

AVALIAÇÃO “IN-SITU” DAS CONDIÇÕES DE FUNDAÇÃO DOS PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS COM BASE EM ENSAIOS DE CARGA

MARIA DE LURDES ANTUNES

INVESTIGADORA PRINCIPAL DO LNEC, CHEFE DE NÚCLEO DE INFRAESTRUTURAS, DEPARTAMENTO DE TRANSPORTES

FERNANDO BRANCO

CONSULTOR, COBA

RUI BARROS

DIRECTOR TÉCNICO, PRONORSAN

RESUMO

O dimensionamento de pavimentos através de métodos analíticos requer o conhecimento das características mecânicas dos materiais das camadas que o constituem, e da sua fundação. É essencial que na fase de projecto sejam adoptadas, para efeitos de dimensionamento dos pavimentos, características adequadas para as respectivas fundações. Já na fase de obra, é conveniente verificar os valores adoptados no projecto e realizar eventuais adaptações na estrutura do pavimento em função dos resultados obtidos.

O recurso a ensaios de carga com deflectómetro de impacto directamente sobre camadas de pavimentos em construção tem vindo a ser adoptado pelo LNEC em diversos estudos de investigação realizados nas décadas de 80 e de 90, o que tem permitido aperfeiçoar os métodos adoptados para a realização dos ensaios e interpretação dos resultados.

Nesta comunicação apresenta-se uma metodologia para avaliação “in-situ” das condições de fundação dos pavimentos rodoviários com base em ensaios de carga com deflectómetro de impacto, bem como um conjunto de casos práticos da sua aplicação em obras rodoviárias recentes de grande dimensão.

1. INTRODUÇÃO

O dimensionamento de pavimentos através dos métodos analíticos requer o conhecimento das características mecânicas dos materiais das camadas que o constituem, e da sua fundação. As condições de fundação dos pavimentos

desempenham um papel muito importante no desempenho da estrutura ao longo da vida útil dos pavimentos.

É pois essencial que na fase de projecto sejam adoptadas, características adequadas para a fundação dos pavimentos. Tais características dependerão, naturalmente, dos solos de fundação existentes na linha e dos materiais utilizados para a execução dos aterros, e das medidas que se adoptarem com vista à execução do leito do pavimento. Para efeitos de dimensionamento por via analítica, as condições de fundação dos pavimentos serão traduzidas através do módulo de deformabilidade da camada de leito de pavimento.

Tendo em vista minimizar o risco de ocorrência de ruína por deficiências da fundação, ainda que em zonas localizadas, é essencial que, na fase de execução da obra possam ser garantidas, na generalidade da área a pavimentar, as condições de fundação adoptadas no dimensionamento. Por outro lado, podem surgir na fase de obra, condições para a obtenção de condições de fundação melhoradas, quer decorrentes do tipo de solos encontrados na linha, quer decorrentes do tipo de materiais utilizados na execução do leito de pavimento.

Do exposto anteriormente ressaltam as vantagens de dispôr de meios que permitam, de uma forma relativamente expedita, verificar “*in situ*” os valores atribuídos aos módulos de deformabilidade da fundação dos pavimentos, para efeitos de dimensionamento, e fornecer elementos para eventuais alterações a adoptar na estrutura dos pavimentos, no caso dos resultados obtidos apontarem para condições de fundação distintas das consideradas no dimensionamento.

Nesta comunicação apresenta-se uma metodologia para a avaliação “*in situ*” das condições de fundação de pavimentos rodoviários, durante a respectiva fase de construção, utilizando ensaios de carga com deflectómetro de impacto e apresentam-se alguns casos práticos de aplicação em obras recentes.

2. UTILIZAÇÃO DO DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO NA CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE LEITOS DE PAVIMENTO

2.1. Antecedentes

A metodologia a adoptar na caracterização “*in situ*” de camadas de pavimentos tendo em vista a concretização dos objectivos enunciados em 1 deve, por um lado, permitir obter parâmetros directamente relacionados com o desempenho da estrutura do pavimento e, por outro lado, assentar na realização de um elevado número de ensaios com vista a garantir a representatividade dos resultados obtidos e a avaliar homogeneidade das camadas aplicadas.

