

# INFLUÊNCIA DA FORÇA DE ENSAIO NA AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS POR MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS.

Ana Machado<sup>1</sup>, Simona Fontul<sup>2</sup> e Ana Cristina Freire<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, Monte da Caparica, Portugal; email: a.machado@campus.fct.unl.pt

<sup>2</sup> Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Transportes, Av. Brasil, 101, 1700-066, Lisboa, Portugal; email: simona@lnec.pt

<sup>3</sup> Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Transportes, Av. Brasil, 101, 1700-066, Lisboa, Portugal; email: acfreire@lnec.pt

---

## Sumário

Os ensaios de carga não destrutivos são cada vez mais utilizados na avaliação da capacidade de carga de infraestruturas de transporte. Assim, foram caracterizadas várias estruturas de pavimento através da realização e interpretação de ensaios não destrutivos, com os equipamentos Defletómetro de Impacto (FWD) e Defletómetro de Impacto Portátil (DIP).

Os ensaios foram realizados em quatro estruturas de pavimento construídas em modelo físico à escala real, sendo uma em material granular e as outras três em misturas betuminosas, apresentando as camadas constituintes diferentes espessuras.

Para um melhor entendimento do comportamento dos materiais e definição de metodologias de ensaio, foram realizados ensaios para várias forças de carga, de modo a comparar os resultados obtidos e estudar possíveis correlações.

---

**Palavras-chave:** Defletómetro de Impacto (FWD); Deflectómetro de Impacto Portátil (DIP); Avaliação estrutural, Infraestruturas rodoviárias.

## 1 INTRODUÇÃO

Para uma melhor compreensão da metodologia de avaliação estrutural de pavimentos flexíveis, foi realizado um estudo onde são analisados quatro tipos de estruturas, diferentes em termos de materiais a utilizar nas camadas estruturais, bem como em termos da espessura dessas camadas.

Este estudo foi desenvolvido com base em ensaios de carga não destrutivos, utilizando dois equipamentos disponíveis no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), bastante aplicados a nível nacional e internacional para este tipo de avaliação de pavimentos: o Deflectómetro de Impacto (FWD) [1][2][3][4], (Figura 1), e o Deflectómetro de Impacto Portátil (DIP) [5][6][7][8] (Figura 2), tendo a interpretação dos resultados obtidos sido realizada através do programa de cálculo de elasticidade linear desenvolvido pela SHELL, BISAR 3.

Nestes dois equipamentos o ensaio de carga consiste na aplicação de uma força de impulso à superfície do pavimento, gerada pela queda de uma massa de uma determinada altura sobre um conjunto de amortecedores e transmitida à superfície através de uma placa metálica circular. A medição das deflexões no pavimento é feita por um conjunto de transdutores de deslocamento apoiados linearmente sobre a superfície do pavimento. A deformada obtida reflete a influência das diferentes camadas na resposta do pavimento à solicitação aplicada [1][2].



Figura 1 Defletómetro de Impacto (FWD)



Figura 2 Defletómetro de Impacto Portátil (DIP)

Foram submetidas a ensaio quatro tipos de infraestruturas, designados por “células”, de composições estruturais distintas, construídas em modelo físico no LNEC. Salieta-se que não se tratam de estruturas típicas de pavimentos flexíveis, dado que foram construídas como subestruturas ferroviárias de alta velocidade, integrando um outro estudo de investigação realizado no LNEC [9]. Tendo em conta o facto de a sua construção ter sido realizada em condições controladas, considerou-se oportuno aproveitar as referidas estruturas para avaliar a influência das condições de ensaio na análise estrutural de pavimentos, nomeadamente através de ensaios de carga realizados com o Defletómetro de Impacto (FWD) e com o Defletómetro de Impacto Portátil (DIP). Pretendeu-se também analisar a eventual correlação entre os ensaios realizados com os dois equipamentos.

