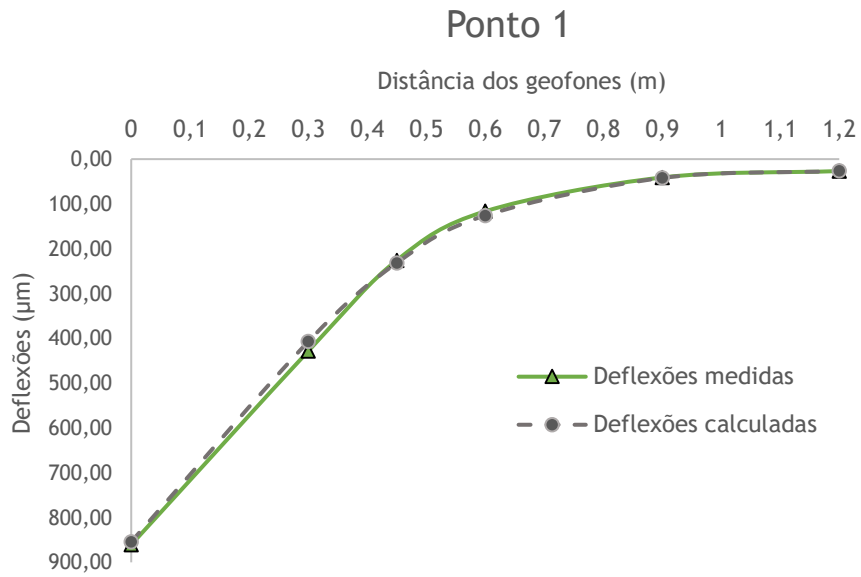


Figura 4.10 - Relação entre as deflexões medidas e calculadas para o ponto 1 (iteração 2)

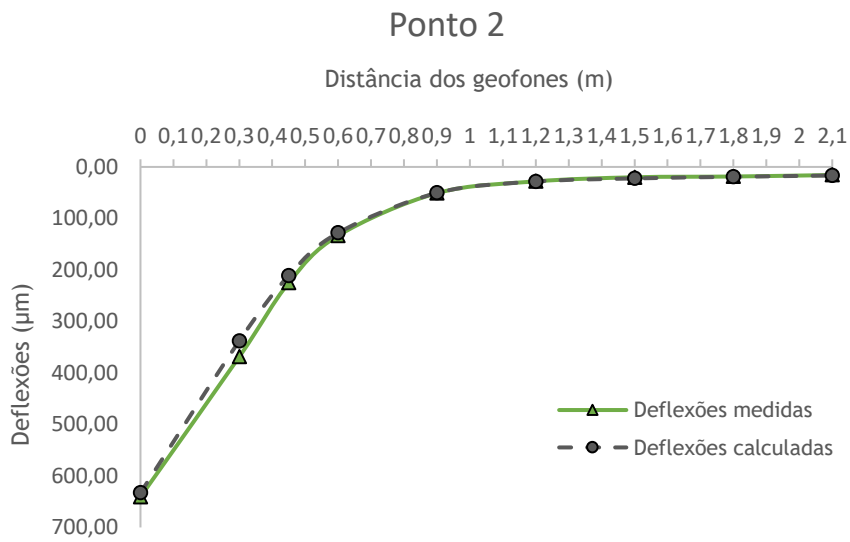


Figura 4.11 - Relação entre as deflexões medidas e calculadas para o ponto 2 (iteração 2)

