

RELAÇÃO ENTRE MÓDULO DE DEFORMABILIDADE E CBR NO ESTUDO DA FUNDAÇÃO DUM PAVIMENTO RODOVIÁRIO FLEXÍVEL

Hermínia Maria Mesquita Morais, Manuel J. Costa Minhoto^(*)

Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, Portugal

^(*)*Email:* minhoto@ipb.pt

RESUMO

Este artigo apresenta um estudo sobre a relação entre o módulo de deformabilidade (E) dum leito de pavimento e o correspondente índice californiano de capacidade de suporte (CBR) avaliado em laboratório, como forma de caracterizar mecanicamente a fundação dum pavimento rodoviário flexível. O estudo realizado envolveu uma análise da sensibilidade dos pavimentos rodoviários flexíveis à variação da capacidade de suporte da fundação, em termos de resposta mecânica, complementado por uma validação baseada em ensaios, correntes, laboratoriais e de campo.

O estudo envolveu a realização de ensaios *in situ* que consistiram na avaliação da deformabilidade de alguns solos de fundação (leito de pavimento), localizados em algumas obras de terraplanagens a decorrer na zona de Bragança, por meio do ensaio de carga em placa, observando as condições de compactação. Este estudo foi complementado com ensaios laboratoriais de identificação e caracterização dos solos constituintes da fundação ensaiada *in situ*, bem como os correspondentes valores de CBR.

Este trabalho permitiu comparar os resultados com as relações de caracterização mecânica da fundação (E vs CBR) preconizadas no âmbito da metodologia de conceção de pavimentos flexíveis, proposta pela Shell.

Palavras-chave: Pavimento flexível, módulo de deformabilidade, leito de pavimento, CBR.

1. INTRODUÇÃO

Um pavimento rodoviário flexível é normalmente considerado como uma estrutura estratificada, constituída por várias camadas, betuminosas e granulares, de espessura finita, e construída sobre uma superfície de terreno natural, compacto, resultante dos trabalhos de terraplanagem e designada por fundação.

O desempenho dum pavimento rodoviário flexível ao longo da sua vida em serviço, depende fundamentalmente do comportamento mecânico das camadas que o constituem, quando sujeitas ao efeito combinado das ações do tráfego e da temperatura. Neste contexto, o papel das propriedades mecânicas das camadas do pavimento, particularmente das propriedades mecânicas do solo de fundação do pavimento, assume importância fundamental naquele desempenho.

A maioria das metodologias empírico-mecanicistas de dimensionamento de pavimentos rodoviários envolve a necessidade de caracterização mecânica da fundação do pavimento. Esta camada é considerada como uma camada de solo natural de características melhoradas,

com espessura aproximada de 1 metro, localizada imediatamente abaixo da última camada de pavimento e designada por leito de pavimento. A caracterização mecânica desta camada baseia-se normalmente na caracterização do seu módulo de deformabilidade (E). Em situações em que se apresenta inviável a avaliação direta deste parâmetro (E), recorre-se normalmente a expressões, propostas pelas diversas metodologias existentes, como por exemplo a metodologia da Shell (*Shell, 1985*), que relacionam este parâmetro com outros parâmetros de caracterização da fundação mais expeditos e de uso universal. Um dos parâmetros mais conhecidos e divulgados tendo em vista uma caracterização empírica da resistência do solo de fundação é o índice californiano de capacidade de carga, CBR (*California bearing ratio*).

O estudo realizado consistiu no estabelecimento, possível, duma relação entre os módulos de deformabilidade (E), obtidos em alguns leitos de pavimento, e os correspondentes índices californianos de capacidade de suporte (CBR), avaliados laboratorialmente em amostras representativas dos mesmos, em situações específicas de algumas obras de terraplanagens realizadas na região de Bragança.

O trabalho que se apresenta, envolveu ainda a realização prévia de um estudo de sensibilidade sobre a dependência do comportamento dum pavimento flexível da variação das propriedades mecânicas da sua fundação, para enquadramento do tema e compreensão da importância da caracterização da fundação num contexto de dimensionamento. A este estudo prévio seguiu-se a realização de ensaios *in situ* de avaliação da deformabilidade dos solos de leito de pavimento por meio do ensaio de carga em placa, observando as suas condições de compactação, complementados com ensaios laboratoriais de identificação de amostras dos mesmos solos, bem como os correspondentes valores de CBR. Da análise destes resultados laboratoriais deduziu-se uma relação entre os parâmetros avaliados, constituindo uma contribuição para uma melhoria das relações existentes.