O deflectómetro de impacto é um equipamento destinado à realização de ensaios de carga em pavimentos de estradas e de aeroportos que consistem na aplicação, à superfície, de uma força de impulso gerada pela queda de uma massa de determinada altura sobre um conjunto de amortecedores, e na medição das deflexões daí resultantes na referida superfície [1]. Esta força é transmitida ao pavimento através de uma placa de carga circular, que promove uma distribuição relativamente uniforme das pressões aplicadas à superfície. Através da variação da massa cadente, da respectiva altura de queda e das características dos amortecedores, é possível aplicar cargas com valores de pico variáveis. No caso do equipamento do LNEC, que se ilustra na Figura 1, as forças de pico aplicadas podem variar entre 20 e 150 kN.



Figura 1 – Deflectómetro de impacto do LNEC

O recurso a ensaios de carga com deflectómetro de impacto directamente sobre camadas de pavimentos em construção tem vindo a ser adoptado pelo LNEC em diversos estudos de investigação realizados nas décadas de 80 e de 90, quer sobre camadas de pavimentos de estradas e auto-estradas, quer sobre camadas de pavimentos de aeroportos [2] a [6]. Este tipo de metodologia tem também sido utilizado para a caracterização de camadas executadas com materiais alternativos [7].

A experiência adquirida, bem como os estudos realizados por outros centros de investigação [8] [9], tem permitido aperfeiçoar os métodos a adoptar para a realização dos ensaios e interpretação dos resultados. Nas secções seguintes apresenta-se uma metodologia expedita para avaliação das condições de fundação de pavimentos em construção.

2.2. Metodologia de ensaio

2.2.1 Equipamento de ensaio

Existem diversos tipos equipamentos de ensaio que podem ser considerados adequados à caracterização mecânica de leitos de pavimento durante a construção, nomeadamente:

- Ensaio de carga com placa (estático);
- Ensaio de carga com deflectómetro de impacto (FWD);
- Ensaio de carga com deflectómetro de impacto portátil (DIP).

Estes três tipos de ensaio assentam no mesmo princípio: é aplicada uma solicitação à superfície a ensaiar, transmitida através de uma placa de carga circular, sendo medidos os deslocamentos verticais (deflexões) daí resultantes na referida superfície.

Embora o princípio de funcionamento seja semelhante, estes tipos de equipamentos diferem significativamente, quer no tipo de solicitação aplicada, quer nas opções disponíveis relativamente ao tipo de placa, quer ainda no tipo de variação temporal das cargas aplicadas à superfície. Por estas razões, a experiência adquirida até ao presente, aponta para diferenças entre os módulos de deformabilidade obtidos com os três tipos de equipamento sobre uma mesma camada.

Estudos comparativos efectuados por diferentes autores [8] levaram a concluir que a utilização de placas de carga flexíveis, com diâmetros de 0,45 m, por oposição a placas de carga rígidas e com menores dimensões, conduz a melhores resultados, do ponto de vista da repetibilidade e da reprodutibilidade. Por outro lado, atendendo à não linearidade do comportamento dos solos e materiais granulares, as solicitações aplicadas à superfície ensaiada devem simular, na medida do possível, os estados de tensão induzidos pela passagem dos rodados dos veículos após entrada em serviço do pavimento. Tendo em atenção este facto, e as potencialidades dos equipamentos disponíveis, recomenda-se a utilização do deflectómetro de impacto com a placa de 0,45 m de diâmetro, aplicando uma força de pico nominal de 20kN.

2.2.2 Condução da campanha de ensaios

Tendo em atenção a necessidade de garantir uma adequada homogeneidade das características da fundação e de dispor de valores representativos de toda a área em estudo, a condução da campanha de ensaios deverá ter em conta o seguinte:

- A resposta obtida nos ensaios varia significativamente nos primeiros dias após a colocação da camada, nomeadamente devido às variações do teor em água. Recomenda-se que a campanha de ensaios seja realizada no prazo máximo de uma semana após a compactação da camada, a menos que ocorra precipitação elevada.