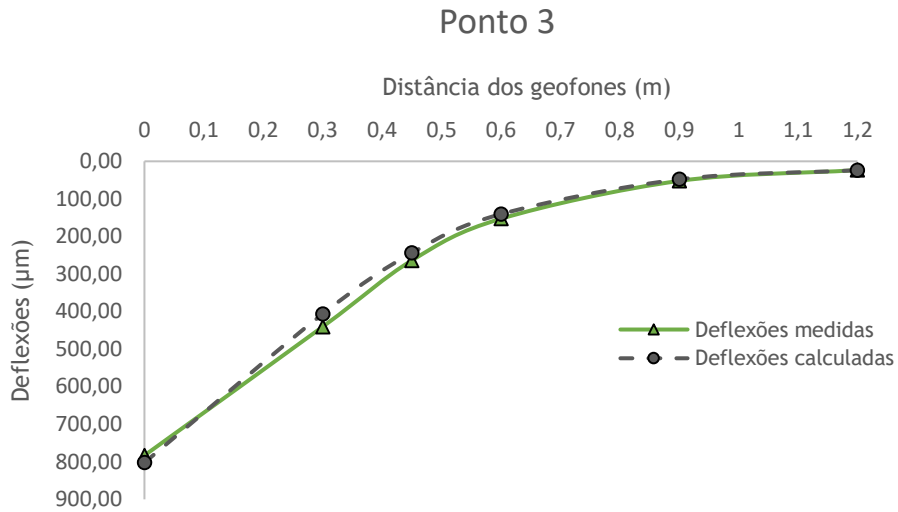


Figura 4.12 - Relação entre as deflexões medidas e calculadas para o ponto 3 (iteração 1)

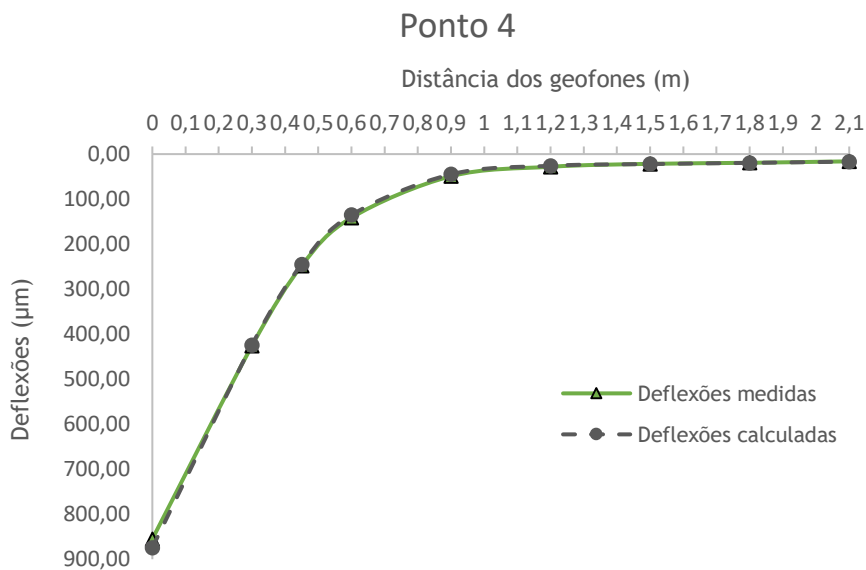


Figura 4.13 - Relação entre as deflexões medidas e calculadas para o ponto 4 (iteração 2)

Nas figuras que representam os gráficos, apresentados anteriormente, é possível obter uma melhor percepção da relação entre as deflexões medidas durante o ensaio FWD e as calculadas através do programa BISAR. No quadro 4.9 apresentam-se todos os módulos de deformabilidade introduzidos no BISAR, através dos quais foi possível obter as deflexões teóricas apresentadas no quadro 4.7.

Quadro 4.8 - Módulos de deformabilidade utilizados para o processo iterativo no programa BISAR

Camadas	Módulos de deformabilidade (MPa)											
	Ponto 1			Ponto 2			Ponto 3			Ponto 4		
	lt. 1	lt. 2	lt. 3	lt. 1	lt. 2	lt. 3	lt. 1	lt. 2	lt. 3	lt. 1	lt. 2	lt. 3
PA1 (0,03m)	850	910	890	1210	1500	1700	1050	1150	980	955	910	900
PA2 (0,04m)	850	910	890	1220	1500	1700	1050	1150	980	955	910	900
Brita 5/15 (0,09 m)	600	600	550	950	980	1100	700	750	720	455	600	610
Brita 15/25 (0,25 m)	30	30	30	40	40	30	35	35	30	35	30	300
Solo	250 (2m)	250 (2 m)	250 (2m)	200 (1,5m)	200 (1.5m)	200 (1,5m)	140 (1m)	135 (1m)	140 (1,5m)	200 (1,5m)	200 (1,5m)	200 (1,5m)
Camada rígida	300	270	290	300	300	300	340	325	350	300	300	350

