



Comparação de Diferentes Métodos de Avaliação da Capacidade de Carga de Pavimentos Rodoviários

Bruno Alberto da Cunha Magalhães

UMinho | 2015

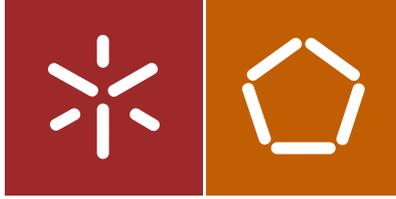


Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Bruno Alberto da Cunha Magalhães

Comparação de Diferentes Métodos de Avaliação da Capacidade de Carga de Pavimentos Rodoviários

dezembro de 2015



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Bruno Alberto da Cunha Magalhães

Comparação de Diferentes Métodos de
Avaliação da Capacidade de
Carga de Pavimentos Rodoviários

Dissertação de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia Civil

Trabalho efectuado sob a orientação do
Professor Doutor Joel Ricardo Martins Oliveira

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho apenas foi possível devido ao apoio de várias pessoas, às quais gostaria de manifestar os meus agradecimentos, em especial:

Ao Professor Doutor Joel Ricardo Martins Oliveira, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho e meu orientador, pelo apoio, pela motivação, pelos ensinamentos transmitidos e pelo tempo disponibilizado durante a realização da dissertação.

Ao engenheiro Carlos Palha e ao Hélder Torres, por toda a ajuda prestada e tempo despendido durante a realização da parte prática deste trabalho.

À minha família, pela confiança depositada e pelo apoio dado ao longo destes anos na realização dos meus objetivos.

À Joana, pela motivação, companheirismo e paciência que sempre demonstrou.

E finalmente, aos meus amigos, pela convivência e pelos bons momentos ao longo do curso.

Comparação de diferentes métodos de avaliação da capacidade de carga de pavimentos rodoviários

RESUMO

Nas últimas décadas, a rede rodoviária nacional sofreu um grande desenvolvimento tanto ao nível das infraestruturas existentes, como na construção de novas vias. Este desenvolvimento implica também a uma preocupação crescente na conservação e reabilitação da rede. Assim, de forma a aferir-se a verdadeira necessidade da sua reabilitação dos pavimentos existentes, é necessário realizar-se a avaliação da sua capacidade de carga, que é obtida com base em vários parâmetros tais como a deflexão, que por sua vez permite determinar o módulo de deformabilidade das camadas dos pavimentos. A medição das deflexões em pavimentos rodoviários pode ser feita recorrendo a vários métodos, uns mais eficientes e modernos que outros.

Esta dissertação centra-se então no estudo e comparação dos métodos mais utilizados na avaliação da capacidade de carga de pavimentos rodoviários, onde são medidas as deflexões com quatro métodos distintos, em vários pavimentos com constituições diferentes entre si. Durante as medições utilizam-se os mesmos procedimentos de ensaio para cada um dos métodos em estudo. Com os valores das deflexões obtidos em cada um dos pavimentos e com cada método, são analisados e comparados os dados entre si, obtendo-se assim, expressões que traduzem as relações das deflexões medidas entre os vários métodos.

Um dos equipamentos com maior interesse em ser estudado neste trabalho é o Defletómetro de Impacto Ligeiro (*Light Falling Weight Deflectometer, LFWD*), para o qual é feita uma comparação adicional com o Defletómetro de Impacto convencional (*FWD*), noutra local, com o objetivo de apurar com maior rigor a relações existentes entre as deflexões medidas com os dois equipamentos, comparando-os também com a literatura existente.

Palavras-Chave

Capacidade de Carga

Defletómetro de Impacto Ligeiro

Deflexão

Pavimentos Rodoviários

Solos

Comparison of different road pavement structural capacity evaluation methods

ABSTRACT

During the last decades, the national highway system suffered a major development, both of the existing infrastructures and of construction of new roads. This development also implies a growing concern in the maintenance and rehabilitation of the highway system. Thus, in order to define the pavement rehabilitation, the assessment of its structural capacity is required, which is obtained based on several parameters, such as deflection, which allows determining the stiffness modulus of pavement layers. The measurement of pavement deflections can be carried out by several methods, some more modern and efficient than others.

This dissertation focused on the study and comparison of the methods used in assessing the structural capacity of road pavements. Thus, deflections of different pavements were measured with four different testing devices. During the measurements, the same test procedures are used for each one of the methods studied. The deflection values obtained in each pavement are statistically analyzed and compared, thereby obtaining expressions that represent the relationship between the deflections measured among the several methods.

The piece of equipment with the greatest interest to be studied is the Light Falling Weight Deflectometer (LFWD), whereby an additional comparison with the conventional Falling Weight Deflectometer was made, elsewhere, in order to ascertain more precisely the relationships between the deflections measured with both devices, while comparing them to the values presented in the literature.

Keywords

Bearing Capacity

Light Falling Weight Deflectometer

Deflection

Road Pavements

Soils

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento temático	1
1.2	Objetivos.....	2
1.3	Conteúdo da dissertação	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1	Conceito de Pavimento Rodoviário e Tipos de Pavimentos	5
2.2	Os Sistemas de Gestão e a Avaliação de Pavimentos Rodoviários.....	8
2.2.1	Avaliação Funcional de Pavimentos Rodoviários.....	12
2.2.2	Avaliação Estrutural de Pavimentos Rodoviários.....	13
2.3	Métodos de Avaliação da Capacidade de Carga de Pavimentos Rodoviários	15
2.3.1	Métodos destrutivos	15
2.3.2	Métodos não destrutivos	16
2.3.3	Cálculo do Módulo de Deformabilidade.....	26
2.4	Estudos realizados na comparação de diferentes de diferentes métodos de avaliação de capacidade de carga	27
3	CASO DE ESTUDO E METODOLOGIAS UTILIZADAS	31
3.1	Seleção dos pontos de ensaio.....	31
3.2	Equipamentos Utilizados.....	37
3.3	Metodologias de Ensaio	43
3.3.1	Ensaios com Defletómetro de Impacto (<i>Falling Weight Defletometer, FWD</i>).....	43
3.3.2	Ensaios com Defletómetro de Impacto Ligeiro (<i>Light Falling Weight Defletometer, LFWD</i>).....	46
3.3.3	Ensaios com Viga Benkelman	47
3.3.4	Ensaio de Carga com Placa	49
3.3.5	Metodologia de análise	54

4	ANÁLISE DE RESULTADOS	55
4.1	Resultados obtidos em ensaios com FWD	55
4.2	Resultados obtidos em ensaios com LFWD	57
4.3	Resultados obtidos em ensaios com Viga Benkelman	60
4.4	Resultados obtidos em ensaios de carga com placa	60
4.5	Análise comparativa dos vários ensaios	62
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPETIVAS FUTURAS	69
5.1	Conclusões	69
5.2	Trabalhos futuros	70
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	71

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de estrutura de um pavimento rodoviário (adaptado de Pais (2012)).....	6
Figura 2 - Constituição e comportamento de um pavimento rodoviário flexível (Miranda e Pereira, 1999).....	7
Figura 3 - Vida residual de um pavimento (Maia, 2013)	12
Figura 4 - Evolução das deflexões (Miranda e Pereira, 1999)	14
Figura 5 - Equipamentos mais utilizados em NDT (Francisco, 2012)	17
Figura 6 - Esquemática do ensaio de placa (Albernaz, 1997, Borges, 2001)	18
Figura 7 - Representação esquemática da Viga Benkelman (Albernaz, 1997, Lopes, 2010).....	19
Figura 8 - Ensaio com Viga Benkelman (Pavement Interactive, 2010)	20
Figura 9 - Pontos de avaliação da Viga Benkelman (Borges, 2001).....	21
Figura 10 - Gráfico típico obtido com FWD	23
Figura 11 - Esquemática do equipamento – FWD (Cornell University, 2005)	23
Figura 12 - Constituição de um LFWD (adaptado de Elhakim <i>et al.</i> , 2014).....	25
Figura 13 - Relação entre as bacias de deflexão com Viga e FWD (Macêdo, 2003).....	28
Figura 14 - Mapa de localização dos pontos de ensaio (Google Maps)	31
Figura 15 - Ponto 1 (Solo arenoso).....	32
Figura 16 - Ponto 2 (Betão)	33
Figura 17 - Ponto 3 (Cubos de granito)	33
Figura 18 - Ponto 4 (Solo vegetal)	34
Figura 19 - Ponto 5 (Agregado Britado de Granulometria Extensa, ABGE).....	34
Figura 20 - Ponto 6 (Pavimento Betuminoso).....	35
Figura 21 - Exemplo de medição do teor em água no ponto 4.....	35
Figura 22 – Localização aproximada dos pontos de ensaio na segunda fase (Google Maps).....	36
Figura 23 - Acesso à Horta Pedagógica de Guimarães	36
Figura 24 - Solo arenoso (2ª fase de ensaios).....	37
Figura 25 - Defletómetro de Impacto da Universidade do Minho, <i>DYNATEST 8000</i>	38
Figura 26 - Defletómetro de Impacto Ligeiro HMP LFG4	39
Figura 27 - Viga Benkelman utilizada.....	40
Figura 28 - LVDT (<i>Linear Variable Differential Transformer</i>).....	41
Figura 29 - Dispositivo de aquisição de dados	41

Figura 30 - Dispositivo de medição de distância horizontal.....	42
Figura 31 - Veículo utilizado durante os ensaios de carga com Viga Benkelman e com Placa	43
Figura 32 - Execução de medição com FWD (1ª fase).....	45
Figura 33 - Execução de medição com FWD (2ª fase).....	45
Figura 34 - Preparação do Defletómetro de Impacto Ligeiro (LFWD) para o ensaio	46
Figura 35 - Exemplo de gráfico Distancia Horizontal – Deformação, obtido no ensaio da Viga Benkelman.....	48
Figura 36 - Adaptação para rodado simples no ensaio da Viga Benkelman.....	49
Figura 37 - Princípio dos ciclos de carga-descarga aplicados à placa durante o ensaio (AFNOR (2000)).....	50
Figura 38 - Colocação da placa sob o veículo e posicionamento da ponta apalpadora da viga Benkelman.....	50
Figura 39 - Pormenor do sistema de medição de carga (célula de carga).....	51
Figura 40 - Execução do ensaio de carga com placa	51
Figura 41 - Software utilizado para a aquisição de dados do ensaio de carga com placa.....	53
Figura 42 - Exemplo de gráfico Tempo-Deformação (FWD)	58
Figura 43 – Obtenção da deflexão para ensaio de carga com placa	61
Figura 44 – Relação entre deflexões medidas com LFWD e FWD.....	62
Figura 45 - Relação entre deflexões medidas com LFWD e Viga Benkelman	63
Figura 46 - Relação entre deflexões medidas com LFWD e ensaio de carga com placa	64
Figura 47 - Relação entre deflexões medidas com LFWD e os restantes equipamentos.....	65
Figura 48 - Relação entre deflexões medidas com LFWD e FWD (2ª fase)	66
Figura 49 - Comparação entre os módulos de deformabilidade medidos (LFWD e FWD) e os resultados obtidos aplicando a Equação 7	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores típicos de módulos de deformabilidade e coeficientes de Poisson, utilizados em pavimentos rodoviários (Alves, 2007, Antunes, 1993).....	8
Tabela 2 - Tipo de Pavimentos/Solo dos pontos ensaiados.....	32
Tabela 3 - Especificações técnicas do LFWD utilizado.....	39
Tabela 4 - Deflexões médias medidas com o FWD e respetiva força média (1ª fase).....	55
Tabela 5 - Deflexões medidas com o FWD e respetivos módulos de deformabilidade (2ª fase).....	57
Tabela 6 - Deflexões médias medidas com o LFWD.....	58
Tabela 7 - Deflexões medidas com LFWD e respetivos módulos de deformabilidade (2ª fase).....	59
Tabela 8 - Deflexões medidas com viga Benkelman.....	60
Tabela 9 - Deflexões medidas com ensaio de carga com placa.....	61

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento temático

A capacidade de carga é um parâmetro de referência utilizado quando existe a necessidade de caracterizar estruturalmente pavimentos rodoviários. É largamente usado pelas entidades gestoras de redes rodoviárias nos seus sistemas de gestão de conservação de forma a definir a qualidade estrutural de um pavimento rodoviário.

Este parâmetro é obtido tendo por base a deformação vertical reversível observada na superfície do pavimento aquando da aplicação de uma carga, o que traduz a deformação do conjunto solo de fundação-pavimento. A esta deformação, que é medida na superfície da camada de desgaste, chama-se deflexão.

Ao longo dos anos foram-se desenvolvendo vários métodos que permitem medir a deflexão, sendo todos baseados no princípio de medição do deslocamento vertical, de um ou mais pontos na superfície de um conjunto de camadas, após a aplicação de um carregamento.

Métodos como o ensaio de carga com placa e com a Viga Benkelman, sendo o primeiro mais apropriado para solos e o segundo para pavimentos rodoviários, podem ser bastante eficazes na medição propriamente dita, mas a logística e o tempo que requerem na sua execução levaram os técnicos e investigadores da área à procura por soluções mais versáteis. Assim surgiu um equipamento que permite a aplicação da carga num pavimento, simulando a passagem de um veículo, medindo a deflexão induzida por essa mesma carga em vários pontos simultaneamente no período de apenas alguns minutos. Esse equipamento é o Defletómetro de Impacto, ou como é conhecido na literatura anglo-saxónica, *Falling Weight Deflectometer (FWD)*.

Apesar do princípio básico destes ensaios ser o mesmo, os resultados que são obtidos, por exemplo com a viga Benkelman, não são necessariamente idênticos aos que obtêm com o *FWD*. Assim, de forma a se poder comparar dados obtidos com recurso a diferentes equipamentos é necessário que se consiga obter correlações entre eles para que se possa fazer uma conversão dos dados.

Mais recentemente surgiu um novo equipamento, o Defletómetro de Impacto Ligeiro ou *Light Falling Weight Deflectometer* (LFWD), que tal como o FWD, pretende tornar mais rápido o processo de análise de capacidade de carga de pavimentos e solos, com a particularidade de ser um equipamento mais leve e compacto que possibilita o acesso a pontos e locais impossíveis de alcançar com o Defletómetro de Impacto convencional. Em contrapartida, a carga que permite aplicar é bastante mais baixa, limitando largamente o seu uso, principalmente em pavimentos rodoviários.

1.2 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é aprofundar o conhecimento relativo às metodologias seguidas em estudos de avaliação de capacidade de carga em pavimentos rodoviários e encontrar correlações entre eles que permitam converter as deflexões medidas com o Defletómetro de Impacto convencional (*Falling Weight Deflectometer – FWD*), em deflexões equivalentes do ensaio com a Viga Benkelman, do ensaio de carga com placa e o Defletómetro de Impacto Ligeiro (*Light Falling Weight Deflectometer – LFWD*). Para tal, espera-se obter expressões analíticas que possam ser aplicadas aos resultados obtidos por um método por forma a se obterem os resultados equivalentes de um outro método. Importa referir que as correlações entre os diferentes métodos são excessivamente dependentes da estrutura ensaiada, das condições climatéricas e do protocolo seguido (Borges, 2001).

Este trabalho tem ainda objetivos mais específicos, nomeadamente no que concerne às limitações de aplicabilidade de cada um dos métodos. Ou seja, pretende-se estudar quais as situações em cada método pode ser considerado válido, tendo em conta o tipo de pavimento e os materiais que as constituem.

Pretende-se também analisar o impacto que diferentes estruturas de pavimentos têm nos resultados obtidos em cada ensaio.

1.3 Conteúdo da dissertação

No Capítulo 2, intitulado “Estado da arte sobre a comparação de diferentes métodos de avaliação da capacidade de carga de pavimentos rodoviários”, apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre os diferentes tipos de pavimentos rodoviários existentes, diferentes métodos

e equipamentos utilizados na medição das deflexões, os fatores que possam influenciar os valores de deflexão e as correlações encontradas na literatura pesquisada.

No Capítulo 3, intitulado “Caso de Estudo e Metodologias Utilizadas” são descritos todos os pontos ensaiados, bem como as razões que levaram à sua escolha. São também apresentados todos os procedimentos seguidos durante a execução dos ensaios e as adaptações que foram necessárias efetuar para que fosse possível a sua execução. Por fim, neste capítulo está incluída uma secção que apresenta a metodologia de análise de dados que será utilizada no capítulo seguinte.

O Capítulo 4, com o título “Análise de Resultados”, apresenta os dados obtidos durante a execução dos ensaios em campo, a análise desses dados e as equações que representam as relações obtidas entre os diferentes métodos de ensaio.

No quinto e último capítulo apresentam-se as principais conclusões obtidas nesta dissertação, bem como alguns conteúdos que poderiam ser mais aprofundados e objeto de trabalhos futuros, contribuindo assim para valorizar este e outros trabalhos no mesmo âmbito.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Conceito de Pavimento Rodoviário e Tipos de Pavimentos

Um pavimento pode ser descrito como uma estrutura construída sobre a terraplenagem de um terreno, que suporta as cargas provenientes do tráfego, redistribui essas cargas para a infraestrutura e proporciona as condições satisfatórias de conforto, economia e segurança aos seus utilizadores (Branco *et al.*, 2008). Dito isto, como principais requisitos, estas estruturas devem proporcionar condições de circulação segura e confortável (requisitos funcionais) resistindo a esforços verticais e horizontais provocados pelo tráfego que solicita a estruturas (requisitos estruturais), ao longo do período de vida útil para o qual foi projetada (Reis, 2009).

Além de deverem ser cumpridos os requisitos acima apresentados, há uma preocupação crescente relacionada com os aspetos de natureza ambiental como a mitigação do ruído proveniente da circulação de veículos, ou os aspetos paisagísticos (Antunes *et al.*, 2005).

Relativamente à sua constituição, um pavimento rodoviário é considerado como um sistema multiestratificado, formado por várias camadas de espessura finita, apoiadas na fundação constituída pelo terreno natural. Essas diferentes camadas dispõem-se, normalmente, com qualidade e resistência decrescentes, de cima para baixo, em consonância com a progressiva redução dos esforços em profundidade (Menezes, 2008).

Dependendo da categoria da estrada, do tráfego previsto, das condições da fundação e também das condições climáticas, podem ser adotados vários tipos de pavimentos, sendo eles classificados como:

- Pavimentos Flexíveis
- Pavimentos Semirrígidos
- Pavimentos Rígidos

Especificamente, os pavimentos flexíveis são estruturas multiestratificadas genericamente constituídas por camadas superiores de misturas betuminosas, isto é, misturas estabilizadas com ligantes hidrocarbonados (betume asfáltico) e por camadas inferiores de materiais granulares (Cunha, 2010, Menezes, 2008), como mostra a Figura 1. As camadas betuminosas são camadas ligadas e as camadas granulares são camadas não ligadas. Sendo camadas com características

distintas, estas apresentam também comportamentos distintos. Assim, as camadas betuminosas (ligadas) devem resistir aos esforços de tração, enquanto que as camadas granulares (não ligadas) devem suportar os esforços de compressão (Ribeiro, 2012).

