

15CNG

Congresso
Nacional de
Geotecnia

8CLBG

Congresso
Luso-Brasileiro
de Geotecnia



CARACTERIZAÇÃO DA FUNDAÇÃO DE PAVIMENTOS COM OS RESULTADOS DO ENSAIO DO PENETRÓMETRO DINÂMICO LIGEIRO

CHARACTERIZATION OF THE PAVEMENT FOUNDATION WITH THE RESULTS OF THE LIGHT DYNAMIC PENETROMETER TEST

Pires Rodrigues, David Michel; *Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, Portugal, david.mp.rodrigues@hotmail.com*

Paula, António Miguel Verdelho; *Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, Portugal, mpaula@ipb.pt*
Minhoto, Manuel Joaquim da Costa; *Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, Portugal, minhoto@ipb.pt*
Morais, Hermínia Maria Mesquita; *Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, Portugal, hmorais@ipb.pt*

RESUMO

O objetivo deste trabalho é identificar e caracterizar fundações de pavimentos em diferentes obras/aterros. Foram realizados ensaios laboratoriais e em campo de identificação e caracterização mecânica de solos com uso exclusivo para fundação de pavimentos. Realizaram-se ensaios de identificação dos solos estudados e posteriormente foram realizados ensaios para caracterizar mecanicamente o solo no âmbito do dimensionamento do pavimento. Foram assim realizados ensaios laboratoriais como o California Bearing Ratio CBR e ensaio Proctor e ensaios de campo como o ensaio de controlo da compactação em campo com célula radioativa, o ensaio de carga em placa e por último o ensaio com o penetrómetro dinâmico ligeiro.

Com estes ensaios pretende-se fazer um estudo comparativo de correlação empírica entre os diferentes ensaios de caracterização mecânica realizados, tanto laboratoriais como de campo, aprofundando a relação que existe entre propriedades mecânicas e as classes de fundação de pavimentos e os resultados dos ensaios de campo, principalmente com os resultados do ensaio penetrómetro dinâmico ligeiro por ser um ensaio fácil de usar e realizar.

ABSTRACT

The main objective of this work is to identify and characterize floor foundations in different works / landfills. Thus laboratory tests and field identification and mechanical characterization of soils for exclusive use in floor foundation were performed. First, soil identification tests were performed, subsequently tests to mechanically characterize the soil were performed in order to design the pavement. Thus, it were performed laboratory tests such as the California Bearing Ratio CBR and Proctor tests and field tests as the compression control test with radioactive cell, the plate load test for soil deformability module and finally the test with the light dynamic penetrometer.

With these tests it is intended to make a comparative study of empirical correlation between the different mechanical characterization tests performed, both in laboratory and in the field, deepening the relationship between mechanical properties and floor foundation classes and the results of field trials mainly with the results of the performed test.

1 - INTRODUÇÃO

A fundação é geralmente constituída por terreno natural ou por material granular em aterro. Assim, o conhecimento adequado do comportamento geotécnico dos solos de fundação é essencial à análise estrutural dos pavimentos rodoviários. A fundação de um pavimento integra o leito do pavimento e todo o terreno subjacente que condiciona o seu comportamento, a escolha do que se deve usar e a espessura da respetiva camada dependem da qualidade do solo e da capacidade de suporte que se pretende obter para a fundação (leito mais solo subjacente) (Santos, 2010).

A capacidade de suporte da fundação é das características mais importantes para o dimensionamento de pavimentos. De facto, essa característica mecânica condiciona as características das camadas granulares que nela vão ser colocadas. Assim surgiram as primeiras formas empíricas de dimensionamento de pavimentos, sendo a mais conhecida, o CBR (California Bearing Ratio), que através da percentagem de CBR do material, nos dá a espessura a aplicar. Este método foi desenvolvido por Porter, através de ensaios realizados pela Divisão de Estradas da Califórnia entre 1928 e 1929 (Quaresma, 1985).

Além do ensaio CBR, existem ensaios de campo para definir os parâmetros do solo. Os ensaios de campo mais frequentemente utilizados são o ensaio de Standard Penetration Test (SPT) e o ensaio de Cone Penetration Test (CPT) devido a serem dos ensaios mais antigos. Apesar dos ensaios SPT e CPT serem os ensaios mais frequentemente utilizados para obter os parâmetros do solo, existe outro ensaio para

averiguar as características do solo, como é o caso do ensaio Dynamic Probing Light Test (DPL). Apesar deste ensaio ser dos mais antigos, mais rápido e simples de execução, não se conhecem métodos para correlacionar os resultados deste ensaio com os parâmetros mecânicos do solo.

Como se compreenderá, a diversidade de equipamentos usados e das respetivas energias de cravação não é alheia ao facto apontado (Matos Fernandes, 2011).

O bom comportamento mecânico da fundação do pavimento é fundamental quer a curto prazo para a circulação de veículos durante a fase de construção, quer a longo prazo para minimizar a deterioração do pavimento.

Este trabalho pretende estabelecer uma correlação entre os resultados de diferentes ensaios de caracterização do solo da fundação do pavimento tanto em campo como em laboratório. Assim, foram realizados diferentes ensaios laboratoriais tais como: ensaios de identificação de solos, Proctor e CBR. Os ensaios *in situ* realizados foram: penetrómetro dinâmico leve (PDL), ensaio de carga em placa (ECP) e ensaio de controlo de compactação com célula radioativa para conhecer a compacidade do solo *in situ*.

2 - OBJETIVO E PROGRAMA DE TRABALHOS

2.1 - Objetivo

Com este trabalho pretende-se incrementar os métodos para classificar os solos de fundação de pavimentos usando ensaios de penetração dinâmica PDL.

