

A GEOTECNIA E OS DESAFIOS SOCIETAIS

20-23 de Junho
2016 Porto

15CNG
Congresso
Nacional de
Geotecnia

8CLBG
Congresso
Luso-Brasileiro
de Geotecnia



CORRELAÇÕES ENTRE RESULTADOS DE ENSAIOS DE PENETRAÇÃO DINÂMICA (DP) COM O ENSAIO STANDARD PENETRATION TEST (SPT)

CORRELATIONS BETWEEN THE RESULTS OF DYNAMIC PENETRATION TEST (DP) WITH STANDARD PENETRATION TEST (SPT)

Afonso, André Filipe; *Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, Portugal, a20592@alunos.ipb.pt*

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

Braz César, Manuel; *Departamento de Mecânica Aplicada do Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, Portugal, brazcesar@ipb.pt*

RESUMO

Não se conhecem métodos que permitam interpretar teoricamente os resultados dos ensaios com o Penetrómetro Dinâmico (DP) para obter parâmetros mecânicos do terreno, e as correlações empíricas que existem têm pouca fiabilidade comparável a outros ensaios, como o Standard Penetration Test (SPT). No entanto têm surgido alguns trabalhos na bibliografia com o objetivo de correlacionar os resultados dos dois ensaios de penetração, principalmente entre o Penetrómetro Dinâmico Superpesado (DPSH) e o Standard Penetration Test (SPT). Assim, este trabalho pretende, apresentar e correlacionar os resultados dos dois tipos de ensaios "in situ" a ser executados em diferentes solos na região do nordeste transmontano e com os equipamentos disponíveis no Laboratório de Geotecnia do Instituto Politécnico de Bragança.

ABSTRACT

There are no theoretical methods to interpret the mechanical parameters of the soil with results of the Dynamic Penetrometer Test (DP) and the empirical correlations that exist have little reliability comparable with other tests, like the Standard Penetration Test (SPT). However there have been performed some work, in the literature, to correlate the results of this two penetration tests, especially between the Dynamic Penetrometer Superheavyweight Test (DPSH) and the Standard Penetration Test (SPT). Thus, this work intends to present and correlate the results of this two types of tests in different soils in the north-east region of Portugal and with the equipment available in the geotechnical laboratory of the Polytechnic Institute of Bragança.

1 - INTRODUÇÃO

A caracterização geotécnica do terreno através da realização de ensaios in situ, torna-se imprescindível em obras de engenharia, através do qual consegue-se adotar decisões de projeto e execução mais eficientes, precisas, seguras e económicas.

Os ensaios de penetração são os mais difundidos na prospeção geotécnica, salientando-se três tipos de penetrómetros: o ensaio de penetração SPT (Standard Penetration Test), o ensaio de penetração estática CPT (Cone Penetration Test) e o ensaio com penetrómetros dinâmicos DP (Dynamic Probing). Os penetrómetros de utilização mais corrente em Portugal são o penetrómetro dinâmico ligeiro (DPL) e o penetrómetro dinâmico superpesado (DPSH).

O presente estudo, pretende apresentar os resultados de correlações entre os ensaios SPT e DPSH realizados em Bragança, nas proximidades do Instituto Politécnico de Bragança.

Devido ao facto de estes dois ensaios, SPT e DPSH, possuírem especificações semelhantes, permitiu o estabelecimento de correlações diretas entre os resultados destes dois ensaios de penetração.

O ensaio SPT, é hoje em dia um dos ensaios mais utilizados em todo o mundo. Como consequência da sua ampla aplicação em diferentes tipos de solos e condições, e estando em certas situações associado a outros ensaios in situ e/ou laboratoriais, existem numerosos estudos de correlação dos dados do ensaio com características mecânicas, de deformabilidade e identificação de maciços terrosos. Enquanto que para o DPSH, não existem correlações abundantes e fiáveis que permitam estimar diretamente, e com a mesma fiabilidade, os parâmetros geotécnicos a partir dos resultados dos ensaios.

Assim, é prática corrente relacionar os valores resultantes do ensaio DPSH (N_{DPSH}) com os valores do SPT (N_{SPT}), e a partir daí obter os parâmetros geotécnicos. Esta associação entre os ensaios é frequente nas campanhas de caracterização geotécnica de áreas com alguma dimensão, permitindo combinar uma malha mais reduzida de ensaios SPT com outra mais apertada de ensaios DPSH, mais rápidos e económicos de executar, resultando numa caracterização mais completa do terreno.