Neste contexto, este trabalho visou ainda comparar as relações obtidas com as relações do mesmo tipo preconizadas na metodologia de concepção de pavimentos flexíveis, proposta pela Shell (*Shell, 1985*), no que diz respeito à caracterização mecânica da fundação num contexto de dimensionamento. Nesta metodologia é proposta, como estimativa razoável, a seguinte relação para obtenção, em solos e camadas granulares, do módulo de deformabilidade em função do CBR:

$$E_{sf} (MPa) = 10 \times CBR (\%) \quad (1)$$

2. INFLUÊNCIA DA FUNDAÇÃO NO DESEMPENHO DUM PAVIMENTO

O estudo de sensibilidade realizado teve em vista analisar a influência da variação da capacidade de suporte da fundação no desempenho dos pavimentos, sendo este expresso pelo número de eixos padrão que uma estrutura de pavimento admite até à sua ruína por um dos dois critérios normalmente adotados: fadiga e deformação permanente.

Concretamente, este estudo consistiu na determinação, para diversas situações de análise (estrutura de pavimento vs capacidade de suporte da fundação), do número acumulado admissível de eixos padrão de 80 kN (NAEP₈₀), usando a metodologia proposta pela Shell para dimensionamento de pavimentos flexíveis, considerando as condições climáticas referentes à região de Bragança e considerando a variação das características mecânicas do solo de fundação.

O estabelecimento das diversas situações de análise baseou-se na adoção de diferentes tipos de estruturas, de pavimento, quer em termos de geometria quer em termos de características mecânicas, por forma a conferir um carácter representativo das estruturas mais utilizadas em obras de pavimentação correntes no nosso país/região. A maior parte da extensão da Rede Rodoviária Nacional é formada por pavimentos do tipo flexível, com uma constituição típica composta por: (i) um conjunto de camadas superiores constituídas por materiais betuminosos (camada de desgaste, camada de regularização e, em alguns casos, uma camada de base betuminosa) e (ii) por um conjunto de camadas inferiores, colocadas acima da fundação, constituídas por materiais granulares (camadas de base e de sub-base).

Neste contexto, foram considerados quatro tipos de estruturas de pavimento, apresentados na tabela 1, envolvendo os seguintes materiais constituintes das camadas: Bb₁ – betão betuminoso em camada de desgaste; Bb₂ – betão betuminoso em camada de regularização; M_c – macadame betuminoso em camada de base; C_g – camada constituída por agregado de granulometria extensa britado (*tout-venant*).

Tabela 1 - Pavimentos considerados na análise

Camada	Estruturas de Pavimento							
	P1		P2		P3		P4	
	Espessura (m)	Tipo	Espessura (m)	Tipo	Espessura (m)	Tipo	Espessura (m)	Tipo
Desgaste	0,05	Bb1	0,04	Bb1	0,04	Bb1	0,05	Bb1
Regularização	0,06	Bb2	0,06	Bb2	0,06	Bb2	0,08	Bb2
Base	0,24	Mc	0,15	Mc	-	granular	0,20	granular
Sub-base	0,2	Cg	0,2	granular	0,2	granular	-	-

A consideração de diversos tipos de solos de fundação consistiu no estabelecimento de diversos valores do CBR do solo de fundação e obtendo, a partir deste, as correspondentes propriedades mecânicas usando a expressão (1). Os valores do CBR adotados variaram entre 2,5% e 25% em intervalos sucessivos de 2,5% em 2,5%. Na figura 1 apresenta-se o esquema representativo do processo de simulação realizado tendo em vista o estudo de sensibilidade proposto.

Neste processo de simulação as propriedades mecânicas das camadas betuminosas foram determinadas para uma temperatura de serviço de 20°C, para uma velocidade dos veículos pesados de 50 Km/h e para um betume asfáltico do tipo 50/70 (Pen₂₅=60°C e Tab=57°C). Os módulos de deformabilidade das camadas granulares foram determinados a partir dos módulos das camadas subjacentes, usando a seguinte expressão:

$$E \text{ (MPa)} = k \times E_{\text{sub}} \text{ (MPa)} \quad (2)$$

Onde:

E_{sub} – Módulo da camada subjacente (MPa);

$k = 0.2 \times h^{0.45}$;

h = espessura da camada (mm).