A célula 1 apresenta todas as camadas constituídas por material granular, enquanto as restantes três células apresentam a mistura betuminosa na camada de desgaste, variando apenas as espessuras das camadas. Dada a existência de uma estrutura em material granular (célula 1), considerou-se interessante o seu estudo de modo a simular a fase de construção de camadas de base e sub-base não ligadas de pavimentos e contribuir assim para um controlo de qualidade melhor e para a caracterização do comportamento de matérias em obra.

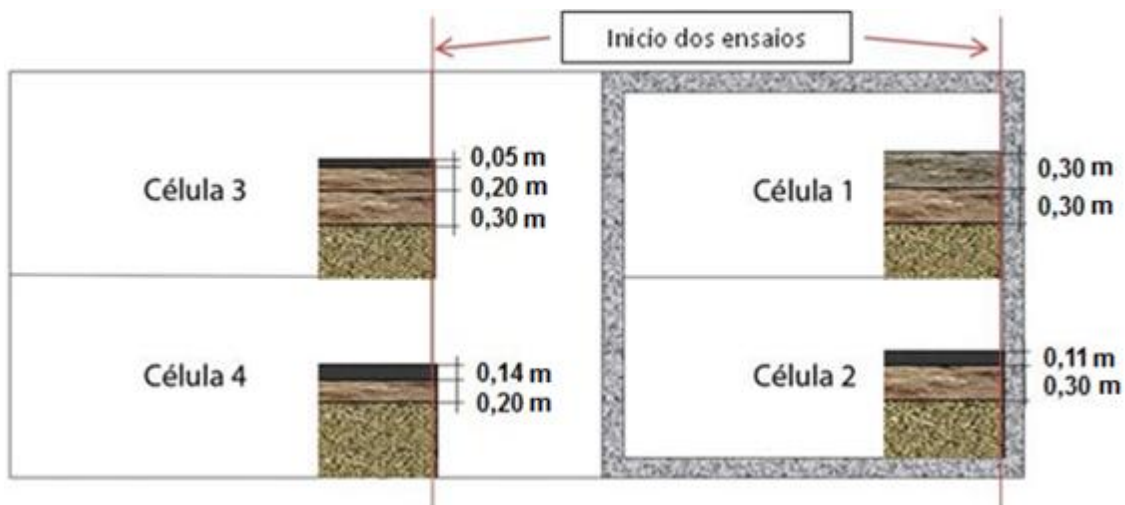
Em cada célula foram ensaiados dois alinhamentos distanciados em 0,50 m entre si, e em cada alinhamento foram realizados ensaios em cinco pontos distanciados em cerca de 1,0 m, obtendo-se assim 10 pontos de ensaio por célula.

Com o FWD foram realizados ensaios em cinco alturas de queda, correspondentes as forças de pico entre 25 e 120 kN. Com o DIP, foi realizada uma medição para cada ponto acima referido, sendo a força de carga aplicada de 15 kN.

Utilizando o programa de cálculo linear elástico (BISAR), foi realizada uma retroanálise de todos os pontos ensaiados tendo como objetivo determinar os módulos de deformabilidade das diversas camadas constituintes das diferentes células.

## 2 DESCRIÇÃO DO MODELO FÍSICO ENSAIADO

Foram ensaiados quatro tipos de pavimentos reproduzidos em modelo à escala real, construídos no LNEC [9][10]. A Figura 3 apresenta um esquema da disposição das quatro células, com cerca de 2,0 m x 5,0 m cada, existentes no modelo físico, e o esquema das estruturas de cada uma das células. Os ensaios foram realizados em dois alinhamentos distanciados a 0,50 m entre si e em cada alinhamento foram realizados ensaios em cinco pontos localizados a 0,90 m, 1,75 m, 2,65 m, 3,55 m e 4,30 m da margem direita de cada célula.



**Figura 3 Esquema do modelo físico objeto de estudo**

A célula 1 é constituída por 0,30 m de material granular granítico na primeira camada, 0,30 m de material granular de natureza calcária na segunda camada e 2,20 m de solo de fundação.

A célula 2 é constituída por 0,11 m de mistura betuminosa, 0,30 m de material calcário e 2,40 m de solo de fundação.

Na célula 3 existem as seguintes camadas, 0,05 m mistura betuminosa, 0,20 m de material calcário, 0,30 m de material calcário e 2,05 m de solo de fundação.