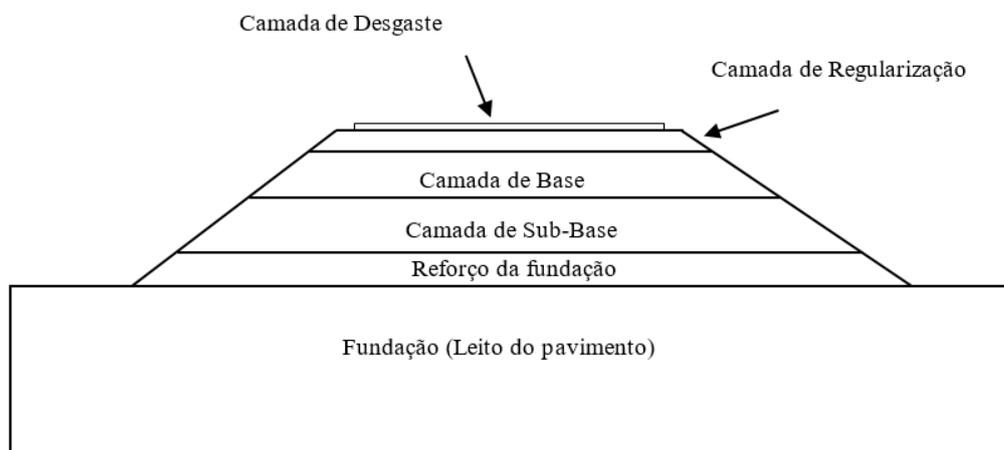


Figura 1 - Exemplo de estrutura de um pavimento rodoviário (adaptado de Pais (2012))

A camada de desgaste tem a função de assegurar as características funcionais já referidas, de modo a contribuir para uma circulação confortável e segura. Suporta e redistribui até às camadas inferiores as tensões induzidas pelos rodados dos veículos além de terem também características impermeabilizantes, evitando a entrada de água exterior para as camadas inferiores e para o solo de fundação. A sua superfície deve ser regular e deve ter uma rugosidade compatível com a mobilização de atrito (Menezes, 2008). Quando há necessidade que esta camada adquira determinada característica, recorre-se a betões betuminosos “modificados”, seja com borracha, com polímeros ou outros, para que essa característica seja conferida ao pavimento.

A camada de ligação ou regularização é a superfície onde a camada de desgaste irá assentar e, como todas as camadas de um pavimento flexível, distribui as tensões. A camada de base necessita normalmente de espessura elevada, de modo a cumprir a sua função, ou seja, distribuir e reduzir as tensões que chegam à camada de sub-base e ao solo de fundação, como se pode verificar pela Figura 2. A camada de sub-base suporta as camadas adjacentes, permite que a camada de base seja devidamente compactada, distribui as tensões, protege o solo de fundação do tráfego durante a execução da obra e tem ainda uma função drenante e anti contaminante, protegendo as bases granulares da penetração de finos (Ribeiro, 2012).

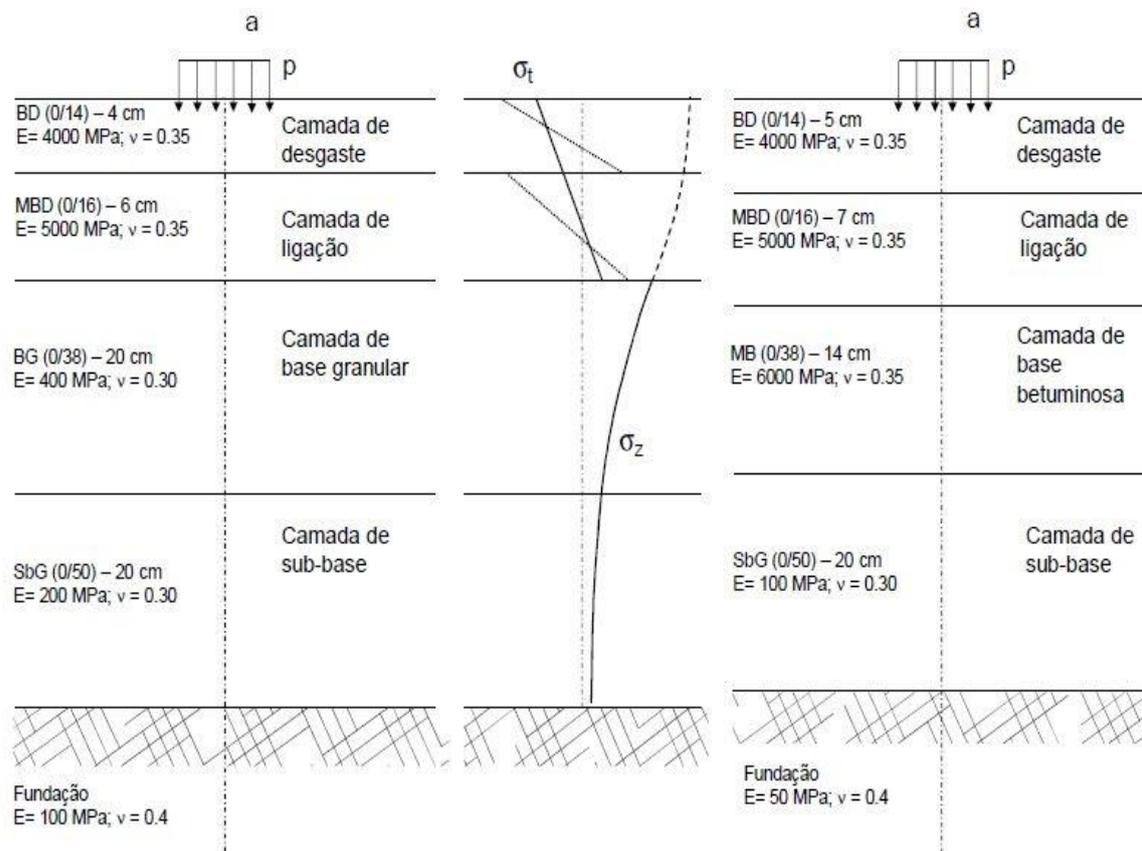


Figura 2 - Constituição e comportamento de um pavimento rodoviário flexível (Miranda e Pereira, 1999)

Do ponto de vista do comportamento dos materiais que constituem os pavimentos, a seguir abordam-se resumidamente os solos, os materiais granulares e as misturas betuminosas, para uma melhor definição da sua função.

As características mecânicas mais importantes para o dimensionamento das estruturas de pavimento são o módulo de deformabilidade (E em MPa) e o coeficiente de Poisson (ν). No entanto, admite-se, geralmente, que o coeficiente de Poisson não tem muita influência no comportamento estrutural de um pavimento, daí serem fixados valores típicos de cada material ((Alves, 2007) citando Antunes (1993)).

Na Tabela 1 são apresentados alguns valores típicos de módulos de deformabilidade e de coeficientes de Poisson, utilizados em pavimentos rodoviários.

Tabela 1 - Valores típicos de módulos de deformabilidade e coeficientes de Poisson, utilizados em pavimentos rodoviários (Alves, 2007, Antunes, 1993)

Tipo de material	Módulo de deformabilidade (E – MPa)	Coefficientes de Poisson (ν)
Misturas Betuminosas	3000 – 15000	0,35 – 0,40
Materiais Granulares	50 – 1500	0,35
Solos	5 – 300	0,40
Betão de Cimento	30000 – 70000	0,20
Materiais tratados com cimentos	1000 - 40000	0,25

Segundo Lopes (2010), os solos e materiais granulares não tratados, tem um comportamento não linear, isto é, o seu módulo de deformabilidade depende do respetivo estado de tensão. Pode-se ainda separar estes materiais em 2 tipos de comportamento distinto, uns que são caracterizados pela relação entre os módulos de deformabilidade, e os outros que são caracterizados pelo seu estado de tensão, dependendo se são solos finos ou solos granulares e granulares britados. No caso dos solos finos, o seu comportamento poderá depender também do tempo de atuação das cargas, independentemente do estado de tensão.

Por outro lado, as propriedades das misturas betuminosas, que apresentam um comportamento viscoelástico, variam em função da temperatura e/ou do tempo de atuação das cargas.

2.2 Os Sistemas de Gestão e a Avaliação de Pavimentos Rodoviários

Durante as ultimas décadas surgiram, no domínio dos pavimentos rodoviários, os sistemas de gestão de pavimentos. Tal como em outras áreas, estes tipos de sistemas de gestão funcionam como importantes meios de apoio à tomada de decisões.

Estruturar e implementar um sistema de gestão de pavimentos não é uma tarefa fácil, uma vez que não existe ainda a nível mundial, uma definição ou estruturação pré-estabelecida. Ainda assim Tavakoli define-o da seguinte forma: “*Um sistema de gestão de pavimentos é um programa computacional e organizacional usado para catalogar pavimentos, reconhecer o seu estado atual,*

calcular a evolução de deterioração e identificar vários métodos e níveis de conservação e reparação, de modo a avaliar quais os custos dessas reparações agora ou num futuro próximo” (Tavakoli et al., 1992, Vasquez et al., 2011).

Tomando como exemplo Portugal, a Administração Portuguesa (Estradas de Portugal, EP), desenvolveu um sistema de gestão de pavimentos (SGP) para a rede rodoviária que estava sobre a sua alçada, com uma extensão de aproximadamente 1300 km (Picado-Santos *et al.*, 2006).

Segundo Luz e Picado-Santos (2011), o SGP entrou em funcionamento em 2007, e a sua estrutura engloba três módulos principais:

- Base de Dados Rodoviária;
- Sistema de Avaliação da Qualidade;
- Sistema de Avaliação de Estratégias de Conservação.

Na Base de Dados são registadas as características relevantes dos pavimentos, obtidas através de inspeção visual através de instrumentação adequada, como o VIZIROAD. Este módulo inclui dados como a geometria do perfil transversal (largura de vias e bermas), a história dos pavimentos (tipo de estrutura e fundação, composição da estrutura e fundação, ações de conservação realizadas), o tráfego, o tipo de intervenções de conservação e respetivos custos e outra informação complementar sobretudo relacionada com a utilização de modelos determinísticos de previsão da evolução da degradação nos pavimentos (Picado-Santos *et al.*, 2006).

O Sistema de Avaliação da Qualidade como próprio nome indica é o módulo que serve de base à avaliação técnica das condições em que os pavimentos se encontram. Esta avaliação realiza-se através da determinação de um índice da qualidade (IQ), o qual caracteriza o estado dos pavimentos para cada secção da rede, em função das informações obtidas no levantamento visual tendo em conta as diversas degradações do pavimento (Horta *et al.*, 2013). O IQ é um valor que varia no intervalo entre 0 e 5, desde “muito mau estado” até “muito bom estado”, respetivamente. Numa primeira aproximação o valor de 2,0 já é indicador de necessidade de intervenção. Para calcular o IQ é necessário estabelecer para cada segmento o valor do nível de gravidade de cada tipo de degradação (Picado-Santos *et al.*, 2006).

Após a recolha de dados, a sua inserção na Base de Dados e calculado o IQ, de modo a definir-se as melhores estratégias para aplicar os recursos disponíveis, utiliza-se o Sistema de Avaliação de Estratégias, que é um instrumento de apoio à decisão cuja estrutura se apoiou em desenvolvimentos anteriores efetuados pela equipa do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra (Picado-Santos *et al.*, 2006, citando Ferreira *et al.*, 2003, Ferreira *et al.*, 2002). Uma vez que idealmente se deva considerar estratégias de conservação preventivas e não intervenções, apenas quando o estado do pavimento é de tal forma mau que a intervenção passa a ser obrigatória (Luz e Picado-Santos, 2011), este sistema tem um papel fundamental para que seja possível haver uma correta aplicação de ações de conservação. Importa referir que este sistema implementado em Portugal, foi desenvolvido tendo por base apenas pavimentos do tipo flexível uma vez que estes representam cerca de 99% de rede portuguesa.

Posto isto, verifica-se que no processo de gestão de estradas, a avaliação das condições dos pavimentos rodoviários é um dos aspetos mais importantes para garantir que estes apresentam características adequadas à circulação automóvel e que é igualmente importante na aplicação de programas de manutenção, quer a curto, médio e longo prazo, uma vez que permite que os recursos disponíveis sejam utilizados de forma otimizada, garantindo que os padrões de segurança e conforto são sempre cumpridos (Battiato *et al.*, 2007). Assim, um sistema de gestão bem implementado pressupõe para um grande número de objetivos, diversas vantagens de ordem técnica, administrativa e económica (Miranda e Pereira, 1999).

A avaliação de pavimentos consiste numa série de atividades que fornecem informações sobre o atual estado de conservação de um pavimento, particularmente no que diz respeito às condições estruturais do mesmo e da sua capacidade de oferecer aos utilizadores conforto e segurança durante a circulação (Jacinto, 2013).

As características alvo de avaliação, também denominadas parâmetros de estado, têm a função de caracterizar o estado funcional (superficial) e estrutural de um determinado pavimento num dado instante de tempo (Alves, 2007).

A avaliação funcional tem o objetivo de definir a qualidade do pavimento, face às exigências dos utentes, nomeadamente quanto ao conforto e à segurança (Freitas e Pereira, 2001). As características funcionais compreendem características de degradação superficial (fendilhamento, covas, exsudações do betume, desgastes, entre outras) e de deformação de

perfil do pavimento como irregularidades transversais e longitudinais (Borges, 2001, citando Gontigo *et al.*, 1994).

Neste trabalho, o objetivo principal é o estudo comparativo entre diferentes métodos de avaliação da capacidade de carga dos pavimentos rodoviários, pelo que a avaliação estrutural, neste caso, passa a ter um estudo mais aprofundado. Não querendo com isto dizer que as características funcionais são menos importantes, até porque como é sabido, podem influenciar em grande parte a capacidade estrutural dos pavimentos. Assim, a avaliação estrutural procura definir o estado da estrutura do pavimento quanto à capacidade de suportar as cargas para que foi projetado, sob a ação de determinadas condições climáticas (Freitas e Pereira, 2001).

Segundo Borges (2001), os pavimentos em serviço sofrem deformações causadas pela ação das cargas transmitidas pelas rodas dos veículos, levando a que as principais deformações a que estão sujeitos são as deformações permanentes e as deformações reversíveis. As deformações permanentes ocorrerem geralmente devido a:

- Assentamento do pavimento devido a deficiências construtivas (má compactação das camadas, problemas de drenagem);
- Capacidade de carga insuficiente, devido a falhas no dimensionamento;
- Deformação da camada de desgaste, devido a excesso de ligante (betume).

Por outro lado, as deformações reversíveis correspondem às deformações elásticas ou viscoelásticas da estrutura. São deslocamentos verticais que surgem na superfície, ou no interior da estrutura do pavimento, e desaparecem ao ser retirada a carga que os produziu. As deformações elásticas recuperam a sua forma anterior imediatamente após a ser retirada a carga que produziu a deformação, enquanto as deformações viscoelásticas recuperam a forma anterior, somente após um intervalo de tempo (Borges, 2001).

Segundo Freitas e Pereira (2001), o desempenho estrutural dos pavimentos estuda-se correntemente a partir da análise da vida residual, cujo cálculo se baseia numa metodologia que, a partir da observação da deflexão e do estado superficial, permite caracterizar estruturalmente o pavimento, e, assim, calcular o número de aplicações de carga admissíveis, através de leis de comportamento dos materiais. Resumidamente, a vida residual corresponde à capacidade do pavimento suportar cargas, definida pelo número de passagens de um eixo de referência que o conduzirá à ruína, num determinado momento da sua vida (Freitas e Pereira,

2001). Na avaliação da vida residual, há conjunto de parâmetros que devem ser tidos em conta tais como a geometria do pavimento e as características dos materiais que o constituem, as condições de aplicação da carga, as variações de temperatura, a periodicidade de observação e a respetiva análise e também quais as leis que estão na base do cálculo do módulo de deformabilidade. A Figura 3 demonstra como o módulo de deformabilidade é um parâmetro com relevância quando se avalia a vida residual de um pavimento rodoviário.

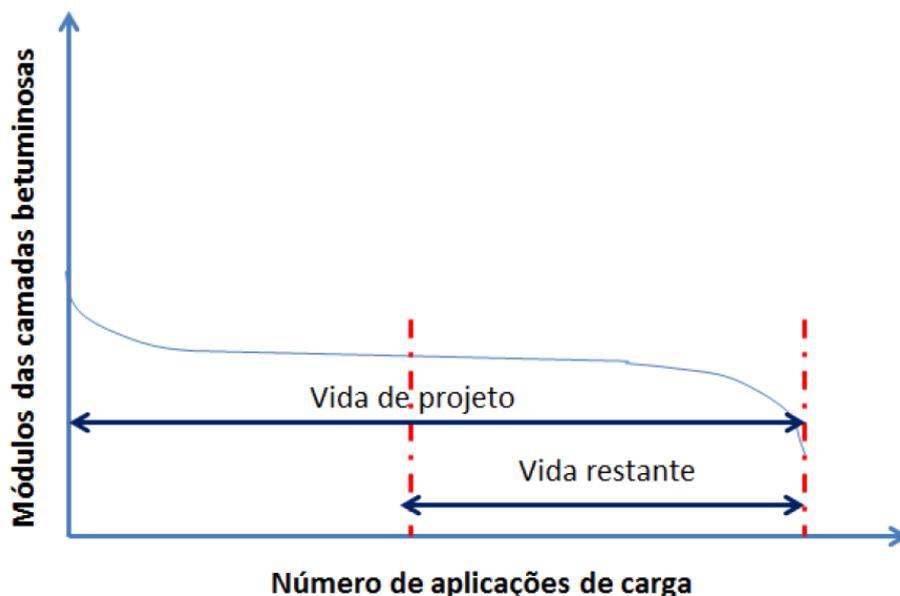


Figura 3 - Vida residual de um pavimento (Maia, 2013)

Para que esta avaliação seja feita corretamente, é fundamental que a caracterização do pavimento em estudo (estado superficial, características mecânicas dos materiais, deformações) seja realizada através das metodologias adequadas.

2.2.1 Avaliação Funcional de Pavimentos Rodoviários

Como referido anteriormente, a avaliação funcional tem o objetivo de definir a qualidade global do pavimento, nomeadamente ao nível do conforto e da segurança que o mesmo transmite aos seus utilizadores. Assim, na caracterização funcional dos pavimentos rodoviários geralmente faz-se uma avaliação aos seus parâmetros funcionais (Maia, 2013):

- Irregularidade longitudinal (IRI)
- Regularidade transversal
- Coeficiente de atrito
- Textura superficial

Segundo Jacinto (2013), estas informações podem ser obtidas através de observações periódicas da qualidade do pavimento associada a registos do tráfego. Muitos dos métodos de dimensionamento destinam-se a determinar as espessuras das camadas do pavimento para que este resista às tensões ou extensões calculadas, tendo em conta o tráfego que se preveja que solicite o pavimento. Sabendo como certo que as fendas aparecerão se o pavimento sofrer tensões ou extensões superiores para as quais foi dimensionado, o que causará uma diminuição da sua qualidade quer funcional, quer estrutural.

Segundo Miranda e Pereira (1999), de forma a obter-se uma maior fiabilidade e homogeneidade nos resultados neste tipo de avaliação, existem documentos de referência que devem ser utilizados pelos técnicos responsáveis nesta avaliação. Os Catálogos de Degradações são parte integrante da maioria dos sistemas de avaliação da qualidade de pavimentos, os quais devem conter a seguinte informação:

- Definição e descrição sumária do tipo de degradação, para auxiliar na identificação das mesmas
- Definição dos níveis e classes de gravidade, de modo a conseguir-se a quantificação das degradações
- Indicação dos procedimentos de medição ou avaliação das degradações
- Indicação das causas possíveis e respetivas potenciais evoluções.

Assim a principal função destes Catálogos de Degradações é apoiar o técnico, quer este realize o registo das degradações observando o pavimento *in situ*, quer observe em gabinete, recorrendo a registo em formato de fotografia e/ou vídeo.

Apesar de se tratar de um parâmetro de difícil observação no que à fiabilidade dos resultados diz respeito, a avaliação funcional dos pavimentos é uma componente imprescindível a qualquer sistema de gestão de pavimentos (Miranda e Pereira, 1999).

2.2.2 Avaliação Estrutural de Pavimentos Rodoviários

A avaliação estrutural de pavimentos rodoviários pode ser conseguida tendo por base métodos empíricos ou métodos analíticos. Os métodos empíricos assentam principalmente na observação do comportamento dos pavimentos, enquanto os métodos analíticos se baseiam nos ensaios da capacidade de carga (Francisco, 2012).

