

CARACTERIZAÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE E DO CBR PARA O DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS

CHARACTERIZATION OF THE DEFORMABILITY MODULE AND CBR FOR PAVEMENT FOUNDATION DESIGN

Morais, Hermínia Maria Mesquita; Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, Portugal, hmorais@ipb.pt

Minhoto, Manuel J. Costa; Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, Portugal, minhoto@ipb.pt

Paula, António Miguel; Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, Portugal, mpaula@ipb.pt*

**autor para correspondência*

RESUMO

Este estudo tem como objetivo apresentar os resultados da relação entre o módulo de deformabilidade estático (E_{v2}) e do índice californiano de capacidade de suporte (CBR) avaliado em laboratório, para diferentes tipos de solos de fundação (leito de pavimento), localizados em algumas obras de terraplanagens no distrito de Bragança. Permite assim contribuir para a caracterização mecânica de fundações de pavimentos rodoviários flexíveis, particularmente para a relação (E_{v2} vs CBR).

O estudo envolveu a realização de ensaios in situ, concretamente, ensaios de carga em placa (ECP), observando as condições de compactação, assim como ensaios laboratoriais em amostras dos solos constituintes da fundação ensaiada in situ, bem como os correspondentes valores de CBR.

Da análise dos ensaios realizados obteve-se um coeficiente de relação entre o módulo de deformabilidade e o CBR de 5,31 (valor médio). Este valor tende a variar com o tipo de solo. Assim, reconhece-se existir algum cuidado na apresentação duma proposta de generalização dos resultados do estudo realizado.

ABSTRACT

This study aims to present the results of the relationship between the static modulus of deformability (E_{v2}) and the Californian index of bearing capacity (CBR) evaluated in the laboratory, for different types of soil foundation, located in some earthworks in the district of Bragança. This makes it possible to contribute to the mechanical characterization of flexible road pavement foundations, particularly for the ratio (E_{v2} vs CBR).

The study involved carrying out in situ tests, specifically plate load tests (ECP), observing compactness conditions, as well as laboratory tests of the soils of the foundation tested in situ, as well as the corresponding CBR values.

From the analysis of the tests carried out, a coefficient of relationship between E and CBR of 5.31 (mean value) was obtained. This value tends to vary with the type of soil under study. Thus, it is recognized that there is some care in presenting a proposal to generalize the results of the study carried out.

1. INTRODUÇÃO

O estudo que se apresenta consiste na contribuição para a melhoria da representatividade duma relação entre o módulo de deformabilidade (E) duma fundação e o seu correspondente índice californiano de capacidade de carga, CBR, desenvolvida em estudos anteriores (Morais, 2011), (Morais & Minhoto, 2014), (Morais, Minhoto, & Paula, 2018), baseada na caracterização mecânica de leitos de pavimento através de ensaios de carga em placa (ECP) in situ, e os correspondentes índices californianos de capacidade de suporte (CBR), avaliados laboratorialmente em amostras representativas desses solos de leito de pavimento, em obras de terraplanagens realizadas na região de Bragança.

Da análise de correlação dos resultados obtidos, estabeleceu-se uma relação entre os parâmetros envolvidos, do mesmo tipo da preconizada na metodologia de conceção de pavimentos flexíveis, proposta pela Shell (Shell I. P., 1978), tendo em vista contribuir para uma melhoria das relações empíricas existentes. Segundo (Picado-Santos, 1993) e (Shell I. P., 1978), a partir de variadíssimos testes de carregamento dinâmico in situ, recomendam a relação empírica [1] para estimar o módulo de deformabilidade dinâmico, E_{vd} , do solo com o CBR, para aplicação em solos e camadas granulares:

$$E(MPa) = 10 \times CBR (\%) \quad [1]$$

Os resultados obtidos serviram para estabelecer uma relação entre o módulo de deformabilidade (E_{v2}) do ECP e o CBR, no contexto da realidade da região observada. Uma vez que, em estudos anteriores foram desenvolvidos trabalhos no mesmo sentido, o presente trabalho tem em vista contribuir para a melhoria da fiabilidade da mesma, à medida que vão surgindo oportunidades da execução destes tipos de ensaios por parte dos laboratórios de geotecnia do Instituto Politécnico de Bragança.

2. TRABALHOS EXECUTADOS

No âmbito da caracterização do comportamento mecânico duma fundação duma infraestrutura de transportes, é habitual proceder à obtenção “in situ” do seu módulo de deformabilidade. O módulo de deformabilidade duma camada de fundação depende, de entre outras variáveis, da forma como é determinado, do nível de carga, das deformações atingidas e das condições de estado do material (compactação, tipo de solo, estado hídrico).

