

# AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES DE UM PAVIMENTO RODOVIÁRIO COM RECURSOS A ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

## EVALUATION OF ROAD PAVEMENT PROPERTIES USING NON DESTRUCTIVE TESTS

*Vítor Antunes*

*Direção Geral Técnica e da Inovação, Elevo Group*

*Vânia Marecos*

*Departamento de Transportes, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.*

*Doctoral Programme in Geotechnologies applied to Construction, Energy & Industry, University of Vigo, Spain*

*Simona Fontul*

*Departamento de Transportes, Laboratório Nacional de Engenharia Civil*

*Ana Cristina Freire*

*Departamento de Transportes, Laboratório Nacional de Engenharia Civil*



## RESUMO

Este trabalho apresenta um conjunto de ensaios não destrutivos realizados sobre as diferentes camadas de um pavimento rodoviário com o Radar de Prospecção (GPR), o Defletómetro de Impacto Ligeiro (LFWD) e Pesado (FWD), para avaliar as suas propriedades.

Os ensaios foram realizados sobre as camadas constituintes das soluções implementadas numa pista de ensaios à escala real, construída no âmbito do Projeto de I&D Tropical-PAV.

## ABSTRACT

This paper presents a set of non-destructive tests performed on different layers of a road pavement with Ground Penetrating Radar (GPR), Light Falling Weight Deflectometer (LFWD) and Falling Weight Deflectometer (FWD) to evaluate their properties.

The tests were conducted on the pavement solutions implemented on a full scale test track, built under the R&D Project Tropical-PAV.

Palavras-chave: Pavimentos rodoviários / Ensaios Não Destrutivos / Radar de Prospecção / Defletómetro Impacto Pesado / Defletómetro de Impacto Ligeiro

## 1. INTRODUÇÃO

O sector dos transportes é um elemento chave em diversos aspetos da vida económica de um país, apresentando o planeamento do sistema de transporte rodoviário um papel preponderante (Mubila et al. 2014; Collier & Kirchberger 2015). Os elevados custos de construção, manutenção e reabilitação de uma infraestrutura rodoviária combinados com a sustentabilidade, podem conceder às soluções adotadas uma minimização dos impactos ambientais, justificando-se assim a necessidade da otimização e racionalização de recursos (Association 2007). Para este propósito, e de forma a minimizar os custos do ciclo de vida de uma estrutura sem comprometer o seu desempenho, é crucial a utilização de metodologias adequadas de avaliação das propriedades das diferentes camadas de pavimento, permitindo assim, a seleção da solução de manutenção mais adequada.

Uma correta aferição das propriedades de um pavimento, quer das camadas inferiores (camadas de fundação e leito de pavimento), como das camadas de base e sub-base, e das camadas superficiais de um pavimento, tanto em construção nova, como em soluções de reabilitação, permitem um correto planeamento, tanto a nível temporal como conceptual das soluções a aplicar, promovendo vantagens económico-sociais e ambientais.

Este trabalho apresenta um conjunto de ensaios não destrutivos realizados sobre as diferentes camadas de um pavimento rodoviário referindo-se: o Radar de Prospeção (GPR), sendo este um método aconselhado para inspeções de rotina por permitir a recolha em contínuo de dados e tendo a vantagem de operar à velocidade normal de tráfego; o Defletómetro de Impacto Ligeiro (LFWD) e Pesado (FWD), para a avaliação da capacidade de carga dos pavimentos, consistindo na aplicação de uma carga sobre a superfície do pavimento e na medição das deflexões daí resultantes, permitindo a determinação do módulo de deformabilidade dos materiais *in-situ* através de retro análise realizada com o conhecimento da espessura da camada que pode ser determinada pelo método de GPR.

Os ensaios foram realizados sobre as camadas constituintes das soluções implementadas numa pista de ensaios à escala real, construída no âmbito do Projeto de Investigação e Desenvolvimento Tropical-PAV – Soluções de Pavimentação Rodoviária para Climas Tropicais (Antunes et al. 2016).