Os ensaios de deflexão têm sido usados por engenheiros ao longo das últimas décadas para avaliar estruturalmente os pavimentos rodoviários. O princípio básico dos ensaios de deflexão é o de que a deflexão que ocorre num pavimento submetido à ação de uma carga é um bom indicador da capacidade que o mesmo tem para suportar as cargas do tráfego (Khazanovich *et al.*, 2014). Deve ter-se em linha de conta que ao longo do tempo em que o pavimento está em serviço e sujeito a ação do tráfego e dos agentes climáticos, verificar-se-á uma evolução das deflexões. Estas tendem a diminuir ao longo dos anos em que o pavimento está em serviço, apresentando, na fase final da vida do pavimento, um aumento da deflexão. Assim, podem considerar-se seis fases distintas para classificar a evolução das deflexões ao longo dos anos que o pavimento se encontra em serviço (Miranda e Pereira, 1999)

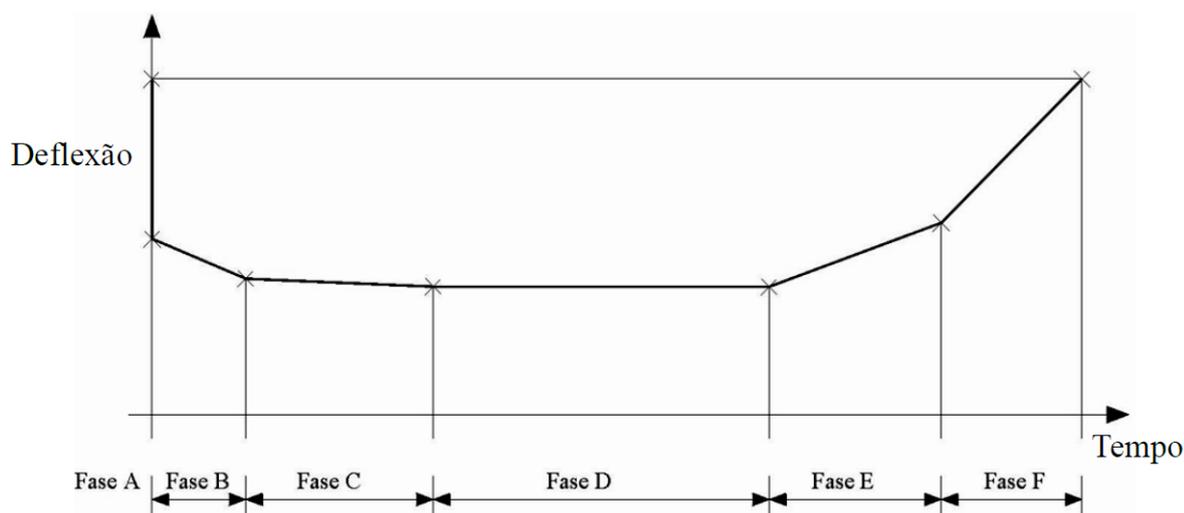


Figura 4 - Evolução das deflexões (Miranda e Pereira, 1999)

A Figura 4 refere-se a um pavimento que sofreu um reforço. Como é possível verificar, na fase A, o mesmo apresenta deflexão elevada uma vez que se encontra degradado antes do reforço. Após o reforço, o pavimento ganhou capacidade de suporte o que resultou numa diminuição significativa da deflexão. A deflexão continua a diminuir até a fase C devido a melhorias das características mecânicas dos materiais, principalmente devido ao aumento da rigidez das camadas de reforço por pós-compactação. Posteriormente a deflexão do pavimento passa por um período de estabilização, onde a mesma se mantém praticamente inalterada, sendo esta a fase D. É a fase mais longa de todo o período de vida do pavimento e reflete o bom desempenho de toda a estrutura do pavimento em relação as ações que está sujeito. A fase seguinte, E, é caracterizada pelo aparecimento dos primeiros sinais de fadiga, e conseqüentemente pelo

desenvolvimento de fendas que levam à perda de capacidade de carga (aumento da deflexão). A fase F é a última fase, onde o pavimento já entrou em estado de ruína, aumentando ainda mais a deflexão (Branco *et al.*, 2008).

É importante referir que os ensaios que visam obter os valores de deflexão a partir da aplicação de carga são ensaios não destrutivos. No entanto, no âmbito da avaliação estrutural de pavimentos existem também ensaios destrutivos, que são normalmente realizados para complementar a informação sobre as características físicas e mecânicas das diferentes camadas que constituem os pavimentos.

Segundo Fernandes (2010), nos ensaios destrutivos são removidas amostras das camadas do pavimento, através de sondagens, para determinar em laboratório as suas características *in situ* (espessura, condição dos materiais, eventuais deformações, tipos de materiais, condições de humidade). As principais desvantagens deste tipo de ensaios são a dificuldade de reprodução do estado de tensões e condições ambientais, o tempo requerido para a execução dos ensaios, o condicionamento do tráfego, os custos de reconstrução do pavimento (após os ensaios) e os custos para os utilizadores.

Por outro lado, nos ensaios não destrutivos não é necessário retirar amostras da estrutura para conhecer as suas características. Atualmente são cada vez mais usados métodos de ensaio não destrutivos em infraestruturas rodoviárias, devido ao seu fácil manuseamento e preservação da integridade das estruturas, em associação com um reduzido tempo de ensaio (Machado, 2012).

Durante esta dissertação, o trabalho será desenvolvido recorrendo apenas a ensaios não destrutivos, cujo estudo assume assim maior relevância.

2.3 Métodos de Avaliação da Capacidade de Carga de Pavimentos

Rodoviários

2.3.1 Métodos destrutivos

Como referido anteriormente, nos métodos destrutivos é necessário que haja a remoção de partes do pavimento para verificação das condições *in situ* e obtenção de amostras para ensaios

de laboratório. São chamados destrutivos porque invalidam, para futuros testes, as áreas do pavimento onde foram feitas as remoções (Pitta e Trichês, 2000).

Este tipo de ensaio destina-se à determinação em laboratório de índices de caracterização (CBR, limite de liquidez, limite de plasticidade), propriedades físicas (granulometria, densidade) ou propriedades e características que sejam necessárias serem conhecidas para a realização de procedimentos mecânicos (módulo de deformabilidade, resistência à tração ou compressão, comportamento à fadiga e deformação permanente) (Macêdo, 1996). Segundo Henrique (2013), neste tipo de ensaio é possível ainda determinar o estado de envelhecimento do ligante, por extração do ligante e posterior caracterização química e/ou física.

2.3.2 Métodos não destrutivos

A aplicação de técnicas de cariz não destrutiva tem sido utilizada mais que nunca na avaliação da integridade das redes de pavimentos existentes (Nazarian e Stokoe, 1989).

Os ensaios não destrutivos (Non Destructive Testing, NDT) provocam menores interrupções no tráfego que os métodos destrutivos, possibilitando assim maior flexibilidade na avaliação estrutural do pavimento em qualquer altura do seu período de serviço, além de permitir que o mesmo ponto seja analisado em posteriores avaliações, ao contrário dos métodos destrutivos. Outra vantagem dos NDT reside no facto de as medições podem ser consideradas verdadeiramente *in situ*, uma vez que é possível medir a resposta real do pavimento à carga aplicada, sem submeter a restante estrutura às perturbações que a recolha de carotes pode causar, dispensando também da preparação de amostras que reproduzam as condições reais do pavimento *in situ* para ensaiar posteriormente. Outro benefício da utilização destes métodos é que os dados recolhidos representam o comportamento médio da estrutura e dos materiais numa área algo considerável (Macêdo, 1996).

Os ensaios não destrutivos permitem, através de equipamentos adequados, obter bacias de deflexão para um determinado ponto de ensaio do pavimento, quando sobre o mesmo incide uma carga pontual ou rolante. Os equipamentos que utilizam a carga pontual para a realização dos ensaios são designados por defletómetros e medem a deflexão resultante do impacto de uma massa, que cai de uma determinada altura, sobre um determinado ponto da superfície do pavimento. Por outro lado, os ensaios realizados por carregamentos designados de carga rolante

utilizam equipamentos, que através de uma carga aplicada pela passagem de um eixo de um veículo pesado, permitem obter uma linha de influência de carga relativamente a um ponto fixo. Este tipo de ensaios apresenta a vantagem de induzir nos pavimentos ações semelhantes às do tráfego em termos da grandeza das cargas aplicadas (Francisco, 2012).

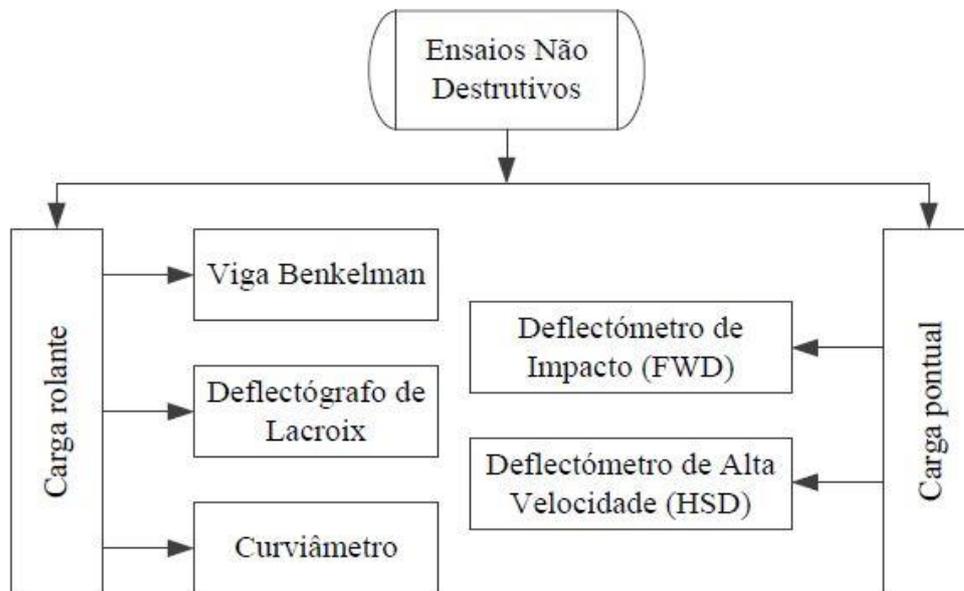


Figura 5 - Equipamentos mais utilizados em NDT (Francisco, 2012)

A Figura 5 apresenta os equipamentos mais utilizados em NDT, seguidamente abordo sucintamente os mais relevantes no âmbito desta dissertação.

2.3.2.1 Ensaio de Carga com Placa

O ensaio de carga com placa tem sido vastamente utilizado, principalmente na Europa, no controlo da qualidade de solos e de estruturas de pavimentos. Este método de ensaio permite a determinação da curva tensão-deslocamento, de forma a se caracterizar o solo ou pavimentos quanto à sua deformação e capacidade de carga, pelo cálculo do seu módulo de deformabilidade. A Figura 6 esquematiza o princípio do ensaio, que consiste na aplicação de uma carga a uma placa circular sobre a superfície a ensaiar, aplicando incrementos de carga até se obter a carga máxima, medindo as respetivas deflexões. A carga é transmitida à placa por um macaco hidráulico que usa um veículo pesado como reação, medindo a deformação

correspondente simultaneamente. Na maioria dos casos são seguidas as normas francesa e alemã AFNOR NF P 94-117-1 (2000) e DIN 18134 (2001), respetivamente (Martins, 2011).

ENSAIO DE PLACA

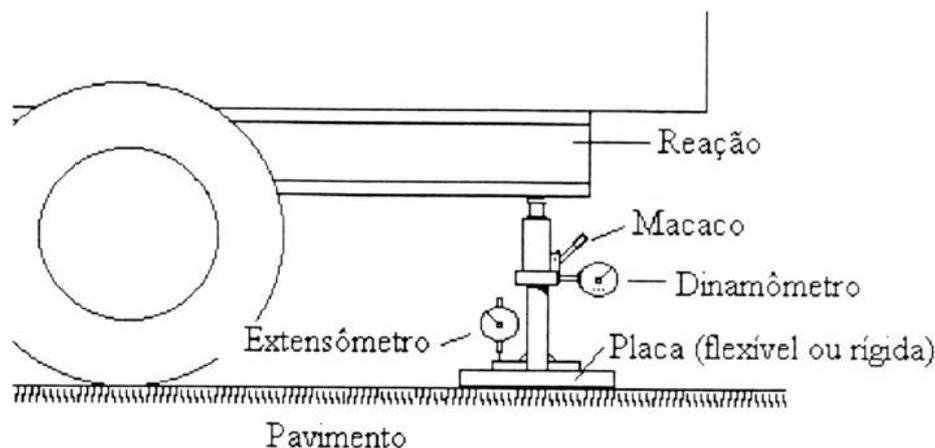


Figura 6 - Esquemática do ensaio de placa (Albernaz, 1997, Borges, 2001)

Sendo este ensaio claramente indicado para a caracterização de solos, segundo Borges (2001) só em 1948 se utilizou pela primeira vez na pavimentação, para avaliar as pistas dos aeroportos de Sarnia e Ottawa, no Canadá.

O mesmo autor refere que se encontrou uma boa relação entre as deformações medidas com a viga Benkelman e o coeficiente de reação vertical obtido com os ensaios de carga, num estudo realizado por *Suzuki et al* (1988). O coeficiente de reação vertical, não é mais que a razão entre a pressão em qualquer ponto da superfície de contato e o deslocamento vertical produzido devido a aplicação da carga (Christan, 2013).

Existe um conjunto de normas que especificam o procedimento a seguir na realização deste ensaio, as quais também mostram como obter os módulos de deformabilidade, E_{v2} , onde maioritariamente são variações da solução de Boussinesq, dependendo do procedimento prescrito.

Um dos maiores problemas deste método é que é bastante moroso, pelo que não permite a realização de um elevado número ensaios por dia, o que leva a que este ensaio seja pouco eficiente na sua execução. Por esse motivo desenvolveram-se novos métodos, com o objetivo

de acelerar o processo de caracterização de solos, mas principalmente de pavimentos, onde é necessário que se executem os ensaios o mais rapidamente possível de forma a aumentar a frequência dos mesmos, acelerando assim todo o processo de caracterização das estruturas de pavimentos.

2.3.2.2 Viga Benkelman

A Viga Benkelman surgiu na década de 50, sendo desenvolvida por A.C Benkelman, na WASHO (*Western Association of State Highway Organizations*) (Pavement Interactive, 2010). Segundo Visser e Priambodo Koesrindartono (2000) a Viga Benkelman é um equipamento utilizado em NDT capaz de medir as deflexões, que ocorrem à superfície de um pavimento, decorrentes da carga aplicada por um veículo pesado real, e podem ser medidas em diferentes pontos ao longo de um pavimento.

Este equipamento é composto por uma parte fixa, apoiada no pavimento, através de pés reguláveis e por uma viga móvel ligada através de uma articulação. Como se verifica pela Figura 7, numa extremidade fica a ponta apalpadora, em contacto com a superfície (ponto onde se pretende medir a deflexão). Na outra extremidade é acionado um defletómetro que regista o movimento vertical. A articulação entre os braços permite o movimento da viga e divide-a em duas partes, onde o braço maior tem geralmente um comprimento de 2,4m e o menor tem metade desse valor (Lopes, 2010).

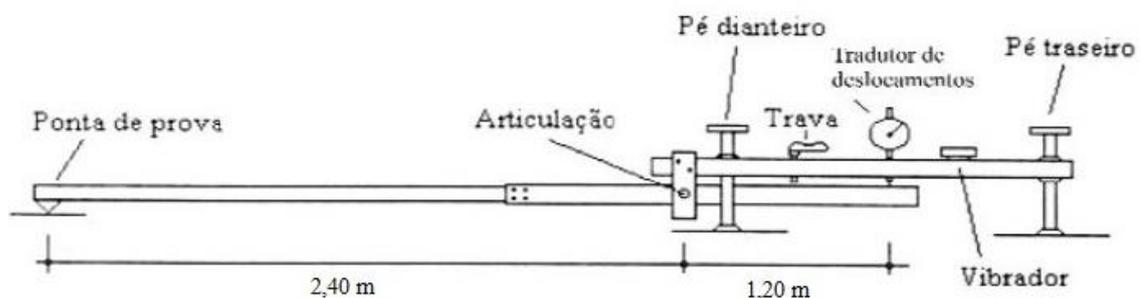


Figura 7 - Representação esquemática da Viga Benkelman (Albernaz, 1997, Lopes, 2010)

Este equipamento necessita também de um veículo pesado padronizado, tipicamente com uma carga de 80kN num eixo simples com rodado duplo com os pneus a uma pressão entre 480 e

550 kPa (70 a 80 psi) (Pavement Interactive, 2010). Na Figura 8 é possível verificar que a ponta apalpadora da viga é colocada entre os pneus, e com o movimento do caminhão, gera a deflexão máxima nesse ponto.



Figura 8 - Ensaio com Viga Benkelman (Pavement Interactive, 2010)

Segundo Borges (2001), o cálculo das deflexões obtidas no ensaio realizado com a viga Benkelman é realizado através das Equações 1 e 2:

$$D = (L_0 - L_f) * \frac{a}{b} \quad (1)$$

$$D = (L_i - L_f) * \frac{a}{b} \quad (2)$$

Onde:

D - Deflexão máxima;

D_i - Deflexão intermedia;

L_0 - Leitura inicial;

L_i - Leitura final;

$\frac{a}{b}$ - Relação entre braços da viga

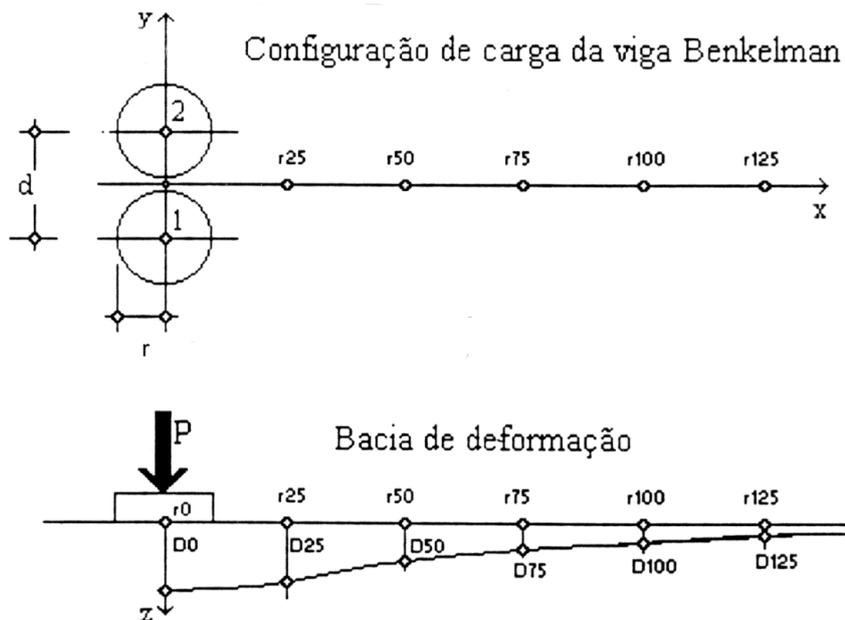


Figura 9 - Pontos de avaliação da Viga Benkelman (Borges, 2001)

Assim, com as leituras a diferentes distâncias do ponto de aplicação da carga é possível determinar a linha de influência longitudinal da bacia de deformação e o calcular o raio de curvatura (Figura 9)

O raio de curvatura representa uma parábola que passa no ponto de deflexão máxima, D_0 , e geralmente a 25cm do ponto inicial, ou seja, D_{25} . E a expressão (Equação 3) que o permite calcular é a seguinte (Bernucci, 2008):

$$R = \frac{6250}{2(D_0 - D_{25})} \quad (3)$$

Borges (2001) apresenta uma série de vantagens e desvantagens no uso deste equipamento. Como principais vantagens deste equipamento destacam-se:

- Facilidade de operação;
- Necessidade de mão-de-obra pouco qualificada;
- O valor medido, geralmente, representa com grande rigor a deformação real do pavimento;
- Baixo custo do ensaio.