- Tendo em vista obter um conjunto de resultados suficiente para avaliar a homogeneidade das características da fundação dos pavimentos deverá ser realizado um número mínimo de 30 ensaios em cada troço homogéneo a caracterizar, em pontos afastados entre si de 25 m, no máximo.
- A totalidade dos ensaios destinados a caracterizar um determinado troço deve ser realizada num período relativamente curto, por forma a que não ocorram variações significativas no comportamento da camada em estudo, nomeadamente por efeito dos agentes atmosféricos.

2.3. Análise dos resultados

2.3.1 Introdução

A análise dos resultados obtidos em ensaios com deflectómetro de impacto realizados sobre camadas solas e materiais granulares de pavimentos em construção deverá incidir quer sobre os valores das deflexões obtidas, quer sobre a respectiva homogeneidade. A possibilidade de avaliar a homogeneidade das características da fundação dos pavimentos é, de resto, uma das vantagens de recorrer a equipamentos de ensaio de elevado rendimento como o deflectómetro de impacto.

Em cada troço considerado homogéneo é usual seleccionar um ensaio como representativo do conjunto de resultados obtidos nesse troço. Com base nos resultados obtidos nesse ensaio, poder-se-á então estimar os módulos de deformabilidade das camadas submetidas a ensaio individualmente, recorrendo a métodos de retro-análise [1] ou, de uma forma mais simplificada, determinar um módulo de deformabilidade aparente do conjunto.

2.3.2 Análise da homogeneidade dos resultados em cada troço

O primeiro passo para a análise da homogeneidade do comportamento em determinado troço ensaiado consiste na “normalização” das deflexões medidas em cada ponto, em particular as medidas no centro da área carregada, para um valor nominal da força aplicada no ensaio. Para o caso particular da força de 20 kN (pressão de 125,75 kPa), esta normalização é realizada de acordo com a fórmula:

$$D_0^{norm} = \frac{D_0 \times 20}{P} \dots\dots\dots(1)$$

Sendo: D_0^{norm} A deflexão no centro da área carregada, normalizada para uma força padrão de 20 kN;
 P A força de impacto registada no último impacto, em kN;
 D_0 A deflexão medida no centro da área carregada no último impacto, (correspondente à carga P).

O conjunto de deflexões normalizadas obtidas ao longo do troço ensaiado deve ser analisado, tendo em vista a eventual sub-divisão em troços homogéneos. Propõe-se para tal a utilização do valor do coeficiente de variação (*COV*) dado por:

$$COV = DP/D_0^{med} \times 100\% \dots\dots\dots(2)$$

sendo D_0^{med} o valor médio das deflexões normalizadas e *DP* o respectivo desvio padrão.

Avalia-se a homogeneidade de cada troço através do seguinte critério:

- $COV < 20\%$ Boa homogeneidade
- $20\% = COV < 30\%$ Homogeneidade moderada
- $30\% = COV < 40\%$ Homogeneidade fraca
- $COV = 40\%$ Troço não homogéneo.

A análise dos resultados em cada troço homogéneo definido, deve ser efectuada tendo em atenção o seguinte:

- O número mínimo de pontos de ensaio por cada troço homogéneo deve ser de 30;
- Os troços com $COV = 40\%$ não podem ser considerados como homogéneos.

Em cada troço homogéneo pode definir-se um valor característico das deflexões normalizadas, através do valor correspondente ao percentil 85% ($D_0^{85\%}$, no caso particular das deflexões no centro da área carregada).

3.2.3 Módulo de deformabilidade da fundação do pavimento

No caso da avaliação das condições de fundação de pavimentos, pretende-se determinar quais os valores a adoptar como representativos da fundação dos pavimentos (leito do pavimento + solo de fundação), para efeitos de verificação do dimensionamento das camadas a construir sobre esta. Estando-se já em fase de obra, a análise dos resultados deverá ser realizada por um método expedito, que permita uma rápida tomada de decisão. Assim, considera-se vantajoso estabelecer uma metodologia que permita determinar o módulo de deformabilidade aparente da fundação com um grau de confiança adequado e sem recorrer a análises subjectivas.

