

CONSIDERAÇÃO DA NÃO-LINEARIDADE DO COMPORTAMENTO DOS SOLOS NA MODELAÇÃO NUMÉRICA DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

CONSIDERATION OF NON-LINEARITY OF SOILS BEHAVIOUR IN THE NUMERICAL MODELLING OF ROAD PAVEMENTS

Neves, José M. C., *Instituto Superior Técnico, CESUR, Lisboa, neves@civil.ist.utl.pt*
Gomes Correia, A., *Universidade do Minho, Guimarães, agc@civil.uminho.pt*

RESUMO

O objectivo principal desta comunicação é evidenciar a importância de considerar a não-linearidade do comportamento dos solos de fundação na modelação numérica dos pavimentos rodoviários, para fins de dimensionamento estrutural. A instrumentação e observação de dois trechos experimentais numa estrada em Lisboa permitiram analisar o comportamento dos solos com esta finalidade. Durante a construção dos aterros foram realizados ensaios de carga com placa e ensaios de carga com pneu. A análise estrutural dos solos da fundação dos pavimentos, pelo método dos elementos finitos, permitiu concluir que a utilização do modelo elástico não-linear foi a metodologia mais adequada à modelação do comportamento observado durante os ensaios. A consideração de comportamento elástico linear, tão corrente no dimensionamento dos pavimentos, mostrou-se inadequada e com tendência para subestimar a rigidez da fundação.

ABSTRACT

The main objective of this paper is to point out the importance of non linearity of soils foundation behaviour in the road pavement modelling, for structural design purposes. The monitoring of two full-scale instrumented pavements in a road in Lisbon had allowed to this objective. During the test sections constructions, plate load tests and wheel load tests were carried out. The structural analysis of soils behaviour, by the finite elements method, allowed to conclude that the best adjustment to the experimental results was performed with the non-linear elastic model. The elastic linear behaviour, so worldwide used in pavements design, has shown inadequate and with trend to under predict foundation stiffness.

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento adequado do comportamento geotécnico dos solos de fundação é essencial à análise estrutural dos pavimentos rodoviários. No entanto, é ainda corrente a prática de dimensionamento basear os seus cálculos em modelos de comportamento elástico linear, não só para as camadas de fundação, mas também para os próprios materiais do pavimento. Esta simplificação tem derivado essencialmente das dificuldades de caracterizar experimentalmente os materiais. A investigação científica neste domínio tem sido orientada pela definição de modelos dos solos mais ajustados ao comportamento da fundação evidenciado quer em ensaios de laboratório quer na observação de pavimentos experimentais. Nomeadamente, a realização de ensaios triaxiais cíclicos tem mostrado que o módulo reversível dos solos depende do estado de tensão aplicado, ou seja, que o comportamento é claramente não-linear. Assim, a utilização de correlações empíricas baseadas em resultados de ensaios, como é o caso mais corrente do ensaio CBR, apenas deve ser considerada como uma mera via de avaliação qualitativa da deformabilidade do solo.

Aproveitando a construção de um dos lanços do itinerário complementar IC 17 em Lisboa, mais conhecido por CRIL (Circular Regional Interior a Lisboa), procedeu-se à instrumentação e à realização de ensaios de carga ainda na fase de execução dos aterros e dos pavimentos. Este estudo experimental foi desenvolvido no âmbito de uma tese de Doutoramento que decorreu no Instituto Superior Técnico, em colaboração com a actual Estradas de Portugal, E.P.E., sobre a modelação do comportamento estrutural de pavimentos rodoviários flexíveis (Neves, 2001). No 8º Congresso Nacional de Geotecnia, realizado no Laboratório Nacional de Engenharia Civil em 2002, os autores apresentaram uma comunicação, baseada naquele trabalho, sobre o contributo da observação de trechos experimentais na modelação do comportamento estrutural de pavimentos flexíveis (Neves e Gomes Correia, 2002). Na presente comunicação é feita uma breve descrição das características dos aterros dos trechos experimentais, da instrumentação e da metodologia seguida na realização dos ensaios de carga.

Na análise do comportamento dos pavimentos dos trechos experimentais durante os ensaios de carga utilizaram-se dois modelos distintos para o comportamento reológico dos solos: o modelo elástico não-linear de Dawson e Gomes Correia (1996) através do método dos elementos finitos; o modelo elástico linear para cada uma das sub-camadas em que foi dividida a fundação, tal como é recomendado por alguns autores para ter em conta indirectamente a não-linearidade do comportamento, utilizando o método tradicional de múltiplas camadas elásticas lineares.