Foram realizados ensaios PDL no âmbito de estabelecer uma correlação entre os resultados deste ensaio no âmbito de facilitar a caracterização dos leitos de pavimentos, de facto, no dimensionamento dos leitos o valor utilizado é o índice CBR, no entanto o ensaio CBR é um ensaio longo. Realizaram-se também ensaios de carga em placa de modo a correlacionar os resultados do ensaio PDL com o módulo de deformabilidade; também se realizaram ensaio de controlo de compactação com célula radiativo para comparar os resultados do ensaio PDL com o grau de compactação medido *in situ*. O ensaio PDL é um ensaio que se consegue realizar rapidamente e numa grande quantidade de pontos por dia; assim estas correlações permitirão caracterizar mais pontos ao longo dum leito de pavimento de forma mais rápida e mais económica.

2.2 - Programa de trabalhos

A realização dos ensaios decorreu em varias fases e requereram um trabalho importante de organização. Os ensaios foram realizados em quatro locais distintos. Primeiro, foi necessário ir ao local e seleccionar os pontos onde seriam realizados os ensaios. De seguida recolheram-se amostras de solo para poder realizar os ensaios laboratoriais e posteriormente foram realizados os ensaios em campo, PDL, ECP e controlo da compactação com célula radioativa para conhecer a compactação do solo *in situ*.

A realização do ensaio de carga em placa foi condicionada pela disponibilidade do cilindro na obra, pois este ensaio além de relativamente rápido de execução requer a presença dum sistema de reação, geralmente um camião carregado, neste trabalho foi utilizado um cilindro compactador. Este ensaio foi realizado para determinar o módulo de deformabilidade do solo.

Na Figura 1 é apresentado um organograma dos ensaios realizados. Na mesma figura estão referidas as normas usadas para a realização dos diferentes ensaios.

Para classificar os solos, recorreu-se a classificação unificada dos Solos ASTM D 2487-85.

Para realização dos ensaios CBR utilizou-se a prensa CBR de marca Adedis, do Laboratório de Geotecnia da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Bragança. Para realização deste ensaio, seguiu-se o descrito na norma internacional ASTM D1883 - 14 "Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils".

O controlo convencional da compactação de aterros envolve a determinação do peso volúmico e do teor em água. A medição do peso volúmico e do teor em água pode ser efetuada com equipamento baseado na radioatividade. O equipamento utilizado para realização destes ensaios foi o equipamento do Laboratório de Geotecnia da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Bragança, trata-se dum equipamento da marca Troxler, modelo 3440 (ver Figura 2a).

Para o ensaio com o penetrómetro dinâmico ligeiro (PDL), a resistência à penetração é definida pelo número de pancadas necessárias para cravar o penetrómetro de 10 em 10 cm, o ensaio termina quando os 10 cm não são atingidos após 50 pancadas. O equipamento de ensaio PDL usado neste trabalho está representado

na Figura 2b). Para a realização deste ensaio, os operadores seguiram a norma portuguesa NP EN ISO 22476-2 de 2008.

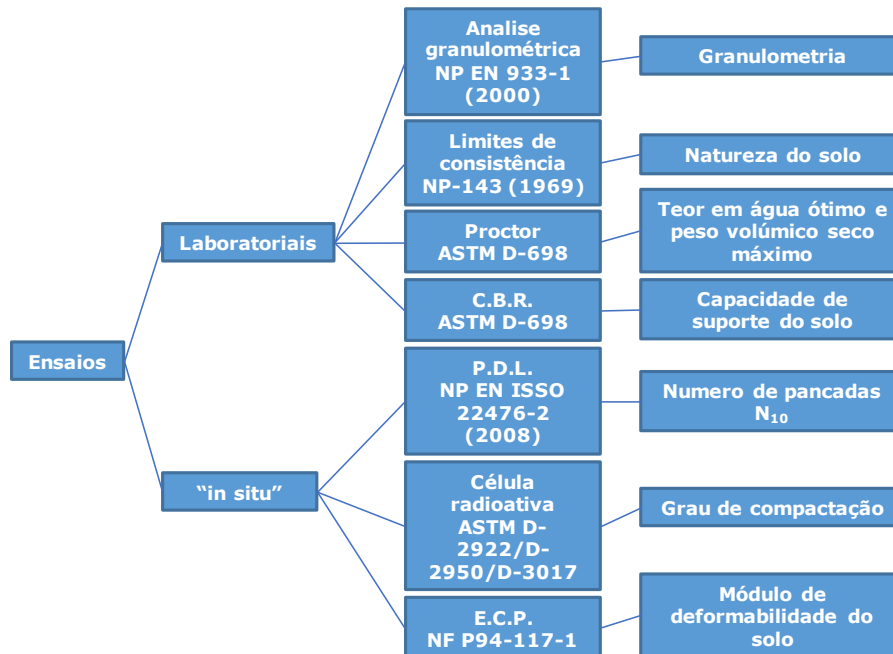


Figura 1 - Organograma dos ensaios realizados.

O ensaio de carga em placa consiste no carregamento por escalões de uma placa circular de aço, colocada sobre a superfície do terreno a ensaiar, medindo o assentamento resultante. Segundo a norma AFNOR NF P94-117-1, o ensaio tem por objetivo a determinação do módulo de deformabilidade sob carregamento estático aplicado numa placa sobre uma plataforma (Morais, 2011).