Na impossibilidade de se realizarem ensaios de deformabilidade às camadas, e podendo obter o valor de CBR dos solos constituintes do mesmo (materiais não ligados), a existência de relações empíricas do tipo da equação [1], permitirá estimar o módulo de deformabilidade para efeito de conceção/avaliação de pavimento flexíveis.

No sentido de estabelecer uma equação, do tipo [1] objetiva-se neste trabalho a obtenção de um coeficiente “K”, entre o módulo de deformabilidade E (ECP) com o correspondente CBR (laboratorial), de acordo com a equação [2]:

$$E(MPa) = K \times CBR (\%) \quad [2]$$

Onde, E (MPa) é módulo de deformabilidade do solo de fundação e o CBR (%) é o índice californiano de capacidade de carga.

Na Figura 1 apresenta-se o organograma representativo do processo desenvolvido para a execução deste trabalho.

Segundo (Oliveira, 2017), o ensaio de carga com placa tem tido uma utilização cada vez mais frequente no que se refere ao controlo da qualidade das camadas granulares de um pavimento ou até mesmo de um solo (grosso, fino ou médio). Basicamente, este ensaio faz com que se tenha a curva carga-assentamento com o objetivo de avaliar as características de deformação e resistência do solo e determinar o módulo de deformabilidade. Estes ensaios são efetuados normalmente para controlo da compactação e para determinação de módulos de deformabilidade. O ECP foi executado segundo a norma NF P94-117-1 (AFNOR, 2000).

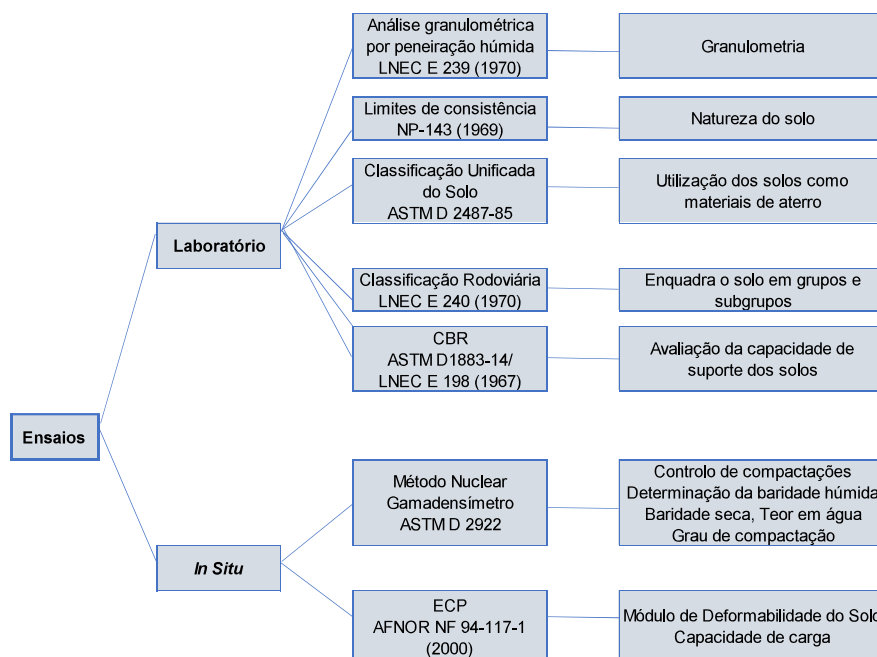


Figura 1 - Organograma dos ensaios realizados

Segundo (Martins et al., 2008) ao primeiro carregamento deverá corresponder uma tensão média sob a placa de 0,25 MPa, devendo esta tensão ser mantida durante o tempo necessário à estabilização do deslocamento da placa. No segundo ciclo de carregamento deverá ser atingida uma força tal que traduza uma tensão média sob a placa de 0,20 MPa. A descarga só deverá ser efetuada após a estabilização da deflexão.