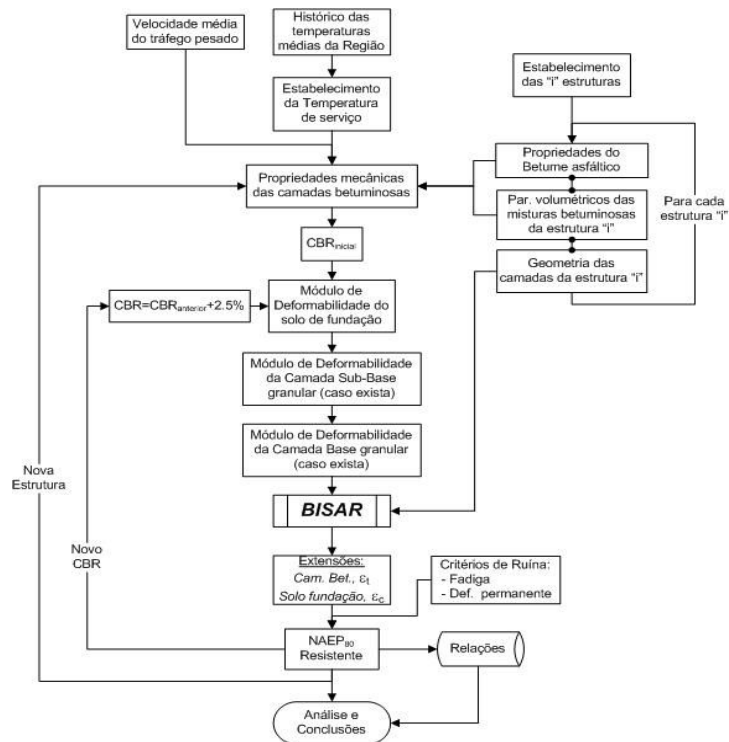


Figura 1 – Organograma do processo de simulação realizado rodoviário flexível (adaptado de Silva, 2005).

A determinação do número admissível, acumulado, de eixos padrão de 80 kN ($NAEP_{80}$) foi realizada com base na aplicação dos critérios de ruína indicados para os pavimentos flexíveis, adotando-se as leis de fadiga e de deformação permanente propostas pelo método da Shell, expressos em função do estado de extensão verificado no pavimento para as diversas situações de análise provocado pela carga do eixo padrão proposta pela Shell (Shell, 1985). O estado de extensão foi obtido como resultado da aplicação desta carga padrão em todas as situações de análise e foi calculado por via da utilização do programa de cálculo automático BISAR®, com o qual se obtiveram as extensões críticas nos pontos relevantes do pavimento: extensão de tração na base das camadas betuminosas (fadiga) e extensão vertical de compressão, no topo do solo de fundação (deformação permanente). Na tabela 2 apresentam-se, como exemplo, os resultados da simulação de situações de comportamento do pavimento P2 perante a variação da capacidade de suporte da fundação.

Tabela 2 - $NAEP_{80}$ para o pavimento P2

Pavimento P2 – ($T_{serv\ bet}=20,0^{\circ}C$)										
Resultados										
	Sit. 1	Sit. 2	Sit. 3	Sit. 4	Sit. 5	Sit. 6	Sit. 7	Sit. 8	Sit. 9	Sit. 10
$\epsilon_t=$	6,2E-05	5,4E-05	5,0E-05	4,6E-05	4,4E-05	4,2E-05	4,0E-05	3,8E-05	3,7E-05	3,5E-05
$\epsilon_c=$	2,4E-04	1,8E-04	1,5E-04	1,3E-04	1,2E-04	1,1E-04	1,0E-04	9,6E-05	9,0E-05	8,5E-05
$N_{80-fad}=$	9,1E+07	1,7E+08	2,7E+08	3,8E+08	5,1E+08	6,5E+08	8,2E+08	1,0E+09	1,2E+09	1,5E+09
$N_{80-dp}=$	6,4E+07	1,9E+08	3,7E+08	6,2E+08	9,4E+08	1,3E+09	1,8E+09	2,3E+09	3,0E+09	3,7E+09
$NAEP_{80}=$	6,4E+07	1,7E+08	2,7E+08	3,8E+08	5,1E+08	6,5E+08	8,2E+08	1,0E+09	1,2E+09	1,5E+09