Em Portugal, diversos autores estudaram a correlação entre estes dois ensaios, designadamente Fonseca (1996), Fonseca et al. (2000), Cavaleiro (2001) e Martins e Miranda (2003), entre outros.

2 - EQUIPAMENTO UTILIZADO

Para a realização dos ensaios de penetração SPT e DPSH, foi utilizado um penetrómetro dinâmico portátil de lagartas, do Laboratório de Geotecnia do Instituto Politécnico de Bragança, representado na Figura 1. Este penetrómetro tem acoplado uma cabeça de rotação para a utilização de um trado helicoidal de 3", permitindo assim, com o mesmo equipamento, realizar o ensaio SPT.



Figura 1 - Penetrómetro dinâmico portátil do Laboratório de Geotecnia do Instituto Politécnico de Bragança

Os procedimentos de execução dos ensaios DPSH e SPT foram realizados segundo a Norma EN ISO 22476-2:2005 e a Norma EN ISO 22476-3:2005, respetivamente.

A Norma EN ISO 22476-2:2005, subdivide os ensaios de penetração dinâmica em cinco níveis energéticos, de acordo com o apresentado no Quadro 1. No caso em estudo, o equipamento utilizado tem uma massa do martelo de 64 kg e uma altura de queda de 760 mm, correspondendo ao penetrómetro dinâmico DPSH-B.

Quadro 1- Características de referência para os quatro tipos de ensaios de penetração dinâmica segundo Norma EN ISO 22476-2:2005

Dispositivos para ensaios de penetração dinâmica	Simb.	Un.	DPL (ligeiro)	DPM (médio)	DPH (pesado)	DPSH (super pesado)	
						DPSH-A	DPSH-B
Dispositivo de queda							
Massa do martelo, M	m	kg	10±0,1	30±0,3	50±0,5	63,5±0,5	63,5±0,5
Altura de queda, H	h	mm	500±10	500±10	500±10	500±10	750±20
Cone de 90°							
Área nominal da base	A	cm ²	10	15	15	16	20
Diâmetro da base	D	mm	35,7±0,3	43,7±0,3	43,7±0,3	45,0±0,3	50,5±0,5
Comprimento da camisa cilíndrica	L	mm	35,7±1	43,7±1	43,7±1	90,0±2	51,0±2
Varas							
Massa	m	kg/m	3	6	6	6	6
Diâmetro exterior (máx.)	d	Mm	22	32	32	32	35
Energia específica por pancada	E _n	kJ/m ²	50	100	167	194	238

As características mencionadas para o penetrómetro DPSH-B (massa do martelo e altura de queda), são iguais às do SPT, de acordo com a Norma EN ISO 22476-3:2005. Assim sendo, em termos de energia cinética, o DPSH-B assemelha-se ao SPT.

A principal vantagem do ensaio SPT em relação ao ensaio DPSH, é o facto de associar a uma resistência à penetração a recolha de amostras remexidas ao logo de um perfil, possibilitando a identificação do solo.

Em relação à utilização dos penetrómetros dinâmicos, ao haver o registo contínuo da resistência do solo em profundidade, ao contrário do SPT, constituem os métodos mais adequados para a apreciação da posição

do "firme" e como detetores de irregularidades do subsolo, o qual não se obtém através de métodos descontínuos como é o caso do SPT.

O registo do número de pancadas no ensaio DPSH foi realizada em cada 20 cm (N_{DPSH}), enquanto no SPT se faz a cada 30 cm de penetração (N_{SPT}), sendo que os resultados apresentados das relações entre o número de pancadas dos dois ensaios têm em consideração a razão entre os dois comprimentos. As relações estabelecidas entre N_{SPT} e N_{DPSH} , só são válidas para o tipo de solo caracterizado, dado estas dependerem das características do solo e das características específicas dos equipamentos utilizados não são generalizáveis para outras situações. A eficiência do equipamento de ensaio para a realização dos dois tipos de ensaio é de 60%. A eficiência foi igual em todos os ensaios.