A placa utilizada tem um diâmetro de 0,6m e uma espessura de 0,26m, colocada na parte superior da camada a testar e mediram-se as deflexões sob incrementos de carga em três pontos concêntricos, igualmente afastados entre si. A carga é transmitida para as placas por um macaco hidráulico, agindo contra o equipamento móvel pesado (camião/ cilindro) como força de reação, enquanto é medida a deflexão correspondente. Em cada ponto selecionado in situ executaram-se ensaios de carga com placa, ECP, (Figura 2a) e ensaios com o gamadensímetro nuclear (células radioativas) (Figura 2b), tendo em vista a caracterização do seu estado de compactação. Os ECP foram realizados em locais distintos na zona de Bragança, sendo estes condicionados pela disponibilidade do cilindro ou camião carregado para fazer um sistema de reação e medir os assentamentos.

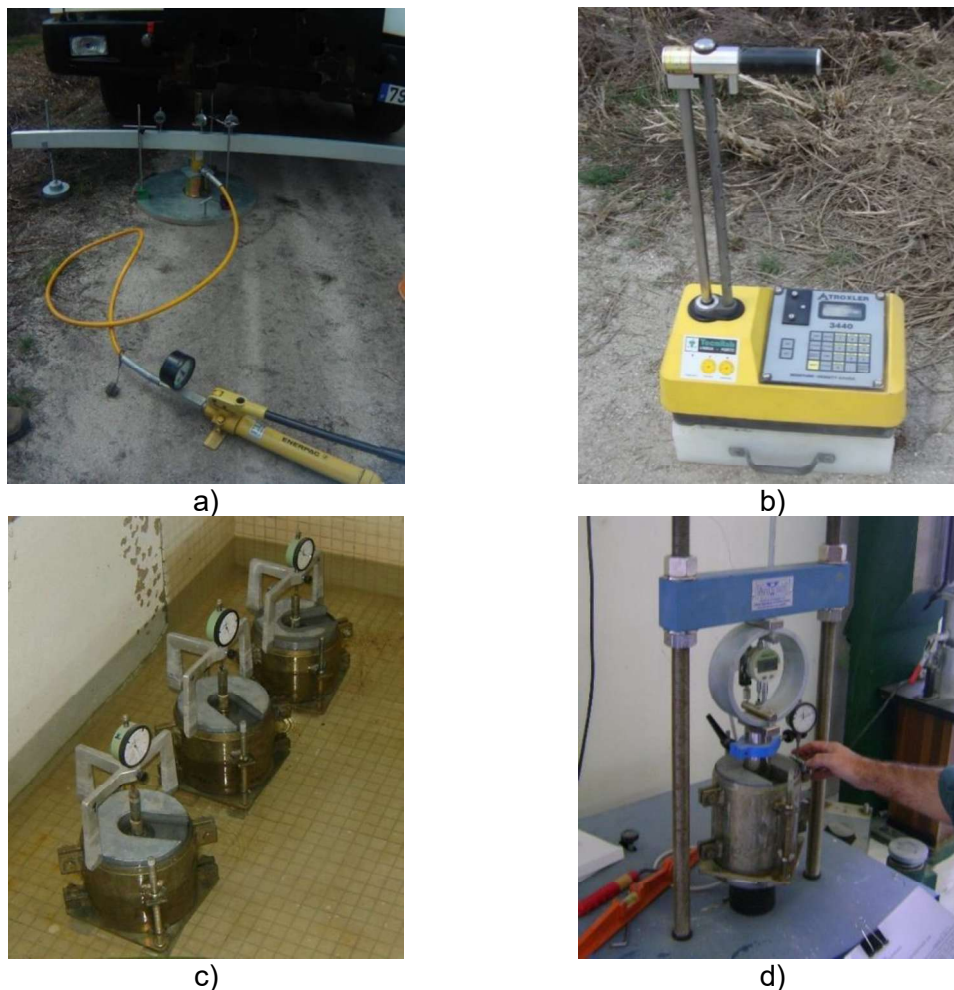


Figura 2 - Equipamentos de ensaio: a) ECP; b) ensaio com o gamadensímetro nuclear; c) CBR, embebido; c) Prensa CBR

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. Os solos foram classificados segundo a classificação unificada (ASTM-D2487, 1985) classificação para fins rodoviários E240, (LNEC-E240, 1970), e os ensaios CBR foram realizados segundo o descrito na norma ASTM D1883-14 (ASTM-D1883, 2014) e na especificação E 198 (LNEC-E198, 1967), (ver Figura 2c e 2d).