Os módulos de deformabilidade selecionados a verde representam aqueles em que o RMS foi menor e, conseqüentemente, proporcionam uma melhor relação entre as deflexões calculadas e medidas, como se pode constatar nas figuras 4.10 a 4.14. Depois de obtidos os valores dos módulos de deformabilidade realizou-se o ajuste dos mesmos para a temperatura de serviço de acordo com a equação 3.5 do capítulo 3. As temperaturas da superfície do pavimento medidas durante o ensaio foram de 18,9 °C para o ponto 1, 27,5°C para o ponto 2, 20,0°C para o ponto 3 e 14,8°C para o ponto 4. O ajuste da temperatura foi realizado de acordo com os dados do Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA), onde se retiraram os dados da temperatura média do ar do ano 2017 para cada mês e se realizou a média dos mesmos. Na Figura 4.14 apresenta-se um exemplo do esquema de temperaturas médias do ar, retirado do IPMA, para o mapa de Portugal em Novembro de 2017.

Pela análise da figura 4.14 na zona da Covilhã, assinalada com uma circunferência vermelha, podemos estimar o valor da temperatura média do ar para o ano de 2017, sendo que a figura 4.14 representa apenas o caso do mês de Novembro. A temperatura média do ar obtida para a região da Covilhã no ano de 2017 foi cerca de 16°C. Depois de estimado o valor da temperatura média do ar para o ano de 2017, ano de construção do pavimento, chegou-se ao valor da temperatura de serviço através do ábaco de Shell. Na figura 4.15 pode-se visualizar este ábaco.

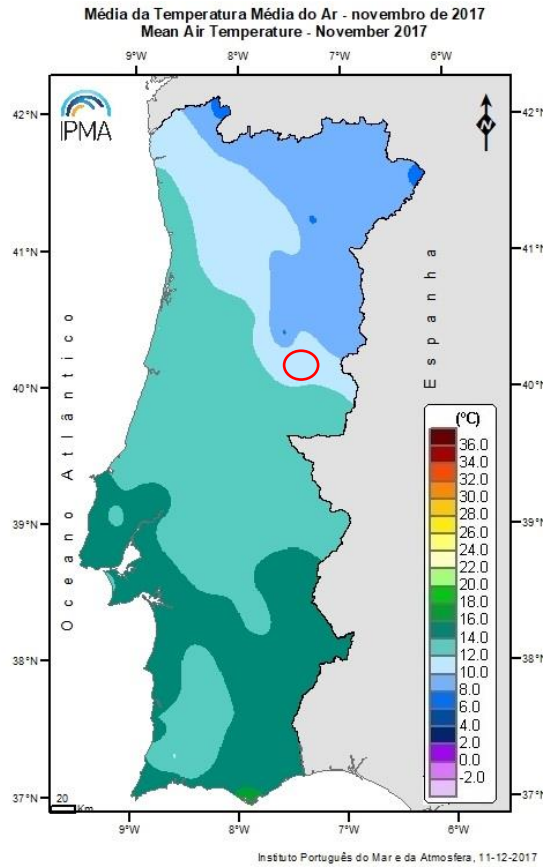


Figura 4.14 - Mapa de temperaturas médias do ar do mês de Novembro 2017 (IPMA), consultado em <https://www.ipma.pt> (10/09/2018)



Figura 4.15 - Ábaco de Shell (Lopes,2009)

Pela figura 4.15, com uma temperatura média mensal a rondar os 16°C e com uma espessura das camadas betuminosas de 7 cm, chegou-se a uma temperatura das camadas de cerca de 26°C.

No quadro 4.10 podem observar-se os resultados finais para os módulos de deformabilidade após o ajuste da temperatura.