Teoricamente, a relação entre os resultados dos ensaios SPT e DPSH pode ser estabelecida em termos de energia específica de penetração (equação 1 e 2), que traduz a energia específica do martelo por unidade de área da secção da ponteira do DPSH ou do amostrador de Terzaghi no ensaio SPT.

$$E_S = \frac{M \cdot g \cdot H}{S} \quad [1]$$

$$E_{S,DPSH} \cdot \frac{N_{DPSH}}{L_{DPSH}} = E_{S,SPT} \cdot \frac{N_{SPT}}{L_{SPT}} \quad [2]$$

Sendo M a massa do martelo, g a aceleração da gravidade, H a altura de queda, S a área nominal da ponteira (ou do amostrador de Terzaghi) e L o comprimento de cravação num dado solo.

No entanto, existem duas hipóteses a considerar para a área do amostrador de Terzaghi: considerando que o amostrador está a trabalhar como um conjunto ($S=2040 \text{ mm}^2$), principalmente a partir de determinada profundidade em que o solo dentro do amostrador passa exercer alguma reação à cravação existindo pressões elevadas de confinamento, ou considerando apenas a secção transversal do amostrador ($S=1080 \text{ mm}^2$).

Resolvendo a equação 2 obtêm-se os limites teóricos, em termos de relações energéticas, para a relação entre o ensaio SPT e o DPSH, de acordo com a seguinte expressão:

$$1,5 > \frac{N_{SPT}}{N_{DPSH}} > 0,8 \quad [3]$$

A validade desta relação foi contestada, mais tarde, por Fonseca et al. (2000), indicando que o valor de N_{SPT}/N_{DPSH} tende a ser superior a 1,5 para valores de N_{SPT} superiores a 20.

3 - LOCAIS DE ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS ESTUDADOS

3.1 - Localização

Para a realização dos ensaios objeto deste estudo, selecionaram-se três locais na zona de Bragança, os quais se designaram por Campos Experimentais. Foram realizados ensaios num terreno pertencente a empresa Faurecia-sistemas De Escape Portugal Lda (Campo Experimental 1), num terreno da zona industrial das Cantarias em Bragança (Campo Experimental 2) e finalmente num terreno na R. Alexandre Herculano em Bragança (Campo Experimental 3). Na Figura 2, encontra-se representada o enquadramento dos três locais selecionados na cidade de Bragança, a distribuição dos ensaios SPT e DPSH no Campo Experimental 1, 2 e 3 estão representados na Figura 3.



Figura 2 - Localização dos campos experimentais e distribuição dos ensaios no Campo Experimental 1

No Campo Experimental 1, foram realizados 9 ensaios SPT e 8 ensaios DPSH, adjacentes aos primeiros, de acordo com o apresentado na Figura 3. Em relação ao Campo Experimental 2 e 3 foram realizados 3 ensaios SPT e 3 ensaios DPSH. No total foram realizados 15 ensaios SPT e 14 ensaios DPSH.