3. RESULTADO DOS ENSAIOS DE CAMPO

3.1. Ensaio de Carga com Placa (ECP)

O Ensaio de Carga com Placa foi realizado em quatro obras, perfazendo vinte e quatro pontos de ensaio na região de Bragança, foi utilizado um cilindro de rasto liso ou um camião carregado como sistema de reação para gerar o carregamento na placa circular de aço, de modo a obter as características mecânicas do solo em termos de tensão – assentamento. Este ensaio permite obter as curvas de carga-assentamento para cada ponto com a finalidade de estimar as características de deformação e resistência do solo e determinar o módulo de deformabilidade.

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) foram calculados aplicando a fórmula proposta na norma NF P94-117-1 (AFNOR, 2000) (equação [3]):

$$E = \frac{\pi}{4} (1 - \nu^2) \frac{\rho \times D}{z_2} \quad [3]$$

onde ν é o coeficiente de Poisson, ρ (MPa) é a tensão média na placa, D (mm) é o diâmetro da placa e z_2 (mm) o deslocamento da placa provocado pelo segundo ciclo de carregamento. Em cada ensaio ECP foram efetuados dois ciclos de carga - descarga, com carregamento por escalões, com a medição contínua dos assentamentos resultantes.

A carga axial máxima (no 1º e 2º ciclo) foi de aproximadamente, 145kN. Optou-se por um coeficiente de Poisson de 0,35 visto tratar-se de solos granulares, aterros e terrenos similares em condições drenadas. Os dados obtidos confirmam que o assentamento médio no segundo ciclo de carga é inferior ao primeiro assentamento, logo por consequência o módulo de deformabilidade para o segundo ciclo de carga é sempre superior ao do primeiro ciclo, ver Figura 3 a) e b). Da totalidade dos pontos ensaiados com ECP obtiveram-se para o primeiro ciclo de carregamentos (E_{v1}) valores que variam de 25 MPa a 167 MPa, enquanto para o segundo ciclo de carregamentos (E_{v2}) os valores variam de 66 MPa a 325 MPa. Os valores de E_{v2} variam 66 e 325 MPa para solos mais grossos e entre 63 e 157 MPa para solos finos.

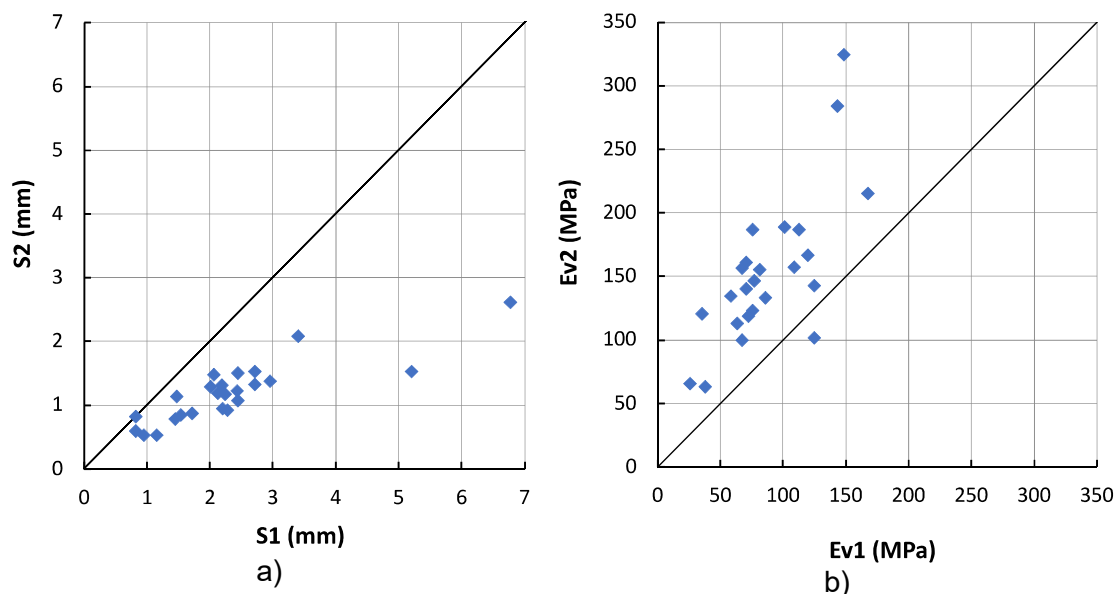


Figura 3 – Resultados do ensaio ECP: a) S_1 (mm) vs S_2 (mm); b) E_{v1} (MPa) vs E_{v2} (MPa)

3.2. Grau de compactação *In Situ*

Em todos os pontos onde foram executados os ECP, fez-se na proximidade do respetivo ponto o controlo da compactação *in situ* com a célula radioativa (gamadensímetro nuclear). No Quadro 2 apresentam-se resumidamente os resultados do grau de compactação para os valores obtidos *in situ* com o gamadensímetro nuclear nos pontos em estudo.