A análise do comportamento da fundação durante os ensaios de carga, segundo as duas metodologias, permitiu confirmar a importância de considerar a não-linearidade do comportamento dos solos nos métodos de análise estrutural para efeitos de dimensionamento dos pavimentos. Com efeito, a utilização do modelo não-linear foi o método que se mostrou mais adequado à modelação dos solos de fundação. A aplicação do modelo elástico linear, admitindo meio homogéneo e semi-infinito, deu resultados não satisfatórios e que subestimaram a rigidez dos solos, tendência confirmada por outros autores (Gomes Correia, 2001).

2. MODELOS DE COMPORTAMENTO REVERSÍVEL DOS SOLOS

O conhecimento adequado dos modelos de comportamento dos solos que constituem a fundação dos pavimentos, traduzidos por relações tensões-deformações designadas por leis constitutivas ou reológicas, é fundamental para que, ao serem integrados nos modelos de resposta dos pavimentos, seja possível o cálculo realista dos estados de tensão, deformação e deslocamentos induzidos pelas solicitações aplicadas aos pavimentos, indispensável a um dimensionamento estrutural dos pavimentos que satisfaça, não só critérios técnicos, mas também critérios económicos.

O comportamento elástico linear tem sido o modelo mais correntemente usado, pela sua simplicidade, de relacionar tensões e deformações no dimensionamento estrutural das camadas dos pavimentos e das suas fundações. No entanto, o comportamento dos solos de fundação e também de outros materiais, como é o caso dos materiais granulares das camadas de sub-base e base dos pavimentos, é caracterizado por curvas tensão-deformação que correspondem a relações não-lineares, o que leva à definição de parâmetros variáveis para relacionar diferentes valores de tensão com a deformação correspondente.

Contudo, o comportamento mecânico dos solos, quando estes são submetidos a carregamentos repetidos como aqueles que são induzidos pela passagem do tráfego, é complexo e depende de muito factores, como por exemplo do estado de tensão e deformação aplicado, da história de tensões, da frequência e da amplitude do carregamento, do número de ciclos de carregamento, do estado de compactação, da anisotropia, da sucção e do teor em água (Neves, 2001). Perante esta complexidade e diversidade de comportamentos, a instrumentação e observação, quer em

laboratório quer em pavimentos construídos em pista ou em serviço, são fundamentais no contínuo aperfeiçoamento dos modelos de comportamento e, conseqüentemente, a sua validação e calibração contribuem para uma implementação mais generalizada no dimensionamento racional dos pavimentos, assistido por meios de cálculo automático cada vez mais potentes.

O ensaio triaxial tem sido reconhecido consensualmente por muitos investigadores como um dos ensaios mais adequados à caracterização do comportamento reversível dos solos, permitindo a validação e calibração de modelos mais ajustados ao comportamento real evidenciado pelos solos na fundação dos pavimentos. De um modo geral, no caso de solos argilosos, os modelos de comportamento relacionam o módulo reversível (M_r) com a tensão deviatória cíclica, q , ou com as relações q/σ_3 ou q/p'_0 , mostrando, também, que o módulo reversível depende da tensão de confinamento (σ_3) e da tensão normal média efectiva (p'_0). Estas leis salientam o comportamento não-linear dos solos argilosos quando sujeitos a carregamentos cíclicos.

Dawson e Gomes Correia (1996) propuseram um modelo simples para solos argilosos definido pela seguinte expressão:

$$M_r = C + A p'_0 - B q_r$$

em que A , B e C são constantes experimentais. A tensão normal média efectiva é dada por:

$$p'_0 = p_0 - u$$

onde p_0 é a tensão normal média devida ao peso próprio e u é a pressão intersticial da água calculada pela expressão:

$$u = \alpha p_0 - S$$

sendo que S é a sucção, expressa em unidades de pressão, e α é um coeficiente que pode ser estimado a partir dos limites de consistência do solo.

Estes autores mostraram o bom ajustamento deste modelo a dois solos finos. A Figura 1 dá um exemplo de aplicação deste modelo à previsão do módulo reversível de um solo argiloso ensaiado por Loach (1987), sendo notório o adequado ajustamento aos valores experimentais. Outros autores têm estudado a influência da não-linearidade dos solos com base neste modelo (Guezouli et al., 1995).