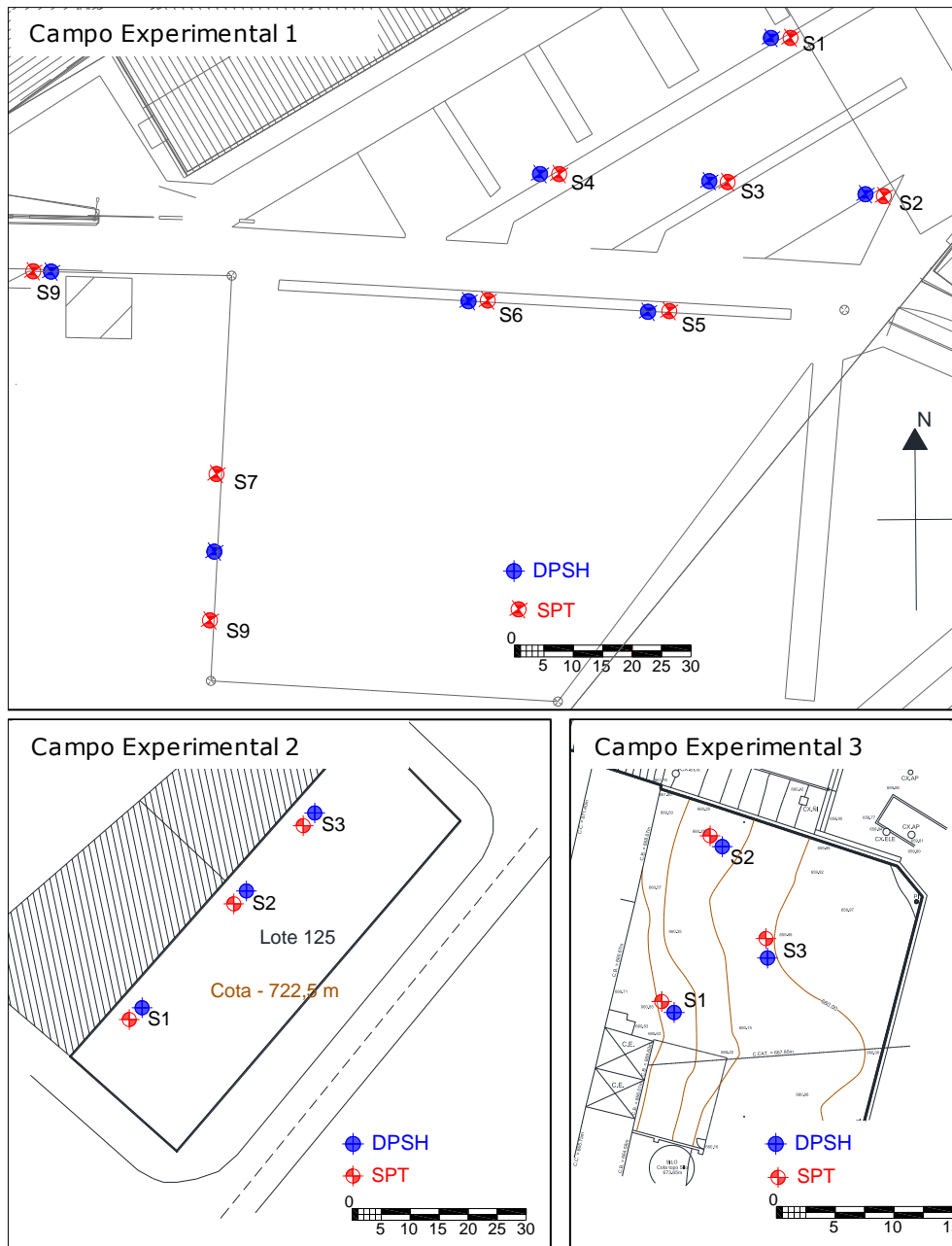


Figura 3 – Distribuição dos ensaios (SPT e DPSH) no Campo de Experimental 1, 2 e 3

3.2 - Características geotécnicas dos solos atravessados

Para a caracterização geotécnica do subsolo, em todos os pontos de sondagem foram feitas colheitas de amostras remexidas do solo intersetado, através do amostrador do ensaio SPT.

No Campo Experimental 1, verificou-se que o maciço atravessado é um solo homogéneo, tratando-se de uma só formação geológica. O solo atravessado é predominantemente arenoso ($\pm 40\%$) com cerca de 33% de silte e argila e 27% de seixo. Segundo a classificação unificada de solos "ASTM D 2487-85", trata-se de uma areia siltosa com cascalho (classificação unificada **SM**), de cor avermelhada. O diâmetro médio das partículas (D_{50}) é de cerca de 0,5 mm.

O solo do Campo Experimental 2 é também um solo homogéneo predominantemente arenoso com cerca de 50% de areia, 30% de seixo e 20% de silte. Segundo a classificação unificada de solos, no ponto de ensaio S1 e S3 é um cascalho siltoso com finos não plásticos (classificação unificada **GM**). No ponto de ensaio S2 é uma areia siltosa com cascalho (classificação unificada **SM**). O diâmetro médio das partículas (D_{50}) varia entre 0,2 a 1,5mm. O solo encontra-se compacto a denso.

Das 3 zonas, o solo do Campo Experimental 3 é o solo mais fino. É também um solo homogéneo em profundidade. Segundo a classificação unificada é uma areia com argilosa **SC** nos pontos de ensaio S1 e S3 e cascalho com argila **GC** no ponto de ensaio S2. A densidade relativa do solo é compacto a denso. O diâmetro médio das partículas (D_{50}) varia entre 0,2 a 1,0mm.