Como se verifica o grau de compactação é superior ao ótimo (considerando o ótimo igual a 95%) em todos os pontos exceto num que apresenta valor ligeiramente inferior (93%).

4. RESULTADO DOS ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Em cada ponto onde foram realizados os ensaios ECP *in situ*, foram recolhidas amostras de solo, para posteriormente realizar ensaios de laboratório, tendo em vista efetuar ensaios de identificação e a obtenção dos repetitivos valores de CBR.

Segundo a Classificação Unificada de Solos (Norma ASTM D2487-85), a classe de solo dominante é o GM - cascalhos siltosos, misturas de cascalho, areia e silte mal graduados e tendo finos não plásticos (em 12 pontos de ensaios), GP-GM - cascalho mal graduado com silte (em 4 pontos), SM - areias siltosas, misturas mal graduadas de areia e silte e com finos não plásticos (em 5 pontos) e SW-SM – areia bem graduada com silte (em três pontos). Segundo a Classificação rodoviária AASHTO¹¹/ LNEC E240-1971 os solos classificam-se em A-1-a (9 pontos) e A-1-b (15 pontos). Os ensaios CBR foram efetuados segundo os procedimentos da norma internacional ASTM D1883-14

No Quadro 2 é apresentada a classificação das amostras de solo colhido em cada ponto, recorrendo-se à classificação unificada (CU), o diâmetro médio das partículas D_{50} (mm), a classificação segundo a AASHTO e o valor do CBR (%). Os resultados para os valores CBR correspondente ao GC *in situ*, obtidos para os solos nos pontos em estudo estão compreendidos entre 15 e 54% (ver Quadro 1).

Quadro 1 - Classificação Unificada de solos/ Classificação rodoviária (AASHTO)/ D_{50} (mm) nos pontos ECP

Ponto de Ensaio	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12
Classificação	GM	GM	GM	GM	GM	GM	GM	GP-GM	GM	GM	SM	GM
GC <i>in situ</i> (%)	99	100	100	97	98	100	100	99	100	100	97	96
AASHTO	A-1-b	A-1-b	A-1-b	A-1-b	A-1-b	A-1-a	A-1-a	A-1-a	A-1-b	A-1-a	A-1-b	A-1-b
D_{50} (mm)	3,5	3,5	3,5	3	3	7	7	6	4,5	6	2	4
CBR (%)	41	47	45	21	28	15	23	23	42	22	18	22

Ponto de Ensaio	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20	P21	P22	P23	P24
Classificação	GM	GP-GM	SM	GM	GP-GM	SM	GP-GM	SW-SM	SW-SM	SW-SM	SM	SM
GC <i>in situ</i> (%)	99	100	95	96	93	98	97	100	100	99	95	97
AASHTO	A-1-a	A-1-a	A-1-b	A-1-b	A-1-a	A-1-b	A-1-a	A-1-a	A-1-b	A-1-b	A-1-b	A-1-b
D_{50} (mm)	7	11	2	3,5	10	0,9	10	3,2	1,3	1,5	1	1,3
CBR (%)	48	34	38	35	26	54	32	39	37	18	29	30

5. RELAÇÃO ENTRE O MÓDULO DE DEFORMABILIDADE E O CBR

Com os dados obtidos estabeleceu-se uma relação baseada na equação [2], de forma a explicitar um coeficiente adimensional “K”, entre o módulo E (ECP) com o correspondente CBR.

¹¹ AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials

No Quadro 2 a 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 estático de carga em placa (ECP). Cada quadro apresenta os resultados para cada tipo de solo classificado segundo a classificação Unificada, GP-GM, GM, SM e SW-SM, respetivamente. Nestes Quadros apresentam-se os coeficientes de relação entre as duas variáveis para os diversos níveis de compactação das amostras em laboratório.