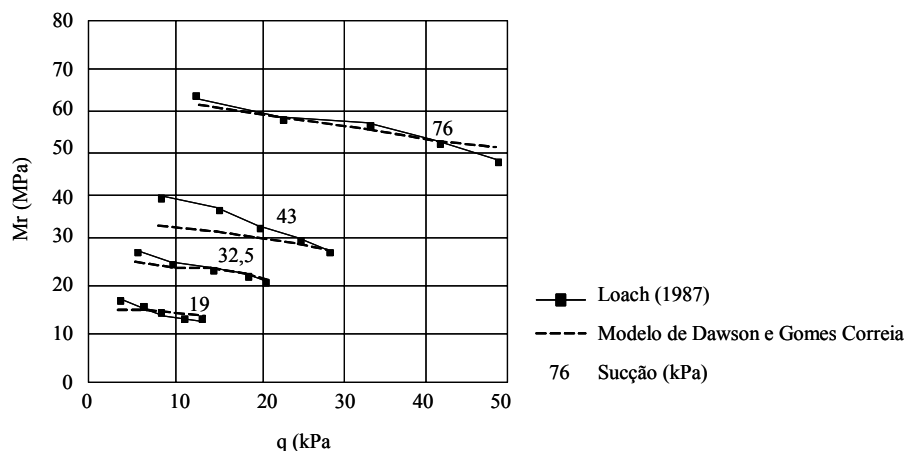


Figura 1 – Ajustamento do modelo não-linear à previsão do módulo reversível (Dawson e Gomes Correia, 1996)

3. ESTUDO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO NÃO-LINEAR

3.1 Descrição dos trechos experimentais

Conforme já referido na introdução, os trechos experimentais que serviram de base ao estudo que agora se apresenta localizam-se no lanço Pontinha/Odivelas/Olival Basto do IC17 (CRIL). Trata-se de um itinerário com características de via rápida e está integrado na Rede Complementar dos Acessos Norte a Lisboa. A construção deste lanço iniciou-se em Outubro de 1994 e a abertura ao tráfego ocorreu em Abril de 1997. O pavimento da obra é do tipo flexível constituído por camada de sub-base em material granular e por camadas de base, regularização e desgaste em misturas betuminosas. A descrição mais pormenorizada das características de projecto e construção da obra, em geral, e dos trechos experimentais, em particular, é apresentada por Neves (2001).

Um dos trechos experimentais – CRIL1 – localizou-se no Restabelecimento 7 (próximo do Nó de Odivelas) e o outro trecho experimental – CRIL2 – localizou-se no Nó da Pontinha, em plena via. Ambos os trechos experimentais estão localizados em aterro com alturas variáveis consoante a topografia do terreno natural e a inclinação da rasante. Com base nos elementos de projecto relativos ao traçado em perfil longitudinal, estimou-se a variação da espessura dos aterros na zona dos trechos experimentais: o aterro do trecho CRIL tem uma altura variável de 2,0 a 2,5 m; o aterro do trecho CRIL2 tem uma altura compreendida entre 6,60 e 7,0 m.

A execução dos aterros iniciou-se em 1995, mas a construção da maior parte dos aterros decorreu de Julho até ao início do mês de Outubro de 1996. Os aterros estão fundados nos terrenos “in situ” do nível estratigráfico designado por “Formação de Benfica” e procedeu-se sempre à decapagem da terra vegetal e saneamento dos aterros recentes. As sucessivas camadas dos aterros foram compactadas com cilindro de rasto liso BOMAG BW 217 D (cilindro de tipo V4 segundo a classificação SETRA/LCPC).

3.2 Caracterização dos materiais

Os terrenos existentes ao longo do traçado e nas zonas de empréstimo que foram utilizados na construção dos aterros pertencem, essencialmente, à “Formação de Benfica”, de idade Oligocénica. Na região de Lisboa este complexo litológico é muito heterogéneo, englobando argilas muito duras a rijas de cores em geral avermelhadas, areias frequentemente muito compactas, seixos e calhaus e ainda alguns níveis calcários e de arenitos calcários.