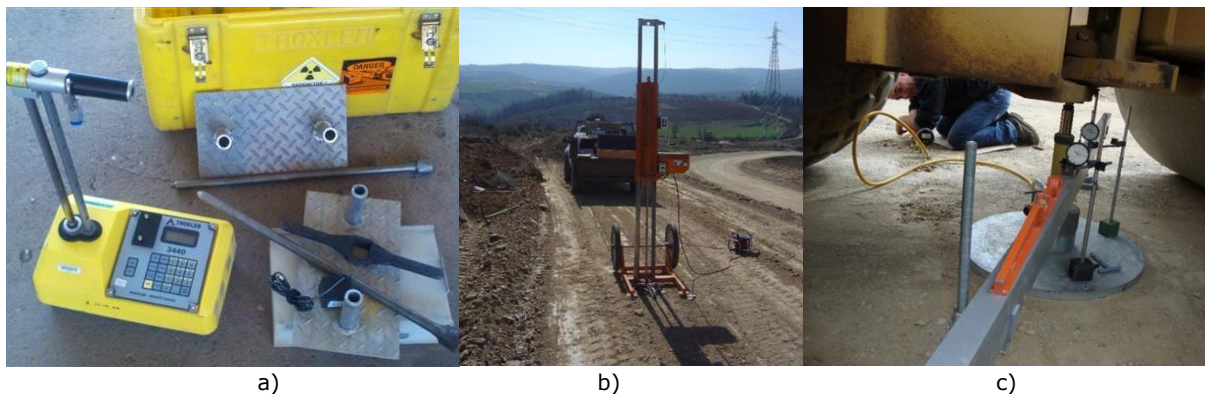


Figura 2 - Equipamentos de ensaio de campo: a) célula radioativa; b) penetrômetro dinâmico ligeiro; c) ensaio de carga em placa.

2.3 - Locais de ensaio

Os ensaios foram realizados em quatro locais distintos. O primeiro local situa-se na estrada M527 (Zona 1) no troço que liga as aldeias de Mós e Valverde no distrito de Bragança sobre uma extensão de aproximadamente 2,5 km. Como se pode ver na Figura 3a) foram realizados ensaios em 7 pontos ao longo da extensão do troço.

Em todos os pontos de ensaio da Zona 1 o solo foi compactado *in situ* com equipamentos mecânicos.

Além dos ensaios realizados na Zona 1 também foram realizados ensaios num terreno da zona industrial das Cantarias em Bragança (Zona 2), num terreno na R. Alexandre Herculano em Bragança (Zona 3) e finalmente num terreno na estrada do aeroporto Santa Maria pertencente a empresa Faurecia-sistemas De Escape Portugal Lda (Zona 4).

As Figuras 3 b), c) e d) mostram as localizações dos pontos ensaiados nas diferentes zonas.



Figura 3 – Vista aérea dos locais estudados: a) zona 1; b) zona 2; c) zona 3; d) zona 4. (fotos obtidas do Google Earth)

No total foram realizados ensaios de identificação e caracterização (quer laboratorial, quer em campo) em 17 pontos de ensaios. Devido a condicionantes e razões externas à equipa de trabalho nem em todos os pontos foi possível realizar todos os ensaios referidos. No entanto, foram realizados ensaios suficientes para ser possível fazer uma análise comparativa dos resultados obtidos e obter conclusões de correlações entre os diferentes ensaios.

3 - RESULTADOS DE ENSAIOS

3.1 - Classificação dos solos

Nos quatro locais onde se realizaram os ensaios, destacaram-se duas categorias de solo, os solos **GM**, descrito como cascalhos siltosos, misturas de cascalho, areia e silte mal graduados e tendo finos não plásticos e os solos **SM**, descrito como areias siltosas, misturas mal graduadas de areia e silte e com finos não plásticos.

Estes solos são perfeitamente admissíveis para aterros e leitos de pavimentos segundo o MACOPAV.

Foram encontrados solos de outras categorias tais como solos **GW-GM**, descrito como cascalho bem graduado com silte na classificação unificada, solos **CL**, descrito como argilas orgânicas de baixa a média plasticidade, e solos **SC**, descrito como areias argilosas, e mistura de areia e argila, mal graduadas com finos plásticos. Estes solos não foram tidos em conta.

No Quadro 1 apresenta-se um quadro resumo com a classificação obtida para os solos intersetados recorrendo-se à classificação unificada dos solos ASTM D 2487-85. Recorrendo a Tabela com as classes de terrenos de fundação segundo o MACOPAV de julho 1995 (JAE, 1995), observa-se que estes solos são duma classe de solo S4 a S2 (ver Quadro 1). Os solos da classe S4 e S3 são perfeitamente admissíveis para aterros e leitos de pavimentos segundo o MACOPAV. Os solos da classe S2 são admissíveis para aterros, mas não para leitos de pavimento.

Quadro 1- Classificação unificada dos solos intersetados nos pontos de ensaio

Zona	Pontos	Classificação do Solo ASTM D 2487-85	Classes de terrenos de fundação segundo o MACOPAV (julho 1995)	
1	P1.1	GW-GM	Cascalho bem graduado	S4
	P1.2			
	P1.3			
	P1.4	GM	Cascalhos siltosos com finos não plásticos	S4
	P1.5			
	P1.6			
	P1.7			
2	P2.1	GM	Cascalhos siltosos com finos não plásticos	S4
	P2.2	SM	Areia siltosa com cascalho	S3
	P2.3	GM	cascalhos siltosos com finos não plásticos	S4
3	P3.1	SC	Areia argilosa	S3
	P3.2	GC	Cascalhos com argila	S4
	P3.3	SC	Areia argilosa	S3
4	P4.1	CL	Argila magra com cascalho	S2
	P4.2			
	P4.3	SM	Areia siltosa com cascalho	S3
	P4.4			

3.2 - Ensaio C.B.R. avaliação da capacidade de carga do solo compactado

Para realização deste ensaio, os operadores seguiram a norma internacional ASTM D1883 - 14 "Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils". O ensaio CBR consiste na determinação da relação entre a pressão necessária para produzir uma penetração de um pistão num provete de solo, e a pressão necessária para produzir a mesma penetração numa mistura padrão de brita estabilizada granulometricamente. Essa relação é expressa em percentagem, ver Quadro 2.