Por outro lado, como desvantagens esse autor refere as seguintes:

- Dificuldade na determinação da curvatura e dimensões da bacia de deflexão;
- Elevada dispersão das leituras, devido à baixa repetibilidade dos ensaios;
- Impossibilidade de assegurar que as bases de apoio da viga estejam fora da deformada;
- Morosidade do teste.

Apesar de este ensaio ter um custo reduzido e apresentar valores de deformação próximos da real deformação do pavimento, acaba por ter uma rentabilidade baixa, na medida em que é bastante moroso, pelo que surgiram novos equipamentos e métodos com o objetivo de melhorarem a forma como as deflexões podem ser medidas.

2.3.2.3 Defletómetro de Impacto (FWD)

O Defletómetro de Impacto (FWD) é um equipamento que permite aplicar um carregamento na superfície de um pavimento que se pretende estudar, através de uma placa circular. Este equipamento estabeleceu-se mundialmente como sendo uma das ferramentas mais eficazes na medição de deflexões (Saltan e Terzi, 2008).

Segundo Nóbrega (2003) os equipamentos tipo FWD simulam o efeito da passagem de uma roda em movimento sobre o pavimento. Esta simulação é feita através da queda de um conjunto de massas, de uma determinada altura, sobre um sistema de amortecedores capazes de transmitir ao pavimento um pulso de carga com formato aproximadamente igual a uma onda sinusoidal.

Estes equipamentos aplicam normalmente cargas entre 6,7 – 156 kN no pavimento e são medidas as deflexões resultantes do impacto da carga na superfície do pavimento, bem como o tempo que demorou a voltar ao ponto inicial após a deformação. Como dito anteriormente, a carga é aplicada a uma placa circular metálica, por um peso que cai de determinada altura, sobre um conjunto de amortecedores, evitando o impacto direto da placa com a superfície do pavimento. Geralmente as deflexões são medidas em diferentes posições através de sensores. Os valores de pico lidos em cada um destes sensores possibilitam traçar a chamada bacia de deflexão (Burak Goktepe *et al.*, 2006).

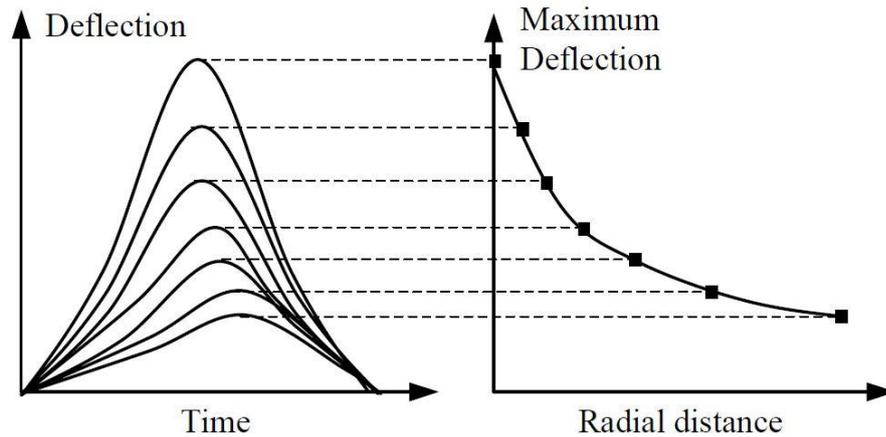


Figura 10 - Gráfico típico obtido com FWD

Como é possível verificar na Figura 10, a maior deflexão medida ocorre no ponto de aplicação da carga, sendo que nos sensores mais afastados desse mesmo ponto, as deflexões diminuem.

O FWD é geralmente atrelado a um veículo e posicionado no ponto de ensaio, sendo portanto um ensaio estacionário. Posteriormente a placa de ensaio é encostada à superfície do pavimento e a massa é elevada à altura pretendida. A aquisição de resultados é efetuada num computador existente no veículo rebocador. O diâmetro da placa de ensaio varia de 30 cm a 45 cm, de acordo com a norma ASTM D 4694-96. A placa de 30 cm de diâmetro é, normalmente utilizada em pavimentos rodoviários, enquanto em pavimentos aeroportuários é utilizada a de 45 cm (Alves, 2007).

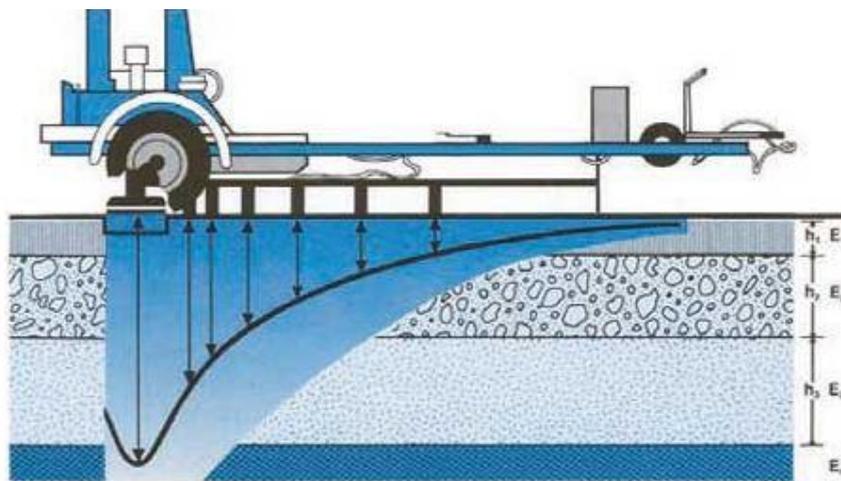


Figura 11 - Esquematização do equipamento – FWD (Cornell University, 2005)

Segundo Alves (2007), a medição da temperatura de ensaio é um parâmetro muito importante, especialmente na avaliação de pavimentos flexíveis, já que quanto menor for a temperatura, menores serão as deflexões registadas. Para se proceder a uma correta interpretação dos resultados, para a análise do comportamento do pavimento, é necessário o conhecimento do valor da temperatura de ensaio, uma vez que a força aplicada em cada ponto de ensaio não corresponde exatamente à força pretendida. Assim, é necessário proceder a uma normalização dos valores de deflexões para a força pretendida.

Este ensaio tem a vantagem de se poder medir com maior precisão a bacia de deflexões do pavimento (Figura 11) é utilizá-la para estimar os módulos de elasticidade das camadas, o que permite uma avaliação estrutural mais adequada e o cálculo do reforço estrutural, quando necessário, pelos princípios da mecânica dos pavimentos. Isto é possível através da técnica chamada de análise inversa (Bernucci, 2008).

2.3.2.4 Defletómetro de Impacto Ligeiro

O Defletómetro de Impacto Ligeiro (LFWD) é um basicamente um defletómetro de impacto portátil, mais compacto que o FWD tradicional, que foi desenvolvido na Alemanha no início da década de 80 (Elhakim *et al.*, 2014). Este equipamento surgiu como alternativa ao FWD convencional especialmente em situações onde se possam encontrar dificuldades de acesso aos pontos de ensaio, como em estradas ainda em construção (Benedetto *et al.*, 2012).

A Figura 12 mostra a constituição genérica de um Defletómetro de Impacto Ligeiro.



Figura 12 - Constituição de um LFWD (adaptado de Elhakim *et al.*, 2014)

Este é um ensaio dinâmico de carga com placa, com um princípio de funcionamento idêntico ao do FWD, onde a força de impacto é gerada pela queda de uma massa sobre um sistema de amortecedores, transmitindo um impulso ao solo através de uma placa de carga (Lopes, 2010).

As deflexões são medidas por um geofone ou em alguns equipamentos por um conjunto de geofones, estando um deles localizado no interior do cilindro, o qual atua através de um furo no centro da placa de carga. A célula de carga e os geofones estão ligados a um dispositivo eletrônico, geralmente um computador portátil, que regista automaticamente a força aplicada,

as deflexões e o historial da deflexão central e respetivo valor de pico. É ainda possível o uso de GPS, para conseguir a georreferenciação (Machado, 2012).

Este ensaio pode ser utilizado na avaliação da capacidade de carga em pavimentos, e também na determinação do módulo de deformabilidade de solos granulares com módulos entre os 15 e 70/80 MPa (Lopes, 2010).

As principais vantagens deste equipamento estão associadas à sua mobilidade, facilidade de transporte e possibilidade de realização de ensaios em locais de difícil acesso, como trincheiras de escavação. Apesar de apresentar estas vantagens, o seguinte conjunto de fatores que podem influenciar os resultados obtidos com este tipo de equipamentos (Lopes, 2010):

- Fatores ambientais, tais como, a temperatura e a humidade;
- Teor em água e compactação das camadas;
- Espessura e posição das camadas;
- Tipos de materiais que constituem as camadas.

Apesar de existirem vários tipos e modelos de Defletómetros de Impacto Ligeiros disponíveis no mercado em todo o mundo, o princípio de funcionamento é o mesmo.

2.3.3 Cálculo do módulo de deformabilidade

O módulo de deformabilidade pode ser calculado pelo método de análise inversa, considerando os seguintes dados: os valores da deflexão, a geometria, a natureza e estado das camadas do pavimento e as propriedades do solo de fundação. O método de análise inversa tem como primeiro passo a atribuição de módulos de deformabilidade a cada uma das camadas que constitui o pavimento. Após calcular a bacia de deflexão resultante da aplicação duma carga padrão, com a ajuda do programa de cálculo, comparam-se as deflexões calculadas com as deflexões medidas (Freitas e Pereira, 2001). Resumidamente, o método de análise inversa tem por base a utilização de um *software* de cálculo onde são introduzidas as características do pavimento como a espessura, o módulo de rigidez de cada camada que é arbitrado, e o coeficiente de Poisson (Amorim, 2013). De forma a obterem-se modelos representativos, deve repetir-se o procedimento até se obter o erro mínimo entre as deflexões medidas e as deflexões calculadas (Freitas e Pereira, 2001 citando Molenaar, 1994).

2.4 Estudos realizados na comparação de diferentes de diferentes métodos de avaliação de capacidade de carga

Ramos *et al.* (2006) desenvolveram no Brasil o estudo “Relação entre deflexões medidas com Viga Benkelman e *Falling Weight Deflectometer*: Estudo de caso durante implantação no sistema de gerência de pavimentos do DER-SP”, o qual comparou as deflexões máximas medidas em intervalos de 40 metros em vários segmentos de 1 km de extensão. Após análise estatística dos dados recolhidos, estabeleceram a seguinte relação para correlacionar o *FWD* e a Viga Benkelman: $D_{VB} = 0,84 D_{FWD}$. Concluindo que as deflexões medidas com o equipamento *FWD* representam aproximadamente 84% das deflexões medidas com a Viga Benkelman.

Borges (2001) cita alguns estudos comparativos realizados por vários autores, a destacar o trabalho realizado por Fabrício *et al.* (1994), que analisaram trechos homogêneos da rodovia BR-101/RS concluindo, através da expressão 4, que as deflexões medidas com a Viga Benkelman são sempre menores que as obtidas com o *FWD*.

$$D_{FWD} = 18,5 + 0,5 D_{VB} , com R^2 = 0,37 \quad (4)$$

O trabalho de Fabrício *et al.* (1994) tem particular interesse no âmbito desta dissertação uma vez que analisou trechos homogêneos de diferentes estruturas de pavimentos.

Após analisar vários estudos, Borges (2001) , concluiu que para comparação entre os métodos da Viga Benkelman e o *FWD*, a maior parte das correlações seguiram o modelo linear de regressão e os coeficientes de determinação R^2 variaram de 0,37 a 0,94. Algumas correlações foram obtidas a partir de valores médios de deflexão de segmentos homogêneos, outras a partir de deflexões características dos segmentos, ou ainda com os valores obtidos em cada estação avaliada.

Macêdo (2003) cita alguns trabalhos realizados no mesmo âmbito, entre eles o trabalho realizado por Duarte *et al.* (1996), que apresenta a seguinte correlação para os ensaios com Viga Benkelman e *FWD*:

Para deflexões $D_{FWD} < 0,0085\text{mm}$

$$D_{VB} = 20,645 * (D_{FWD} - 19)^{0,351} \quad (5)$$

Para deflexões $D_{FWD} > 0,0085\text{mm}$

$$D_{VB} = 8,964 * (D_{FWD} - 60)^{0,351} \quad (6)$$

Um aspeto importante a ter em conta na tentativa de correlacionar os ensaios é a forma do carregamento. Enquanto na Viga Benkelman a carga é aplicada através de duas rodas do eixo padrão, onde as leituras das deflexões são realizadas num eixo imaginário que passa entre as duas rodas, no FWD a carga é aplicada através de placa circular de diâmetro maior que o das rodas do eixo padrão individualmente, mas com as leituras realizadas num eixo imaginário que passa pelo centro do carregamento. Isto conduz a deflexões iniciais maiores no FWD do que na Viga Benkelman e à medida que as leituras da deflexão se afastam do ponto de aplicação da carga, as deflexões da Viga Benkelman tendem a valores maiores que os valores encontrados no FWD (Macêdo, 2003).

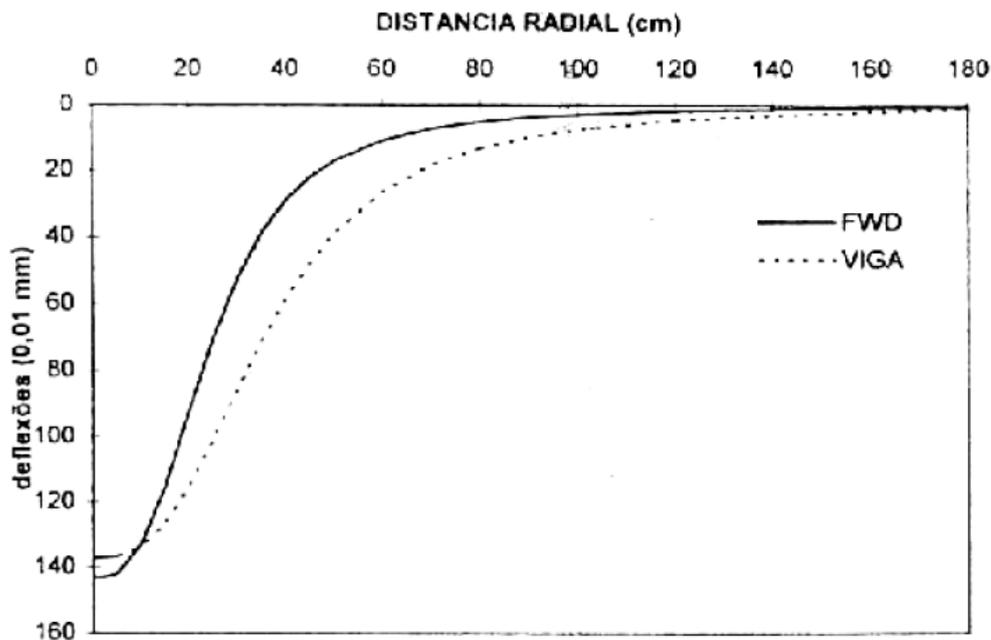


Figura 13 - Relação entre as bacias de deflexão com Viga e FWD (Macêdo, 2003)

Poucos estudos foram realizados na comparação de diferentes métodos de avaliação da capacidade de carga onde esteja incluído o defletómetro de impacto ligeiro (LFWD). O módulo de deformabilidade é inversamente proporcional ao valor das deflexões, ou seja, quanto maior forem as deflexões medidas, menor é o valor do módulo obtido. Oliveira (2006) citando Thom (2003) apresenta a seguinte correlação entre os módulos obtidos entre o FWD e o LFWD:

$$E_{LFWD} = \frac{E_{FWD}}{\left(1 + E_{FWD}/150\right)} \quad (7)$$

3 CASO DE ESTUDO E METODOLOGIAS UTILIZADAS

3.1 Seleção dos pontos de ensaio

Tendo em conta as condicionantes em termos de meios para a realização dos ensaios, seleccionaram-se 6 pontos localizados dentro do *Campus* de Azurém da Universidade do Minho. Desta forma conseguiu-se realizar os ensaios de forma mais rápida e económica. Na Figura 14 é possível visualizar a localização dos mesmos na imagem de satélite retirada do Google Maps.

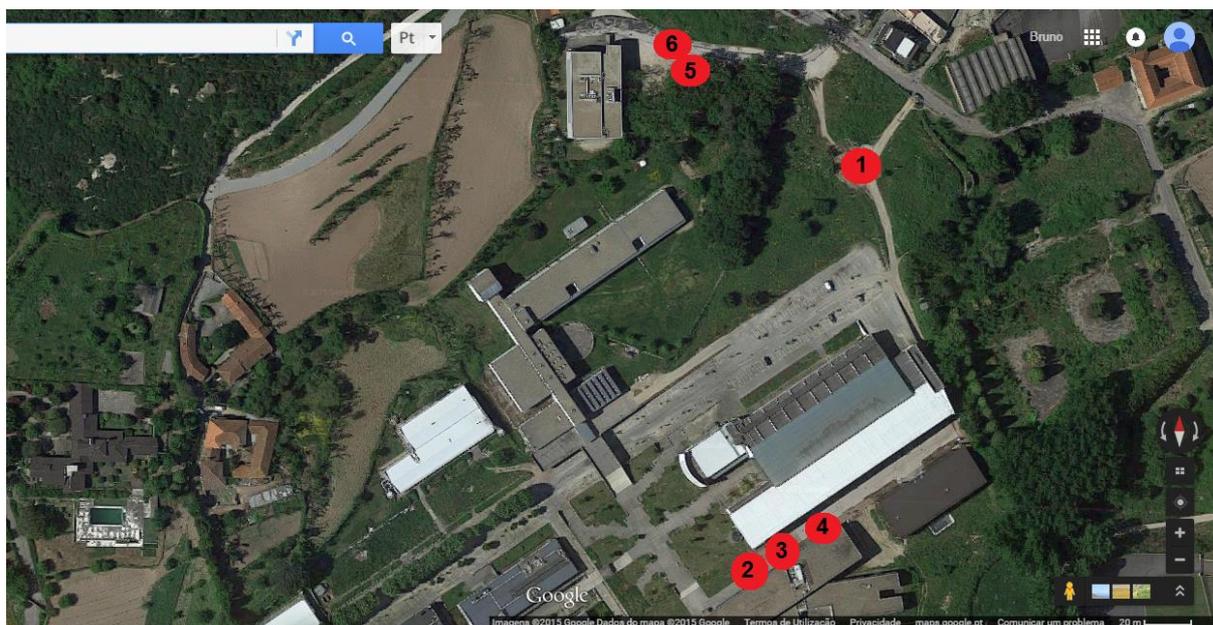


Figura 14 - Mapa de localização dos pontos de ensaio (Google Maps)

Os 6 pontos seleccionados têm uma constituição de pavimento/solo diferente entre si. Optou-se por esta diversidade de estruturas para que seja possível analisar o comportamento de cada uma delas ao serem solicitadas por diferentes equipamentos. Desta forma poderá determinar-se em que tipo de estrutura é mais adequada a aplicação de cada ensaio e até que ponto os resultados obtidos podem ser considerados válidos ou fiáveis.

Na Tabela 2 apresentam-se o tipo de pavimento correspondente a cada ponto.

Tabela 2 - Tipo de Pavimentos/Solo dos pontos ensaiados

Ponto	Tipo de Pavimento/Solo
1	Solo arenoso
2	Betão (rígido)
3	Cubos de granito
4	Solo vegetal
5	Agregado Britado de Granulometria Extensa (ABGE)
6	Betuminoso (delgado)

O ponto 1 representa de um solo arenoso que, apesar de não se ter efetuado o ensaio CBR, aparenta ser um solo bem compactado, e apresentava no dia do ensaio um teor em água de 2,6%, por isso espera-se a medição de deflexões baixas.