Por último, a célula 4 é constituída por 0,14 m de mistura betuminosa e 0,20 m de agregado calcário e 2,25 m de solo de fundação.

### 3 PROCESSO DE RETROANÁLISE

Na sequência da obtenção das deflexões dos pavimentos estudados, foi realizada, através dum programa de modelação linear elástico, a retroanálise para todos os pontos ensaiados, tendo como objetivo a obtenção dos módulos de deformabilidade das camadas constituintes. De modo a homogeneizar os modelos estruturais, foram levadas a cabo várias tentativas de retroanálise para os diferentes pontos ensaiados, nomeadamente 10 por célula, 5 em cada alinhamento. As várias tentativas tiveram como objetivo a obtenção de resultados coerentes tanto ao longo de cada alinhamento, como em cada uma das células estudadas, por tipo de material, e também tendo em conta os cinco níveis de carga aplicadas.

Para a realização do processo de retroanálise é necessário definir, para cada um dos pontos em estudo, as características da carga aplicada na superfície do pavimento, as características das camadas do pavimento, nomeadamente espessuras, módulos de deformabilidade e coeficientes do *Poisson*, e a posição dos pontos onde se pretende obter a resposta da estrutura.

As cargas aplicadas, a espessura das camadas e a posição da determinação das deflexões mantêm-se inalteráveis para todas as zonas em estudo, para cada uma das células. A carga vertical aplicada corresponde à força padrão que se pretende estudar (25, 50, 75, 90 e 120 kN), nomeadamente a utilizada nos ensaios com o Deflectómetro de Impacto.

Os pontos onde se pretende determinar a deflexão devida à aplicação da carga circular correspondem à posição dos sensores (geofones) do ensaio de carga, distribuídos linearmente pela superfície do pavimento e identificados de D1 a D9.

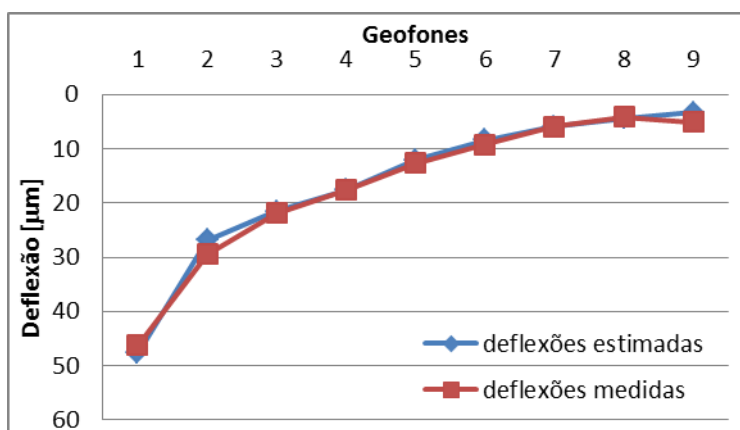
Os coeficientes de *Poisson* adotados para os materiais constituintes do modelo de comportamento estrutural, foram os geralmente utilizados, 0,35 [2][10].

De um modo iterativo, os módulos de deformabilidade são ajustados função da deformada calculada pelo programa de cálculo BISAR e a deformada real obtida pelos Deflectómetro de Impacto (FWD), adotando-se como critério de paragem do processo de iteração, a minimização do valor do RMS (*Root Mean Square*), nomeadamente da raiz quadrada dos valores médios dos quadrados das diferenças entre as deflexões medidas e calculadas divididas pelos valores médios [3][10].

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

em que:            n – número total de geofones utilizados;  
                       d<sub>ci</sub> – deflexão calculada no geofone i (μm);  
                       d<sub>mi</sub> – deflexão medida no geofone i (μm).

Para valores de RMS inferiores a 10% considerou-se que o conjunto de módulos de deformabilidade apresentava um grau de aproximação aceitável. Nestes casos, a deformada calculada aproxima-se de forma satisfatória da deformada real. Na Figura 4 apresenta-se um exemplo da retroanálise dos valores das deflexões obtidos nos ensaios realizados com o FWD na célula 2.