Durante este ensaio, o material é perfurado por um pistão de 50mm de diâmetro, com uma velocidade constante de 1 mm / min. O índice C.B.R., expresso em percentagem, corresponde ao maior dos seguintes valores:

$$\frac{\text{Força de penetração a 2,5mm (em kg)} \times 100}{1355} \quad [1]$$

$$\frac{\text{Força de penetração a 5mm (em kg)} \times 100}{2033} \quad [2]$$

Os valores do C.B.R. são arredondados a unidade. Quanto maior for o índice CBR maior é a capacidade de suporte do solo, ver Figura 4.



Figura 4 – Realização do ensaio CBR

Os resultados dos ensaios C.B.R. estão resumidamente apresentados no Quadro 2 para as diferentes zonas estudadas. No quadro são também apresentados o intervalo de valores do C.B.R. em função da classe de terrenos de fundação segundo o MACOPAV de Julho 1995.

Para melhorar a representatividade do solo, deve-se determinar o CBR em laboratório em amostras com o grau de compactação na ordem dos 95%. (Minhoto, 2012/2013).

Quadro 2- Resultados dos ensaios CBR

Amostras zona 1	P1.1	P1.2 / P1.3 / P 1.4	P1.5	P1.6 / P1.7
C.B.R. (%) Laboratório	25	21	27	18
C.B.R (%) MACOPAV, 1995	≥20			
Amostras zona 2	P2.1	P2.2	P2.3	-
C.B.R. (%) Laboratório	16	15	12	-
C.B.R (%) MACOPAV, 1995	≥20	≥10 a <20	≥20	-
Amostras zona 3	P3.1	P3.2	P3.3	-
C.B.R. (%) Laboratório	29	34	23	-
C.B.R (%) MACOPAV, 1995	≥10 a <20	≥20	≥10 a <20	-
Amostras zona 4	P4.1	P4.2	P4.3	P4.4
C.B.R. (%) Laboratório	9	8	20	36
C.B.R (%) MACOPAV, 1995	≥5 a <10		≥10 a <20	

Os valores obtidos então para o C.B.R. estão genericamente em concordância com os valores obtidos pela classe de terrenos de fundação segundo o manual de dimensionamento MACOPAV de Julho 1995. Segundo o manual de dimensionamento para solos da classe S4, que abrange todos os solos da zona 1 e alguns solos da zona 2 e 3, o valor do C.B.R. deve ser superior a 20%. Para os solos da classe S2 e S3 o valor do CBR dever estar compreendido entre 5% a 10% e 10% a 20%, respetivamente.

3.3 - Controlo de compactação com célula radioativa

O controlo convencional da compactação de aterros envolve a determinação do peso volúmico e do teor em água. A medição do peso volúmico e do teor em água pode ser efetuada com equipamento baseado na radioatividade. É um método eficaz para o controlo da compactação das camadas granulares.

Os resultados do ensaio podem ser apresentados numa tabela onde se define grau de compactação (GC) como a relação entre o peso volúmico seco obtida em campo e o peso volúmico seco ótimo obtido em laboratório com a seguinte fórmula:

$$GC(\%) = \frac{\gamma_d^{campo}}{\gamma_d^{máx}} \quad [3]$$

Em que:

- GC (%) é o grau de compactação expresso em percentagem.
- γ_d^{campo} é o peso volúmico seco medido *in situ*.
- $\gamma_d^{máx}$ é o peso volúmico máximo do solo determinado através do ensaio Proctor.

Devido à facilidade e rapidez de realização do ensaio de controlo da compactação com a célula radioativa, este ensaio foi realizado em todos os pontos estudados, ver Quadro 3.

Este ensaio visa controlar a compactação dos solos *in situ*. Na zona 1, no ponto P1.1 o grau de compactação é muito mais baixo quando nos outros pontos a compactação está próxima dos 100%. De todos os pontos de ensaio realizados, o que apresenta menor compactação *in situ* é o solo do ponto de ensaio P1.1. Provavelmente porque os procedimentos de compactação (espessura das camadas, numero de passagens do cilindro compactador, teor em água) tenham sido iguais em todos os pontos da obra da Zona 1 e o solo do ponto P1.1, sendo mais grosso, necessitasse de procedimentos mais exigentes/diferentes para obter melhores resultados de compactação.

Para um aterro rodoviário é recomendado um grau de compactação mínimo de 95%. Todos os pontos cumprem esse requisito à exceção do ponto P1.1.

Na zona 2, os solos estudados são mais finos que os da Zona 1. Os graus de compactação obtidos em campo estão entre os valores recomendados para aterro. Apenas o solo do ponto P2.2 apresenta resultados ligeiramente inferiores a 95%.

Os solos da Zona 3 e 4 encontram-se no seu estado natural. Estes solos foram estudados pelo Laboratório de Geotecnia do Instituto Politécnico de Bragança no âmbito de trabalhos de prospeção geotécnica (LGIPB, 2013) e achou-se conveniente apresentar aqui os resultados dos ensaios para estes solos e também comparar com solos que apresentam graus de compactação ótimo (Zona 1 e 2). Estes solos (Zona 3 e 4) apresentam graus de compactação natural abaixo do ótimo (considerando o ótimo a 95%).