Para a determinação do módulo de deformabilidade aparente da fundação é prática corrente utilizar a teoria de Boussinesq, admitindo que o meio ensaiado é um meio espaço homogéneo, com comportamento elástico-linear, com um determinado valor do coeficiente de Poisson.

No entanto, na generalidade dos casos de interpretação de resultados de ensaios de carga é admissível que, a partir de uma dada profundidade, o módulo de deformabilidade do solo aumente, nomeadamente por razões relacionadas com o estado de tensão em que se

encontram as camadas, a que por vezes se associa a estratificação do meio. Neste contexto, é frequente a interpretação dos resultados dos ensaios com recurso a sistemas de multi-camada, considerando que, a partir de uma dada profundidade se encontra uma camada com módulo de deformabilidade (E_r) superior ao da camada superficial (E_0) (entre 2 e 10 vezes).

No Quadro 1 apresentam-se algumas hipóteses consideradas no que concerne à interpretação de resultados de ensaios sobre o leito do pavimento, para diferentes modelos de cálculo, correspondentes a distintas relações entre os módulos de deformabilidade das camadas superior e inferior. Na Figura 2 apresentam-se os resultados obtidos para a relação entre módulos de deformabilidade e deflexões para cada uma destas hipóteses, utilizando as equações de Boussinesq, na hipótese 1, ou o programa ELSYM 5, nos restantes casos. Em qualquer das hipóteses foi considerado um coeficiente de Poisson igual a 0,4 para a camada de leito.

Quadro 1 – Modelos de cálculo considerados

Hipótese	h_0 (m)	E_r/E_0
1	Boussinesq	1
2	0,90	2
3	0,90	5
4	0,90	10

Legenda:

- h_0 – Profundidade a que se encontra a “camada rígida”;
- E_0 – Módulo de deformabilidade da camada de fundação (camada superficial, no caso de duas camadas)
- E_r – Módulo de deformabilidade da camada “rígida”.

Adoptando os resultados correspondentes ao caso mais desfavorável ($E_r = 10 E_0$) chega-se aos valores tabelados no Quadro 2.

Quadro 2 – Valores dos módulo de deformabilidade (E_0) a atribuir à fundação dos pavimentos num troço homogéneo

Força de Impacto – 20 kN								
Diâmetro da placa – 0,450 m								
Camada ensaiada:	E_0 (MPa)	60	70	80	90	100	110	120
Leito do pavimento	$D_o^{85\%}$ (μm)	≤ 660	≤ 560	≤ 490	≤ 440	≤ 390	≤ 360	≤ 330