No Quadro 1 são apresentadas as principais características de amostras de solo consideradas representativas dos materiais utilizados na construção dos aterros nos locais dos trechos experimentais: o solo representado pela Amostra nº 49 foi utilizado nas primeiras camadas do aterro do trecho CRIL2; o solo da Amostra nº 318 foi utilizado na parte restante do aterro do trecho CRIL2 e na totalidade do aterro do trecho CRIL1 (Neves, 2001).

O controlo de compactação dos aterros baseou-se em ensaios com o gamadensímetro, da marca Troxler e modelo nº 3440. Os ensaios para obtenção da massa volúmica foram realizados por emissão directa desde a profundidade de 20 cm. Os ensaios para obtenção do teor em água volumétrico foram executados por reflexão a partir da superfície. A análise estatística dos resultados dos ensaios permitiu obter os valores médios e os desvios padrão para o teor em água (w) e a massa volúmica seca (ρ_d) que se apresentam no Quadro 2. Um estudo realizado nesta obra, comparando os resultados obtidos pelo gamadensímetro, a garrafa de areia e a secagem em estufa, veio confirmar a importância de corrigir os valores do gamadensímetro (Neves, 2001).

Quadro 1 – Principais propriedades dos solos

Amostra nº		49	302	318
Data dos ensaios		Maio de 1995	Outubro de 1995	Outubro de 1995
Análise granulométrica (LNEC E 239)				
Peneiros (ASTM E 11)		% de material acumulado que passa		
Abertura da malha (mm)	Nº			
37,5	1 ½"	---	---	100,0
25,0	1"	---	---	99,2
19,0	¾"	---	---	97,4
12,5	½"	100,0	---	96,4
9,50	3/8"	99,7	100,0	94,8
4,75	4	96,9	96,0	91,3
2,00	10	90,8	92,0	82,6
0,425	40	65,8	77,0	52,2
0,106	140	51,3	(1)	43,1
0,075	200	37,6	56,0	37,8
Limites de consistência (%) (NP 143)				
w _L (limite de liquidez)		61	60	61
w _P (limite de plasticidade)		22	32	33
Classificação do solo	ASTM D 2487	SC – areia argilosa	MH – silte elástico arenoso	SM – areia siltosa
	AASHTO M 145	A-7-6 (8)	A-7-5 (14)	A-7-5 (5)
Compactação pesada (LNEC E 197)				
Massa volúmica seca máxima (g/cm ³)		1,79	1,92	1,92
Teor em água óptimo (%)		16,1	12,9	13,2
CBR (%) (LNEC E 198)				
Penetração (GC=95%; w _{opt} +2%)	2,5 mm	(2)	4	(2)
	5,0 mm		5	

(1) Peneiro não utilizado.

(2) Não foi possível realizar o ensaio.

Quadro 2 – Controlo de compactação dos aterros

Trecho	w (%)		ρ _d (g/cm ³)	
	média	desvio padrão	média	desvio padrão
CRIL1	12,4	1,89	1,82	0,0545
CRIL2	12,6	1,34	1,84	0,0408

3.3 Instrumentação dos trechos experimentais

Os trechos experimentais foram instrumentados com o objectivo de medir extensões, temperaturas e teores em água nas camadas do pavimento e da fundação, quando submetidos a ensaios de carga. A instrumentação baseou-se essencialmente na instalação de extensómetros eléctricos de resistência, para medição das extensões nas camadas de fundação, de sub-base granular e de base em macadame betuminoso, e de pares termo-eléctricos para medição das temperaturas nas camadas de misturas betuminosas. Estes instrumentos foram fornecidos pelo LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) de Nantes, França. Neves (2001) apresenta a descrição pormenorizada da instrumentação levada a cabo nos trechos experimentais: instrumentos de medição, equipamentos de leitura e registo e plano de instrumentação.

3.4 Ensaios de carga dos trechos experimentais

No âmbito de um estudo sobre o tratamento com cal dos solos do leito de pavimento, foram realizados ensaios de carga com placa no aterro de fundação do pavimento na plena via desta obra, ao km 2+460. Os solos do aterro deste local são representados pela Amostra nº 302, cujas características são apresentadas no Quadro 1. As características de compactação do solo na zona do ensaio, obtidas também com gamadensímetro, da marca Troxler e modelo nº 3440, são: $w = 12,9\%$ e $\rho_d = 1,80\text{ g/cm}^3$. Pormenores sobre este estudo são apresentados por Gomes Correia et al. (1997). Em virtude da elevada altura do aterro, a interpretação do ensaio considerou a placa rígida apoiada em meio semi-infinito, homogêneo e isotrópico. Na Figura 2a é apresentado o gráfico tensão-deslocamento obtido num dos ensaios. A Figura 2b mostra a variação não-linear do módulo reversível, o que evidencia o comportamento não-linear do solo.