Quadro 3- Resultados dos ensaios com célula radioativa

Pontos zona 1	P1.1	P1.2	P1.3	P1.4	P1.5	P1.6	P1.7
Profundidade de ensaio (m)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Teor em água <i>in situ</i> (%)	7	4,5	7	6	8,2	8,8	7,6
Grau de Compactação (%)	92	99	100	99,6	99,5	97	98
Pontos zona 2	P2.1	P2.2	P2.3	-	-	-	-
Profundidade de ensaio (m)	0,2	0,2	0,2	-	-	-	-
Teor em água <i>in situ</i> (%)	15	17,4	16,2	-	-	-	-
Grau de Compactação (%)	98,2	94	95	-	-	-	-
Pontos zona 3	P3.1	P3.2	P3.3	-	-	-	-
Profundidade de ensaio (m)	0,2	0,2	0,2	-	-	-	-
Teor em água <i>in situ</i> (%)	15,6	18,2	11,7	-	-	-	-
Grau de Compactação (%)	73,4	70	88,2	-	-	-	-
Pontos zona 4	P4.1	P4.2	P4.3	P4.4	-	-	-
Profundidade de ensaio (m)	0,2	0,2	0,2	0,2	-	-	-
Teor em água <i>in situ</i> (%)	9,8	11,6	8,6	11,6	-	-	-
Grau de Compactação (%)	80,7	94	91	87	-	-	-

3.4 - Ensaio com penetrómetro dinâmico ligeiro - PDL

O penetrómetro dinâmico ligeiro PDL faz parte do grupo de penetrómetros dinâmicos no qual também se encontra o penetrómetro dinâmico médio (DPM), pesado (DPH) e superpesado (DPSH). Estes ensaios avaliam a resistência do solo à penetração de um cone ligado a varas metálicas cravado no solo por queda de um pilão.

Como o objetivo do trabalho é estudar o solo de fundação de pavimentos usando os resultados do ensaio PDL, no quadro a seguir apresentam-se os resultados do N_{10} médio nos primeiros 50 cm da camada de solo de fundação. Calculou-se o N_{10} médio de forma a ter um valor para cada ponto ensaiado nos primeiros 50 cm devido a ser a profundidade máxima a qual foram recolhidas as amostras de solo.

Quadro 4- Resultados do ensaio penetrómetro dinâmico ligeiro PDL

Pontos zona 1	P1.1	P1.2	P1.3	P1.4	P1.5	P1.6	P1.7
Profundidade atingida (m)	0,9	0,4	0,4	0,4	1,1	0,7	0,9
N_{10} (Médio)*	21,4	48,75	48,5	42,75	36,6	39,6	38
Pontos zona 2	P2.1	P2.2	P2.3	-	-	-	-
Profundidade atingida (m)	2,6	2	0,3	-	-	-	-
N_{10} (Médio)*	38,2	15,4	48,7	-	-	-	-
Pontos zona 3	P3.1	P3.2	P3.3	-	-	-	-
Profundidade atingida (m)	1,3	1,7	3,8	-	-	-	-
N_{10} (Médio)*	11,8	7,8	29,4	-	-	-	-
Pontos zona 4	P4.1	P4.2	P4.3	P4.4	-	-	-
Profundidade atingida (m)	1,7	1	1,4	0,7	-	-	-
N_{10} (Médio)*	14,8	21,8	34,6	19,2	-	-	-

* - valor calculado ate aos 50 cm de profundidade

Na zona 1 verificamos aqui uma grande disparidade de resultados, de facto, o ponto P1.1 apresenta os valores mais baixos, resultado esperado devido a apresentar um grau de compactação *in situ* menor. Nos pontos P1.2 a P1.7, esperava-se resultados semelhantes devido ao solo ser igual e graus de compactação próximos. Nota-se apenas que o parâmetro de resistência de ponta é ligeiramente mais elevado nos pontos P1.2 e P1.3.

Os resultados obtidos na zona 2 são opostos aos esperados. Comparando com o ensaio de controlo de compactação com célula radioativa esperava-se uma resistência mais elevada no ponto P2.1 e resistências próximas para os pontos P2.2 e P2.3. Obteve-se um valor atípico no ponto P2.2 pois este valor está baixo.

Na zona 3, dificilmente se pode comparar os resultados do ensaio PDL com os resultados do ensaio C.B.R. devido a estarmos em presença dum solo natural. No entanto se compararmos os valores da resistência a penetração N_{10} com o grau de compactação que o solo apresenta em campo obtemos resultados comparativamente coerentes.

Tal como na zona 3, na zona 4 dificilmente se pode comparar os resultados do ensaio PDL com os resultados do ensaio C.B.R.. Aqui também pode ser feita a comparação com os valores da resistência a penetração com o grau de compactação que o solo apresenta em campo, onde se obtém resultados comparativamente coerentes.

3.5 - Ensaio de carga em placa

O ensaio consiste em aplicar, após uma pré-carga, dois ciclos de carregamento sucessivos através de uma placa de diâmetro e rigidez normalizados (Martins *et al*, 2008-2). Sendo o módulo de deformabilidade, E_v calculado através da solução de Boussinesq, para o carregamento estático sobre uma placa circular rígida em meio elástico linear (equação 4) (Martins *et al*, 2008-1):

$$E_v = \frac{\pi}{2} (1 - \nu)^2 \cdot \frac{p \cdot r}{z_2} \quad [4]$$

Onde:

- ν é o coeficiente de Poisson,
- p é a tensão média sob a placa,
- r é o raio da placa,
- z_2 é o deslocamento da placa.

O ensaio de carga em placa assume atualmente grande importância na caracterização da qualidade de aterros de fundação de pavimentos rodoviários e de plataformas para vias férreas (Matos Fernandes, 2011). Este ensaio foi realizado apenas na Zona 1. É um ensaio que necessita de um sistema de reação para gerar o carregamento na placa circular de aço. Este sistema de reação, que pode ser o eixo traseiro de um veículo pesado ou outro equipamento idêntico que permita dar reação ao equipamento de ensaio, não foi possível obter nos restantes locais/zonas de estudo do trabalho.

Concretamente na Zona 1, os ensaios só foram realizados nos pontos P1.2 a P1.4 e nos pontos P1.6 e P1.7. Não foi possível realizar o ensaio no ponto P1.5 devido à inclinação que o terreno apresenta neste ponto e no ponto P1.1 devido a não estar disponível o equipamento que permite dar reação ao equipamento de ensaio.