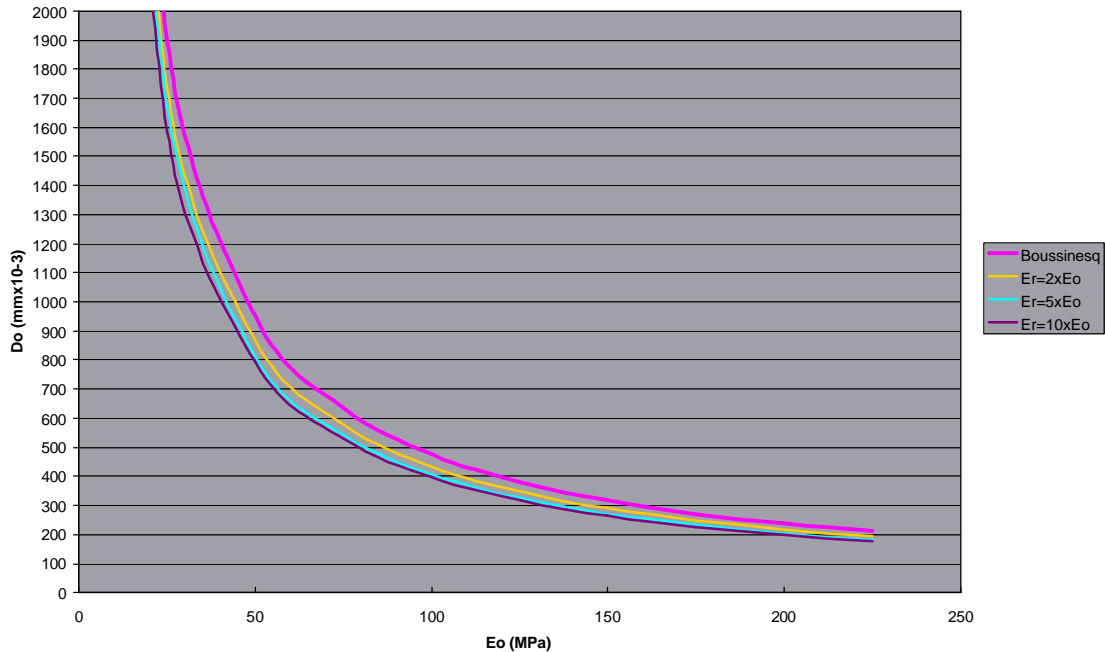


Figura 2 – Relação entre módulos de deformabilidade a adoptar para a fundação (E_0) e deflexões

3. CASOS PRÁTICOS DE APLICAÇÃO

Apresentam-se em seguida alguns casos práticos de aplicação da metodologia anteriormente descrita em obras recentes, designadamente na construção da Auto-estrada da Beira Litoral e Alta. Os exemplos apresentados referem-se a treços construídos sobre solos residuais de formações xistosas, pertencentes ao grupo SM de acordo com a classificação Unificada, nos quais se adoptaram três tipos de soluções distintas para a execução do leito de pavimento:

- Trecho 1: camada de solos areno-siltosos (SM) com 0,30 m de espessura;
- Trecho 2 – camada de Agregado Britado de Granulometria Extensa (ABGE) com 0,15 m de espessura;
- Trecho 3 –solos areno-siltosos tratados com cal até uma profundidade de 0,30 m.

Nas Figuras 3, 4 e 5 apresentam-se os resultados obtidos para as deflexões medidas no centro da área carregada (D_0) em cada trecho. De acordo com a metodologia apresentada, as deflexões medidas foram normalizadas para uma carga de 20 kN.

No Quadro 3 apresenta-se a análise dos resultados obtidos em cada um dos trechos, de acordo com a metodologia proposta.

Trecho 1 (Faixa esquerda entre o pk 14+475 e o pk 14+505)

Total de ensaios: 35

Camada de leito de pavimento: 0.30 metros de solos areno siltosos – SM

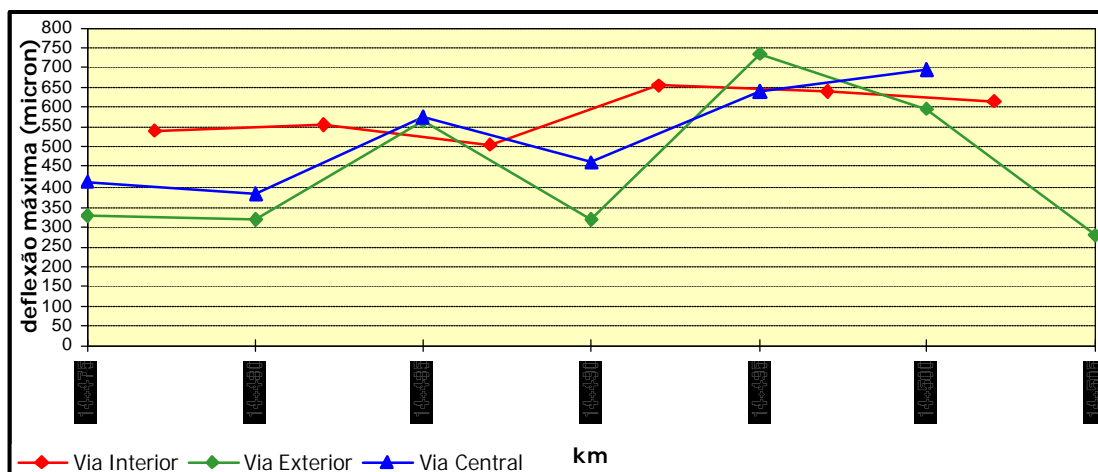


Figura 3 – Deflexões máximas normalizadas para 20 KN – trecho 1

Trecho 2 (Faixa esquerda entre o pk 15+375 e o pk 15+400)

Total de ensaios: 35

Camada de leito de pavimento: 0.15 metros de agregado britado de granulometria extensa – A.B.G.E.