No final da construção dos aterros em cada um dos trechos experimentais, foram realizados ensaios de carga com pneu, segundo o método de ensaio definido pela norma AASHTO T 256, com medição dos deslocamentos verticais à superfície através da viga Benkelman equipada com transdutor de deslocamentos do tipo LVDT permitindo a aquisição automática da linha de influência dos deslocamentos – deflectograma – obtida à passagem do veículo de ensaio. No Quadro 3 indica-se os valores da deflexão reversível total e das deflexões reversíveis intermédias definidas para distâncias de 0 (D0), 0,30m (D30), 0,45m (D45), 0,60m (D60), 0,90m (D90), 1,20m (D120) e 1,50m (D150) à ponta apalpadora da viga Benkelman, obtidos em dois dos ensaios. Estes valores foram obtidos por interpolação do deflectograma.

Os ensaios descritos anteriormente não reflectem a possível influência no comportamento da fundação da existência do pavimento. Assim, quando no trecho CRIL2 já estavam construídas as camadas de leito do pavimento e de sub-base, ambas em materiais granulares (47 cm de espessura), e a camada de base em macadame betuminoso (21 cm de espessura), foram conduzidos ensaios de carga com pneu com medição simultânea das extensões nos extensómetros, nomeadamente naqueles que estavam colocados no topo do aterro de fundação. Nestes ensaios fez-se variar o peso total do camião pelo que, ao aplicar no pavimento diferentes cargas nos rodados do veículo de ensaio, foi possível analisar a linearidade do comportamento dos materiais, em particular dos solos. A Figura 3 mostra a variação das extensões verticais na fundação medidas por dois dos extensómetros instalados. Apesar do número reduzido e da dispersão de resultados, nota-se uma tendência para a diminuição da rigidez do aterro com o incremento de carga do ensaio, e confirma-se a não-linearidade do comportamento para níveis de deformação superiores a 5×10^{-5} .

