

Avaliação da Variabilidade e de Incertezas Relacionadas aos Resultados de Ensaios Executados com Penetrômetro Dinâmico Leve (DPL) em Solos do Estado do Paraná

Charles Henrique Borges do Canto
LACTEC/PPGCC-UFPR, Curitiba, Brasil, charlesborges@hotmail.com

Andrea Sell Dyminski
UFPR, Curitiba, Brasil, asdymi@ufpr.br

Alessander Christopher Morales Kormann
UFPR, Curitiba, Brasil, alessander@ufpr.br

Laryssa Petry Ligocki
LACTEC, Curitiba, Brasil, laryssa@lactec.org.br

RESUMO: O trabalho objetiva mostrar as possíveis variabilidades e incertezas do ensaio DPL e correlações de resultados com ensaios CPT em solos das regiões de Curitiba, Cascavel e Guaíra, no Estado do Paraná. Justifica-se essa iniciativa uma vez que não há estudos mais aprofundados publicados na literatura nacional sobre a validação do ensaio DPL, nem ao menos correlações mais aguçadas com outros métodos de ensaios. São descritos o ensaio DPL, os métodos de análise dos dados, a metodologia empregada na obtenção dos dados para análise, bem como os parâmetros utilizados, e os resultados obtidos com a análise estatística. Finalmente, enfatizam-se as correlações estabelecidas, para que os resultados do ensaio DPL possam ser utilizados diretamente para cálculos preliminares de fundações, inicialmente em estruturas de pequeno porte.

PALAVRAS-CHAVE: DPL, Análise Estatística, Incertezas.

1 INTRODUÇÃO

Um problema contemporâneo na área de construção civil é o aumento do número de obras de pequeno porte sem um projeto confiável de fundação, muitas vezes gerado pela ausência ou quantidade insuficiente de investigações do subsolo. Uma alternativa para a solução desta falta de investigação pode ser o ensaio DPL - *Dynamic Probing Light*, ou penetrômetro dinâmico leve.

O objetivo principal deste trabalho foi o de se avaliar estocasticamente resultados obtidos pelo equipamento DPL através de experimentos em formações de solo situadas em Curitiba, Cascavel e Guaíra. Os resultados dos ensaios com DPL foram comparados com os obtidos em ensaios CPT - *Cone Penetration Test* e CPTu - *Piezococone Test*, procurando-se quantificar a variabilidade das medidas obtidas, bem como as incertezas a elas relacionadas.

2 ENSAIO DPL

2.1 Equipamento e procedimento de ensaio

Segundo Nilsson (2001), o penetrômetro dinâmico leve é um instrumento de investigação geotécnica que tem por finalidade fornecer índices sobre a resistência que o solo oferece à sua penetração (Figura 1). Consiste em uma ponteira cônica acoplada a um conjunto de hastes formadas por segmentos rosqueáveis, introduzidas no solo através de golpes de peso de cravação padronizado, com altura de queda também padronizada, contando-se o número de golpes para a penetração de 10 cm da haste.

O penetrômetro dinâmico leve é um equipamento leve e ágil, podendo ser correlacionado na prática com ensaio CPT.

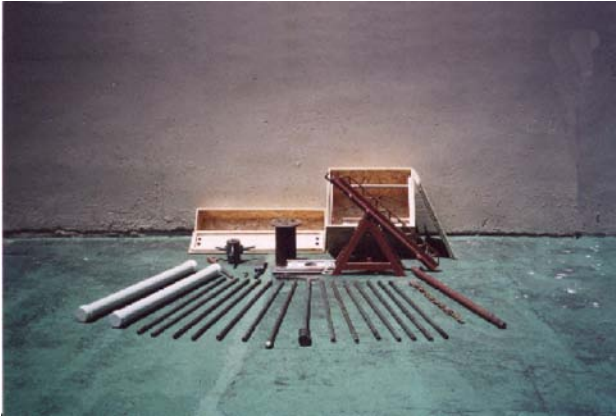


Figura 1. Equipamentos do ensaio DPL

O martelo é levantado e deixado cair livremente 50 cm, esse procedimento é repetido enquanto as hastes descem, até que a parte inferior do batente esteja a 10 cm da plataforma niveladora cilíndrica (Figura 2). Em solos finos com baixa permeabilidade a velocidade dos golpes não deve ultrapassar 30 golpes por minuto para evitar reflexo da energia emitida. Em solo granular, não-saturado, com boa permeabilidade, a frequência pode ser de até 60 golpes por minuto. N_{10} , a quantidade de golpes necessária para a penetração de cada 10 cm de haste é registrada na planilha de campo.



Figura 2. Execução do ensaio DPL

O martelo é removido após a introdução de 90 cm da haste, deixando-se 10 cm para se acoplar a chave que auxilia a fixação da próxima haste, e o batente é desrosqueado. Logo em seguida, o torquímetro é conectado ao topo da haste cravada no solo, para obter o momento de torque máximo e residual entre a ponteira cravada e o solo. O ensaio continua, repetindo-se o mesmo ciclo, acrescentando uma nova haste, batente e guia e martelo, novamente repetindo os procedimentos anteriores.

2.2 Aspectos Importantes na Comparação com o Ensaio DPL com o Ensaio CPT

Por se tratar de um equipamento portátil, sem nenhuma automatização de processos e pouco utilizado no cenário nacional, o DPL apresenta algumas fontes de incertezas inerentes a seu funcionamento, as quais precisam ser controladas antes e durante a execução do ensaio, para que seus resultados finais sejam suficientemente confiável para as correlações futuras (NILSSON, 2006).