Figura 15 - Ponto 1 (Solo arenoso)

O ponto 2 representa uma laje de betão de cimento, com cerca de 10 cm de espessura. Será de esperar baixas deflexões já que se trata de um pavimento rígido, apesar de não se conhecer o tipo de solo subjacente à laje.



Figura 16 - Ponto 2 (Betão)

No caso do ponto 3, trata-se de um pavimento constituído por cubos de granito, pelo que será de esperar deflexões algo elevadas, pois apesar da existência dos cubos graníticos, é um pavimento bastante permeável, o que faz com que a água da chuva penetre nas juntas dos cubos, podendo assim aumentar o teor em água, o que diminui a sua capacidade de carga.



Figura 17 - Ponto 3 (Cubos de granito)

O ponto 4 foi localizado sobre um solo vegetal, o que leva à existência de água no mesmo, apresentando no dia do ensaio um teor em água de 27,1%. Tal como no caso do ponto 3, será de esperar deflexões elevadas, talvez ainda maiores neste ponto.



Figura 18 - Ponto 4 (Solo vegetal)

O ponto 5 é um solo de agregado britado de granulometria extensa (ABGE), apresentando alguma vegetação seca e aparentando boa compactação. No dia do ensaio apresentava um teor em água de 3.7%. Assim, seria de esperar um comportamento idêntico ao do ponto 1.



Figura 19 - Ponto 5 (Agregado Britado de Granulometria Extensa, *ABGE*)

O ponto 6 é um pavimento betuminoso delgado (na imagem pode observar-se também a ponta apalpadora da Viga Benkelman). Trata-se de uma camada delgada de betão betuminoso, cerca de 4cm, colocada sobre um solo idêntico ao do ponto 5.



Figura 20 - Ponto 6 (Pavimento Betuminoso)

Mediu-se o teor em água nos solos de forma a perceber-se se a presença de água teria influência nas deflexões medidas.



Figura 21 - Exemplo de medição do teor em água no ponto 4

Houve a necessidade, numa segunda fase, de se realizar novos ensaios num outro local, onde se utilizaram apenas os defletómetros de impacto (FWD e LFWD) nas medições. Por razões de

segurança e de forma a não perturbar o bom funcionamento do tráfego rodoviário, selecionou-se um local onde o trânsito fosse baixo. O local selecionado foi um dos caminhos de acesso à Horta Pedagógica de Guimarães, na Veiga de Creixomil, conforme se pode observar na Figura 22.

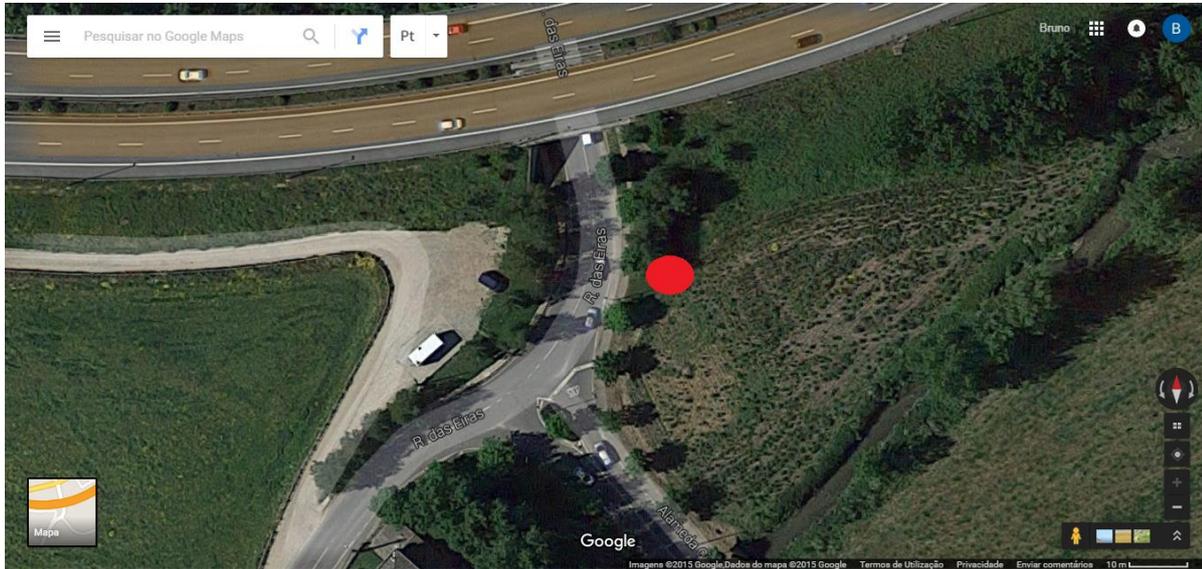


Figura 22 – Localização aproximada dos pontos de ensaio na segunda fase (Google Maps)



Figura 23 - Acesso à Horta Pedagógica de Guimarães

Trata-se de um solo arenoso, apresentado à primeira vista uma compactação média.



Figura 24 - Solo arenoso (2ª fase de ensaios)

3.2 Equipamentos Utilizados

Como referido na secção 1.2, o presente trabalho pretende estudar a existência de possíveis relações entre os resultados obtidos com os vários equipamentos e métodos utilizados na avaliação da capacidade de carga de pavimentos rodoviários. Para isso, é importante explorar os equipamentos de forma correta, tendo em conta as especificações do fabricante e as normas inerentes a cada ensaio.

Durante os ensaios de carga com o defletómetro de impacto (FWD), utilizou-se o equipamento, *DYNATEST 8000*, do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, Figura 25.



Figura 25 - Defletómetro de Impacto da Universidade do Minho, *DYNATEST 8000*

O *DYNATEST 8000* tem incorporados 9 geofones, estando o primeiro localizado no centro da placa e os restantes 8 às distâncias de 300mm, 450mm, 600mm, 900mm, 1200mm, 1500mm, 1800mm e 2100mm, respetivamente. O diâmetro da placa é de 300mm. Este equipamento produz um impulso dinâmico no pavimento que simula a ação de uma carga rolante e permite a determinação da deflexão para uma carga controlada (7 – 120kN) com elevada precisão.

O Defletómetro de Impacto Ligeiro (LFWD) utilizado foi recentemente adquirido pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho e tem um princípio de funcionamento similar ao Defletómetro de Impacto convencional (FWD). Os ensaios foram realizados recorrendo ao equipamento *HMP - LFG4*, o qual possui o respetivo certificado de calibração.

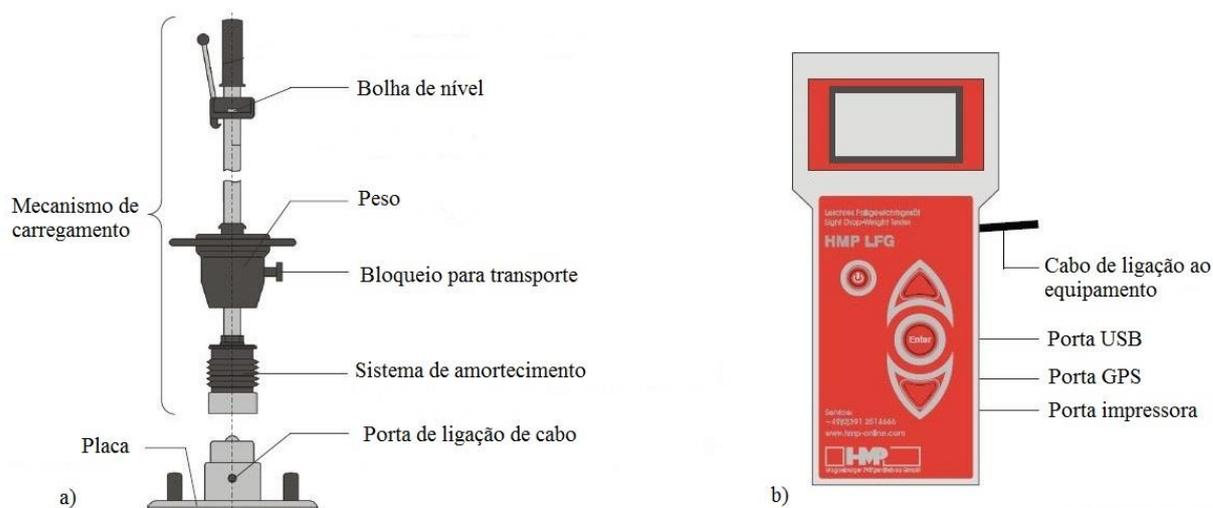


Figura 26 - Defletómetro de Impacto Ligeiro HMP LFG4

A Tabela 3 apresenta as especificações técnicas do equipamento em questão, fornecidas pelo fabricante.

Tabela 3 - Especificações técnicas do LFWD utilizado

Modelo	HMP-LFG4
Ano de Construção	2014
Peso de Queda	10kg
Força de Impacto	7070N ± 70N
Duração do Impacto	17ms ± 1,5ms
Altura de Queda	720mm
Diâmetro da Placa	300mm
Espessura da Placa	20mm
Peso da Placa	15kg
Intervalo de medição de assentamento	0,1 – 2,0mm ± 0,02mm
Intervalo de medição de módulo de deformabilidade	$E_{vd} < 225\text{MPa}$
Intervalo de temperatura para utilização	0 - 40°C

Tendo em conta as especificações apresentadas pelo fabricante, verifica-se, e como seria de esperar por se tratar de um equipamento ligeiro, que o valor máximo do módulo de deformabilidade passível de ser medido é de 225MPa, o que pressupõe à partida que o campo de utilização deste equipamento se limite a solos, e possivelmente camadas betuminosas delgadas.

Este equipamento tem a particularidade de armazenar na sua memória interna os dados das medições, os quais podem ser transferidos para um computador através de um dispositivo de armazenamento ou por cabo pela porta USB. Possibilita ainda a integração de um sistema de GPS que regista a localização de cada ensaio realizado.

Quanto aos ensaios realizados com a Viga Benkelman, recorreu-se a uma viga convencional com uma relação entre braços de 2:1.



Figura 27 - Viga Benkelman utilizada

Na extremidade do menor braço estava acoplado um *LVDT* (*Linear Variable Differential Transformer*), isto é, um sensor de medição de deslocamento linear (Figura 28), o qual permite medir o deslocamento induzido ao pavimento/solo pelo veículo durante a sua passagem junto à ponta apalpadora. O curso do *LVDT* era de 10mm, e estava interligado, juntamente com um dispositivo que permitia medir o deslocamento horizontal do veículo, a um sistema de aquisição de dados *LabVIEW* da *National Instruments* (Figura 29 e 30) Este sistema de aquisição de dados permite armazenar em ficheiros *Excel* a distância percorrida pelo veículo, bem como a respetiva deformação do pavimento.

Devido a condicionantes de logística, não foi utilizado o veículo pesado padronizado sugerido pela respetiva norma do ensaio. Utilizou-se então uma carrinha *pick-up* do laboratório de

Engenharia Civil, carregada com material britado, de forma a se conseguir obter uma carga que permitisse a realização das medições.



Figura 28 - LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*)



Figura 29 - Dispositivo de aquisição de dados



Figura 30 - Dispositivo de medição de distância horizontal

No que concerne aos ensaios de carga com placa, os materiais necessários foram essencialmente os mesmos utilizados nos ensaios com a viga Benkelman, à exceção do dispositivo de medição de distância horizontal. Adicionalmente utilizou-se um sistema de reação (veículo) e um dispositivo de medição da carga aplicada à placa (célula de carga). Utilizou-se a mesma placa de 300mm de diâmetro, o mesmo *LVDT* de 10mm de curso acoplado à Viga Benkelman para medição da deformação vertical do solo/pavimento. A célula de carga, juntamente com o *LVDT* interligados ao sistema de aquisição de dados permitiram medir da carga aplicada à placa e a deformação do pavimento.

Como sistema de reação utilizou-se a carrinha *pick-up* do laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho já referida, carregada com brita de forma a se conseguir obter uma carga que permitisse a realização das medições. Assim, a carrinha foi carregada com cerca de 1575kg de brita, e admitindo que o peso da carrinha, no eixo traseiro, sem a brita é de cerca de 600kg, totaliza então uma carga de aproximadamente 2,1 toneladas, ou seja 21kN.



Figura 31 - Veículo utilizado durante os ensaios de carga com Viga Benkelman e com Placa

3.3 Metodologias de Ensaio

Em Julho de 2015 realizaram-se os levantamentos em campo com os defletómetros (FWD e LFWD), com a Viga Benkelman e com o ensaio de carga com placa. Nesta fase realizou-se um ensaio de cada tipo em cada um dos 6 pontos apresentados na secção 3.1. Foram realizadas duas repetições em cada ponto.

Posteriormente, em Setembro de 2015, realizou-se a já referida segunda fase de ensaios defletométricos. Essa fase apenas englobou ensaios com os defletómetros (FWD e LFWD), na qual se aplicou apenas um carregamento com cada um dos defletómetros, em vários pontos ao longo do caminho de acesso da Horta Pedagógica de Guimarães.

3.3.1 Ensaios com Defletómetro de Impacto (*Falling Weight Defletometer, FWD*)

A norma ASTM D4694 indica que se deve fazer uma pré-compacção através da queda do peso pelo menos 5 vezes, antes de se proceder ao ensaio propriamente dito. Seguiu-se em

grande parte o procedimento de ensaio indicado pela norma anteriormente referida, o qual consiste no seguinte (ASTM, 2003):

- Transportar o equipamento até ao ponto de ensaio e colocar a placa sobre o centro do ponto, o qual deve estar regular com todo o material solto existente removido, para assegurar que a placa é colocada corretamente.
- Baixar a placa e os sensores até a superfície e verificar se estão colocados numa superfície estável e firme.
- Levantar os pesos geradores de carga até à altura desejada e realizar a queda dos mesmos. Guardar a deflexão da superfície e a carga de pico.
- Realizar pelo menos dois carregamentos e comparar os resultados obtidos. Se a diferença em algum sensor for superior a 3%, deve mencionar-se essa diferença em relatório.

De forma a simplificar a análise de resultados, foram tidas em conta as deflexões medidas no defletómetro 1 (D1) localizado no centro da placa, já que o equipamento LFWD apenas dispõe de um defletómetro exatamente no centro da placa, pelo que não se justificava a avaliação das deflexões nos restantes geofones disponíveis no equipamento.

Para que os valores de carga aplicada pelo Defletómetro de Impacto (FWD) fossem o mais aproximado possível dos valores do Defletómetro de Impacto Ligeiro (LFWD), aplicaram-se as cargas mínimas permitidas pelo equipamento, as quais variaram entre 7 e 9 kN, dependendo da resposta do suporte (função do tipo de pavimento/solo ensaiado).

Na primeira fase de ensaios, em cada um dos seis pontos seleccionados aplicaram-se apenas três alturas de queda de pré-compacção, seguidas de mais três quedas de medição. Em cada ponto repetiu-se o mesmo procedimento duas vezes consecutivas, de forma a aferir-se a variabilidade dos resultados obtidos nas medições.

Mediram-se também as temperaturas da superfície do pavimento betuminoso antes de qualquer ensaio, uma vez que a temperatura pode influenciar os resultados obtidos nos ensaios de carga, nomeadamente no módulo de deformabilidade das misturas betuminosas. Aquando os ensaios, a temperatura do pavimento betuminoso registada foi cerca de 27° C.



Figura 32 - Execução de medição com FWD (1ª fase)

Na segunda fase de ensaios, aplicaram-se três quedas de pré-compactação seguidas de três quedas para medição, apenas uma vez. Este procedimento executou-se em 20 pontos espaçados de 5 metros entre si, no caminho de acesso à Horta pedagógica.



Figura 33 - Execução de medição com FWD (2ª fase)

3.3.2 Ensaios com Defletómetro de Impacto Ligeiro (*Light Falling Weight Defletometer, LFWD*)



Figura 34 - Preparação do Defletómetro de Impacto Ligeiro (LFWD) para o ensaio

Todo o procedimento de ensaio foi realizado tendo em conta a norma E2835-11 da ASTM (ASTM, 2011). Assim, em cada ponto, o ensaio realizou-se através dos seguintes passos:

- Posicionou-se a placa no ponto de teste, garantindo uma superfície plana, retirando-se possível material solto.
- Rodou-se a placa para a esquerda e direita 45°, de forma a assentar a placa no ponto.
- Realizaram-se seis quedas da massa, onde as três primeiras serviram de pré-compactação e as três últimas de medição.

De referir que a haste do equipamento deve estar completamente na vertical na altura da queda, e deve repetir-se o teste noutra local se a diferença na pré-compactação for superior a 10% entre quedas.

Este equipamento em particular apresenta no ecrã as amplitudes de assentamento do pavimento/solo S_1 , S_2 e S_3 , sendo respetivamente os valores de assentamento em cada umas das quedas do peso. Após a última queda, é apresentado no ecrã novamente S_1 , S_2 , S_3 e S_m , o

assentamento médio, bem como o valor de E_{vd} , dispensando assim o posterior cálculo do mesmo.

O módulo de deformabilidade pode ser obtido pela Equação 8 e no caso do LFWD é assumido hipoteticamente que a tensão média máxima aplicada ao solo/pavimento durante o ensaio é geralmente constante com o valor de $0,1\text{MN/m}^2$. Considerando uma placa com diâmetro de 300mm, obtém-se:

$$E_{vd} = \frac{22,5}{z_{max}} \quad (8)$$

Tal como no caso do FWD, os ensaios com o LFWD realizaram-se e duas fases distintas, sendo medidos os mesmos pontos e à mesma temperatura. Na primeira fase aplicou-se o mesmo carregamento duas vezes em cada um dos pontos, após a pré-compactação. Na segunda fase aplicou-se apenas um carregamento, após a pré-compactação, em vários pontos igualmente distanciados de 5 metros (nos mesmo pontos ensaiados com o FWD).

3.3.3 Ensaio com Viga Benkelman

Não havendo nenhuma norma ASTM específica para a utilização da viga Benkelman (Pestana, 2008), teve-se por base a norma ASTM D4695-03 (2008): *Standard Guide for General Pavement Deflection Measurements* e também a norma brasileira DNER-ME 024/94.