ϵ_t – extensão de tração na base das camadas betuminoso; ϵ_c – extensão vertical máxima de compressão no topo do solo de fundação para uma fiabilidade de 95%; N_{80-fad} – número acumulado de eixos padrão de 80 kN admissível à fadiga; N_{80-dp} – número acumulado de eixos padrão de 80 kN admissível à deformação permanente; $NAEP_{80}$ – número acumulado de eixos padrão de 80 kN.

Na figura 2 apresenta-se a variação da vida dos pavimentos em função da capacidade de suporte do solo de fundação para os quatro tipos de pavimentos.

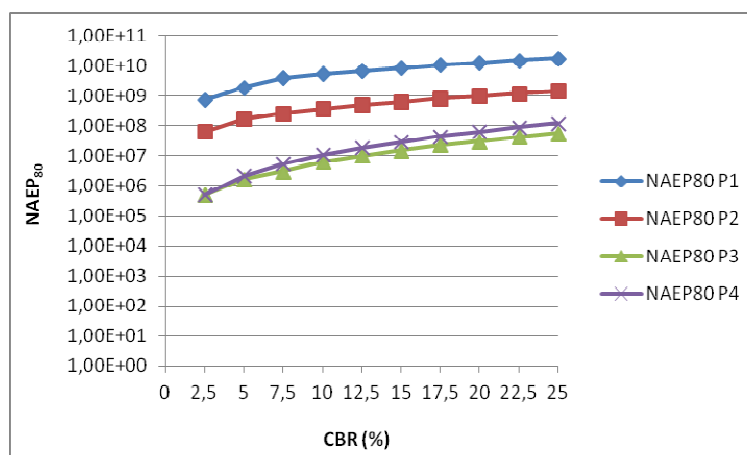


Figura 2 – Variação da vida dos pavimentos em função da capacidade de suporte do solo de fundação

Da figura 2 constata-se que o $NAEP_{80}$ aumenta à medida que aumenta o valor do CBR da fundação. Conclui-se que é fundamental uma boa caracterização do solo de fundação pela dependência do $NAEP_{80}$ da variação do valor de CBR. Da análise da figura constata-se que quanto menos espesso for o pavimento mais sensível é o seu desempenho às condições de capacidade de suporte do solo de fundação, reforçando a importância da correta caracterização do solo de fundação dos pavimentos, em particular em redes rodoviárias menos importantes, ou seja, com pavimentos menos espessos, como é a da região de Bragança.

3. AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DA FUNDAÇÃO

A avaliação das propriedades do solo de fundação envolveu a avaliação *in situ* de camadas de solo de fundação, recorrendo a ensaios de carga em placa (ECP) segundo as normas AFNOR NF P94-117-1, DIN 18134 e ASTM D1194 (1989), e na avaliação laboratorial da capacidade de suporte de amostras dos mesmos solos, através de ensaios CBR. O ensaio de carga em placa (ECP) é um dos ensaios considerados adequados para estabelecimento das características carga-assentamento de solos de fundação, apesar de ser um ensaio moroso. Estes ensaios são efetuados normalmente para controlo da compactação e para determinação de módulos de deformabilidade.

Os solos em estudo são provenientes de escavação e empregues na execução de aterros, executados em camadas de aproximadamente 0,30 m cada e compactadas com cilindros de rasto liso. Em cada ponto representativo das camadas ensaiadas foram efetuados três ensaios de carga estática com placa e ensaios com o gamadensímetro nuclear, tendo em vista a caracterização do seu estado de compactação. Após a execução destes ensaios, recolheram-se amostras de solo, em cada ponto, para posteriores ensaios em laboratório, de forma a caracterizar as propriedades físicas e mecânicas (CBR) dos materiais em estudo.