Este ensaio permite obter as curvas de carga-assentamento para cada ponto de ensaio a partir dos dados obtidos nos defletómetros e no macaco hidráulico. Obtendo-se assim os gráficos a partir dos quais são obtidos os coeficientes de reação do terreno, os assentamentos residuais e calcular o módulo de deformabilidade do solo. No Quadro 5 são apresentados os resultados do ensaio. A placa usada é de 0,6 m de diâmetro e a carga axial máxima (no 1º e 2º ciclo) foi de 180kN.

Quadro 5- Resultados dos ensaios de carga com placa

Amostras	P1.2	P1.3	P1.4	P1.6	P1.7
Ev1 (MPa)*	143,27	72,27	112,45	119,28	167,15
Ev2 (MPa)&	284,06	118,42	186,85	166,58	215,54
K=Ev2/EV1	1,98	1,64	1,66	1,40	1,29

* - módulo de deformabilidade do 1º ciclo de carga.

& - módulo de deformabilidade do 2º ciclo de carga.

Os pontos P1.2 e P1.7 apresentam os módulos de deformabilidade mais elevados, os pontos P1.4 e P1.6 apresentam valores próximos e finalmente o ponto P1.3 apresenta o módulo de deformabilidade mais baixo. Estes resultados não eram os esperados visto que no ensaio de controlo de compactação com célula radioativa obteve-se valores muito próximos para os pontos P1.2, P1.3 e P1.4; e valores ligeiramente mais baixos para os pontos P1.6 e P1.7.

4 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

O objetivo deste trabalho é correlacionar a resistência a penetração dinâmica do ensaio PDL com o índice C.B.R., o grau de compactação *in situ* e o módulo de deformabilidade do solo determinado no ensaio de carga em placa. Só foi possível estabelecer esta relação entre os diferentes resultados de ensaios após a perfeita identificação dos solos estudados. Assim será feita uma análise e comparação dos resultados obtidos dos diferentes ensaios realizados de caracterização do solo de fundação de pavimentos.

Como se pretende encontrar uma ligação entre o ensaio PDL, um ensaio rápido e simples de realizar com o resultado do ensaio CBR, mais caro e demorado na sua realização; foram analisados os diversos

resultados desses ensaios. Por norma, o índice CBR de várias amostras corresponde a graus de compactação diferentes, então de modo a serem mais equitativos nos resultados expostos foi utilizado o índice CBR correspondente ao grau de compactação *in situ*.

Assim, no Quadro 6 apresenta-se um resumo com os resultados dos ensaios realizados e com a classificação unificada obtida para os diferentes pontos.

Quadro 6- Resumo com os resultados dos ensaios realizados e classificação unificada.

Pontos		Classificação do Solo ASTM D 2487-85	Índice de Consistência Ic		C.B.R. correspondente ao G.C. "in situ" (%)	N ₁₀ (Méd)*	Grau de Compactação o "in situ" (%)	Módulo de deformabilidade (MPa)	
								Ev1	Ev2
Solos compactados "in situ" (aterros)	P1.1	GW-GM	-	NP	8	21,4	92	-	-
	P1.2	GM	-	NP	41	48,75	99	143,3	284,06
	P1.3	GM	-	NP	47	48,5	100	72,27	118,42
	P1.4	GM	-	NP	45	42,75	99,6	112,5	186,85
	P1.5	GM	-	NP	40	36,6	99,5	-	-
	P1.6	GM	-	NP	21	39,6	97	119,3	166,6
	P1.7	GM	-	NP	28	38	98	167,2	215,5
Solos compactados "in situ" (aterros)	P2.1	GM	-	NP	20	38,2	98,2	-	-
	P2.2	SM	-	NP	14	15,4	94	-	-
	P2.3	GM	-	NP	12	48,7	95	-	-
Solos naturais	P3.1	SC	-	-	-	11,8	73,4	-	-
	P3.2	GC	-	-	-	7,8	70	-	-
	P3.3	SC	-	-	-	29,4	88,2	-	-
	P4.1	CL	2	Dura	-	14,8	80,7	-	-
	P4.2	SM	2	Dura	7	21,8	94	-	-
	P4.3	SM	2	Dura	10	34,6	91	-	-
	P4.4	SM	4	Dura	8	19,2	87	-	-

* - Valores calculados nos primeiros 50 centímetros de profundidade.

NP: Solo não plástico.

G.C. - grau de compactação

4.1 - Correlação entre N₁₀ e índice CBR.

Na Figuras 5 estão representadas as correlações entre os resultados dos ensaios PDL com o CBR correspondente o grau de compactação *in situ*. Para estas correlações, foram utilizados os solos classificados como GM (cascalhos siltosos com finos não plásticos) presentes na Zona 1 e 2 e SM (Areia siltoosa com cascalho) presentes na zona 4.

Para além das correlações também foram representados os limites inferiores e superiores de confiança a 95% (LIC 95% e LSC 95%, respetivamente), determinados através da distribuição de probabilidades T-Student. Usou-se esta distribuição devido a ser a mais correta quando o numero de amostras é limitado. O intervalo de confiança é o intervalo com 95% de probabilidade de ocorrer a situação desejada. É também apresentado coeficiente de correlação linear (R²).