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Trecho Experimental

No âmbito do Projeto Tropical-PAV foi construída uma estrutura em betão armado, em secção “U” (Fig. 1a), na qual foram implementadas diversas soluções de estruturas de pavimento. A estrutura de betão comporta uma zona de ensaio com 12 m de comprimento

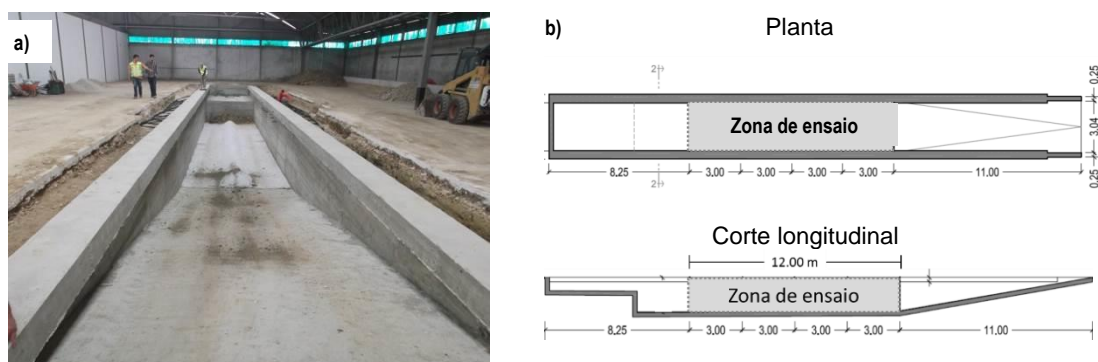
(Fig. 1b), tem um desenvolvimento total de cerca de 31 m, uma profundidade máxima interior de 2 m e uma largura interior de cerca de 3 m. Numa das extremidades, nos primeiros 11 m de desenvolvimento, a estrutura é em rampa, garantindo assim o acesso de máquinas para a construção das camadas constituintes do modelo físico do pavimento.

Foram estudadas quatro estruturas de pavimento apresentadas esquematicamente na Fig. 2, tendo estas em comum as camadas constituintes da fundação e leito de pavimento.

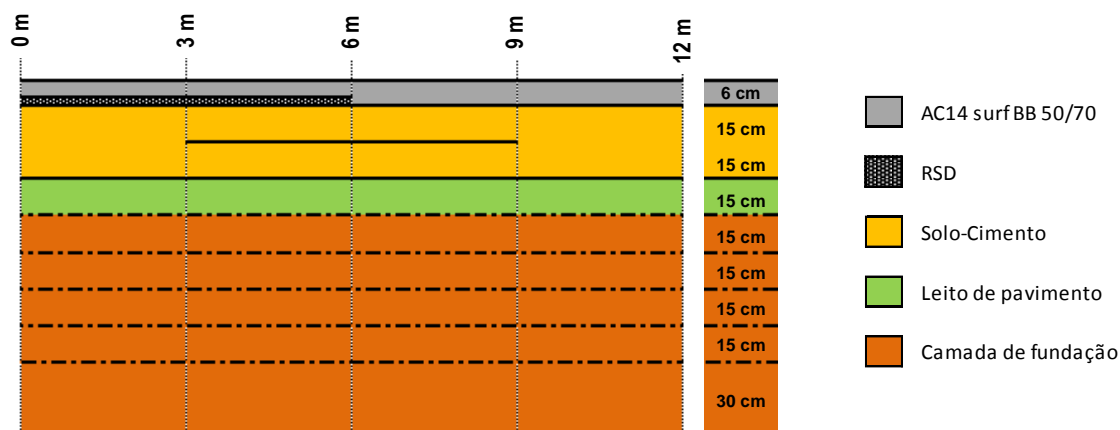
As camadas de fundação e de leito do pavimento foram todas construídas com o mesmo tipo de solo, sendo este do tipo CL – argila pouco plástica, segundo a classificação unificada de solos. Este solo foi também usado para o fabrico das camadas de solo-cimento.

Nas camadas de base e de sub-base em solo-cimento foram aplicadas duas soluções diferentes ao nível da metodologia construtiva, sendo que em dois troços do trecho experimental (0m a 3m e 9m a 12m) foi aplicada uma solução de 30 cm de uma camada de solo estabilizado com 3% de cimento realizada numa única fase construtiva, enquanto nos restantes dois troços (3m a 6m e 6m a 9m) foi aplicada uma camada de 30 cm no total, mas executada em duas fases construtivas, ou seja, estabilizada e compactada em duas camadas com 15cm de espessura cada.