**Figura 4 Retroanálise da célula 2 para 25 kN à distância 0,90m**

Através deste processo iterativo é possível identificar a contribuição das várias camadas constituintes do pavimento para a deformada medida nos ensaios de carga para os pavimentos em estudo.

Anote-se que as deflexões medidas nos geofones mais próximos do local de aplicação da carga traduzem a resposta estrutural do pavimento e da fundação em conjunto, enquanto nos sensores mais distantes, a resposta estrutural depende da condição da fundação.

Por este método, é então possível determinar os módulos de deformabilidade para as diferentes camadas existentes em cada célula.

#### 4 ANÁLISE DE RESULTADOS DO FWD

Após a aplicação da retroanálise aos pontos ensaiados, obtiveram-se os módulos de deformabilidade estimados para as diferentes camadas constituintes dos pavimentos em apreço, de modo a permitir uma análise do comportamento da camada de desgaste quando solicitada por diferentes níveis de carga.

Na Figura 5 apresenta-se o módulo de deformabilidade medido durante o ensaio realizado com o Defletómetro de Impacto Portátil (DIP), bem como os valores do módulo de deformabilidade da camada superior obtidos para diferentes níveis de carga aplicados durante a realização do ensaio com o FWD, na célula 1.

Da análise da Figura 5 observa-se um aumento do valor de E1 com o incremento da força aplicada..

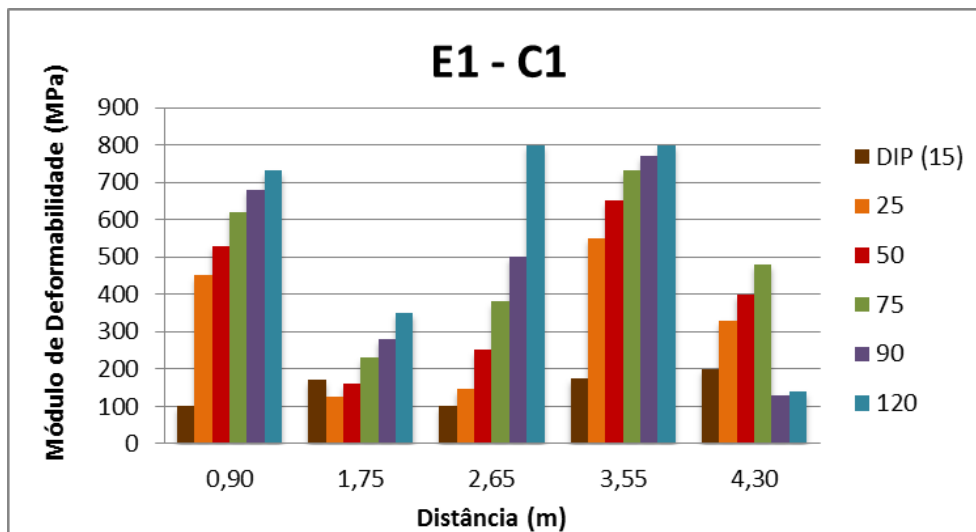


Figura 5 Módulos de Deformabilidade da primeira camada (E1), célula 1

No caso das restantes células (c2 a c4), nas quais as camadas de topo são constituídas por misturas betuminosas constata-se que ocorre uma diminuição do módulo de deformabilidade E1, da primeira camada, com o incremento da força de ensaio.

De modo a ilustrar o comportamento das camadas betuminosas quando solicitadas por diferentes níveis de carga, apresentam-se nas Figuras 6, 7 e 8 os módulos obtidos para as camadas de topo (E1) das células 2, 3 e 4, respetivamente. Nas mesmas figuras são apresentados os módulos medidos durante o ensaio com o DIP.