Após o ensaio é obtido um ficheiro *Excel*, no qual é apresentada a deformação medida durante a execução do ensaio. Essas deformações não têm em conta a relação de 2:1 da viga e não traduz a real deformação do pavimento/solo. Por isso, a deflexão reversível real deve ser calculada da pela Equação 9 (adaptado de Silva, 2004):

$$D_0 = (L_{max} - L_f) * \frac{a}{b} \quad (9)$$

em que,

D_0 – Deflexão real (mm)

L_{max} – Leitura máxima na segunda passagem do veículo (mm)

L_f – Leitura após a segunda passagem do veículo e estabilização do solo (mm)

a/b – Relação entre braços da Viga Benkelman

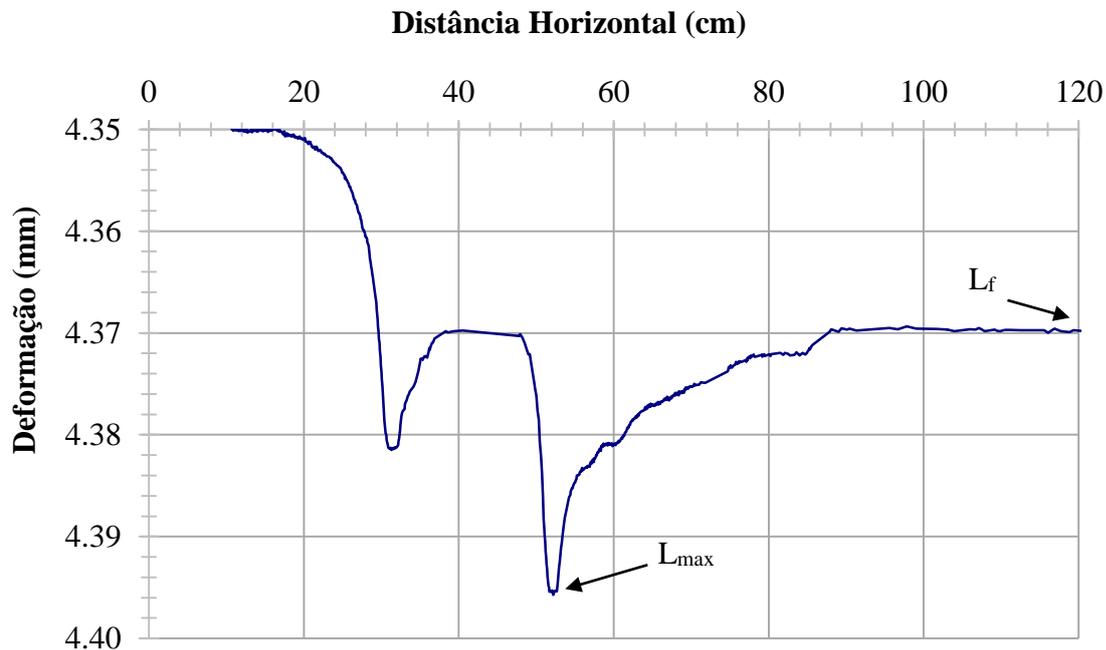


Figura 35 - Exemplo de gráfico Distância Horizontal – Deformação, obtido no ensaio da Viga Benkelman

O valor L_{max} é o valor da deformação medida no *LVDT* no momento da passagem da roda no ponto em medição. Como apenas se mede a deformação provocada pela passagem de uma roda, este valor deve ser dividido por 2, uma vez que o veículo é composto por duas rodas no eixo traseiro, obtendo assim uma carga de aproximadamente 10,5kN (dividindo 21kN por 2) na roda traseira utilizada no ensaio.

Também neste ensaio se mediu a temperatura do pavimento betuminoso antes de ser iniciada a sua execução, registando-se uma temperatura de cerca de 28°C.

Em cada ensaio foi realizado um movimento de aproximação, na direção da extremidade que continha o *LVDT*, e um movimento de afastamento, na direção da extremidade apalpadora. Por limitações do dispositivo utilizado, só foi possível medir a distância horizontal de forma contínua e sempre crescente, o que implica que no ficheiro *Excel* obtido esteja registada a distância total percorrida pelo veículo. No entanto, é possível verificar o ponto da inversão da marcha aquando da inversão dos valores da deformação. Para confirmar a repetibilidade dos resultados efetuaram-se pelo menos dois ensaios em cada um dos pontos em estudo. É

importante salientar que o veículo não dispunha de rodado duplo, portanto, durante os ensaios a roda da carrinha deslocou-se paralelamente à viga, sem que houvesse contacto entre os dois, como mostra Figura 36.



Figura 36 - Adaptação para rodado simples no ensaio da Viga Benkelman

3.3.4 Ensaio de Carga com Placa

Segundo a norma francesa NF P 94-117-1 (2000), no ponto a ensaiar devem ser aplicados dois ciclos de carregamento sucessivos (princípio de carga-descarga). O primeiro carregamento é aplicado com uma velocidade de carregamento constante e, após um período de manutenção da carga, é feita uma descarga de forma faseada, repetindo-se o mesmo processo para o segundo carregamento, conforme se apresenta na Figura 37. Após o segundo ciclo de carregamento obtêm-se a curva tensão-deslocamento, a qual permite o cálculo do módulo de deformabilidade E_{v2} .

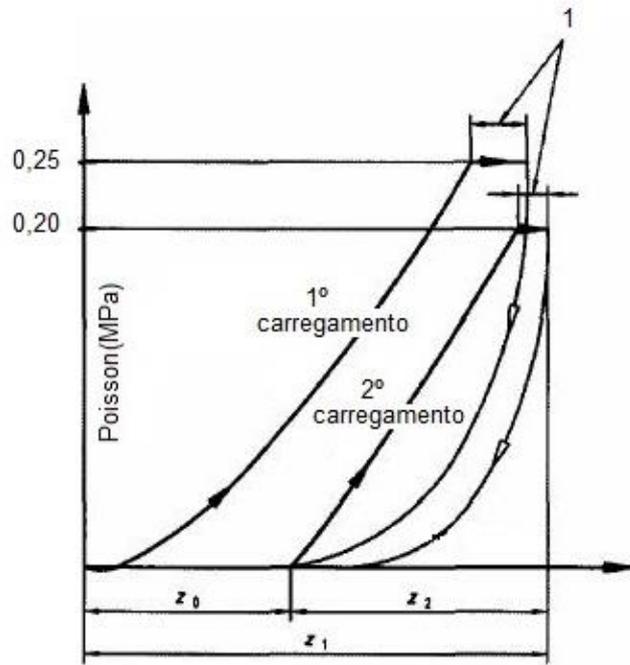


Figura 37 - Princípio dos ciclos de carga-descarga aplicados à placa durante o ensaio (adaptado de AFNOR (2000))



Figura 38 - Colocação da placa sob o veículo e posicionamento da ponta apalpadora da viga Benkelman



Figura 39 - Pormenor do sistema de medição de carga (célula de carga)



Figura 40 - Execução do ensaio de carga com placa

Como é possível verificar nas Figuras 38 a 40, recorreu-se à Viga Benkelman para medir o deslocamento do solo com recurso ao *LVDT*, colocando a ponta apalpadora da mesma sobre a placa. Com o auxílio de um macaco hidráulico, aplicou-se a carga ao solo, usando o veículo carregado como sistema de reação.

Segunda a norma NF P 94-117-1 (2000), o procedimento pelo qual o ensaio se deve reger é o seguinte:

- Preparação do ensaio:

1. Assinalar as coordenadas do ponto a medir
2. Com o auxílio de uma régua, nivelar o ponto de ensaio numa área de, pelo menos 0,7m x 0,7m
3. Sobre a superfície já nivelada, colocar uma camada de regularização de areia limpa, espalhando o material, de modo a que se atinja uma espessura o mais fina possível
4. Posicionar a placa de carregamento centrada na superfície, assentando-a, aplicando duas ou três rotações alternadas de 30° a 45°
5. Colocar na vertical o dispositivo de aplicação da carga sob o sistema de reação, e no centro da placa e instalar os dispositivos de carregamento e de medida das deformações.

Antes de se iniciar o ensaio, deve aplicar-se um carregamento de 30 segundos, sendo este carregamento, a pré-carga. Este primeiro carregamento deve aplicar uma tensão sob a placa de 0,01MPa. Após os 30 segundos de carregamento com a devida tensão instalada, as leituras do valor da carga e do deslocamento deverão ser tomadas como zero, isto é, leituras iniciais de referência (Martins, 2011).

Assim, e tendo em conta a referida norma, é possível iniciar a execução do ensaio da seguinte forma: Aplicar em pelo menos 30 segundos um primeiro carregamento à placa, aplicando-lhe uma força de 7068 daN \pm 140 (70,68kN \pm 1,4kN). Esta força exerce sobre a plataforma uma pressão média de 0.25 MPa, tendo em conta as dimensões da placa. Quando esta pressão é atingida, manter o tempo necessário, de modo que a deformação da placa, medida num período de 15 segundos, seja superior a 0,02mm. Este valor é considerado como correspondente ao da estabilização da deflexão na plataforma. Descarregou-se a placa em menos de 5s e anotou-se a deformação permanente Z_0 .

Executar um segundo carregamento com a mesma velocidade do primeiro mas limitando a carga a um valor de 5654 daN \pm 110 (56,54kN \pm 1,10kN). Esta força produzida sobre a plataforma corresponde a uma pressão média de 0,20 MPa. Pressão essa que deve ser mantida até estabilização da deflexão. Após a estabilização da deflexão da placa, determinar, da mesma forma que para o primeiro carregamento, a deformação total da placa Z_1 no final do segundo carregamento.

Este procedimento sugerido pela norma foi seguido em parte. A carga aplicada foi cerca de 10% do estabelecido pela norma, obtendo-se assim uma carga idêntica à aplicada pelos restantes equipamentos. A norma prevê também a utilização de uma placa de 600mm de diâmetro, no entanto foi utilizada uma placa de 300mm de diâmetro, pelo que a pressão exercida em cada carregamento não corresponderá ao normalizado. Foi novamente utilizado um sistema de aquisição, desta vez adaptado ao ensaio em questão.



Figura 41 - Software utilizado para a aquisição de dados do ensaio de carga com placa

Na Figura 41, é possível verificar a carga máxima aplicada no carregamento, bem como a deformação lida pelo *LVDT* em tempo real. É possível verificar também os incrementos de carga sucessivos e idênticos aplicados à placa, o tempo de espera até à estabilização e a respetiva descarga.

Seguindo a norma NF P 94-117-1 (2000), o módulo de deformabilidade Ev_2 pode ser calculado pela equação 10.

$$Ev_2 = \frac{\pi}{4} * \frac{1}{v^2} * \frac{p * d}{Z_2} \quad (10)$$

Onde,

$$Z_2 = Z_1 - Z_0$$

$Z_1; Z_0$ - Deformações medidas durante o ensaio;

ν - Coeficiente de Poisson;

p - Valores da pressão média sobre a placa (MPa);

d - Diâmetro da placa (mm);

3.3.5 Metodologia de análise

Na análise das medições obtidas na primeira fase de ensaios, comparou-se as deflexões medidas no solo/pavimento, uma vez que se trata do parâmetro comum a todos os ensaios. Não foi possível comparar os módulos de deformabilidade (E_{vd}) pois não foi possível obter informação sobre a constituição da estrutura dos pavimentos em estudo, que permitisse realizar a retroanálise que resultaria na determinação dos módulos de deformabilidade das várias camadas. Assim, apenas se normalizou as deflexões medidas nos vários pontos de ensaio para que fosse possível comparar as mesmas.

Por outro lado, uma vez que é possível a obtenção dos módulos de deformabilidade sem que seja necessária uma caracterização do pavimento nas medições obtidas na segunda fase (por se tratar de um material granular), esse parâmetro foi também incluído na análise realizada. No caso do FWD o módulo foi calculado com base na Equação 11 que se apresenta na secção 4.1, a qual tem em conta o diâmetro da placa e a amplitude da deformação medida. No LFWD o valor módulo é imediatamente calculado pelo *software* presente no equipamento.

4 ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos com cada um dos métodos em estudo, bem como a respetiva análise detalhada.

4.1 Resultados obtidos em ensaios com o FWD

Na primeira fase mediram-se, para cada um dos pontos selecionados, as respetivas deflexões. A Tabela 4 apresenta as deflexões medidas em cada ponto para os ensaios realizados com FWD nessa fase de ensaios. Importa salientar que os valores foram normalizados (linearmente) para uma carga de 7,07kN (correspondente à carga aplicada pelo LFW), de forma a ser possível a comparação entre os ensaios. Esta normalização realizou-se também para os restantes métodos, como será apresentado mais adiante neste capítulo.

Tabela 4 - Deflexões médias medidas com o FWD e respetiva força média (1ª fase)

Tipo de solo/pavimento	Deflexão média medida (mm)	Força média medida (kN)	Deflexão média modificada para carga de 7,07kN (mm)
Solo arenoso	0,063	7,943	0,056
Betão (rígido)	0,205	9,189	0,157
Cubos de granito	0,408	8,794	0,329
Solo Vegetal	1,810	7,130	1,899
ABGE	0,041	8,762	0,033
Betuminoso (delgado)	0,115	8,020	0,102

Numa primeira análise aos resultados obtidos com o FWD nesta fase, verifica-se que a força varia em função do tipo de estrutura, e que os suportes com menor deflexão são o solo arenoso, seguido do ABGE, com valores bastantes próximos. Como previsto no Capítulo 3, as deflexões nestes pontos são baixas, possivelmente devido à boa compactação que têm e ao baixo teor em água. Ao contrário do que seria esperado verificou-se uma deflexão algo elevada no pavimento de betão. O solo vegetal apresenta a maior deflexão, devido do seu teor em água relativamente elevado.

Na segunda fase, as deflexões foram medidas em vários pontos, sendo todos constituídos pelo mesmo tipo de suporte. Assim, tendo uma amostra maior, decidiu-se calcular o valor do módulo

de deformabilidade para este ensaio, uma vez que é um parâmetro medido diretamente pelo LFWD.

Então, o valor do módulo de deformabilidade (E_{vd}) pode ser obtido pela Equação 11 (Kopf *et al.*, 2013):

$$E_{vd} = \frac{1,5 * r * \sigma}{s} \quad (11)$$

Onde,

r – Raio da placa de carregamento (mm)

σ – Tensão debaixo da placa (MPa)

s – Amplitude média da deformação (mm)

1,5 – Fator de ajustamento devido à utilização de uma placa circular

Esta expressão simplificada ignora fatores relacionados com a velocidade de aplicação da carga e com forças de inércia durante a execução do ensaio.

Pela análise da Tabela 5, na qual se apresenta a média dos valores obtidos nas 3 repetições de carga que compõem cada ensaio, é possível constatar que mesmo para os pontos constituídos pelo mesmo tipo de solo, as deflexões variam bastante entre si. Nota-se particularmente que nos últimos pontos as deflexões são mais elevadas. Tal facto poderá dever-se a uma menor compactação do solo e/ou a um maior teor em água naqueles pontos.

Tabela 5 - Deflexões medidas com o FWD e respectivos módulos de deformabilidade (2ª fase)

Ponto	Deflexão média medida (mm)	Força média (kN)	Deflexão média normalizada para a carga de 7,07kN (mm)	Módulo de deformabilidade médio calculado [E_{vd} (MPa)]
1	0,122	7,78	0,111	223,67
2	0,130	7,47	0,123	193,76
3	0,119	7,49	0,112	214,76
4	0,128	7,61	0,119	203,82
5	0,099	7,54	0,093	285,10
6	0,099	7,90	0,089	286,47
7	0,095	7,35	0,091	257,09
8	0,086	7,36	0,083	279,77
9	0,082	7,34	0,079	297,22
10	0,086	7,42	0,082	294,57
11	0,186	8,42	0,156	171,60
12	0,207	8,41	0,174	156,49
13	0,189	8,45	0,158	170,48
14	0,240	8,29	0,205	128,63
15	0,238	8,50	0,198	137,48
16	0,234	7,91	0,209	121,57
17	0,271	8,34	0,230	115,58
18	0,231	7,90	0,207	121,99
19	0,223	8,18	0,193	135,34
20	0,221	8,14	0,182	136,10

4.2 Resultados obtidos em ensaios com o LFWD

As deflexões medidas com o LFWD já apresentam resultados um pouco diferentes, em que os pontos que no FWD apresentavam menores valores de deflexão, apresentam valores bastante maiores neste método, nomeadamente no solo arenoso e no ABGE, sendo que o solo vegetal continua a ser o ponto com maior deformação. Este equipamento aplica uma carga 7,07kN (especificações do fabricante, em função da altura de queda). No entanto, como não possui célula de carga, é impossível medir a carga que é aplicada em cada ensaio e verificar se varia em função do tipo de solo como se verifica com o FWD. Assim sendo, verifica-se que nas medições com o LFWD se obtiveram deflexões mais elevadas, em todos os pontos, do que nas medições com o FWD, apesar da força aplicada ser mais baixa. Esta diferença pode ser explicada pelos diferentes tempos de atuação das cargas, uma vez que no LFWD é cerca de

15ms (verificado nas especificações do fabricantes), e no FWD é de cerca de 30ms (+/- 2ms), como mostra a Figura 42, obtida no ficheiro *Excel* após os ensaios.

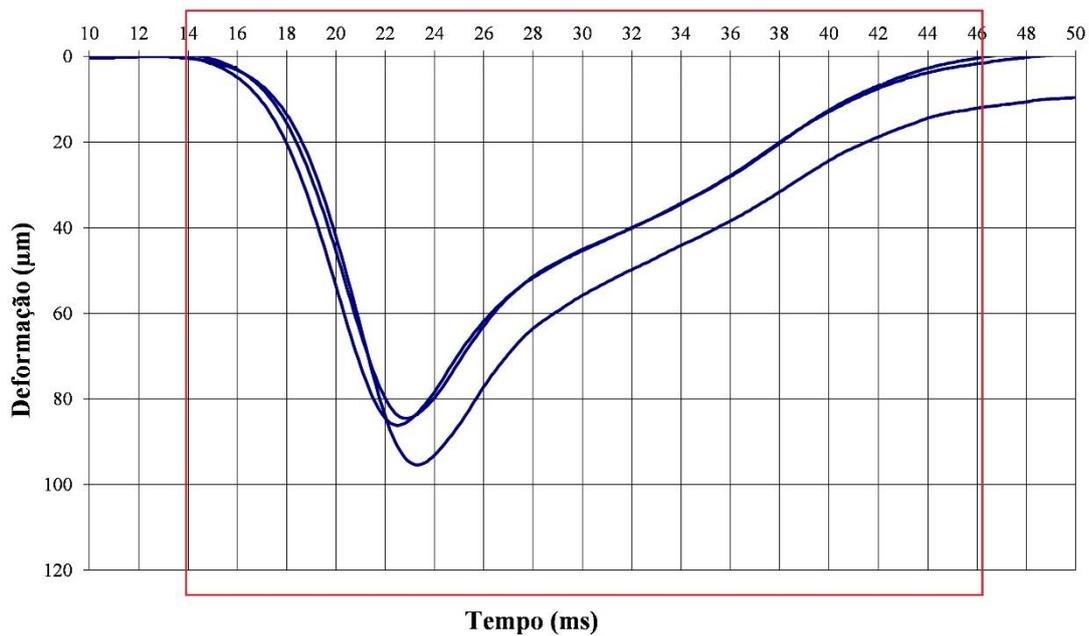


Figura 42 - Exemplo de gráfico Tempo-Deformação (FWD)

A Figura 42 mostra a atuação do carregamento sobre o pavimento, onde as linhas azuis representam as três alturas de queda durante a medição.

Tabela 6 - Deflexões médias medidas com o LFWD

Tipo de solo/pavimento	Deflexão média medida (mm)
Solo arenoso	0,417
Betão (rígido)	0,191
Cubos de granito	0,581
Solo Vegetal	3,574
ABGE	0,347
Betuminoso (delgado)	0,158

É possível verificar também que o no pavimento de Betão, o valor é similar, continuando relativamente alto, o que pode indicar algum problema naquele ponto.

No que concerne as medições realizadas com o equipamento LFWD na segunda fase de ensaios, a Tabela 7 apresenta os valores das deflexões e módulos medidos. Estes valores têm por base uma carga de 7,07kN aplicada pelo equipamento.

Tabela 7 - Deflexões medidas com LFWD e respetivos módulos de deformabilidade (2ª fase)

Ponto	Deflexão média medida (mm)	Módulo de deformabilidade médio calculado [E_{vd} (MPa)]
1	0,290	77,59
2	0,235	95,74
3	0,273	82,42
4	0,273	82,42
5	0,212	106,13
6	0,185	121,62
7	0,172	130,81
8	0,173	130,06
9	0,186	120,97
10	0,205	109,76
11	0,393	57,25
12	0,338	66,57
13	0,327	68,81
14	0,308	73,05
15	0,346	65,03
16	0,380	59,21
17	0,430	52,33
18	0,406	55,42
19	0,362	62,15
20	0,393	57,25

Analisando a Tabela 7, é possível constatar que mesmo sendo os pontos pertencentes ao mesmo pavimento/suporte, as deflexões variam bastante entre si tal como no caso do FWD. Consequentemente os módulos de deformabilidade também são bastantes díspares, uma vez que existe uma relação direta entre a deflexão medida e módulo calculado. Mais uma vez verifica-se que nos últimos pontos as deflexões são mais elevadas, pelo que se nota uma relação entre as medições com FWD e LFWD.