Nos ensaios de carga em placa foi usada uma placa rígida (figura 3), de 0,60 m de diâmetro, com uma espessura de 0,26 m, um macaco hidráulico e respetiva bomba, um barómetro para medição das pressões aplicadas, defletómetros para medição dos assentamentos relativos a

uma viga de referência, apoiada fora da zona de influência do ensaio, e um sistema de reação, materializado por um camião carregado, de forma a se poderem obter as características mecânicas do solo em termos de tensão – assentamento.



Figura 3 – Equipamento de ensaio de carga em placa

O ensaio consiste na aplicação de cargas à placa rígida em contacto com a superfície a ensaiar, através do macaco hidráulico apoiado no sistema de reação, e na medição dos deslocamentos motivados por essas cargas, posicionando-se a placa rígida no local a ensaiar. Em cada ensaio de deformabilidade foram efetuados dois ciclos de carga - descarga, sendo os ciclos de descarga e recarga. Os defletómetros no início de cada ciclo de carga colocaram-se a zero. A recarga ocorreu sobre o solo consolidado pelo primeiro carregamento. Os deslocamentos relativos da placa rígida traduzem os assentamentos ocorridos no material em ensaio.

Dos ensaios realizados estabeleceram-se curvas de carga-assentamento para cada ponto, obtendo-se assim os respetivos gráficos, a partir dos quais foram obtidos os correspondentes módulos de deformabilidade. Os valores do módulo de deformabilidade (E), para cada o primeiro ciclo de carga (E_{v1}) e segundo ciclo de carga (E_{v2}), foram calculados através da expressão:

$$E = 1,5 \times \frac{P_s}{s} \cdot r \quad (3)$$

Sendo:

P_s - tensão média sob a placa,

s - assentamento da placa

r - raio da placa.

Na figura 3 são apresentados alguns resultados dos ensaios ECP nos quais se expressam as curvas carga-assentamentos obtidas.