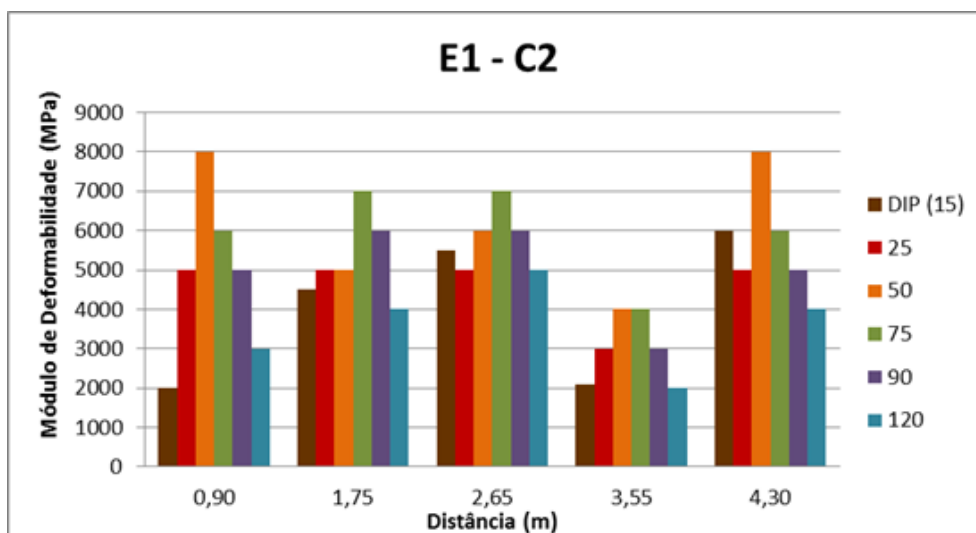


Figura 6 Módulos de Deformabilidade da primeira camada (E1), célula 2

Note-se que, apesar da força de ensaio aplicada com o DIP ter sido só de 15 kN, a sua evolução é consistente com os valores obtidos na retroanálise dos ensaios com o Deflectómetro de Impacto.

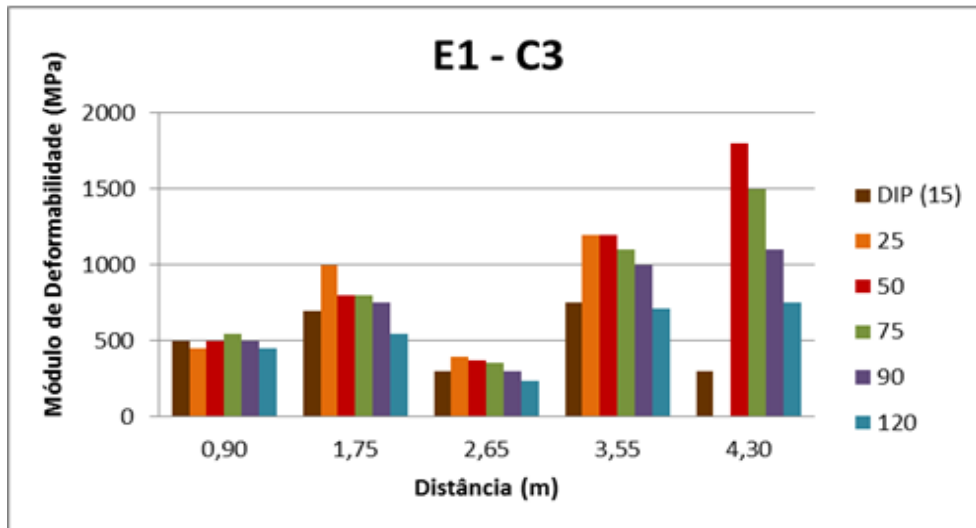


Figura 7 Módulos de Deformabilidade da primeira camada (E1), célula 3

Na célula 3 nota-se a mesma tendência demonstrada para a célula 2, ou seja, com o aumento da força, os módulos de deformabilidade da camada de mistura betuminosa diminuem.