Quadro 2 - Resultados dos CBR versus ECP para solos classificados como GP-GM

Pontos	D ₅₀	Ensaio de Campo		Relação entre E_{v2} e CBR	
	(mm)	CBR (%)	E_{v2} (Mpa)	$K=E_{v2}/CBR$	$E=K_{méd}CBR$ (Mpa)
P8	6	23	186,95	8,13	137,84
P14	11	34	324,53	9,54	203,76
P17	10	26	65,90	2,53	155,82
P19	10	32	120,45	3,76	191,78
Média	9,3	29	174,46	5,99	172,30

Quadro 3 - Resultados dos CBR versus ECP para solos classificados como GM

Pontos	D ₅₀	Ensaio de Campo		Relação entre E_{v2} e CBR	
	(mm)	CBR (%)	E_{v2} (Mpa)	$K=E_{v2}/CBR$	$E=K_{méd}CBR$ (Mpa)
P1	3,5	41	284,06	6,93	243,15
P2	3,5	47	118,42	2,52	278,74
P3	3,5	45	186,85	4,15	266,87
P4	3	21	166,58	7,93	124,54
P5	3	28	215,54	7,70	166,06
P6	7	15	156,84	10,46	88,96
P7	7	23	189,01	8,22	136,40
P9	4,5	42	112,79	2,69	249,08
P10	6	22	160,75	7,31	130,47
P12	2	22	146,38	6,65	130,47
P13	4	48	133,33	2,78	284,67
P16	7	35	134,37	3,84	207,57
Média	5	32	167,08	5,93	192,25

Pela análise dos Quadros 2 e 3, o coeficiente de relação K que variam entre 2,52 (para CBR in situ=47%, ponto P2) e 10,46 (para CBR in situ =15%, ponto P6), resultando um coeficiente de relação médio de $K=5,99$ (GM-GP) e $K=5,93$ (GM). Nos solos SM e SW-SM, Quadro 4 e 5, respetivamente, os valores do coeficiente de relação K variam entre 2,88 (para CBR in situ=54%, ponto P18) e 7,80 (para CBR in situ =18%, ponto P11), resultando um coeficiente de relação médio de $K=4,14$ (SM) e $K=3,83$ (SW-SM).

Para a globalidade dos ensaios realizados, até ao momento e nas condições disponíveis para a realização deste estudo, obtiveram-se valores para o coeficiente de relação "K" que variam entre 2,52 (para CBR in situ=47%, ponto P2) e 10,46 (para CBR in situ =15%, ponto P6), resultando um coeficiente de relação médio de $K=5,31$.

Quadro 4 - Resultados dos CBR versus ECP para solos classificados como SM

Pontos	D ₅₀ (mm)	Ensaio de Campo		Relação entre E _{v2} e CBR	
		CBR (%)	E _{v2} (Mpa)	K=E _{v2} /CBR	E=K _{méd} CBR (Mpa)
P11	2	18	140,41	7,80	74,48
P15	2	38	122,86	3,23	157,23
P18	0,9	54	155,51	2,88	223,43
P23	1	29	101,78	3,47	121,35
P24	1,3	30	99,59	3,30	124,71
Média	1	34	124,03	4,14	140,24

Quadro 5 - Resultados dos CBR versus ECP para solos classificados como SW-SM

Pontos	D ₅₀ (mm)	Ensaio de Campo		Relação entre E _{v2} e CBR	
		CBR (%)	E _{v2} (Mpa)	K=E _{v2} /CBR	E=K _{méd} CBR (Mpa)
P20	3,2	39	157,19	4,05	148,70
P21	1,3	37	142,62	3,87	141,22
P22	1,5	18	63,02	3,58	67,55
Média	2	34	120,94	3,83	119,16

Dos resultados obtidos é proposta a seguinte equação final de relação entre o módulo de deformabilidade (ECP) e CBR:

$$E(\text{MPa}) = 5,31 \times \text{CBR} (\%) \quad [4]$$

Na Figura 4 apresentam-se a relação entre do diâmetro médio D₅₀ (mm) do solo e o K obtido no presente estudo. Na Figura 4a) apresenta-se o valor de K obtido para cada ponto de ensaio (24 pontos de ensaio) e na Figura 4b) o valor médio do K para cada tipo de solo classificado segundo a classificação unificada (4 tipos de solo). Constatase uma grande dispersão nos valores obtidos de K, no entanto, ao mesmo tempo, observa-se o aumento deste parâmetro com o aumento do D₅₀ dos solos.