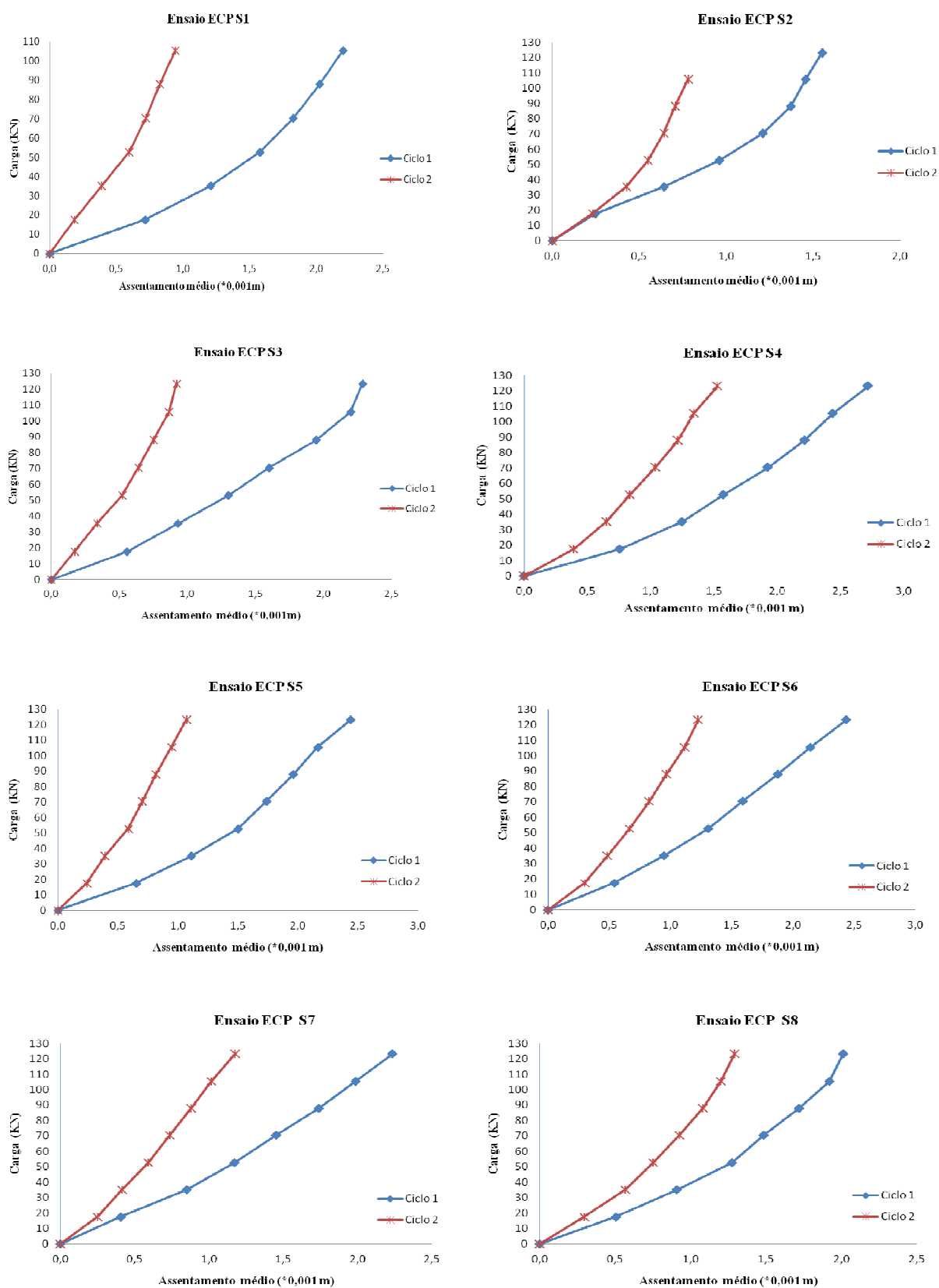


Figura 3 – Curvas “carga – assentamento” resultantes de alguns ensaios realizados

Pela análise dos gráficos da figura 3 confirma-se que o módulo de deformabilidade para o primeiro ciclo de carga é sempre inferior ao do segundo ciclo. Em termos de assentamentos, considerando que o segundo ciclo de carga começa na origem, devido ao facto de após a descarga os deflectómetros serem colocados a zero, verifica-se que os assentamentos são menores no segundo ciclo de carga, pelo facto de o solo se apresentar consolidado após o primeiro ciclo de carga.

Para a totalidade dos pontos ensaiados com ECP constatou-se que os módulos de deformabilidade obtidos para o primeiro ciclo de carregamento (EV_1) estão compreendidos entre 63 MPa e 148 MPa, enquanto para o segundo ciclo de carga (EV_2) os valores se apresentaram entre 113 MPa e 325 MPa, A média dos valores dos módulos de deformabilidade ECP para o primeiro ciclo de carga, é de $EV_{1m} = 85$ MPa e para o segundo ciclo de carga de $EV_{2m} = 165$ MPa. Na figura 4 apresenta-se o conjunto de valores do módulo de deformabilidade.

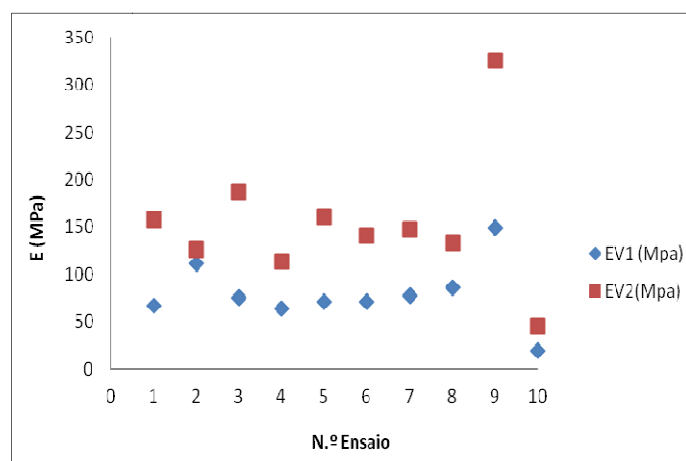


Figura 4 – Módulos de deformabilidade dos ensaios ECP

De cada ponto ensaiado *in situ* foram obtidas amostras que foram ensaiadas tendo em vista a obtenção dos respetivos valores de CBR. Os ensaios CBR foram efetuados segundo os procedimentos da especificação E 198 (LNEC, 1967), sobre provetes compactados para o teor em água ótimo, com 12, 25 e 55 pancadas, e posteriormente sujeitos a embebição. Os ensaios de penetração foram realizados nas amostras após embebição e obtidas as forças correspondentes às penetrações de 2,5 mm e 5 mm, as quais foram relacionadas com as forças de penetração padrão, constantes na norma E198, para obter o valor final do CBR de cada ponto de ensaio. Nas tabelas 3 e 4 apresentam-se alguns resultados dos ensaios laboratoriais.