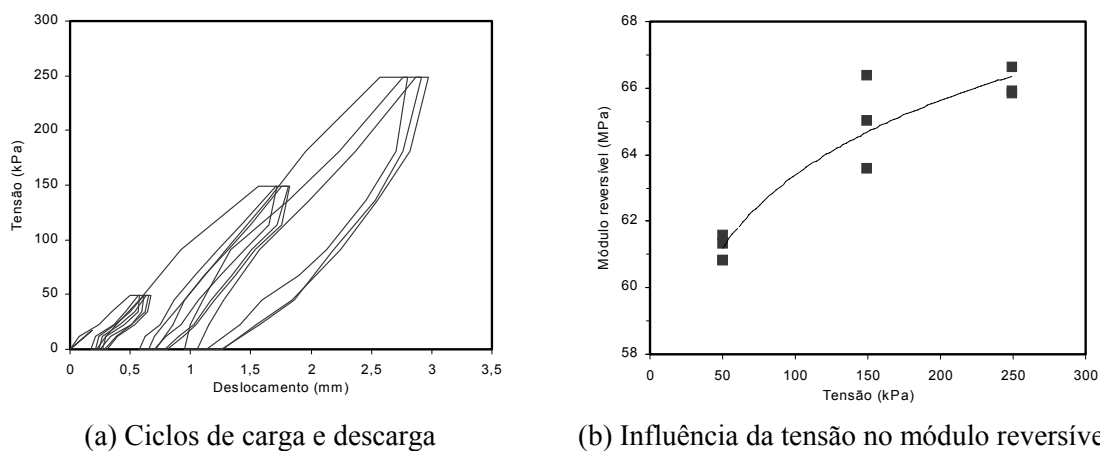


Figura 2 – Comportamento dos solos nos ensaios de carga com placa

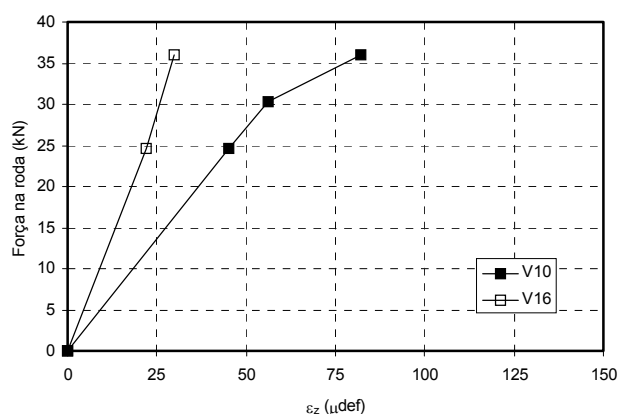


Figura 3 – Comportamento dos solos nos ensaios de carga com pneu

Quadro 3 – Resultados dos ensaio de carga com pneu nos solos

Trecho	Ensaio	Deflexão reversível total ($\times 0,01\text{mm}$)	Deflexões reversíveis intermédias (μm)						
			D0	D30	D45	D60	D90	D120	D150
CRIL1	1F	89	888	360	192	103	35	7	3
CRIL2	2F	56	557	329	240	178	110	80	52

4 MODELAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO OBSERVADO

Através da comparação entre os resultados da observação do comportamento dos trechos experimentais, durante os ensaios de carga, e os resultados da modelação numérica dos pavimentos, para condições idênticas, pretendeu-se analisar o ajustamento do modelo elástico não-linear de Dawson e Gomes Correia (1996), já descrito anteriormente, e analisar o efeito de considerar comportamento elástico linear, conforme é o procedimento mais frequente no dimensionamento corrente de pavimentos.

Os métodos de cálculo utilizados na modelação numérica foram o programa ELSYM5, nas análises estruturais baseadas no comportamento elástico linear dos materiais, e o programa FENLAP, nas análises estruturais considerando modelos de comportamento não-lineares para os materiais. O programa FENLAP é baseado no método dos elementos finitos e foi inicialmente desenvolvido na Universidade de Nottingham, no Reino Unido. Mais recentemente, este programa foi actualizado no Instituto Superior Técnico (Neves, 2001). Trata-se de um programa destinado especificamente à análise numérica do comportamento de pavimentos flexíveis e que considera o pavimento como um sistema axissimétrico em torno do eixo da carga (eixo de simetria axial), simplificando o problema, a priori tridimensional, para bidimensional. Esta simetria radial em torno do eixo da carga é tanto geométrica como mecânica. O pavimento é, também, considerado como um sistema de camadas horizontais, mas permite considerar com relativa facilidade modelos de comportamento não-linear para os materiais.

Na modelação do comportamento dos trechos experimentais utilizou-se para os solos duas metodologias: o modelo de Dawson e Gomes Correia e a divisão dos aterros em sub-camadas com comportamento elástico linear e admitir que o módulo de deformabilidade é crescente com a profundidade da camada, tal como se representa na Figura 4. Esta divisão do aterro permite modelar indirectamente a não-linearidade do comportamento dos solos de fundação utilizando, ainda, o modelo de múltiplas camadas com elasticidade linear.

As diferentes hipóteses de comportamento dos solos consideradas para os dois trechos experimentais são apresentadas no Quadro 4, de acordo com a simbologia da Figura 4: em ambos os trechos admitiu-se o modelo de comportamento elástico linear, quer considerando meio elástico semi-infinito e homogéneo (Hipóteses 1.1 e 2.1) quer considerando o meio estratificado, hipótese que inclui sempre a existência do estrato rígido do terreno natural (Hipóteses 1.2, 1.4, 2.2, 2.3, 2.5, 2.6 e 2.7) e o modelo de comportamento elástico não-linear de Dawson e Gomes Correia (Hipóteses 1.3 e 2.4). Os valores dos parâmetros do modelo de Dawson e Gomes Correia utilizados nos estudos paramétricos são apresentados no Quadro 5 e resultaram de uma análise inspirada nos valores dos parâmetros que foram obtidos por aqueles autores para determinados materiais (Dawson e Gomes Correia, 1996). Os valores dos módulos de deformabilidade, considerados nas análises elásticas lineares, resultaram de um estudo paramétrico do comportamento evidenciado noutros ensaios de carga com pneu, realizados não só nos aterros mas também no leito do pavimento em materiais granulares (Neves, 2001).