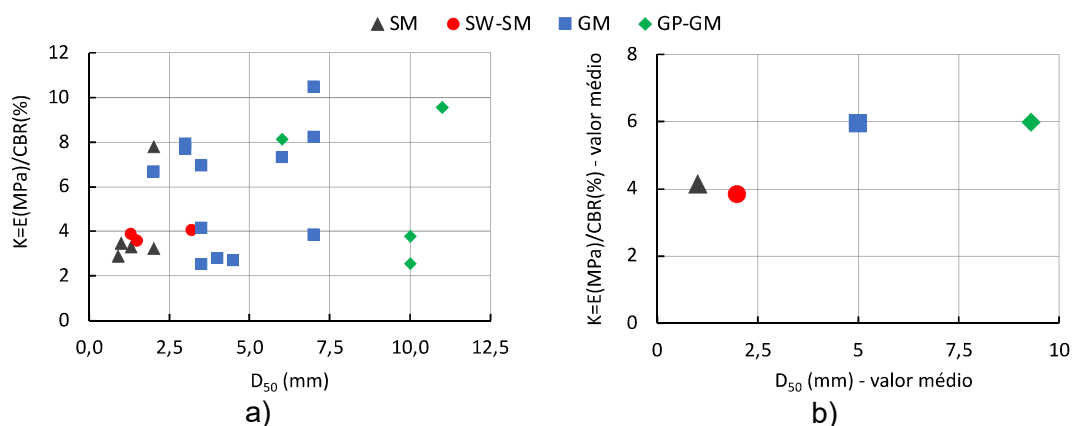


Figura 4 – Relação entre D₅₀ (mm) e o K: a) todos os pontos de ensaio; b) valor médio para cada tipo de solo

Com o valor de K obtido, considera-se interessante obter o valor estimado do módulo de deformabilidade, segundo a equação [2], para comparação com o valor E_{v2} dos ensaios ECP, representando-se, assim, na Figura 5, a relação entre estes dois parâmetros. Na Figura 5a) o valor do E foi estimado usando o valor do $K_{méd}$ obtido para cada tipo de solo da classificação unificada, usando-se, na Figura 5b), o valor $K_{méd}$ tendo em conta todos os pontos de ensaio, independentemente do tipo de solo. Como era expectável, o valor estimado do E, obtido pela equação [2], apresenta valores bastante dispersos. A dispersão é maior quando se tenta usar apenas um $K_{méd}$ para todos os tipos de solo sem ter em conta o tipo de solo em caracterização.

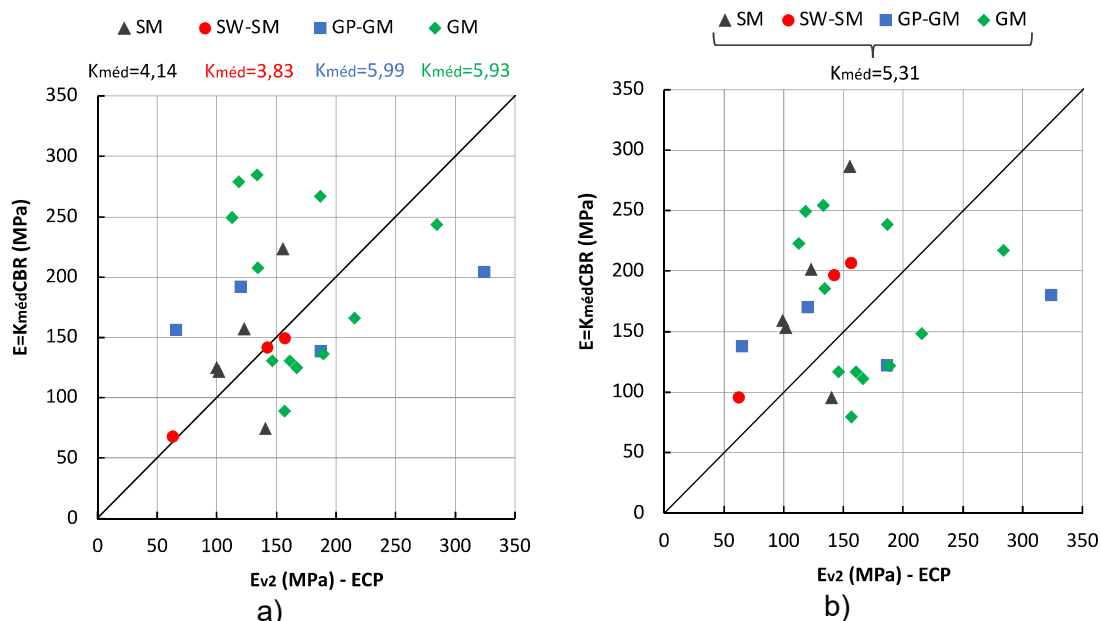


Figura 5 – E_{v2} (MPa) versus valores estimados do $E = K_{méd} \times CBR$ (MPa): a) $K_{méd}$ obtido para cada solo; b) $K_{méd}$ obtido para todos os pontos