Quadro 4.9 - Módulos de deformabilidade para as várias camadas de todos os pontos ensaiados após o ajuste da temperatura

	Módulos de deformabilidade (MPa)			
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4
PA1 (0,03 m)	712	1593	850	633
PA2 (0,04 m)	712	1593	850	633
Brita 5/15 (0,09 m)	600	980	700	600
Brita 15/25 (0,25 m)	30	40	35	30
Solo de fundação	250	200	140	200
Camada rígida	270	300	340	300

Como explicado no capítulo 3, se a temperatura aumenta os materiais dilatam o que leva a menor capacidade de absorção das cargas impostas externamente, conseqüentemente, levam a deformações mais elevadas e um módulo de deformabilidade menor, sendo que, quando a temperatura diminui, os materiais contraem e o processo é inverso. Como a temperatura de serviço obtida é superior à da superfície das camadas registada durante o ensaio, pelo menos para os pontos 1,3 e 4, os módulos destes pontos baixam, o que não acontece no ponto 2, onde a temperatura de serviço foi inferior à temperatura das camadas durante o ensaio.

No quadro 4.10 é também possível constatar que para os vários pontos se obtiveram módulos de deformabilidade distintos. A forma de execução do pavimento pode ter influenciado os resultados pois as deformações diferem de ponto para ponto o que se traduz, necessariamente, em módulos de deformabilidade distintos.

Os resultados dos módulos de deformabilidade podem ser sujeitos a comparações com valores padrão existentes para pavimentos convencionais, como apresentado no capítulo 3 no quadro 3.11. Neste sentido, como seria esperado, os valores dos módulos obtidos para o pavimento drenante são mais reduzidos que os apresentados nesse quadro alusivos aos pavimentos tradicionais. Esta discrepância deve-se à diferente composição das camadas do pavimento, principalmente das camadas superficiais, em comparação com as dos pavimentos tradicionais, pois nas camadas drenantes existem mais espaços vazios o que leva a uma menor capacidade de resistência a cargas aplicadas à superfície.

No que concerne aos valores esperados, estes deviam rondar os 100 MPa para o solo de fundação por se tratar de um solo arenoso e entre 100 e 300 MPa para as camadas britadas de acordo com o quadro 3.11. Relativamente às camadas betuminosas, seria de esperar que os resultados chegassem perto dos 2000 MPa como provado em ensaios laboratoriais em Afonso *et al.*, (2017).

Do ponto de vista matemático as aproximações entre as deflexões medidas e calculadas foram bem conseguidas, no entanto, os módulos obtidos não são realistas. Sempre que se tentou chegar a uma aproximação com os módulos de deformabilidade mais realistas o erro obtido era muito elevado, rondando os 30 e 40 %.

Capítulo 5 - Considerações finais

5.1 Conclusões

O aumento populacional e a construção de edifícios levam a um acréscimo das áreas impermeáveis e, estes fatores, quando combinados com períodos de chuva intensa, levam a episódios de inundações em zonas urbanas. Os pavimentos permeáveis apresentam-se como uma medida de mitigação das inundações em solos urbanos ainda que existam poucas normas que regulamentem a utilização destes pavimentos, como tal é importante o desenvolvimento de trabalhos que conduzam a explicações e demonstrações da eficácia destes.

Nesta dissertação foram levados a cabo três ensaios distintos que permitiram avaliar o comportamento mecânico e funcional do troço experimental idealizado no concelho da Covilhã. Os ensaios realizados foram o ensaio da Mancha de Areia para caracterizar a macrotextura, o ensaio do Pêndulo Britânico para avaliar o atrito e o ensaio do defletómetro de impacto (FWD) para avaliar a capacidade de carga do pavimento.

No ensaio da Mancha de Areia foram comparados dois ensaios, um com recurso a areia devidamente normalizada e outro com a utilização de esferas de vidro. Ambos satisfazem os requisitos impostos pelo CEEP (2014) com valores acima de 1,2 mm e balizados entre 0,5 mm e 5 mm como se encontra regulamentado na EN 13036-1: 2010. Neste sentido, a macrotextura da camada superficial do pavimento classificou-se como muito aberta o que promove uma eficiente capacidade de infiltração.