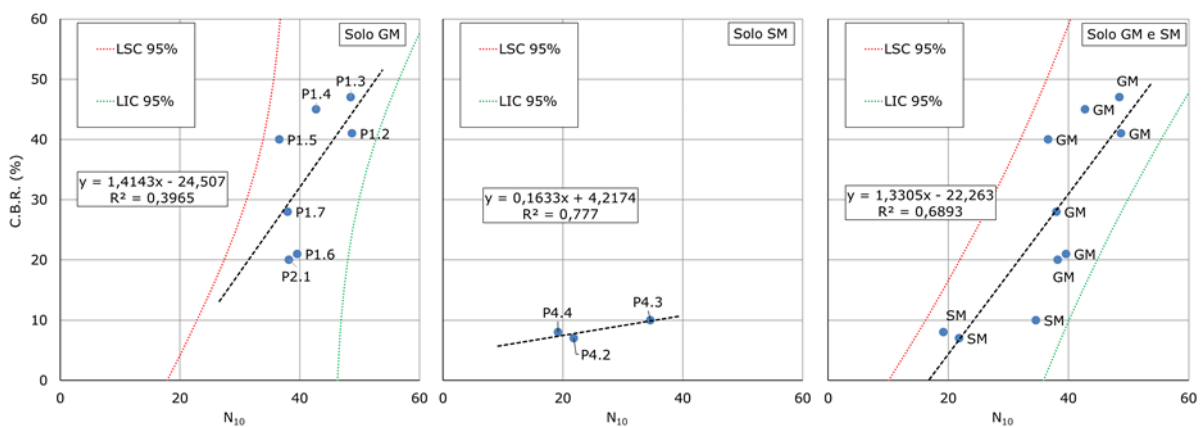


Figura 5 - Correlação entre N₁₀ e índice C.B.R. em solos de classe "GM", "SM" e "GM e SM"

Na Figura 5 o valor de R² é de 0,3965 para os solos da classe GM; este valor é muito baixo. Convém salientar que os limites de confiança estão próximos dos pontos de correlação. Para o solo da classe SM o coeficiente de correlação linear (R²) é de 0,777; este valor é razoável. No entanto os limites inferiores e

superiores de confiança a 95% estão muito afastados dos resultados obtidos (não sendo possível representar no gráfico tais curvas), o que indica a elevada variabilidade dos resultados, isto provavelmente devido ao número limitado de resultados obtidos.

Quando se analisa os resultados das duas classes de solos "GM e SM" na mesma relação, o valor de R^2 é de 0,6893. Também se verifica que os limites de confiança estão próximos da curva de tendências.

4.2 - Correlação entre N_{10} e grau de compactação *in situ*.

Na Figura 6 estão apresentados as correlações entre os resultados dos ensaios PDL e o grau de compactação *in situ*. Para estas correlações, foram utilizados os solos classificados como GM (cascalhos siltosos com finos não plásticos) presentes na Zona 1 e 2 e SM (Areia siltosa com cascalho) presentes na zona 4. Na seguinte figura além das correlações também foram representados os limites inferiores e superiores de confiança a 95% e o coeficiente de correlação linear (R^2).

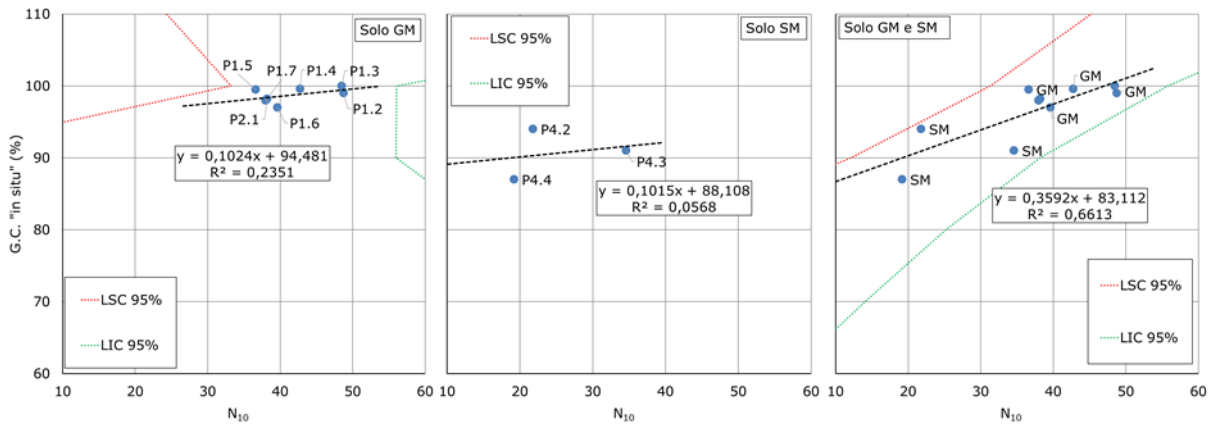


Figura 6 - Correlação entre N_{10} e o grau de compactação *in situ* em solos de classe "GM", "SM" e "GM e SM"

Para o solo da classe GM, o coeficiente de correlação linear é de 0,2351; este valor é muito baixo. Os limites superior e inferior de confiança estão afastados da curva de tendências o que indica a fraca ou quase nula relação entre o grau de compactação com o resultado do ensaio PDL. Para os solos da classe SM, o coeficiente de correlação linear é de 0,0568; este valor é nulo. Também se observa que os limites de confiança estão afastados da curva de tendências, não é possível representa-los na figura.

Para o conjunto das duas classes de solos "GM e SM" o coeficiente de correlação linear é de 0,6613; este valor é apenas razoável. No entanto é possível observar que o limite inferior e superior de confiança estão realmente próximo, indicando pouca variabilidade nos resultados obtidos. De referir que quando se analisou esta correlação separadamente para os dois tipos de solos, os limites inferiores e superiores de confiança estavam realmente muito afastados.

4.3 - Correlação entre N_{10} e módulo de deformabilidade do solo (Ev2).

Nas Figuras 7 estão representados as correlações entre os resultados dos ensaios PDL e o ensaio de carga em placa, ambos realizados *in situ*. Para estas correlações, foram utilizados os solos classificados como GM. Além das correlações também foram representados os limites inferiores e superiores de confiança a 95% e o coeficiente de correlação linear (R^2).