Ao nível das camadas superiores foram também contempladas duas soluções construtivas, conjugadas com as duas soluções aplicadas na camada de base/sub-base. Estas soluções passaram pela aplicação de uma camada de 6 cm de espessura de betão betuminoso do tipo AC14 surf BB 50/70 (com betume de penetração nominal 50/70) em dois dos troços (6m a 9m e 9m a 12m), sendo que a outra solução passou pela aplicação de Revestimento Superficial Duplo (RSD) com cerca de 2 cm de espessura, sobre o qual se aplicou uma camada de 4 cm de um betão betuminoso com as mesmas propriedades do aplicado na solução de 6 cm de espessura, sobre o RSD.



**Fig. 1 – Modelo físico: a) estrutura em betão, b) representação esquemática da zona de ensaio**



**Fig. 2. Representação esquemática das soluções de pavimento aplicadas na pista de ensaios**

Para uma melhor identificação das camadas na realização dos ensaios com o radar de prospecção foram colocadas placas metálicas na interface entre diferentes camadas constituintes do pavimento.

Os ensaios foram realizados sobre o alinhamento central longitudinal do modelo físico. Esta opção justifica-se de forma a serem evitados efeitos de fronteira que podem ser causados pelas paredes de betão de ladeiam o modelo e pela largura do modelo físico, no caso da realização de ensaios de carga com o Defletómetro de Impacto pesado.

## 2.2 Radar de prospecção ou Ground Penetrating Radar (GPR)

O radar de prospecção permite realizar inspeções de rotina de forma contínua, não destrutiva e à velocidade do tráfego. A utilização do radar de prospecção representou um dos avanços mais significativos na obtenção de informação sobre pavimentos existentes. Contudo, apesar de ter um histórico de 30 anos na avaliação de pavimentos (Morey 1998), esta continua a ser uma técnica pouco aplicada (Jol 2008; Saarenketo 2006), sendo umas das principais razões a complexidade na aquisição e na análise dos dados.

As principais aplicações do radar de prospecção em pavimentos têm sido a avaliação da espessura das camadas (Daniels 2004; Fontul 2004), que tradicionalmente era determinada pela realização de sondagens ou poços (Varela-González et al. 2014). Mais recentemente, também tem sido usado para estimar o teor em água (Maser & Scullion 1991), para a deteção de defeitos sub-superficiais (Benedetto & Pensa 2007) e, a nível experimental, para estimar as características mecânicas das camadas do pavimento (Tosti et al. 2014).

O radar de prospecção de impulsos é o mais comum e funciona com a emissão de um impulso eletromagnético, através de uma antena, o qual se propaga verticalmente no

pavimento. Parte da onda é refletida quando encontra materiais com diferentes características dielétricas, sendo que a restante energia eletromagnética continua a propagar-se no pavimento. A energia que é refletida é então recolhida numa antena recetora registando-se as amplitudes e os tempos de percurso da onda.

Dois tipos de antenas podem ser usadas na avaliação de pavimentos, as antenas com contacto na superfície e as suspensas. As primeiras, como o próprio nome indica, requerem contacto com a superfície e permitem uma maior penetração para a mesma frequência de onda emitida, enquanto que as segundas, por serem suspensas sobre o pavimento, permitem que a aquisição seja feita com uma taxa de amostragem superior.

Nos ensaios realizados no âmbito deste estudo foram usados ambos os sistemas: antenas de contato de superfície com frequências de 1,0 e 2,3 GHz e antenas suspensas com frequências de aquisição de 1,0 e 1,8 GHz (Fig. 3).



**Fig. 3. Sistema de ensaios do radar de prospecção (GPR)**

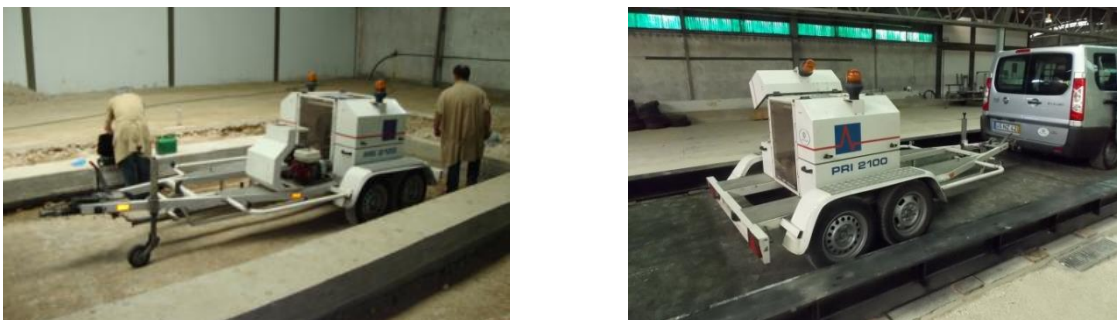
### **2.3 Defletómetro de Impacto Pesado - FWD**