No que concerne ao ensaio do Pêndulo Britânico, os resultados foram também satisfatórios quando comparados com o valor de atrito pontual que se encontra preconizado no CEEP (2014). O ensaio desenvolvido permitiu concluir que o valor de PTV em várias zonas do pavimento foi superior a 60 como requerido pelo Caderno de Encargos. Com estes resultados pode-se admitir que em situações de piso molhado, o pavimento apresenta condições de segurança adequadas no que ao atrito diz respeito.

Depois da avaliação realizada do ponto de vista funcional do pavimento, desenvolveu-se uma análise que permitisse caracterizar o pavimento mecanicamente, ou seja, avaliando a sua capacidade de carga utilizando o ensaio FWD. O objetivo deste ensaio passa por chegar a valores dos módulos de deformabilidade de cada camada constituinte do pavimento através das deflexões medidas durante o ensaio e calculadas através de um processo iterativo. No tratamento de dados efetuado optou-se pela adoção de um critério que privilegiasse a obtenção de um menor erro entre as deflexões medidas e as calculadas.

Os resultados obtidos através do FWD permitem concluir que, apesar dos valores mais baixos de módulos de deformabilidade obtidos, quando comparados com valores dos pavimentos

convencionais, os pavimentos permeáveis apresentam-se como uma solução eficaz. Nos vários pontos analisados no ensaio chegou-se a valores distintos dos módulos de deformabilidade e, este facto, pode estar relacionado com a execução do pavimento ou com o material constituinte do solo de fundação, daí haver pontos em que a rigidez é superior a outros, apesar de serem pontos próximos. As deflexões registadas pelos ensaios são também exemplificativas das diferenças nos resultados finais, e quando comparadas com as deflexões dos pavimentos tradicionais são bastante superiores.

Após o ajuste de temperatura os resultados foram muito inferiores ao esperado, ou seja, apesar de se ter chegado a uma aproximação matemática entre as deflexões medidas e calculadas no processo de retro-análise, os valores dos módulos de deformabilidade foram reduzidos o que induz alguma fragilidade das camadas do pavimento em estudo. De salientar que, sempre que se tentaram utilizar módulos de deformabilidade das camadas mais coerentes e uma interdependência entre camadas mais congruente, tornava-se impossível a aproximação às deflexões medidas durante o ensaio.

Com os resultados obtidos neste ensaio e com a falta de estudos referentes à capacidade de carga em pavimentos permeáveis, este trabalho constitui uma importante apreciação e avanço no tratamento dos dados do ensaio FWD para caracterizar o pavimento do ponto de vista mecânico. Os resultados finais são conclusivos e pode-se afirmar que a utilização de pavimentos permeáveis pode ser vista no futuro como uma inovação.

5.2 Trabalhos futuros

Como forma de aprofundar o estudo sobre os pavimentos permeáveis sugerem-se de seguida alguns temas que podem culminar numa melhoria no desenvolvimento destas infraestruturas:

- Estudo aprofundado acerca do desempenho hidrológico do pavimento permeável à escala real e possível utilização da água infiltrada para outros fins;
- Desenvolvimento de misturas betuminosas drenantes que apresentem menores deformações quando sujeitas a aplicações de carga;
- Criação de um *software* ou metodologia que permita o dimensionamento de pavimentos permeáveis, desde a sua camada superficial até ao solo de fundação;

Referências Bibliográficas

Acioli, L. (2005). Estudo experimental de pavimentos permeáveis para o controle do escoamento superficial na fonte. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil

Afonso, M. L.; Dinis - Almeida, M.; Fael, C.S. (2017). Study of the porous asphalt performance with cellulosic fibres. *Construction and Building Materials*, 135 pp. 104-111. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.222>

Alves, T.S.F. (2007). Metodologias de auscultação de pavimentos rodoviários. Aplicação do radar de prospecção e do defletómetro de impacto. Dissertação, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Março.