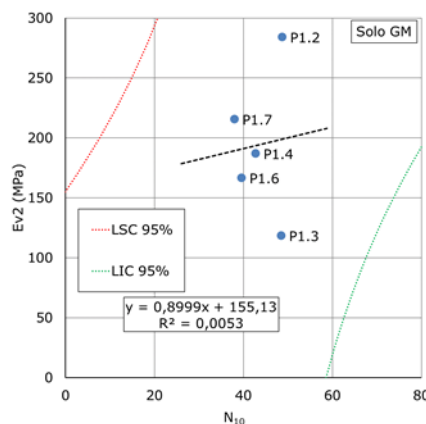


Figura 7 - Correlação entre N_{10} e o módulo de deformabilidade (Ev2) em solos de classe "GM".

O coeficiente de correlação linear (R^2) é de 0,0053; este valor nulo, o que indica que a relação entre estes parâmetros é nula. Além disso, os limites de confiança estão afastados dos pontos de correlação.

5 - CONCLUSÕES

Como foi referido, existe uma grande quantidade de ensaios para caracterizar e identificar um solo. Alguns mais utilizados devido a serem mais simples e antigos e serem aqueles que os métodos de dimensionamento empíricos recomendam utilizar, no entanto, ao longo dos anos foram-se desenvolvendo outros ensaios que permitem completar os resultados obtidos.

Este trabalho, pretende correlacionar a resistência a penetração dinâmica do ensaio PDL com o índice C.B.R., o grau de compactação *in situ* e o módulo de deformabilidade do solo determinado no ensaio de carga em placa. O primeiro passo foi a realização de ensaios de identificação (granulometria, grandezas básicas e os limites de consistência) que permite conhecer a composição do solo e a sua classificação unificada. Distinguem-se duas categorias de solo ao longo dos locais ensaiados, os solos de classe GM descritos como cascalhos siltosos, misturas de cascalho, areia e silte mal graduados e tendo finos não plásticos e os solos de classe SM descritos como areias siltosas, misturas mal graduadas de areia e silte e com finos não plásticos.

Há grande variabilidade nas correlações obtidas. Considerando as correlações obtidas com os resultados dos ensaios, as correlações lineares obtidas são fracas. Para a correlação entre o CBR e o N_{10} o coeficiente de correlação linear (R^2) varia entre 0,397 e 0,777, este último para o solo SM. Para a correlação entre o grau de compactação *in situ* e o N_{10} o coeficiente R^2 é ainda menor, entre 0,057 e 0,661, este último quando se analisa o conjunto dos resultados das duas classes de solo "GM e SM".

Analisando a correlação entre o módulo de deformabilidade E_{v2} e o N_{10} do ensaio PDL é possível verificar uma tendência idêntica à observado para os outros parâmetros, mas com coeficientes de correlação linear muito mais baixos, igual a 0,005, o que indica a nula correlação entre os parâmetros pelo menos para os resultados obtidos neste trabalho.

As correlações obtidas neste trabalho revelam que devem ser realizados mais ensaios e a uma escala maior de caracterização do solo (C.B.R, graus de compactação *in situ*, módulos de deformabilidade) e correlaciona-los com os resultados do ensaio PDL (N_{10}). Assim será possível ajustar os resultados obtidos e confirmar a correspondência entre os parâmetros e verificar se realmente há correlação linear ou não.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Geotecnia do Instituto Politécnico de Bragança pelo apoio prestado na realização de todos os ensaios necessários.

REFERÊNCIAS

- AFNOR NF P94-117-1 (2000). Sols: reconnaissance et essais - Portance des plates-formes - Partie 1: module sous chargement statique à la plaque (EV2)". Association Française de Normalisation, Paris.
- ASTM D 2487-85 (1985). Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). American Society for Testing and Materials.
- ASTM D1883-14 (2014). Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils. American Society for Testing and Materials.
- JAE, (1995). Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional. JAE (atual EP), Almada.
- LGIPB, (2013). Relatório Geotécnico – Rua Alexandre Herculano, Bragança. Laboratório de Geotecnia do Instituto Politécnico de Bragança, Bragança.
- LGIPB, (2013). "Relatório Geotécnico – Rua D. António Machado, Bragança". Laboratório de Geotecnia do Instituto Politécnico de Bragança, Bragança.
- Martins J.P., Correia, A.G., Caldeira L., Neves E.M., Delgado, J.L.C., (2008-1). "Comparação de resultados de ensaios de carga com placa segundo as normas AFNOR NF P94-117-1 e DIN 18134" Sociedade Portuguesa de Geotecnia, Coimbra.
- Martins J.P., Correia, A.G., Caldeira L., Neves E.M., Delgado, J.L.C., (2008-2). "Comparação de resultados de ensaios para avaliação da qualidade de construção de camadas de aterros para linhas férreas de alta velocidade" Sociedade Portuguesa de Geotecnia, Coimbra.

- Matos Fernandes, Manuel, (2011). Mecânica dos Solos, introdução à Engenharia Geotécnica. Volume II, Universidade do Porto, FEUP.
- Minhoto, M. J. C., (2012/2013). Apontamentos das aulas teóricas da Cadeira de Infraestruturas de Transportes. Mestrado em Engenharia da Construção, Instituto Politécnico de Bragança, ESTIG.
- Morais, H. M. M., (2011). Estudo da fundação dum pavimento rodoviário flexível. Tese de Mestrado em Engenharia da Construção, Instituto Politécnico de Bragança, ESTIG.
- NP EN ISO 22476-2 (2008). Geotechnical investigation and testing -- Field testing -- Part 2: Dynamic Probing. Norma Portuguesa, Norma Europeia. International Organization for Standardization.
- Quaresma, L., (1985). Características mecânicas de camadas de pavimentos rodoviários e aeroportuários constituídas por materiais granulares . Dissertação para obtenção do grau de mestre em mecânica de solos, Universidade Nova de Lisboa.
- Santos, J.M.R., (2010). Materiais utilizados na construção de pavimentos rodoviários. Tese de Mestrado em Engenharia civil, Universidade Aveiro, Aveiro, Portugal.