O Defletómetro de Impacto Pesado – Falling Weight Deflectometer (FWD) é um equipamento para ensaios de carga não destrutivo, destinado a avaliar a capacidade estrutural de um pavimento, medindo a resposta do pavimento a uma carga de impacto estando normalizado pela ASTM D4694-96 (ASTM 2003). O ensaio com o FWD consiste na aplicação de uma carga de impacto resultante da queda de uma massa de determinada altura sobre um conjunto de amortecedores e na medição das deflexões daí resultantes na superfície dos pavimentos (Fontul 2004). Para a medição das deflexões na superfície do pavimento, o equipamento é provido de uma régua que possui acelerómetros, onde a cada um corresponde um valor de assentamento da superfície do pavimento, fazendo o equipamento também leituras da temperatura da superfície dos pavimentos para uma correta análise dos resultados. Sendo a temperatura um fator importante para a análise de

um comportamento de um pavimento flexível, devido que esta influência o comportamento do mesmo, logo, também, a sua resposta à ação da carga aplicada (Irwin 2002).

Os deslocamentos verticais do pavimento são medidos ao longo do eixo horizontal pelos acelerómetros instalados, estes podem ser colocadas a distâncias pretendidas, como o afastamento entre eles e a quantidade de acelerómetros pode variar entre 6 e 9, de um modo geral as deflexões do pavimento induzidas pela carga de impacto são medidas em vários pontos, cujas distâncias ao centro da área carregada se situam a: D0 - 0 m; D1 – 0,30 m; D2 – 0,45 m; D3 – 0,60 m; D4 – 0,90 m; D5 – 1,20 m; D6 – 1,50 m; D7 – 1,80 m; D8 – 2,10 m. Nos ensaios aqui apresentados foram feitas medições as distâncias acima referidas, sendo utilizada para aplicação de carga a placa de 300 mm de diâmetro.

A principal vantagem em poder analisar a bacia de deflexões de um pavimento é em permitir uma melhor avaliação estrutural de cada uma das camadas constitutivas, analisando o módulo de elasticidade em camadas distintas e avaliando o comportamento de cada uma delas (Motta et al. 2008)



**Fig. 4. Defletómetro de Impacto Pesado (FWD)**

#### **2.4 Defletómetro de Impacto Portátil – LFWD**

O Defletómetro de Impacto Portátil ou ligeiro, (Light Falling Weight Deflectometer- LFWD, na literatura estrangeira), encontra-se normalizado desde 2007, pela ASTM E2583-07 (ASTM 2015). Este equipamento é portátil e simples de transportar, permitindo um fácil acesso para realização de ensaios in situ (Fig. 5). O LFWD é um equipamento importante na avaliação estrutural de pavimentos, principalmente em obra, devido à sua portabilidade.

O ensaio com o LFWD é utilizado para avaliar a capacidade de deformabilidade das camadas de pavimentos rodoviários, de solo e de materiais granulares dos pavimentos. Este mede as deformações do terreno, induzidas pela aplicação de uma carga, de modo não destrutivo.



Fig. 5. Defletómetro de impacto portátil (LFWD)

Este apresenta a desvantagem de não ser possível aplicação de cargas, geralmente superiores a 14 kN, contudo com o ensaio é possível realizar uma caracterização de fundações ou camadas granulares.

Para os ensaios realizados com o LFWD foi utilizada uma placa rígida de 30 cm acrescida da viga adicional de suporte de sensores que permite utilizar no máximo 3, um no ponto central, um a trinta centímetros e o último a sessenta centímetros.

A medição da deflexão de uma superfície permite, a obtenção do módulo de deformabilidade que serve como indicador da capacidade resistente.

### 3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Foram realizados ensaios em duas fases da construção do modelo físico: no topo da camada de leito do pavimento e no topo da estrutura final.

A carga aplicada nos ensaios com o FWD foi de 30 kN no topo do leito do pavimento (Fig. 6) e de 65 kN no topo do pavimento (Fig. 7), por forma a simular as cargas reais aplicadas aos dois níveis de estrutura num pavimento em serviço.