Al-Rubaei, AM., Stenglein, AL., Viklander, M., Blecken, G-T. (2013). Long-term hydraulic performance of porous asphalt pavements in Northern Sweden. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139 pp. 499-505. DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000569

Amorim, S. (2013). Correções das deflexões obtidas com o defletómetro de impacto devido às variações de temperatura. Dissertação, Universidade do Minho, Guimarães, Julho.

Azzout, Y.; Barraud, S.; Cres, F.N.; Alfakih, E. (1994). “Techniques alternatives en assainissement pluvial”. Paris: Technique et Documentation - Lavoisier. 372 p.

Branco, F. ; Pereira, P. ; Picado Santos, L., (2011). Pavimentos Rodoviários, Editora Almedina.

Brattebo.,B.O. e Booth, D.B. (2003). Long-term stormwater quantity and quality performance of permeable pavement systems. *Water Research*, 37 pp. 4369-4376. DOI:10.1016/S0043-1354(03)00410-X.

CEEP Caderno de Encargos Tipo Obra das Estradas de Portugal, Ex-Estradas de Portugal (2014). Pavimentação, Métodos Construtivos

Cahill, T.; Adams, M.; Marm, C. (2003). Porous Asphalt: The right choice for porous pavements. *Hot Mix Asphalt Technology*.

Couchinho, R.P. dos S. (2011). Medição do coeficiente de atrito da superfície de pavimentos - Estudo do equipamento GripTester. Dissertação, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, Dezembro.

Duarte, J.P.S. (2011). Avaliação do Coeficiente de Atrito em Aeroportos Portugueses: O caso do Aeroporto de Lisboa. Dissertação, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, Dezembro.

Drake, J.; Bradford, A.; Van Seters, T. (2014). Hydrologic Performance of Three Partial-Infiltration Permeable Pavements in a Cold Climate over Low Permeability Soil. *Journal of Hydrologic Engineering*, 19. DOI: [10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000943](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000943)

EASA (2010) . Runway friction characteristics measurement and aircraft braking. European Aviation Safety Agency, Vol.3 - Functional Friction, March

Fontes, L.P.T.L. (2009). Optimização do desempenho de misturas betuminosas com betume modificado com borracha para reabilitação de pavimentos. Tese de Doutoramento, Universidade do Minho, Braga, Julho.

Francisco, A. (2012). Comportamento estrutural de pavimentos rodoviários flexíveis. Relatório final de projeto, Escola Superior de Tecnologia e de Gestão, Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, Outubro.

Freitas, E.F. (2008). Contribuição da superfície dos pavimentos para a produção de ruído. Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Braga.

Gonçalves, V.D.F. (2015). Pavimentos rodoviários com propriedades inibidoras de formação de geadas. Dissertação, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Junho.

Guido-Simm (2007). Estudo do comportamento de estruturas de pavimentos com materiais alternativos visando a redução dos custos de pavimentação no estado de Santa Catarina. Dissertação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.

INAC, I.P. Instituto Nacional de Aviação Civil (2012). Manual sobre condição funcional: atrito, textura, irregularidade e limpeza.

Kamali, M.; Delkash, M.; Tajrishy, M. (2017). Evaluation of permeable pavement responses to urban surfaces runoff. *Journal of Environmental Management*, 187 pp. 43-53. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.11.027> .

Kumar, K.; Kozak, J.; Hundal, L.; Cox, A.; Zhang, H.; Granato, T (2016). In - situ infiltration performance of different permeable pavements in a employee used parking lot - A four - year study. *Journal of Environmental Management*, 167 pp. 8-14.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.11.019>

LCPC. (2004). Rugo. Measure en continu de la macrotexture de la chaussée. Laboratoire Central des Ponts et chaussées.

Lin, W.; Ryu, S.; Cho, Y. (2014). A case of study of flow characteristics of permeable pavements by time and space model. NRC Research Press, 41 pp. 660-666.