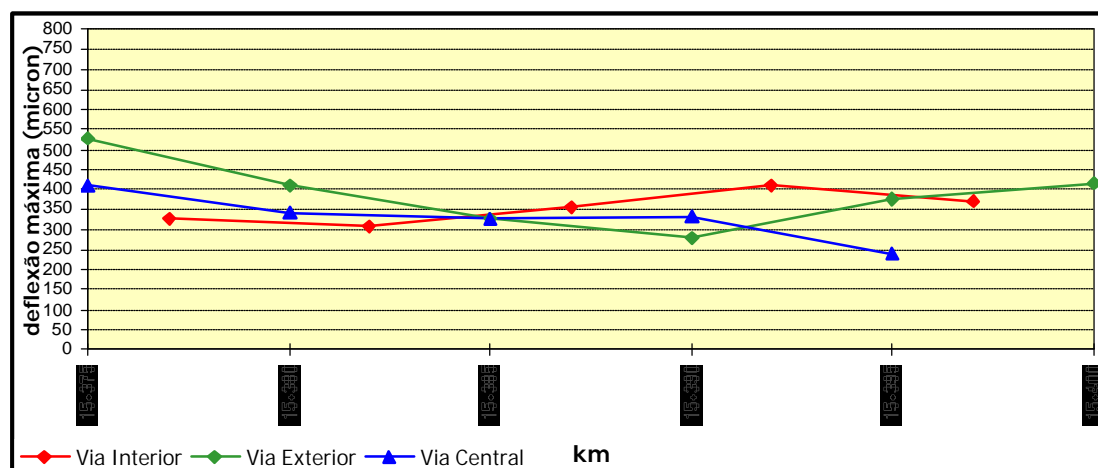


Figura 4 – Deflexões máximas normalizadas para 20 KN – trecho 2

Trecho 3 (Faixa esquerda entre o pk 3+100 e o pk 5+075)

Total de ensaios: 79

Camada de leito de pavimento: Solos arenos siltsos tratados com cal

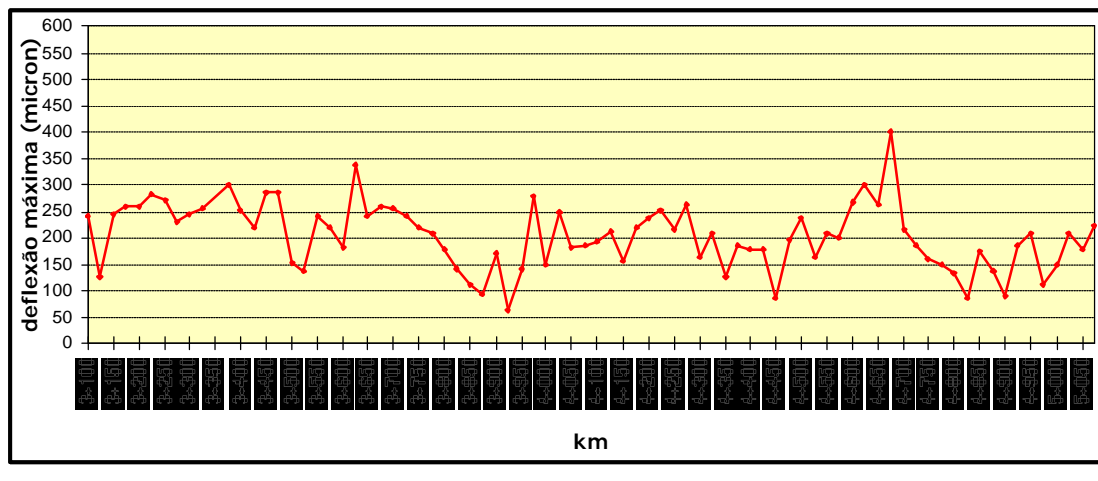


Figura 5 – Deflexões máximas normalizadas para 20 kN – trecho 3

Quadro 3 – Análise dos resultados

Trecho	Leito do pavimento	Média D_0 (μm)	Desvio padrão D_0 (μm)	Coefficiente de Variação D_0 (%)	Valor Característico $D_{085\%}$ (μm)	Módulo de Deformabilidade (MPa)
1	0,30m solos SM	505	134	27	644	60
2	0,15m ABGE	348	52	15	402	90
3	0,30m solos SM tratados com cal	198	55	28	255	120