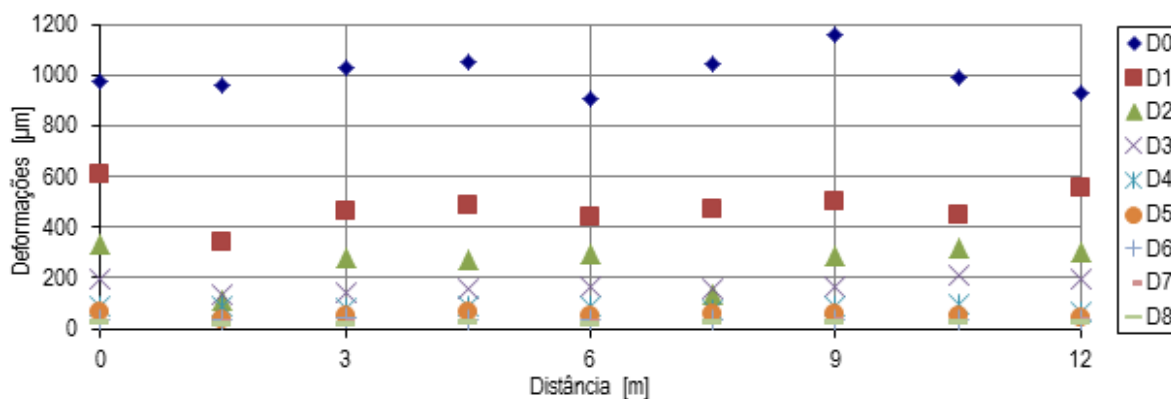
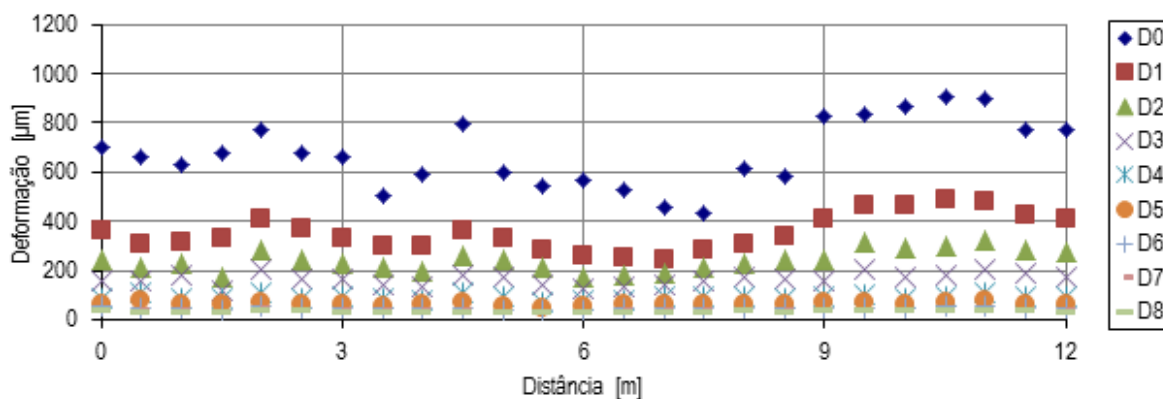


Fig. 6. Deformações obtidas com o FWD no topo do leito de pavimento (carga de 30 kN)



**Fig. 7. Deformações obtidas com o FWD no topo do pavimento (carga de 65 kN)**

Da análise dos resultados dos ensaios de carga obtidos no leito do pavimento (Fig. 6), verifica-se que em algumas zonas existe descontinuidade das deflexões D2 e D3 (posições 1,5 m e 7,5 m ao longo do modelo físico) o que poderá ser um indicativo de fendilhamento ou de camadas desligadas. Verifica-se ainda que nas posições 1,5 m e 9,0 m as diferenças entre as deflexões D0 e D1 são superiores às medidas nos restantes pontos de ensaio o que pode ser devido à existência de fendilhamento superficial.

Nos ensaios com FWD realizados no topo do pavimento (Fig. 7) verifica-se que as zonas que apresentam menores deformações (localizadas entre 3 m e 9 m no modelo físico) correspondem à solução estrutural onde a camada de solo-cimento foi compactada em duas camadas de 15 cm cada. É ainda possível constatar que as deformações no primeiro troço (0 m a 3 m) se aproximam das verificadas para as soluções com a melhor resposta, de duas camadas de solo-cimento, podendo esta situação dever-se ao funcionamento da camada de Revestimento Superficial Duplo (RSD) que terá como função limitar a propagação de fendas por reflexão.