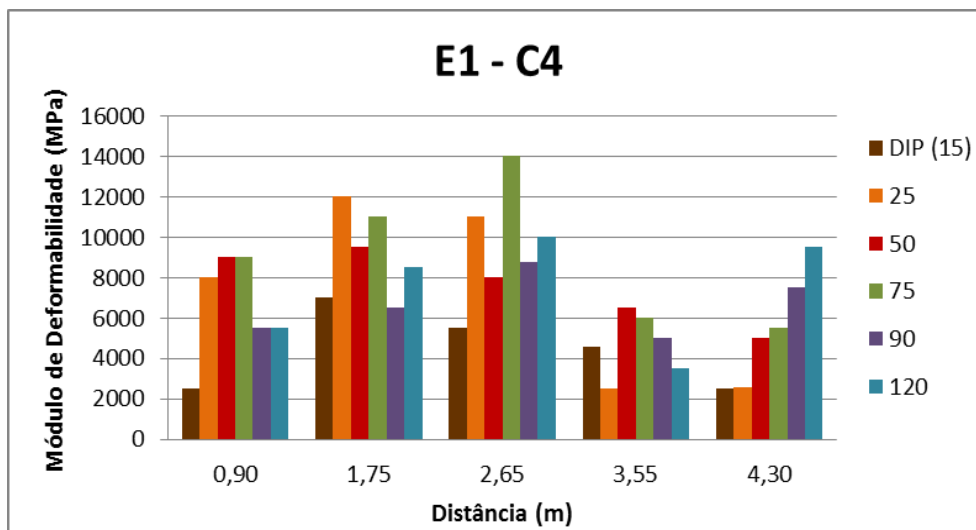


Figura 8 Módulos de Deformabilidade da primeira camada (E1) para a célula 4

Observa-se então, que há uma tendência de evolução dos módulos de deformabilidade similar em todas as distâncias ensaiadas nas diferentes células com misturas betuminosas, registrando-se uma diminuição do módulo de deformabilidade com o aumento da força aplicada, principalmente para forças acima de 75 kN.

As restantes camadas subjacentes à camada betuminosa não sofreram alterações significativas do seu módulo de deformabilidade com a variação da força aplicada. Como exemplo, no Quadro 1 apresentam-se os módulos de deformabilidade obtidos através da retroanálise para a célula 2, ao longo do alinhamento central e para todas as forças de ensaio aplicadas. Salienta-se que nas restantes células observou-se o mesmo tipo de comportamento, em que o módulo de deformabilidade da camada de base, em material granular, sofre alterações pouco significativas, enquanto o módulo de deformabilidade da camada de solo de fundação permanece praticamente constante.

**Quadro 1 Módulos de deformabilidade da célula 2**

Força aplicada (kN)	Módulos (MPa)	Distância (m)				
		0,90	1,75	2,65	3,55	4,30
DIP (15)	E1	2000	4500	5500	2100	6000
25	E1	5000	5000	5000	3000	5000
	E2	3000	6000	6000	3000	2000
	E3	500	500	500	800	1000
	E4	1500	1500	1500	1500	1500
50	E1	8000	5000	6000	4000	8000
	E2	2000	5000	5000	2000	2000
	E3	500	500	500	800	1000
	E4	1500	1500	1500	1500	1500
75	E1	6000	7000	7000	4000	6000
	E2	4000	5000	5000	5000	3000
	E3	400	400	500	500	800
	E4	1500	1500	1500	1500	1500
90	E1	5000	6000	6000	3000	5000
	E2	3000	4000	4000	4000	3000
	E3	500	500	500	600	800
	E4	1000	1000	1600	1500	1500
120	E1	3000	4000	5000	2000	4000
	E2	4000	4000	4000	4000	3000
	E3	500	500	500	600	700
	E4	1000	1000	1600	1500	1500

Legenda:

E<sub>i</sub> – módulo e deformabilidade da camada i

## 5 CONCLUSÕES

Este estudo pretendeu contribuir para avaliação de infraestruturas rodoviárias através de métodos de ensaio não destrutivos realizados com equipamentos normalmente aplicados para este tipo de avaliação estrutural, nomeadamente o Deflectómetro de Impacto (FWD) e o Deflectómetro de Impacto Portátil (DIP).