Tabela 3 – Valores de CBR em amostras de solo compactadas com 55 pancadas

55 Pancadas	Força de penetração (kN)								
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
Penetração a 2,5 mm	147	208	245	378	2574	208	245	585	452
Penetração a 5,0 mm	305	464	476	850	452	366	440	970	694
CBRz (%)	15	23	23	42	22	18	22	48	34
GC (%)	100	100	100	100	100	99	100	100	100

Tabela 4 – Valores de CBR em amostras de solo compactadas com 25 pancadas

25 Pancadas	Amostras								
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
Penetração a 2,5 mm	110	196	208	184	171	159	233	366	378
Penetração a 5,0 mm	233	366	317	366	342	342	366	669	621
CBRz (%)	12	18	16	18	17	16	18	33	20
GC (%)	98	99	99	99	99	97	99	99	98

Com seria de esperar, verifica-se que para provetes compactados com 55 pancadas os valores de CBR são superiores do que em provetes compactados com 25 pancadas. Em todos os provetes se observaram graus de compactação perto de 100%, tendo sido comprados com os obtidos em obra. Nesta foram verificados graus de compactação acima dos 95%.

4. RELAÇÃO ENTRE O MÓDULO DE DEFORMABILIDADE E O CBR

Com os dados disponíveis tentou-se estabelecer uma expressão, do tipo da expressão (1), de forma a explicitar uma relação, caracterizada por um coeficiente adimensional “w”, entre o módulo E (ECP) com o correspondente CBR, com o seguinte formulação:

$$E_{sf} = w \times \text{CBR} \quad (3)$$

onde E_{sf} representa o módulo de deformabilidade do solo de fundação (MPa) e CBR representa o índice CBR, (%).

Na tabela 5 apresentam-se os resultados dos ensaios CBR efetuados em laboratório, assim como os resultados do módulo de deformabilidade E_{v2} obtidos com o ensaio de carga estático com placa (ECP). Nesta tabela apresentam-se os coeficientes de relação entre as duas variáveis para os diversos níveis de compactação das amostras em laboratório. O gráfico da figura 5 apresenta as diversas relações encontradas entre o módulo de deformabilidade e o CBR, para os pontos de ensaio realizados e para as condições máximas de compactação.

Tabela 5 – Resultados finais dos CBR versus ECP

CBR (%)			E_{v2} (MPa)	$k = \frac{E}{CBR_{max}}$	$k = \frac{E}{CBR_{méd}}$	$k = \frac{E}{CBR_{min}}$
Compactação						
Máxima	Média	Mínima				
15	12	9	156,8	10,45	13,07	17,42
23	18	9	126,0	5,48	8,71	17,42
23	16	10	187,0	8,13	9,80	15,68
42	18	12	112,8	2,69	8,71	13,07
22	17	11	160,7	7,30	9,22	14,25
18	16	11	140,4	7,80	9,80	14,25
22	18	12	146,4	6,65	8,71	13,07
48	33	21	133,3	2,78	4,75	7,47
34	30	17	324,5	9,54	5,23	9,22
			Média de k	6,76	8,67	13,54

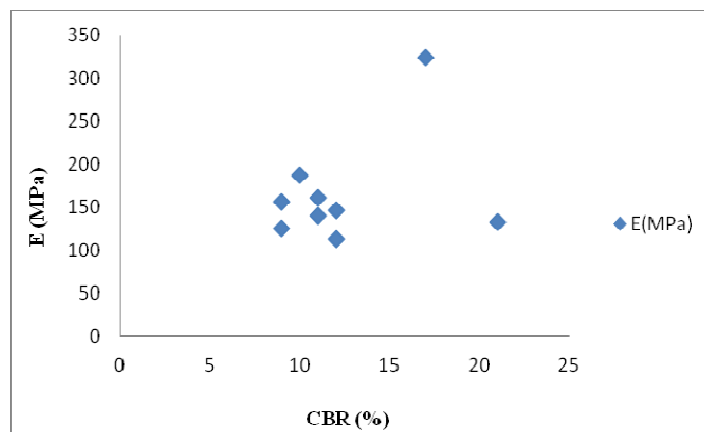


Figura 5 – E versus CBR (compactação máxima =55 pancadas)