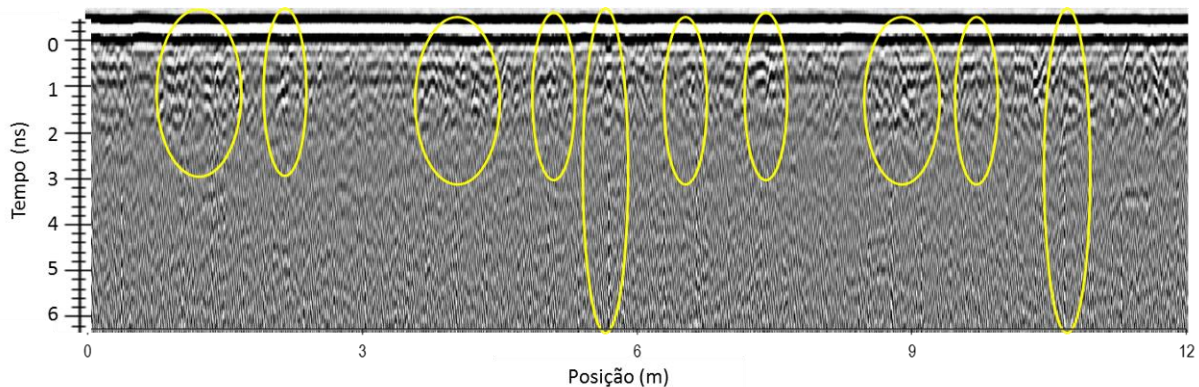
Relativamente aos ensaios com o LFWD, esses corroboraram os resultados obtidos com o FWD, sendo que os módulos de deformabilidade calculados com este equipamento portátil foram inferiores aos determinados pelo FWD.

Nos ensaios com o radar de prospeção (GPR) foram usadas as antenas suspensas e as de superfície para medição no topo da camada de leito de pavimento, e apenas as antenas suspensas para medição no topo do pavimento, sendo essas as utilizadas para avaliação de pavimentos em serviço por permitir medições à velocidade do tráfego

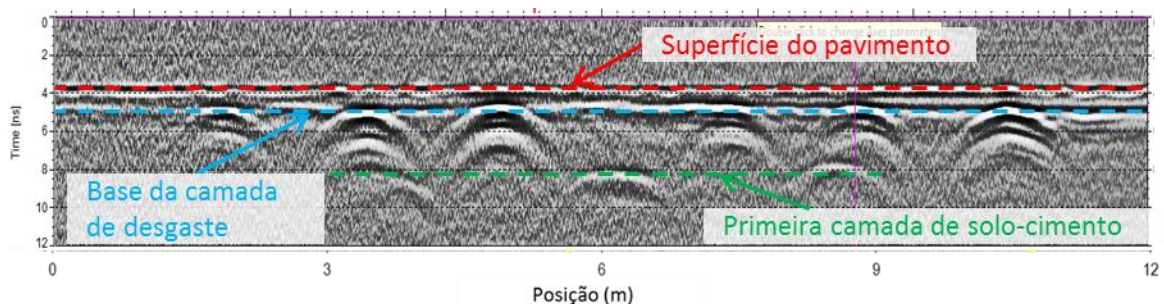
Apresentam-se de seguida alguns exemplos dos resultados obtidos com o GPR aos dois níveis de estrutura de pavimento diferentes, nomeadamente sobre o leito do pavimento com



a antena de contato de superfície de 2,3 GHz (Fig. 8) e no topo do pavimento, com a antena suspensa de 1,8 GHz (Fig. 9). Nessa última figura as parábolas representam reflexões das placas metálicas colocadas na interface entre camadas.



**Fig. 8. Radargrama sobre o leito do pavimento (antena de superfície de 2,3 GHz)**



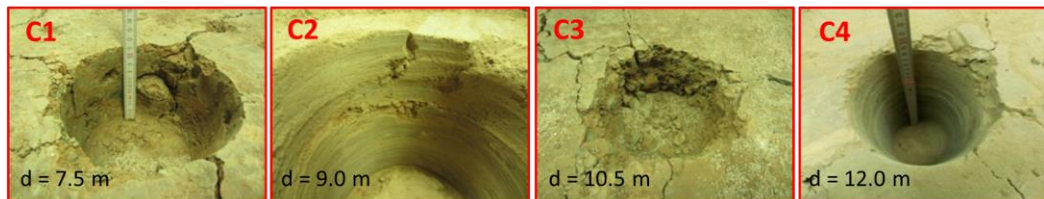
**Fig. 9. Radargrama sobre o topo do pavimento (antena suspensa de 1.8 GHz)**

Na Fig. 8 assinalam-se a amarelo as zonas onde se identificaram descontinuidades nas reflexões e alterações na amplitude do sinal eletromagnético. Estas alterações poderão ser atribuídas a fendilhamento ou a desligamento das camadas devido a alterações da constante dielétrica pela presença de ar nas fendas ou entre as camadas desligadas.