Para o estudo da aplicação destes equipamentos na avaliação estrutural de pavimentos foram realizados vários ensaios em quatro infraestruturas diferentes, reproduzidas em modelo físico à escala real existente no LNEC. Foram realizados ensaios em vários pontos de cada célula de pavimento em apreço e com aplicação de vários níveis de carga.

Os resultados obtidos foram retroanalisados, com base num programa linear elástico, para estimar os modelos estruturais das camadas constituintes dos pavimentos, tendo havido a necessidade de ser realizado de modo a serem obtidos resultados coerentes entre os vários pontos de ensaio e para as várias forças aplicadas.

Constatou-se que, no caso das camadas não ligadas, em material granular obtém-se um aumento do módulo de deformabilidade da primeira camada com o aumento da força de ensaio, enquanto que para as camadas ligadas, de misturas betuminosas o módulo diminui ligeiramente com o aumento da força de ensaio aplicada.

Da comparação dos resultados obtidos com o equipamento DIP e com o FWD conclui-se que poderá ser utilizado o primeiro, em substituição ao FWD no caso em que as condições de acesso ao local de ensaio não o permitam, ou mesmo caso este não esteja disponível, principalmente para forças de carga aplicadas baixas, de 25 kN.

Considera-se que a avaliação estrutural de pavimentos através de métodos de ensaio não destrutivos constitui uma boa ferramenta para uma análise eficiente das camadas constituintes das infraestruturas de transporte. No entanto, salienta-se que se deverá ter em consideração a força aplicada, principalmente no caso de camadas em material granular dado estas apresentarem um comportamento não linear, e consequentemente uma resposta diferente para diferentes níveis de carga.

## 6 AGRADECIMENTOS

À empresa GALP Energia, pelo apoio financeiro para a construção do modelo físico, reabilitação das instalações de ensaio e aquisição de equipamentos de ensaio.

Aos técnicos dos Núcleos de Infraestruturas Rodoviárias e Aeroportuárias e de Infraestruturas Ferroviárias do Departamento de Transportes do LNEC, pela colaboração na realização dos ensaios em modelo físico.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Antunes, M. L. (1993) – Avaliação da Capacidade de Carga de Pavimentos Utilizando Ensaio Dinâmicos. Tese submetida para obtenção do grau de Doutor. Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico.
- [2] Fontul, S. (2004). Structural Evaluation of Flexible Pavements Using Non-Destructive Tests. Dissertação para obtenção do grau de Doutor. Universidade de Coimbra, Faculdade de Ciências e Tecnologia.
- [3] Domingos, P. (2007). Reforço de Pavimento Rígidos: Modelação do Comportamento Estrutural. Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Transportes. Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico.
- [4] Carl Bro (2007). PRI2100 Falling Weight Deflectometer. User's Manual.
- [5] Gudishala, R. (2004). Development of Resilient Modulus Prediction Models for Base and Subgrade Pavement Layers from in situ Devices Test Results. Dissertação submetida para obtenção do grau de



Mestre. Graduate Faculty of the Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College, Sri Krishna Devaraya University, Andra Pradesh, India.

- [6] Fortunato, E. (2005). Renovação de Plataformas Ferroviárias – Estudos relativos à Capacidade de carga. Tese para obtenção do grau de Doutor. Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia.
- [7] NCHRP Synthesis 382 (2008) – Estimating Stiffness of Subgrade and Unbound Materials for Pavement Design. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, U.S.A.
- [8] Govind, K. (2010) – Caracterização Estrutural de Infra-estrutura de Transporte Através de Métodos de Auscultação Não Destrutivos. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Área de Especialização de Vias de Comunicação e Transportes. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- [9] Fortunato, E, Fontul, S. & Freire, A.C. (2012). “Optimização de vias ferroviárias de alta velocidade mediante o uso de sub-balastro betuminoso”. Projeto PDTC/ECM/70571/2006. Caracterização experimental das propriedades dos materiais e leis constitutivas. Relatório final. Relatório LNEC 57/2012 – DT/NIF.
- [10] Machado, A. B. (2012). Contribuição para a Avaliação Estrutural de Infraestruturas Rodoviárias por Métodos Não Destrutivos. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil – Perfil de construção. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.