Nas condições disponíveis para a realização deste estudo obtiveram-se valores para o coeficiente de relação “w” ($w = E_{sf} / \text{CBR}$) que variam entre 2,7 (para CBR= 42%) e 10,5 (para CBR=15%), resultando um coeficiente de relação médio de $w=6,76$, menor que o $w=10$ proposto pelo método da Shell, propondo-se a seguinte expressão final:

$$E = 6,76 \times \text{CBR (MPa)} \quad (4)$$

6. CONCLUSÕES

No presente artigo apresentou-se um estudo acerca do estudo duma relação, w , entre o módulo de deformabilidade duma fundação e o índice de capacidade de carga da mesma, expresso pelo correspondente CBR. O estudo envolveu, previamente, uma análise de sensibilidade do desempenho dum pavimento em função da capacidade de carga do solo de fundação. Deste estudo de sensibilidade concluiu-se que o desempenho duma estrutura de pavimento, expresso pelo número de eixos padrão admissíveis acumulados, NAEP_{80} , até à ruína do pavimento, é consideravelmente condicionado pela capacidade de suporte da fundação. Quanto menos espesso for o pavimento mais suscetível se apresenta relativamente à variação da capacidade de suporte da fundação.

Da análise dos ensaios realizados à amostragem de solos de fundação obteve-se um coeficiente de relação entre o Módulo (ECP) e o CBR com valor médio de 6,76. O coeficiente obtido diverge do valor médio proposto pelo método da Shell (igual a 10), mas mantém-se no intervalo proposto pela Shell (5 a 20).

Atendendo a que o tipo de informação necessária a um tipo de estudo como o apresentado neste artigo requer uma enorme disponibilidade de dados, neste caso, de obras em execução, qualquer abordagem deste género acaba sempre ser insuficiente por se circunscrever às condições das obras a decorrer à data da realização do mesmo, como foi o caso. Neste contexto, atendendo à quantidade de obras que estiveram na base deste estudo, reconhece-se ser limitada uma proposta de generalização dos resultados do estudo realizado, por este não ter envolvido uma quantidade de solos de fundação representativa de todos os solos da região em que se inseriu. No entanto considerou-se ser importante propor esta contribuição. Do presente estudo resulta a consciência da necessidade de atualização constante da informação existente com ensaios do tipo dos apresentados neste trabalho, por forma a contribuir para um constante ajuste dos resultados obtidos, concretamente do coeficiente de relação entre o módulo de deformabilidade e o CBR da fundação.

REFERÊNCIAS

- ASTM D 1194/72, (1977). Standard Test Method for Bearing Capacity of Soil for Static Load on Spread Footings.
- Branco, F.; Pereira, A. A.; Picado-Santos, L. G., (2008). “*Pavimentos Rodoviários.*” Edições Almedina S.A., Coimbra.
- CEPSA, 2006. “*Manual de Pavimentação - Betumes*”, Barcelona
- LNEC (1971). “*Solos: Ensaio de Compactação*”. E 197, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- Minhoto, M. J. C., (2005). “*Consideração da Temperatura no Comportamento à Reflexão de Fendas dos Reforços de Pavimentos Rodoviários Flexíveis.*” Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade do Minho, Escola de Engenharia, Guimarães.
- Pereira, P. & V., Miranda, (1999). “*Gestão da Conservação dos Pavimentos Rodoviários*”, Edição de autor. Braga.
- Shell, (1985). Shell Pavement Design Manual - Asphalt Pavements and Overlays of road Traffic. Shell International Petroleum, London.
- Silva, H. M. R. D., (2005). “*Caracterização do Mastique Betuminoso e da Ligação Agregado-Mastique. Contribuição para o Estudo do Comportamento das Misturas Betuminosas.*” Tese de Doutoramento em Engenharia Civil – Vias de Comunicação, Universidade do Minho – Escola de Engenharia.
- Santos, M. J. L., (2009). “*Dimensionamento de Camada de Reforço de Pavimentos Rodoviários Flexíveis*”. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro. <http://hdl.handle.net/10773/2404>