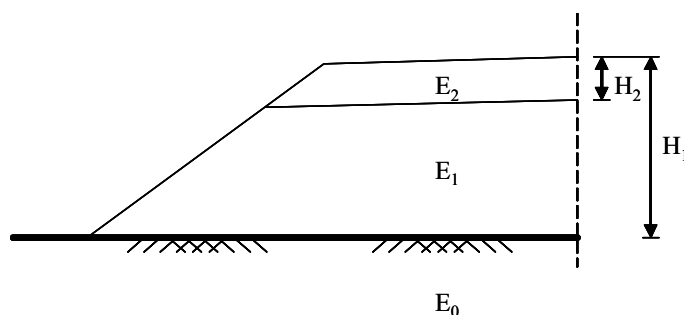


Figura 4 – Divisão do aterro em sub-camadas na análise estrutural

Quadro 4 – Hipóteses consideradas na modelação do comportamento dos solos

Trecho	Hipótese	$E_0^{(1)}$ (MPa)	E_1 (MPa)	H_1 (m)	E_2 (MPa)	H_2 (m)
CRIL1	1.1 ⁽²⁾	85	85	2,30		⁽³⁾
	1.2	2000	81	2,30		⁽³⁾
	1.3	2000	Modelo elástico não-linear ⁽⁴⁾			
	1.4	2000	200	2,30		⁽³⁾
CRIL2	2.1 ⁽²⁾	158	158	6,80		⁽³⁾
	2.2	2000	152	6,80		⁽³⁾
	2.3	2000	500	6,80	140	2,04
	2.4	2000	Modelo elástico não-linear ⁽⁴⁾			
	2.5	2000	500	6,80	81	2,04
	2.6	2000	500	6,80	200	2,04
	2.7	2000	500	6,80	260	2,04

⁽¹⁾ Meio semi-infinito.

⁽²⁾ Hipótese de meio homogéneo e semi-infinito.

⁽³⁾ Camada inexistente.

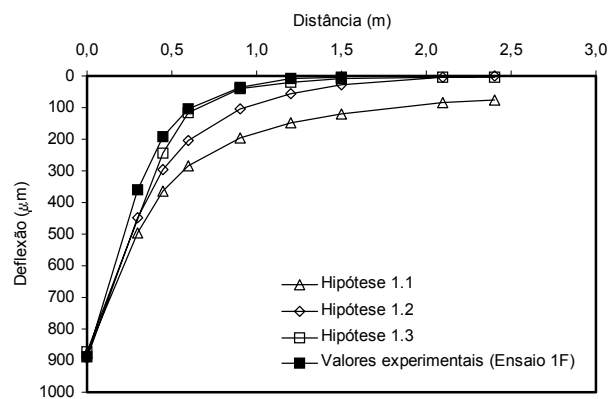
⁽⁴⁾ Consultar o Quadro 5.

Quadro 5 – Parâmetros do modelo elástico não-linear

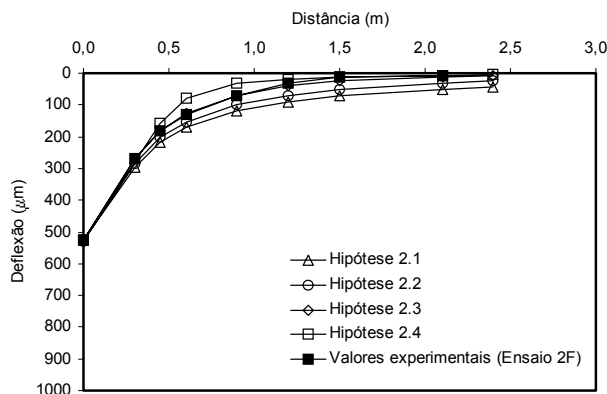
Parâmetros do modelo	A	B	C (kPa)
Hipótese	1.3	1	21000
	2.4	1	34000

Os ensaios de carga com viga Benkelman realizados nos aterros permitiram analisar directamente o comportamento dos solos dos pavimentos, evidenciando claramente a não-linearidade do seu comportamento. A Figura 5 apresenta a modelação dos deflectogramas do Quadro 3 para as hipóteses apresentadas nos Quadros 4 e 5. Desta figura conclui-se que:

- A aplicação do modelo elástico não-linear revelou o melhor ajustamento às deflexões medidas em ambos os trechos experimentais.
- A utilização do modelo elástico linear, admitindo meio homogéneo e semi-infinito, apresentou-se como a hipótese menos ajustada ao comportamento observado. De um modo geral, os valores das deflexões de cálculo mostraram tendência para serem superiores aos valores medidos. Este facto significa que a hipótese de linearidade subestima a rigidez dos solos. Esta hipótese é tanto mais desajustada quanto menor for a altura do aterro, pois a proximidade do estrato do terreno natural, normalmente de maior rigidez, ainda tem influência no comportamento da fundação. De facto, foi esta a constatação no trecho CRIL1, pois o terreno natural está a menor profundidade. A mesma influência não foi evidenciada no trecho CRIL2 onde o aterro tem maior altura.
- A divisão do aterro em camadas, conforme foi observado no caso do trecho CRIL2, foi a hipótese que conduziu ao melhor ajustamento dos resultados experimentais. De notar que este facto confirma indirectamente a hipótese de comportamento não-linear.



(a) Trecho CRIL1



(b) Trecho CRIL2

Figura 5 – Modelação do comportamento dos solos nos ensaios de carga com pneu

5. CONCLUSÃO

Com esta comunicação pretendeu-se salientar a importância do comportamento não-linear dos solos de fundação para efeitos do dimensionamento de pavimentos flexíveis. Tendo em conta que o dimensionamento corrente de pavimentos recorre a programas baseados em modelos de múltiplas camadas elásticas lineares, não só para as camadas do pavimento mas também para a respectiva fundação, este aspecto assume particular importância de investigação do ponto de vista técnico-económico. O trabalho apresentado baseia-se na utilização do modelo elástico não-linear apresentado por Dawson e Gomes Correia (1996). Apesar de não ter sido possível realizar ensaios de laboratório de validação e calibração deste modelo aplicado aos solos estudados, a modelação do comportamento da fundação dos pavimentos de dois trechos experimentais durante a realização de ensaios de carga, recorrendo à experiência da sua aplicação divulgada noutros trabalhos, permitiu confirmar a não-linearidade do comportamento dos solos.

Da modelação numérica apresentada nesta comunicação é possível tirar as seguintes conclusões principais:

- A utilização do modelo não-linear foi a metodologia mais adequada à modelação do comportamento dos solos de fundação.
- A utilização do modelo linear, admitindo meio homogéneo e semi-infinito, foi a metodologia que mais se desajustou dos resultados experimentais, tendendo a subestimar a rigidez dos solos.
- Na consideração de comportamento linear, foi a divisão da fundação em sub-camadas que permitiu a melhor aproximação aos resultados experimentais, confirmando indirectamente a hipótese de comportamento não-linear dos solos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Dawson, A. R., Gomes Correia, A. (1996). The effects of subgrade clay condition on the structural behaviour of road pavements. Proceedings of the European Symposium Euroflex 1993, Lisboa. Flexible Pavements, A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 113-119.

Gomes Correia, A. (2001). Soil mechanics in routine and advanced pavement and rail track rational design. A. Gomes Correia & Brandl (eds.), A.A. Balkema, Rotterdam.

Gomes Correia, A., Neves, J. M. C., Fonseca, P. (1997). Caracterização mecânica “in situ” de camadas da fundação de pavimentos. Actas do 6º Congresso Nacional de Geotecnia, Lisboa, Volume 2, pp. 794-800.

Guezouli, S., Gomes Correia, A., e Almeida, J. A. (1995). Estudo da influência da não-linearidade do solo no comportamento mecânico da estrutura de um pavimento flexível. Actas do IV Encontro Nacional de Mecânica Computacional, Lisboa, Volume 2, pp. 853-863.

Loach, S. C. (1987). Repeated loading of fine grained soils for pavement design. Tese de Doutoramento. University of Nottingham, UK.

Neves, J. M. C. (2001). Contribuição para a modelação do comportamento estrutural de pavimentos rodoviários flexíveis. Tese de doutoramento. Universidade Técnica de Lisboa.

Neves, J. M. C., Correia, A. G. (2002). O contributo da observação de trechos experimentais na modelação do comportamento estrutural e pavimentos flexíveis. Actas do 8º Congresso Nacional de Geotecnia, Lisboa. Sociedade Portuguesa de Geotecnia, Volume 3, pp. 1421-1431.