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho apresenta-se um estudo sobre a relação, K, entre o módulo de deformabilidade de leitos do pavimento, obtidos por ensaios de carga em placa, e o índice de capacidade de carga da mesma, expresso pelo CBR. Os dados obtidos com este estudo não podem ser generalizados, no entanto fornece indicadores que desafiam a necessidade de atualização constante da informação existente relativa aos ensaios enfatizados neste trabalho no sentido de um constante ajuste do coeficiente de relação.

Da análise dos ensaios realizados obteve-se um coeficiente de relação entre o módulo de deformabilidade e o CBR de 5,31 (valor médio). Este valor tende a variar como tipo de solo em estudo. Neste contexto, atendendo à quantidade de obras que estiveram na base deste estudo, reconhece-se existir algum cuidado na apresentação duma proposta de generalização dos resultados do estudo realizado.

Considerou-se ser importante propor esta contribuição, mesmo que limitada. 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 do ECP e o CBR da fundação.

AGRADECIMENTOS

Os autores não poderiam deixar de agradecer a contribuição do Laboratório de Geotecnia do Instituto Politécnico de Bragança, pelo apoio na realização dos ensaios laboratoriais e in situ.

REFERÊNCIAS

- AFNOR. (2000). NFP94-117-1_Sols: reconnaissance et essais – Portance des plates-formes – Partie 1: Module sous chargement statique à la plaque (EV2). Paris, Paris: Association Française de Normalisation.
- ASTM. (2014). D1883-14 Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils. American Society for Testing and Materials.
- ASTM-D2487. (1985). D 2487-85: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). American Society for Testing and Materials.
- Branco, F.; Pereira, A. A.; Picado-Santos, L. G., (2008). “Pavimentos Rodoviários” Edições Almedina S.A., Coimbra.
- DIN-18134-04. (2012). Soil: Testing procedures and testing equipment Plate Load Test. English.
- LNEC-E198. (1967). E 198 - Solos: Determinação do CBR. Lisboa, Portugal: LNEC.
- LNEC-E240. (1970). E240 - Solos: Classificação para fins rodoviários. Lisboa: LNEC.
- Martins, J. P., Correia, A. G., Caldeira, L., & Neves, E. (2008). Comparação de resultados de ensaios de carga com placa segundo as normas AFNOR NF P94-117-1 e DIN 18134. Sociedade Portuguesa de Geotecnia.
- Martins, J., Gomes, A. C., Caldeira, L., Neves, E. M., & Delgado, J. (2008). COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DE ENSAIOS DE CARGA COM PLACA SEGUNDO AS NORMAS AFNOR NF P94-117-1 E DIN 18134.
- Matos Fernandes, M. (2011). Mecânica dos Solos – Introdução à Engenharia Geotécnica. Volume 2. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto: Edição de autor.
- Morais, H. (2011). Estudo da Fundação Dum Pavimento Rodoviário Flexível. Tese de Mestrado da Construção. Instituto Politécnico de Bragança, ESTiG, Bragança, Portugal.
- Morais, H., & Minhoto, M. J. (2014). Relação entre Módulo de Deformabilidade e CBR no Estudo da Fundação Dum Pavimento Rodoviário Flexível. 7º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia/ IV Congresso de Engenharia de Moçambique. Inhambane, Moçambique.
- Morais, H., Minhoto, M., & Paula, A. (2018). Relação entre Módulo de Deformabilidade e CBR para Caracterização Mecânica da Fundação de Pavimentos. 16º Congresso Nacional de Geotecnia, 6ª Jornadas Luso-Espanholas de Geotecnia.
- Oliveira, J. P. (2017). Avaliação de diferentes métodos de ensaio para determinação da capacidade de carga da fundação de pavimentos rodoviários. Universidade do Minho, Escola de Engenharia, Guimarães, Portugal.
- Picado-Santos, L. (1993). Método de Dimensionamento da Shell para Pavimentos Rodoviários Flexíveis (adaptado às condições Portuguesas). Departamento de Engª Civil da FC.T. da U. Coimbra. Coimbra, Portugal.
- Shell, I. P. (1978). Asphalt Pavements Design Manual. Shell International Petroleum Company. London.