No quadro 2 apresenta-se um resumo com algumas propriedades dos solos intersetados neste trabalho.

Quadro 2- Principais parâmetros do maciço atravessados

Campo Experimental	Classificação do Solo ASTM D 2487-85	Densidade do Solo
1	SM Areia siltosa com cascalho	Compacto a denso
2	GM ou SM Cascalho siltoso com finos não plásticos ou Areia siltosa com cascalho	Compacto a denso
3	GC ou SC Cascalho com argilas ou Areia argilosa	Compacto a denso

4 - RESULTADOS DOS ENSAIOS

Para realizar o ensaio SPT foram usados com trado helicoidais de 3" de diâmetro, tendo no final de cada manobra de perfuração (comprimentos de 1,0m) realizado um ensaio Standard Penetration Test SPT.

A título meramente indicativo, na Figura 4, compara-se os valores obtidos dos ensaios SPT e DPSH, realizados no ponto de ensaio S2 do Campo Experimental 1. Através da análise, verifica-se que em relação ao ensaio DPSH, existem quebras bruscas da resistência à penetração e apresenta resistências elevadas a baixa profundidade, permitindo concluir que se trata de fenómenos localizados e não traduzindo a resistência matriz do solo.

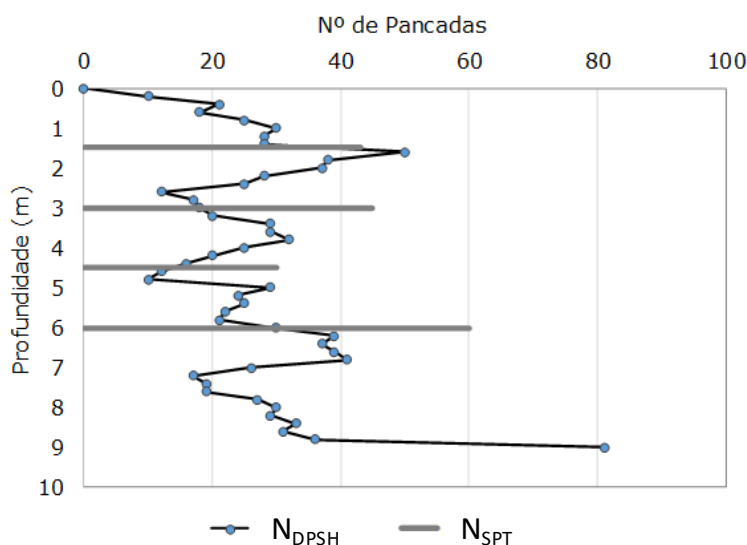


Figura 4 - Resultado dos ensaios SPT e DPSH no ponto de ensaio 2 do Campo Experimental 1

Todos os dados apresentados, correspondem aos valores medidos diretamente do ensaio, aos quais não foi aplicado nenhum tipo de correlação ou normalização, tendo sido diretamente correlacionados os valores de N_{SPT} e N_{DPSH} obtidos a uma determinada profundidade.

Na Figura 5, encontra-se representado os valores dos ensaios SPT realizados no decorrer do presente estudo, tendo sido coligidos no total 33 valores de N_{SPT} , em que 47% desses são para valores de $N_{SPT} > 40$ pancadas. A profundidade máxima atingida com o ensaio SPT foi de 7,5 metros.

A partir dos registos dos ensaios, realizou-se uma regressão linear entre os valores dos ensaios SPT (N_{SPT}) com os correspondentes do ensaio DPSH (N_{DPSH}) e o cálculo do coeficiente de determinação, R^2 , obtendo-se os resultados representados na Figura 6, e a seguir apresentados.