4.3 Resultados obtidos em ensaios com Viga Benkelman

As medições realizadas pelo método da viga Benkelman revelam valores mais baixos que os obtidos com LFWD, sendo na sua maioria mais aproximados aos medidos com o FWD. Importa salientar que a carga aplicada pelo veículo é de cerca de 10,5kN, pelo que mais uma vez, os valores das deflexões medidas foram modificados para uma carga de 7,07kN. Apesar de não se ter medido o tempo durante a execução do ensaio, é seguramente superior a 30ms. Outro fator que terá influência é a área de contacto do carregamento, bem como o próprio carregamento. Neste método a carga é transmitida ao pavimento pela roda do veículo e não por uma placa rígida com diâmetro conhecido, como no caso dos restantes ensaios.

Tabela 8 - Deflexões medidas com viga Benkelman

Tipo de solo/pavimento	Deflexão média medida (mm)	Deflexão média modificada para carga de 7,07kN (mm)
Solo arenoso	0,061	0,043
Betão (rígido)	0,238	0,160
Cubos de granito	0,266	0,179
Solo Vegetal	0,614	0,413
ABGE	0,038	0,026
Betuminoso (delgado)	0,117	0,079

4.4 Resultados obtidos em ensaios de carga com placa

No ensaio de carga com placa a carga é aplicada em incrementos, em dois carregamentos. A deflexão registada na Tabela 9 foi calculada seguindo o mesmo procedimento que usado para o ensaio com a viga Benkelman, utilizando a equação 9, e tendo em conta apenas o segundo carregamento.

Tabela 9 - Deflexões medidas com ensaio de carga com placa

Tipo de solo/pavimento	Deflexão média medida (mm)	Deflexão média modificada para carga de 7,07kN (mm)
Solo arenoso	0,214	0,261
Betão	0,274	0,345
Cubos de Granito	0,458	0,555
Solo vegetal	1,299	1,622
ABGE	0,169	0,207
Betuminoso	0,211	0,261

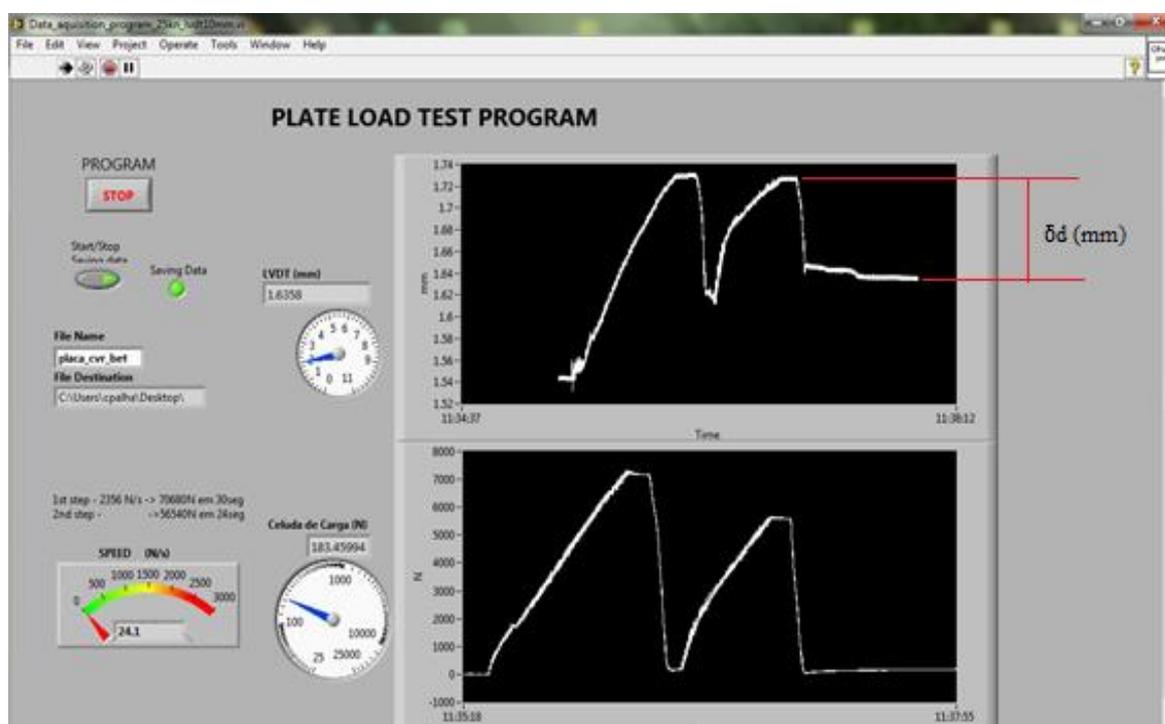


Figura 43 – Obtenção da deflexão para ensaio de carga com placa

A carga aplicada no segundo carregamento foi cerca de 5,7kN em cada um dos pontos, obtendo-se assim deflexões na sua maioria bastante diferentes dos restantes métodos, à exceção do Betão, que devido às suas características de rigidez acaba por apresentar valores de certa forma semelhantes.

4.5 Análise comparativa dos vários ensaios

Nesta secção apresenta-se a análise comparativa dos vários ensaios para cada tipo de solo/pavimento e para cada método, tendo como base de comparação as deflexões medidas com LFWD.

As Figura 44, 46 e 47 representam relação entre as deflexões medidas na primeira fase de ensaios com o LFWD e com o FWD, a Viga Benkelman e o Ensaio de carga com placa, respetivamente.

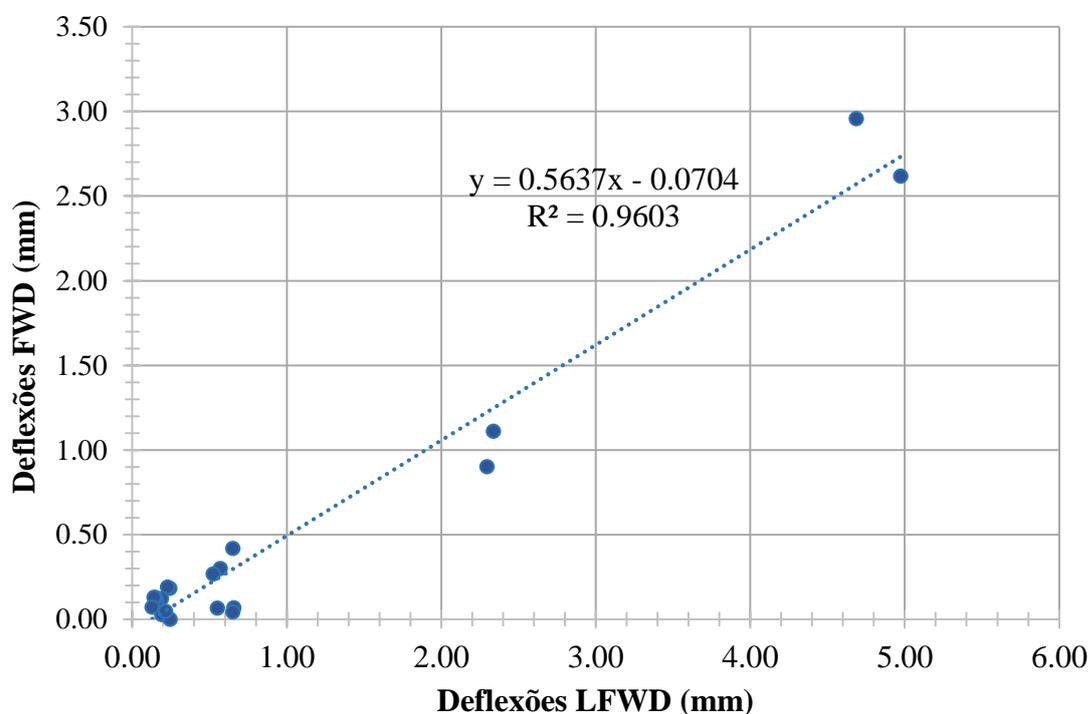


Figura 44 – Relação entre deflexões medidas com LFWD e FWD

Na figura anterior verifica-se a existência de uma nuvem de pontos na extremidade esquerda da reta de ajuste, que corresponde às deflexões medidas no solo arenoso, no pavimento de betão, no ABGE e no pavimento betuminoso. Verifica-se também a existência de pontos intermédios e outros pontos na extremidade direita da reta, que correspondem ao pavimento de cubos de granito e ao solo vegetal, respetivamente.

Aplicando uma regressão linear aos dados, obteve-se a Equação 12, com um coeficiente de determinação, R^2 , de 0,9603.

$$D_{FWD} = 0,5637 * D_{LFW D} - 0,0704 \quad (12)$$

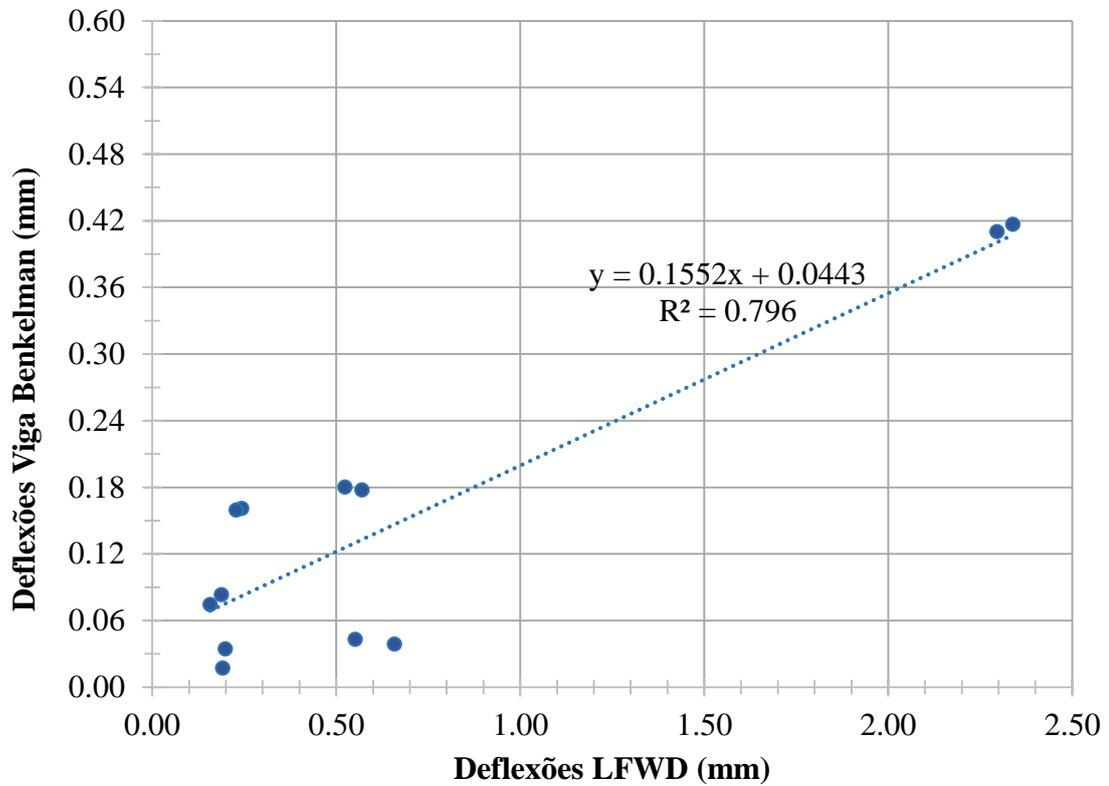


Figura 45 - Relação entre deflexões medidas com LFWD e Viga Benkelman

No caso da comparação entre LFWD e a viga Benkelman, verifica-se mais uma vez um conjunto de pontos próximo da origem do gráfico e outros mais afastados. Aplicando uma regressão linear aos dados, obteve-se a Equação 13, com um coeficiente de determinação $R^2=0,796$.

$$D_{VB} = 0,1552 * D_{LFW D} + 0,0443 \quad (13)$$

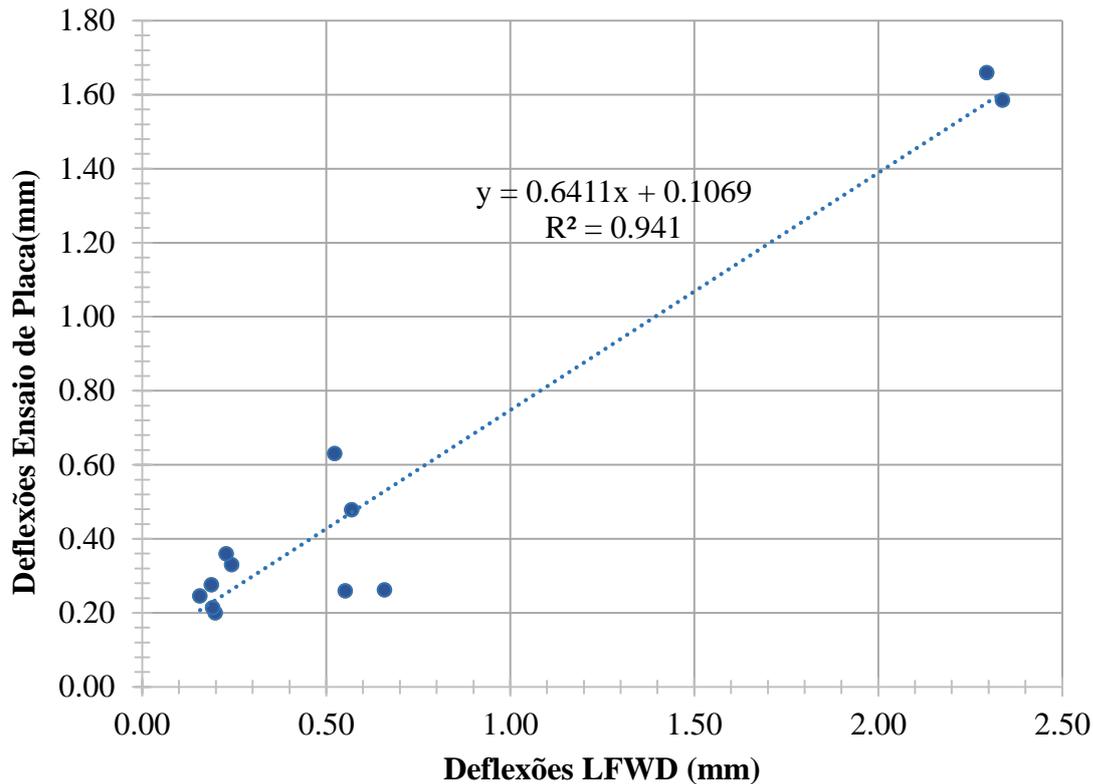


Figura 46 - Relação entre deflexões medidas com LFWD e ensaio de carga com placa

Tal como nos dois gráficos anteriores, no ensaio de carga com placa, a tendência mantém-se com uma concentração de pontos junto à origem do gráfico, e outros mais afastados. Neste caso, aplicando uma regressão linear obteve-se um coeficiente de determinação de 0,941 e a seguinte equação:

$$D_{E.Placa} = 0,6411 * D_{LFWD} + 0,1069 \quad (14)$$

Após analisar os dados relativos à primeira fase de ensaios, verifica-se que apesar se ter obtido valores de deflexões bastantes dispaes entre si, é possível verificar a existência de uma tendência entre os diferentes métodos de ensaio. Ou seja, nos pontos onde se obtiveram maiores deflexões com o FWD, também se obtiveram com a viga Benkelman e com o ensaio de carga com placa. Quando comparados com LFWD obtêm-se retas de ajuste e coeficientes de determinação com tendências semelhantes, como mostra a Figura 47.

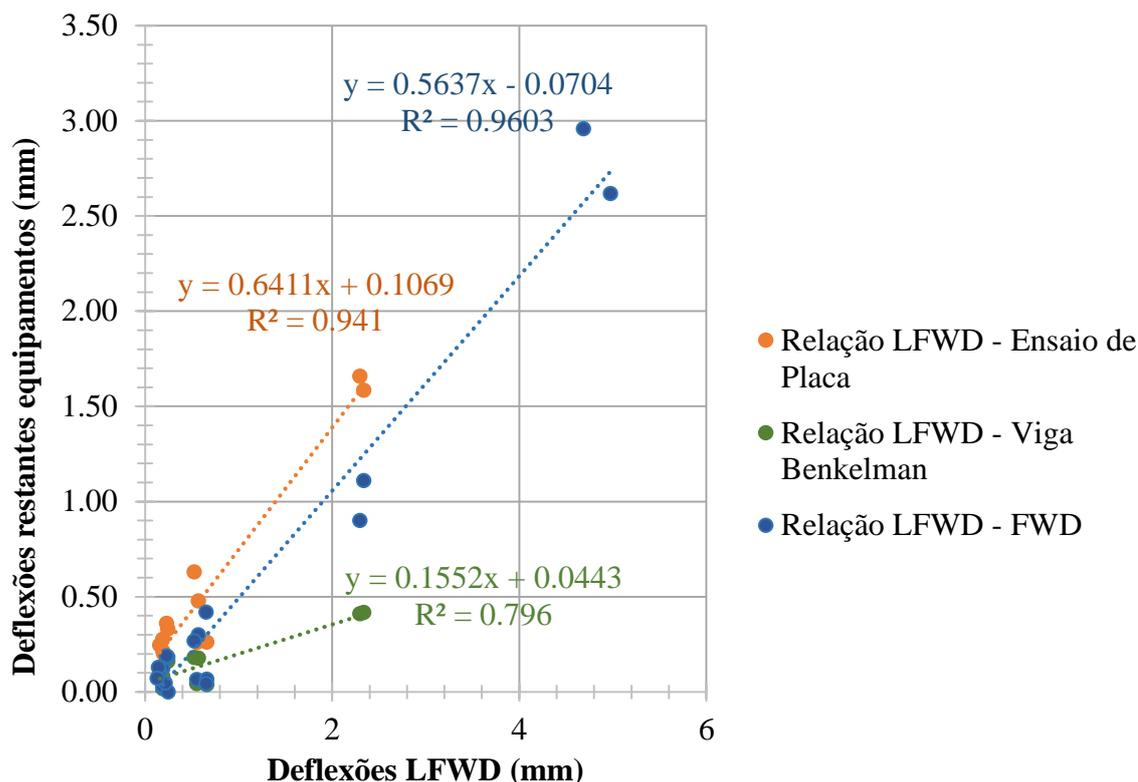


Figura 47 - Relação entre deflexões medidas com LFWD e os restantes equipamentos

Como é possível constatar pelos resultados apresentados, não é possível obter-se uma tendência claramente definida, principalmente nos pontos com valores de deflexão reduzidos (inferior a 0,50mm), onde estes apresentam bastante dispersão.

A realização de um reduzido número de ensaios para cada tipo de solo/pavimento, juntamente com a dificuldade em se encontrar uma relação clara entre os resultados obtidos, justificou a realização de uma nova campanha de ensaios noutra local, para se tentar perceber o que acontece nessa gama de valores.

A segunda fase de ensaios defletométricos, realizou-se sobre um único tipo de suporte (estrada não pavimentada), relacionando os valores obtidos com o FWD e o LFWD obteve-se a Figura 48.