Da análise do quadro anterior, verifica-se que os trechos ensaiados se podem considerar como tendo homogeneidade moderada, no caso dos trechos 1 e 3, ou boa, no caso do trecho 2, tendo-se chegado a valores para os módulos de deformabilidade da fundação considerados razoáveis, tendo em atenção os tipos de solos de fundação e as soluções adoptadas para o leito do pavimento em cada trecho.

4. CONCLUSÕES

Nesta comunicação apresentou-se uma metodologia para avaliação “*in situ*” das condições de fundação de pavimentos rodoviários, durante a respectiva fase de construção, utilizando ensaios de carga com deflectómetro de impacto, tendo em vista verificar, de uma forma relativamente expedita, os valores a atribuir aos módulos de deformabilidade da fundação dos pavimentos, para efeitos de dimensionamento de pavimentos.

A metodologia apresentada assenta na realização de um número de ensaios suficiente para permitir a garantia da representatividade do valor atribuído ao módulo de deformabilidade da fundação de uma determinada área em estudo, e a avaliação da homogeneidade das condições de fundação dos pavimentos. Desta forma, é possível otimizar os recursos dispendidos na construção de pavimentos, face às características obtidas para a sua fundação, sem aumentar os riscos de sobre-avaliação das características da fundação, que pode ter consequências importantes na vida útil dos pavimentos.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Antunes, M.L. – “Avaliação da Capacidade de carga de Pavimentos Utilizando Ensaios Dinâmicos”. Tese elaborada no Laboratório Nacional de Engenharia Civil e submetida para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Técnica de Lisboa no âmbito do protocolo de cooperação entre o IST e o LNEC. Outubro de 1993
- [2] Quaresma, L.; Antunes, M.L.; Pinelo, A.M. – “Caracterização de Bases Granulares e Análise Estrutural da Capacidade de Carga de um Pavimento em Construção no IP1” - Relº Procº 92/1/8189, 1984.
- [3] Freire, A.C.; *et al.* - “Caracterização de Camadas Granulares da Variante às EN 5 e EN 120, em Alcácer do Sal”. Relº Procº 92/16/10723. Protocolo JAE/LNEC, Lisboa, Dezembro de 1994.
- [4] Freire, A.C.; Quaresma, L.; Barros, R.. - “Caracterização de Camadas Granulares na Via Infante de Sagres”. Relº Procº 92/16/10723. Protocolo JAE/LNEC, Lisboa, Agosto de 1996.
- [5] Quaresma, L.; Barros, R. - “IC1 – Variante das Caldas da Raíña. Estudos relativos a leitos de pavimento”. Relº Procº 92/16/12992. Protocolo JAE/LNEC, Lisboa, Novembro de 1996.

- [6] Antunes, M.L.; Freire, A.C.; Hadjadj, T.- “Estudo do comportamento mecânico de camadas granulares do pavimento da auto-estrada A6, sublanço Évora-Estremoz”. Estudo realizado para a firma Mota& Companhia, S.A. Proc° 92/1/13459, LNEC, Outubro de 1997.

- [7] Lima, H.; Quaresma, L.; Antunes, M.L. “Aplicação de escórias da Central Termoeléctrica de Sines num trecho piloto de pavimentação”. Estudo realizado a pedido da Companhia Portuguesa de Produção de Electricidade, S. A.. Proc° 092/01/12941, LNEC Junho de 2001.

- [8] Ferne, B. “Quality control using the FWD”. FWD Backanalysis Workshop. 6th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, Lisboa, Junho de 2002.

- [9] FEHRL “Harmonisation of FWD measurements and data processing for flexible pavement evaluation”. Forum of European Highway Research Laboratories, Public. N° 1, 1994.