Campo Experimental 1:

$$N_{SPT} = 1,70 \cdot N_{DPSH}$$

Campo Experimental 2:

$$N_{SPT} = 0,96 \cdot N_{DPSH} \quad [5]$$

Campo Experimental 3:

$$N_{SPT} = 0,87 \cdot N_{DPSH} \quad [6]$$

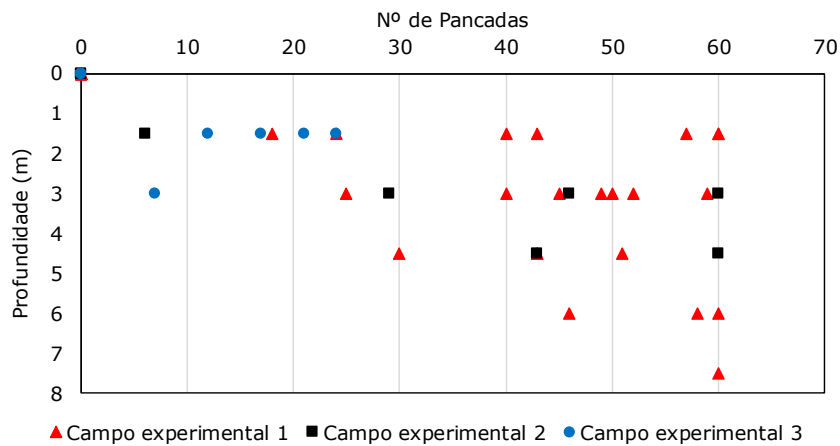


Figura 5 - Valores do ensaio N_{SPT} coligidos

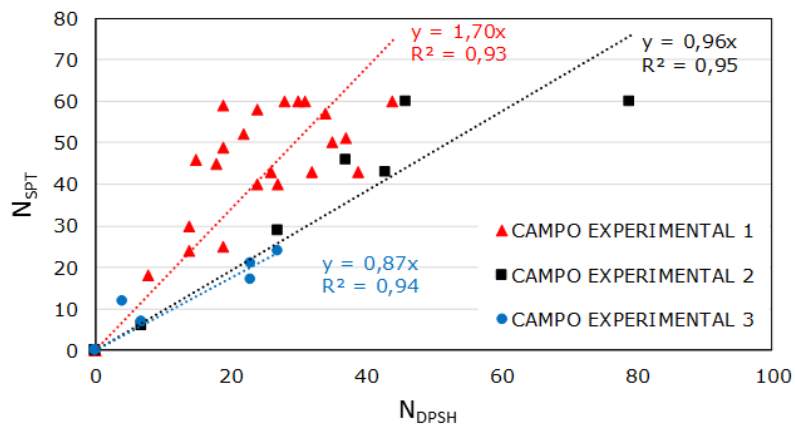


Figura 6 - Relação entre o ensaio N_{SPT} e N_{DPSH}

O valor do coeficiente de correlação linear, R^2 , é igual a 0,93 para o Campo experimental 1, 0,95 para o Campo Experimental 2 e de 0,94 para o Campo Experimental 3; estes valores são elevados e próximos da unidade o que indica a boa correlação linear existente entre os dois ensaios.

Na Figura 7 apresenta-se a variação das relações de N_{SPT}/N_{DPSH} com o valor do N_{SPT} do ensaio SPT. Da análise da figura, é possível verificar que todos os valores da relação N_{SPT}/N_{DPSH} obtidos no Campo Experimental 2 se encontram nos limites teóricos obtidos pela expressão teórica da equação 3. Para os valores do Campo Experimental 3, o mesmo acontece à exceção de um valor que está acima do valor teórico superior de 1,5 (com o valor aproximado de 3). Para os valores do Campo Experimental 1 verifica-se que os valores da relação N_{SPT}/N_{DPSH} são mais dispersos e alguns estão acima do limite superior de 1,5, mas sempre inferior a 3,5. A dispersão tende a acentuar-se quando o valor do $N_{SPT} > 40$.

De um modo geral, com o aumento do N_{SPT} tende a aumentar o valor da relação entre N_{SPT}/N_{DPSH} . Para valores de $N_{SPT} > 40$, as relações entre N_{SPT}/N_{DPSH} tendem a ser superiores a 1,5.

Desta análise, conclui-se que a relação entre SPT e DPSH não são constantes e crescem com o valor de N_{SPT} , não sendo fiáveis as correlações energéticas representadas pela equação 3, estando de acordo com Fonseca (2000).