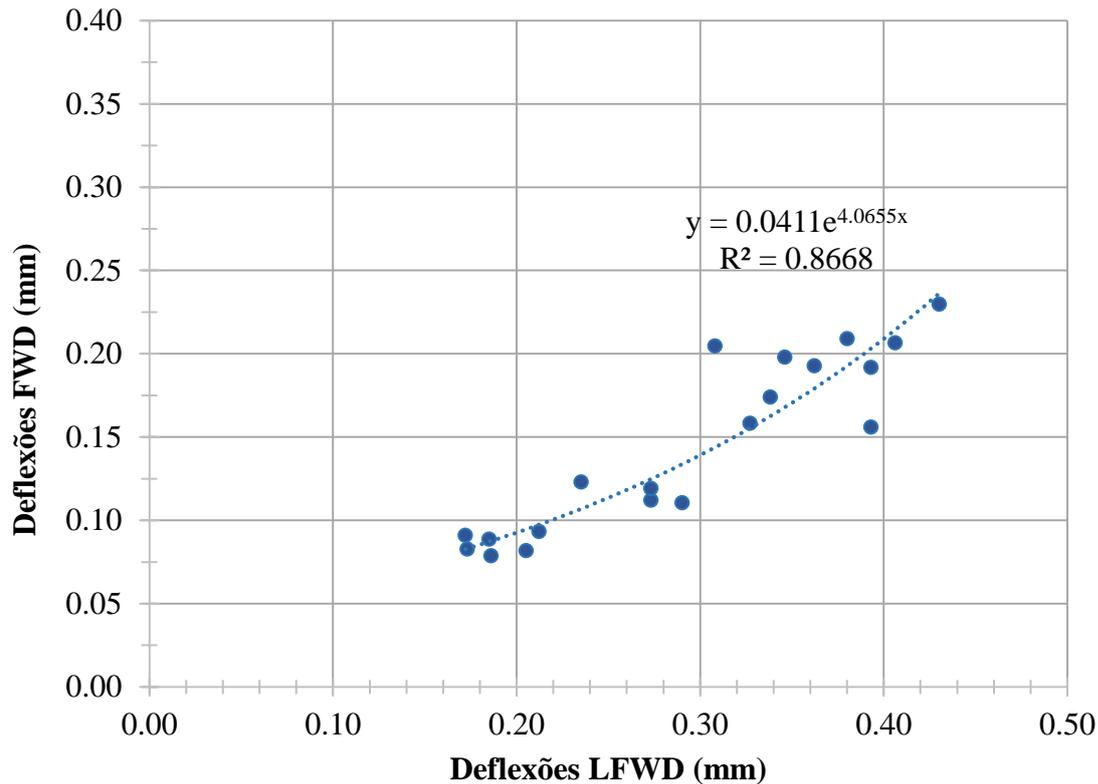


Figura 48 - Relação entre deflexões medidas com LFWD e FWD (2ª fase)

Neste caso a curva de ajuste que melhor se adaptou aos dados foi exponencial, com um coeficiente de determinação R^2 igual 0,8668. A equação 15 representa a curva obtida.

$$D_{FWD} = 0,0411 * e^{4,0655 * D_{LFWD}} \quad (15)$$

Neste caso já é possível verificar a existência de uma tendência mais clara na relação entre os resultados obtidos, com uma menor dispersão dos resultados. Assim, verifica-se que os pontos com maiores deflexões medidas com LFWD foram também os pontos onde se mediram maiores deflexões com FWD, apesar de o LFWD apresentar tendencialmente maiores deflexões do que o FWD para níveis de carga semelhantes.

Tendo em consideração o tipo de suporte em estudo nesta segunda fase, cuja estrutura é totalmente granular, considerou-se adequado estimar os módulos de deformabilidade do suporte (E_{vd}) para cada ponto, quer nos ensaios com FWD (através da Equação 11), quer nos ensaios com o LFWD (o mesmo é automaticamente medido pelo equipamento). Com base nos resultados obtidos realizou-se ainda uma comparação entre as deflexões medidas neste trabalho

e o modelo apresentado por Thom (2003) citado por Oliveira (2006), tendo sido obtido o gráfico da Figura 49.

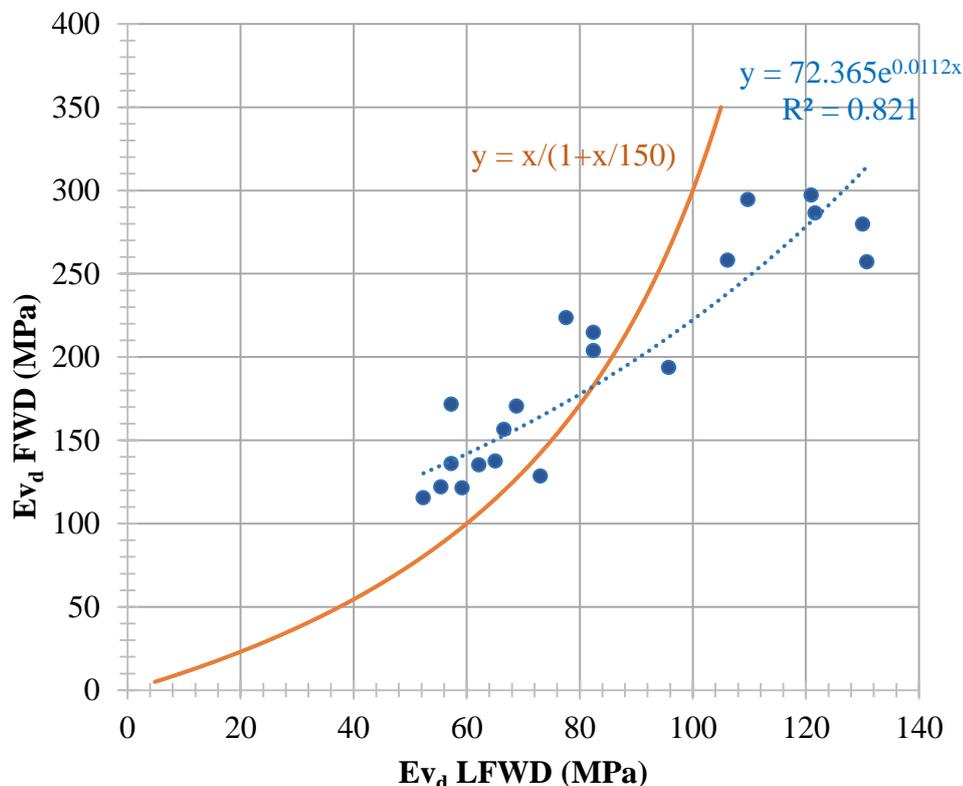


Figura 49 - Comparação entre os módulos de deformabilidade medidos (LFWD e FWD) e os resultados obtidos aplicando a Equação 7

Tendo em conta a curva obtida com a equação de Thom (2003), verificou-se que a mesma segue uma tendência análoga à obtida com os valores das deflexões medidas, principalmente para os resultados com valores de deflexão medidas com o LFWD inferiores a 90 MPa. Verificou-se também que à medida que os valores do módulo de deformabilidade aumentam com o FWD, o mesmo aumenta cada vez menos com o LFWD. Este fenómeno pode ser explicado pelo facto de que as deflexões máximas que podem ser medidas com o LFWD são bastante inferiores às que podem ser medidas com o equipamento mais pesado (FWD), consequentemente o módulo obtido também será menor. Apesar disso, em termos globais, a relação entre as duas variáveis em estudo ($E_{v_d} \text{ LFWD}$ e $E_{v_d} \text{ FWD}$) apresenta uma inclinação menor no presente estudo do que no estudo realizado por Thom (2003), o que resulta numa estimativa mais conservativa do módulo de deformabilidade do FWD quando este for obtido com recurso ao LFWD.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPETIVAS FUTURAS

5.1 Conclusões

O principal objetivo desta dissertação era encontrar relações entre os vários métodos de avaliação da capacidade de carga, com especial interesse na relação entre o defletómetro de impacto ligeiro (LFWD) e o defletómetro de impacto convencional (FWD).

O método ligeiro (LFWD) é relativamente recente, no entanto apresenta vantagens comparativamente aos métodos tradicionais e já amplamente estudados, como o ensaio de deflexão com a Viga Benkelman e o ensaio de carga com placa. A rapidez e a simplicidade de execução das medições aliados a um resultado imediato no que concerne a deflexões médias e módulos de deformabilidade, faz com que este novo método ganhe popularidade na avaliação da capacidade de carga. Possibilita também aceder a locais onde para os restantes equipamentos se torna muito difícil realizar os ensaios, dada a logística necessária para a realização dos ensaios. Por outro lado, tratando-se de um equipamento ligeiro, o seu uso limita-se essencialmente a solos e não tanto a pavimentos rodoviários com camadas ligadas na parte superior. Assim, é previsível que o uso do defletómetro de impacto convencional (FWD) continue a ser o método mais utilizado na avaliação de pavimentos rodoviários, sejam eles rígidos ou flexíveis.

Pela análise dos dados das medições realizadas, conclui-se que as correlações variam entre si, dependendo de cada método. As deflexões medidas mostram que para o mesmo segmento de pavimento em estudo se obtêm valores bastantes diferentes entre si, dependendo do tipo de método utilizado. No caso dos ensaios de carga com placa e com o LFWD verifica-se que para solos mais compactados e com menor teor em água se obtêm maiores deflexões do que nos ensaios com o FWD e com viga Benkelman. Por outro lado, em solo menos compactados e com maior teor em água o LFWD foi o equipamento com o qual se mediram deflexões mais elevadas, seguindo-se o FWD, o ensaio de carga com placa e o ensaio com a viga Benkelman.

A variabilidade nos resultados obtidos, não permitiu que se obtivessem correlações bem definidas na comparação dos diferentes métodos. As correlações entre os diferentes métodos são largamente dependentes da estrutura ensaiada e do protocolo seguido, o que pode justificar a dispersão de valores das deflexões obtidos.

Na segunda fase de ensaios, onde se estudou mais em pormenor a relação entre o LFWD e o FWD, conclui-se que existe uma relação exponencial entre as medições realizadas com esses equipamentos, que pode ser traduzida pela Equação 15, tendo também sido verificada uma boa aproximação ao modelo apresentado por Thom (2003) citado por Oliveira (2006), principalmente para valores de módulo obtidos com o LFWD abaixo dos 90 MPa.

5.2 Trabalhos futuros

O estudo realizado nesta dissertação permitiu obter relações entre os vários métodos de avaliação da capacidade de carga de solos e pavimentos rodoviários. Contudo, não eram conhecidas as características físicas e mecânicas dos suportes/pavimentos estudados, portanto seria vantajoso desenvolver trabalhos em que se realizasse a caracterização das estruturas a estudar, onde se identificasse o número e espessura de camadas, bem como os materiais que as constituem. Desta forma seria possível, através de análise inversa calcular os modelos que mais se aproximam da estrutura real em estudo e assim calcular os seus módulos de deformabilidade com maior rigor, os quais poderiam posteriormente servir de base a uma análise estatística que permitisse relacionar os vários métodos estudados.

Durante a análise de dados verificou-se que dependendo do tipo de pavimento/solo em estudo, a carga aplicada pelo defletómetro de impacto (FWD) variava, por outro lado com o defletómetro de impacto ligeiro esse fator não foi possível quantificar, uma vez que o mesmo não dispõe de célula de carga incorporada. Assim, seria interessante realizar medições com LFWD que tenha acoplada uma célula de carga que permitisse verificar qual a carga aplicada em cada um dos pontos em análise, de modo a poder realizar eventuais correções ao valor do módulo de deformabilidade calculado.

Seria importante que através das mesmas metodologias se ensaiassem estruturas de pavimentos noutras locais com características distintas às estudadas nesta dissertação, comparando os resultados com os obtidos nesta dissertação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFNOR, N.P. (2000). P 94-117-1, *Soils: Investigation and testing Formation level bearing capacity Part I Plate test static deformation module (EV2) Paris: Association Française de Normalisation.*
- Albernaz, C. (1997). *Método simplificado de retroanálise de módulos de resiliência de pavimentos flexíveis a partir da bacia de deflexão*, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Alves, T. (2007). *Metodologias de Auscultação de Pavimentos Rodoviários: Aplicação prática do radar de prospecção e do deflectómetro de impacto*, Dissertação para obtenção de grau de Mestre em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa. Lisboa.
- Amorim, S.I.R. (2013). *Correção das deflexões obtidas com defletómetro de impacto devido às variações de temperatura*, Universidade do Minho, Guimarães.
- Antunes, M.d., Batista, F., Fontul, S., Domingos, P. (2005). *Conservação e Reabilitação de Pavimentos Rodoviário, Apontamentos do curso de formação promovido pelo Fundec-LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.*
- ASTM (2011). *E2835 - 11, Standard Test Method for Measuring Deflections using a Portable Impulse Plate Load Test Device*, U.S.A.
- Battiato, S., Stanco, F., Cafiso, S., Di Graziano, A. (2007). *Adaptive Imaging Techniques for Pavement Surface Distress Analysis*, Communications to SIMAI Congress.
- Benedetto, A., Tosti, F., Di Domenico, L. (2012). Elliptic model for prediction of deflections induced by a Light Falling Weight Deflectometer, *Journal of Terramechanics*, Vol. 49 (1), pp. 1-12.
- Bernucci, L.L.B. (2008). *Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros*, Petrobrás.
- Borges, C.B.S. (2001). *Estudo comparativo entre medidas de deflexão com viga Benkelman e FWD em pavimentos da malha rodoviária estadual de Santa Catarina*, Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
- Branco, F., Pereira, P., Picado-Santos, L. (2008). *Pavimentos Rodoviários*, Edições Almedina, Coimbra.

- Burak Goktepe, A., Agar, E., Hilmi Lav, A. (2006). Advances in backcalculating the mechanical properties of flexible pavements, *Advances in Engineering Software*, Vol. 37 (7), pp. 421-431.
- Christan, P.d. (2013). *Estudo da interação solo-estaca sujeito a carregamento horizontal em ambientes submersos*, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba.
- Cornell University (2005). *An Important Tool for Highway Management*; http://www.clrp.cornell.edu/nuggets_and_nibbles/articles/2005/fwd.html; Acedido em 11/05/2015.
- Cunha, C.M. (2010). *Reciclagem de pavimentos rodoviários flexíveis: diferentes tipos de reciclagem*, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa.
- Duarte, J., Silva, P., Fabrício, J. (1996). Correlação entre Deflexões Características em Pavimentos Flexíveis Medidos com a Viga Benkelman e com o FWD–Falling Weight Deflectometer, *Reunião Anual de Pavimentação*, Vol. 30, pp. 637-646.
- Elhakim, A.F., Elbaz, K., Amer, M.I. (2014). The use of light weight deflectometer for in situ evaluation of sand degree of compaction, *HBRC Journal*, Vol. 10 (3), pp. 298-307.
- Fabrício, J., Silva, G., Gonçalves, E. (1994). Método Simplificado de Retroanálise em Pavimentos Flexíveis, *28a Reunião Anual de Pavimentação*, Vol. 1, pp. 658-682.
- Fernandes, C.I.C.d.S.H. (2010). *Sistemas de gestão de pavimentos aeroportuários: caracterização e aplicabilidade*, UTL, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Francisco, A.P.S. (2012). *Comportamento estrutural de pavimentos rodoviários flexíveis*, Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Bragança.
- Freitas, E.F., Pereira, P.A. (2001). Estudo da evolução do desempenho dos pavimentos rodoviários flexíveis.
- Henrique, Y.F. (2013). Método de avaliação de pavimentos aeroportuários aplicação a um aeródromo militar, *Projeto de Graduação Escola Politécnica/UFRJ Rio de Janeiro, RJ, Brasil*.
- Horta, C.S., Pereira, F.C., Lopes, S., Morgado, J. (2013). *O Sistema de Gestão de Conservação de Pavimentos das Estradas de Portugal, SA–Balanço de uma Implementação Consolidada*, Estradas de Portugal, Almada.
- Jacinto, M.A.S.C. (2013). *Caracterização estrutural de pavimentos*, Universidade do Porto, Porto.
- Khazanovich, L., Lukanen, E., Tompkins, D. (2014). Evaluation of Bearing Capacity of Low-Volume Roads in Minnesota, *Transportation Research Record* (2433), pp. 79-86.

- Kopf, F., Adam, D., PaulMilch, I. (2013). *Investigation of the dynamic plate loading test with the light-weight deflectometer using the boundary element method*.
- Lopes, J.E.R. (2010). *Contributo para o estudo da utilização do deflectómetro de impacto ligeiro*, Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- Luz, A.S.F.d.S., Picado-Santos, L.G. (2011). *Contribuição para a modelação do índice de qualidade na caracterização da rede rodoviária nacional*, UTL. Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Macêdo, F. (2003). *Retroanálise de bacias de deflexão reais e teóricas obtidas por métodos estáticos e dinâmicos*, Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília.
- Macêdo, J.A.G. (1996). *Interpretação de ensaios deflectométricos para avaliação estrutural de pavimentos flexíveis*, Tese de Doutoramento, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- Machado, A.B.A.d.S. (2012). *Contribuição para a avaliação estrutural de infraestruturas rodoviárias por métodos não destrutivos*, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.
- Maia, I.M.C. (2013). *Caracterização de patologias em pavimentos rodoviários*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Martins, J.P. (2011). *Compaction and its influence on the structural behaviour of high speed railways*, Universidade do Minho, Guimarães.
- Menezes, M. (2008). *Estudo das características de superfície de pavimentos rodoviários para análise da segurança do tráfego*, Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Miranda, V., Pereira, P. (1999). *Gestão da Conservação dos Pavimentos Rodoviários*, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Braga.
- Nazarian, S., Stokoe, K.H. (1989). Nondestructive evaluation of pavements by surface wave method, *Nondestructive testing of pavements and backcalculation of moduli*, pp. 119-137.
- Nóbrega, E.S. (2003). *Comparação entre métodos de retroanálise em pavimentos asfálticos*, Universidade Federal do Rio De Janeiro.
- Oliveira, J.R.M.d. (2006). *Grouted macadam: material characterisation for pavement design*, University of Nottingham.
- Pavement Interactive (2010). *Deflection*; <http://www.pavementinteractive.org/article/deflection/>; Acedido em 27 Abril 2015.

- Pestana, R. (2008). *Contribuição para o Estudo do Comportamento Mecânico de Resíduos de Construção e Demolição Aplicados em Estradas de Baixo Tráfego*, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Picado-Santos, L., Ferreira, A., Pereira, P. (2006). Estruturação de um sistema de gestão de pavimentos para uma rede rodoviária de carácter nacional, (nº 26).
- Pitta, D.M., Trichês, G. (2000). Avaliação do comportamento mecânico da camada de lastro de pedra pulmão empregada no lote 8 da duplicação da BR-101, *Reunião Annual de Pavimentação*, Florianópolis.
- Ramos, D., Sestini, V., Araújo, M., Prieto, V. (2006). Relação entre deflexões medidas com viga Benkelman e Falling Weight Deflectometer: Estudo de caso durante implantação no sistema de gerência de pavimentos do DER-SP, *V Jornadas Luso-Brasileiras de Pavimentos: Políticas e Tecnologias*, Recife, Brasil.
- Reis, N. (2009). *Análise Estrutural de Pavimentos Rodoviários–Aplicação a um Pavimento Reforçado com Malha de Aço*, Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil do IST da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- Ribeiro, R.M.d.P. (2012). *Aplicação de mistura betuminosa aberta com betume modificado com alta incorporação de borracha na reabilitação de pavimentos rodoviários*, Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu, Instituto Politécnico de Viseu, Viseu.
- Saltan, M., Terzi, S. (2008). Modeling deflection basin using artificial neural networks with cross-validation technique in backcalculating flexible pavement layer moduli, *Advances in Engineering Software*, Vol. 39 (7), pp. 588-592.
- Silva, C.A.R.d. (2004). *Controle Deflectométrico na Execução de Camadas de Pavimento*, Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.
- Tavakoli, A., Lapin, M.S., Figueroa, J.L. (1992). PMSC: Pavement management system for small communities, *Journal of transportation engineering*, Vol. 118 (2), pp. 270-280.
- Thom, N.H. (2003). *Implementation of a Performance Specification for Capping and Subgrade*, Final Report prepared for The Highways Agency by Scott Wilson Pavement Engineering Ltd, Nottingham.
- Vasquez, C., Heaslip, K., Langford, M. (2011). *An Alternative Pavement Management System Approach for Local Governments*, Transportation Research Board 90th Annual Meeting.
- Visser, A., Priambodo Koesrindartono, D. (2000). Towards a mechanistic analysis of Benkelman beam deflection measurements, *HERON*, vol 45 (3), 2000