Comparando os resultados obtidos na Fig. 6 e Fig. 8 verifica-se que as zonas onde se identificaram alterações no radargrama obtido com o radar de prospeção coincidem com as zonas onde se verificaram alterações na capacidade de carga do pavimento medida com recurso ao FWD.

De forma a validar os resultados obtidos em ambos os ensaios não destrutivos, foram realizadas sondagens à rotação (Fig. 10) em zonas onde foram identificadas anomalias nos ensaios (C1, C2 e C3), mas também em áreas sem presença de anomalias (C4). As

sondagens evidenciaram a existência de fendilhamento na camada do leito de pavimento (C1, C2 e C3), e ainda alguma delaminação entre camadas (C1). Não foram detetadas deficiências em profundidade na posição C4 para além do fendilhamento que se verifica em toda a superfície de ensaio, no topo da camada de argila, característico deste material quando ocorre secagem superficial.



**Fig. 10. Sondagens à rotação**

Na Fig. 9 é possível identificar claramente a superfície de separação da camada de desgaste. No caso da camada de solo-cimento essa identificação já não é tão fácil e apenas foi possível pelo facto de se ter colocado placas metálicas entre as várias camadas durante a construção, que são detetadas no radargrama através das hipérbolas de reflexão das placas de metal. Esta situação ocorre pelo facto das características dielétricas do material serem idênticas nas várias camadas.

Nos ensaios de radar no topo da estrutura do pavimento não são visíveis as anomalias detetadas em profundidade nos ensaios realizados sobre o leito do pavimento, devido ao elevado teor de argila presente no solo-cimento e nas camadas inferiores, responsável por uma absorção do sinal eletromagnético limitando a força do sinal em profundidade. Como os ensaios foram realizados após a construção da estrutura, ainda sem cargas aplicadas no pavimento, não se detetam diferenças com o radar de prospeção nas diferentes estruturas relativamente à progressão das fendas.

#### **4. CONCLUSÕES**

No âmbito do presente trabalho foram realizados ensaios não destrutivos sobre quatro estruturas de pavimento constituintes de um trecho experimental executado no âmbito do Projeto de I&D Tropical-PAV. Os ensaios foram realizados durante a construção (sobre o leito do pavimento) e após a conclusão da estrutura ainda sem aplicação de cargas.

Nos ensaios realizados sobre a camada do leito de pavimento verificaram-se algumas variações ao longo do perfil de ensaio apesar do solo apresentar todas as mesmas características. As deflexões medidas com recurso ao FWD apresentam em alguns pontos inversão das deflexões para um acelerómetro mais afastado do ponto de aplicação de carga em relação a outro mais próximo (D2 vs D3). Foram identificadas ainda variações entre as

deflexões medidas sobre o ponto de aplicação de carga e o acelerómetro mais próximo (D0 vs D1). Ambas as situações podem-se dever à existência de fendilhamento no interior das camadas de solo e ainda ao desligamento das camadas do pavimento.

O atrás disposto foi confirmado com os resultados obtidos nos radargramas resultantes do GPR onde se registou uma alteração do sinal eletromagnético, que geralmente se deve à existência de fendilhamento ou desligamento entre as camadas. De forma a confirmar o registado em ambos os ensaios não destrutivos, foram realizadas sondagens à rotação que corroboraram os resultados obtidos.

Nos ensaios com FWD realizados na estrutura final do pavimento as zonas com a solução de duas camadas de solo-cimento apresentam menores deformações em comparação com os locais com a solução de camada única. Foi ainda possível contactar que as deformações no troço com RSD, combinado com a solução de camada única de solo-cimento, se aproximam das verificadas para as soluções com melhor resposta, podendo esta situação ficar a dever-se ao funcionamento da camada de RSD que terá como função limitar a propagação de fendas por reflexão.

Nos radargramas obtidos na superfície do pavimento identificou-se a camada de desgaste, tendo ainda sido detetada a primeira camada de solo-cimento através das hipérbolas de reflexão das placas de metal colocadas na interface dessa camada. Não se detetaram diferenças com o radar de prospeção nas diferentes estruturas, no entanto realça-se o facto de os ensaios terem sido realizados após a construção da estrutura, ainda sem cargas aplicadas no pavimento.