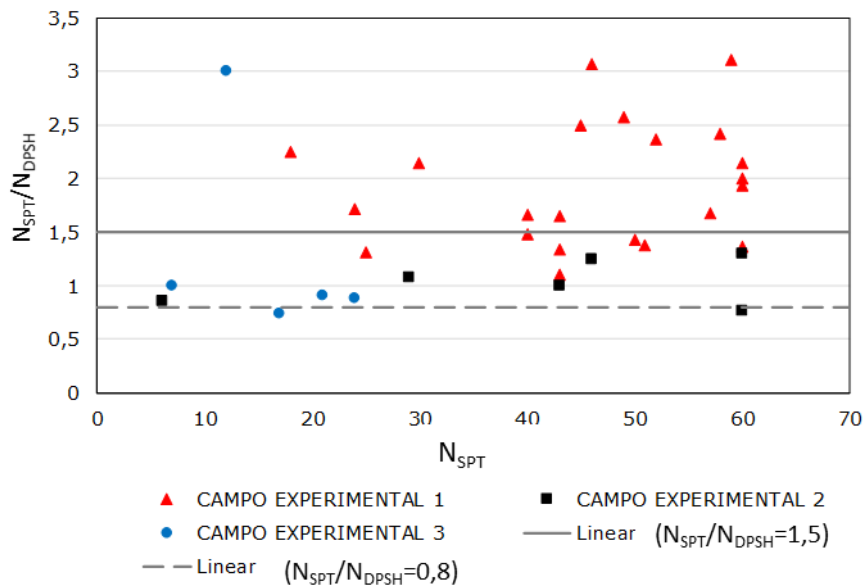


Figura 7 - Relação entre N_{SPT}/N_{DPSH} e N_{SPT}

5 - CONCLUSÕES

Dentro dos ensaios in situ, os penetrómetros dinâmicos apresentam-se como sendo um meio mais expedito para a determinação de um grande número de parâmetros do solo.

A escolha de estes dois ensaios para efeitos comparativos recaiu sobre a semelhança existente entre as características dos dois equipamentos.

Em relação ao ensaio SPT, mesmo usando o mesmo peso do martelo do ensaio DPSH, o amostrador de Terzaghi tem uma menor capacidade de penetração que a ponteira do ensaio DPSH. Em termos de execução do ensaio, o SPT é muito mais moroso, devido ao facto de ser necessário tirar o amostrador após um ensaio a determinada profundidade.

As relações entre o número de pancadas do DPSH e SPT (N_{SPT}/N_{DPSH}), é de 0,87 a 1,7, e o valor do coeficiente de determinação (R^2) varia entre 0,93 a 0,95. Estes coeficientes, sendo próximos da unidade são bons e superiores aos resultados obtidos por Viana Fonseca (2000). O que indica uma boa correlação entre os resultados dos dois tipos de ensaios.

Dos resultados obtidos pode-se também concluir que a relação entre SPT e DPSH não são constantes e crescem com o valor de N_{SPT} , para valores de $N_{SPT} > 40$, as relações entre N_{SPT}/N_{DPSH} tendem a ser superiores ao limite superior teórico de 1,5.

As correlações obtidas não são aplicáveis para outros tipos de solos nem para outros equipamentos, mesmo com características semelhantes. Caso contrário pode levar a resultados incorretos.

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS

- Cavaleiro, V. M. P. (2001). *Correlação entre o Ensaio de Penetração Dinâmica Super Pesado (DPSH) e o Ensaio de Penetração Dinâmica Normalizado (SPT) em Solos Graníticos da Covilhã*. Universidade da Beira Interior, Covilhã.
- Cruz, N. (2010). *Modelling Geomechanics of Residual Soils with DMT Tests*.
- EN ISO 22476-2 *Geotechnical investigation and testing. Field testing. Part 2: Dynamic probing*.

- EN ISO 22476-3 *Geotechnical investigation and testing. Field testing. Part 3: Standard penetration test.*
- Martins, J., Miranda, T. (2003). *Ensaios de Penetração nos Solos Graníticos da região Norte de Portugal. Algumas Correlações.*
- Matos Fernandes, M. (2011). *Mecânica dos Solos. Introdução à Engenharia Geotécnica, Vol.2.* Edições FEUP, Porto.
- Fonseca, A. Viana (1996). *Geomecânica dos Solos Residuais do Granito do Porto. Critérios para Dimensionamento de Fundações Diretas.* Dissertação de Doutoramento, FEUP, Porto.
- Fonseca, A. Viana et al. (2000). *Caracterização Geotécnica de um troço de Túnel 1- Porto,* VII Congresso Nacional de Geotecnia, Porto.