LNEC (2005). Observação do comportamento de trechos piloto em pavimentos flexíveis inseridos na rede rodoviária nacional 1992 a 1999, Relatório 162/05, Núcleo de Infra-estruturas, Lisboa, Abril

Lucke, T.; Boogard, F.; van de Ven, F. (2014). Evaluation of a new experimental test procedure to more accurately determine the surface infiltration rate of permeable pavement systems. Urban, Planning and Transport Research: An Open Access Journal. Vol. 2, 1 pp. 22-35
<http://dx.doi.org/10.1080/21650020.2014.893200>

Luz, A.S.F.S. (2011). Contribuição para a modelação do índice de qualidade na caracterização da rede rodoviária nacional. Dissertação, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Outubro.

Machado, A. (2012). Contribuição para a avaliação estrutural de infraestruturas rodoviárias por métodos não destrutivos. Dissertação, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Dezembro.

Machado, A. ; Fontul, S.; Freire, A. . Influência da força de ensaio na avaliação estrutural de pavimentos por métodos não destrutivos.

MACOPAV (1995). Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional. Julho

Maia, I.M.C. (2012). Caracterização de patologias em pavimentos rodoviários. Dissertação, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Setembro.

Menezes, M.V.P. (2008). Estudo das características de superfície de pavimentos rodoviários para a análise da segurança do tráfego. Dissertação, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Setembro.

Pereira, P. & Miranda, V. (1999). Gestão da Conservação dos Pavimentos Rodoviários, Universidade do Minho, Braga.

Pinto, J. (2003). Caracterização superficial de pavimentos rodoviários. Faculdade de Engenharia do Porto, Universidade do Porto, Porto, Julho.

Quaresma, L.,(1985). Características mecânicas de camadas de pavimentos rodoviários e aeroportuários constituídos por materiais granulares. LNEC, Lisboa.

Relhas, R. (2012). Elaboração do projecto de um protótipo para avaliação do coeficiente de atrito entre superfícies. Dissertação, Faculdade de Engenharia do Porto, Porto, Junho.

Rodríguez-Rojas, M.I.; Huertas-Fernández, F.; Moreno, B.; Martínez, G.; Grindlay, A.I. (2018). A study of the application of permeable pavements as a sustainable technique for the mitigation of soil sealing in cities. *Journal of Environmental Management*, 205 pp.151-162.

Rohde, G. e Scullion, T. (1990). Nondestructive teste procedures for analysing the structural condition of pavements. Investigação, Texas Transportation Institute, Novembro.

Sardão, E. (2012) . Camadas de desgaste betuminosas com incorporação de seixo britado - análise de alguns parâmetros relativos ao atrito superficial. Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra, Novembro.

Sayers, M. & Karamilhas, S. (1998). The little book of profiling - Basic information about measuring and interpreting road profiles. University of Michigan, September.

Shueler, T. (1987). “Controlling Urban Runoff: A Practical Manual for Planning and Designing Urban” BMPs

Smith, D. (2006). Permeable interlocking concrete pavements. Manual 3ª edição.

Tenreiro, R. (2016). Pavimentos betuminosos permeáveis resistência à deformação permanente da camada superficial. Dissertação, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Junho.

Trandem, J. (2016). Testing of infiltration system for stormwater. Tese de Mestrado, Norwegian University of Science and Technology, Sandnes, Noruega.

Valeo, C. e Gupta, R. (2018). Determining Surface Infiltration Rate of Permeable Pavements with Digital Imaging. *Water*, 10 pp. 133. [doi:10.3390/w10020133](https://doi.org/10.3390/w10020133)

Virgiliis, A. (2009). Procedimentos de projeto e execução de pavimentos permeáveis visando retenção e amortecimento de picos de cheias. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil

Acervo Normativo

- EN 13036-1:2010** Road and airfield surface characteristics - Test methods - Part 1: Measurement of pavement surface macrotexture depth using a volumetric patch technique
- EN 13036-4:2011** Road and airfield surface characteristics - Test methods - Part 4: Method for measurement of slip/skid resistance of a surface - The pendulum test