Nos ensaios de radar no topo da estrutura do pavimento não foram visíveis as anomalias detetadas em profundidade nos ensaios realizados sobre o leito do pavimento, devido ao elevado teor de argila presente no solo-cimento e nas camadas inferiores, responsável por uma absorção do sinal eletromagnético limitando a força do sinal em profundidade. Neste sentido salienta-se a vantagem da realização de ensaios de acompanhamento durante a construção para poder ter um acesso mais completo a toda estrutura do pavimento.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores pretendem manifestar o seu agradecimento ao consórcio do Projeto de I&D Tropical-PAV pela utilização do trecho experimental na execução dos ensaios.

Parte deste estudo foi desenvolvido no âmbito da atividade dos Grupos de Trabalho 5, “Métodos não destrutivos no diagnóstico de infraestruturas de transporte - da Comissão Portuguesa de Geotecnia nos Transportes (CPGT) da Sociedade Portuguesa de Geotecnia.

O trabalho é do interesse da Ação COST TU1208 “Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar”.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- Antunes, V. et al., 2016. SOLUÇÕES DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS PARA PAÍSES COM CLIMAS TROPICAIS – PROJETO DE I&D TROPICAL-PAV. In 8º CRP. Lisbon, Portugal.
- Association, E.A.P., 2007. Sustainable roads - Long-Life Asphalt Pavements Version for “bankers.”
- ASTM, 2003. *ASTM D 4694 - 96. Standard Test Method for Deflections with a Falling-Weight-Type Impulse Load Device*, USA.
- ASTM, 2015. *ASTM E2583-07. Standard Test Method for Measuring Deflections with a Light Weight Deflectometer (LWD)*.
- Benedetto, A. & Pensa, S., 2007. Indirect diagnosis of pavement structural damages using surface GPR reflection techniques. *Journal of Applied Geophysics*, 62(2), pp.107–123.
- Collier, P. & Kirchberger, M., 2015. The Cost of Road Infrastructure in Low and Middle Income Countries. , pp.1–27.
- Irwin, P., 2002. Backcalculation: An Overview and Perspective. FWD/Backcalculation Work. 3. In *6th International Conference Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields - BCRA 2002*. pp. 24–6.
- Jol, H., 2008. *Ground Penetrating Radar Theory and Applications* 1st editio., Elsevier Science.
- Maser, K.R. & Scullion, T., 1991. Automated detection of pavement layer thicknesses and subsurface moisture using ground penetrating radar. *Transportation Research Board Paper*.
- Morey, R.M., 1998. Ground penetrating radar for evaluating subsurface conditions for transportation facilities. NCHRP Synthesis Report No. 255. *Synthesis of highway practice*, (255), p.37 p.
- Motta, L. et al., 2008. Pavimentação Asfáltica. Formação Básica para Engenheiros.
- Mubila, M., Moolman, A. & Zyl, W. Van, 2014. Study on Road Infrastructure Costs: Analysis of Unit Costs and Cost Overruns of Road Infrastructure Projects in Africa. , p.40. Available at: [http://www.afdb.org/fileadmin/uploads/afdb/Documents/Publications/Study\\_on\\_Road\\_Infrastructure\\_Costs-\\_Analysis\\_of\\_Unit\\_Costs\\_and\\_Cost\\_Overruns\\_of\\_Road\\_Infrastructure\\_Projects\\_in\\_Africa.pdf](http://www.afdb.org/fileadmin/uploads/afdb/Documents/Publications/Study_on_Road_Infrastructure_Costs-_Analysis_of_Unit_Costs_and_Cost_Overruns_of_Road_Infrastructure_Projects_in_Africa.pdf).
- Saarenketo, T., 2006. Electrical properties of road materials and subgrade soils and the use of Ground Penetrating Radar in traffic infrastructure surveys. , p.127.
- Tosti, F. et al., 2014. Large-scale analysis of dielectric and mechanical properties of pavement using GPR and LFWD. *Proceedings of the 15th International Conference on Ground Penetrating Radar, GPR 2014*, pp.868–873.
- Varela-González, M. et al., 2014. A semi-automatic processing and visualisation tool for ground-penetrating radar pavement thickness data. *Automation in Construction*, 45, pp.42–49. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2014.05.004>.