Essas incertezas estão diretamente ligadas ao cumprimento das diretrizes de execução do ensaio, descritas na norma alemã DIN 4094/1990 e nos procedimentos de ensaio propostos por Thomas Nilsson, em meados de 2006.

Outra incerteza pode ser constatada quanto a forma de medida da resistência de penetração da ponteira no solo. No caso do ensaio DPL, essa medida é feita a cada 10 cm de profundidade, com o cravamento da haste (procedimento descrito no sub-item 2.1). Já no caso do ensaio CPT, essa medida é feita a cada 2 cm (padrão utilizado para a série de ensaios realizados). Essa diferença na forma de medição acarreta estudos mais criteriosos para determinação de uma correlação entre profundidade. Para esse estudo em questão, foi utilizada apenas a média simples dos valores obtidos em 5 segmentos de 2 cm do ensaio CPT para cada segmento de 10 cm do ensaio DPL.

Nesse caso, não foram consideradas as unidades de medida de resistência à cravação no solo de ambos os ensaios, ou seja, apenas foram correlacionados os resultados dos ensaios para se determinar o comportamento da curva de correlação para ambos os ensaios. Critérios como desempenho do operador do equipamento na hora do ensaio, tipo de solo ensaiado e condições climáticas também foram analisados mas não apresentaram influência significativa no resultado final dos ensaios, não sendo considerados assim fontes de incertezas que necessitam de controle especial.

3 METODOLOGIA

3.1 Ensaaios executados

Para realização do presente trabalho, foram coletados dados de resistência à penetração do subsolo através de ensaios CPT, CPTu e DPL em diferentes formações geológicas, localizadas nos municípios de Curitiba, Cascavel e Guaíra. Os resultados destes ensaios foram analisados e comparados estocasticamente (comparação estatística/probabilística) para determinação da variabilidade entre os ensaios.

A campanha de ensaios realizados para este estudo consistiu em 7 ensaios CPT e CPTu, realizados entre Setembro e Dezembro de 2007, sendo 3 na região de Cascavel (Furos CV1, CV2 e CV3), registrando-se solo com comportamento argiloso nos primeiros 4 m de profundidade e silte-argiloso nos demais metros até o limite da sondagem, 1 na região de Guaíra (Furo GR1), com formação argilo-siltosa em toda a profundidade do ensaio e 3 na região de Curitiba (Furos CB1, CB2 e CB3), com solo predominantemente da Formação Guabirotuba. Posteriormente, nessas mesmas localidades, foram executados 7 ensaios DPL, seguindo a mesma distribuição de furos, a uma distância aproximada de 2 m dos furos CPT, onde foram obtidas diversas resistências de penetração, visando a comparação com a resistência de ponta Q_c do ensaio CPT e CPTu.

Foi utilizado o critério de proximidade dos pontos para escolha, uma vez que se os pontos de sondagem CPT e DPL não estivessem próximos o suficiente (distância menor ou igual a 2 m), esses valores não seriam confiáveis e precisos. Essa distância foi adotada visando sair da zona de influência do ensaio CPT, mas também mantendo uma proximidade mínima aceitável do marco do ensaio.

3.2 Avaliação Estatística dos Dados Experimentais

A avaliação da variabilidade dos resultados de diferentes ensaios de campo pode ser um bom indicativo da qualidade dos procedimentos executados e das incertezas inerentes ao ensaio. Desta forma, procurou-se realizar a avaliação estatística dos resultados, tanto dos ensaios DPLs quanto dos CPTs executados nos sítios

anteriormente descritos.

O método aqui empregado consiste na análise estatística dos resultados obtidos em campo. Neste caso, foram calculados os parâmetros estatísticos básicos (média, desvio-padrão e COV – Coef. de variação) e taxa de flutuação vertical dos valores obtidos nos ensaios (ZHANG, 2004). Também foram avaliadas funções de distribuição de probabilidade que melhor caracterizavam os resultados obtidos pelos diferentes tipos de ensaios, realizados em cada uma das formações geológicas estudadas. Levando-se em conta a análise estocástica e os procedimentos e equipamentos usados nos ensaios, pôde-se também estimar algumas incertezas relacionadas ao DPL.

3.2 Análise estatística da variabilidade dos parâmetros

Para a análise estatística foi utilizado o software *Microsoft Excel* para o cálculo da média,

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} \quad (1)$$

desvio-padrão,

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

e COV – Coef. de variação.

$$c_v = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (3)$$

O software *Mathworks Matlab* também foi utilizado para execução de rotinas de filtragem dos dados, visando eliminar possíveis dados considerados ruidos, ou seja, dados discrepantes do conjunto, que influenciam os resultados finais.

3.3 Correlações Lineares

Para determinação das correlações lineares foi utilizado também o software *Microsoft Excel*, sendo criadas tabulações de dados equivalentes, correlações preliminares de valores de resistência à penetração entre os ensaios CPT e DPL e gráficos comparativos dos valores de Q_c médio (MPa) e N_{10} (golpes).

Tendo esses conjuntos de dados bem definidos, foram determinadas linhas de tendência com regressão linear, equação do gráfico e valor do R-quadrado (coeficiente de correlação entre os valores de Q_c médio e N_{10}), o que ajuda na análise da dispersão dos dados.

4 RESULTADOS

4.1 Análise estatística

Para análise estatística/probabilística foram utilizados os dados coletados dos ensaios, com filtragem e sem agrupamento por camadas de solo, ou seja, foram utilizados os dados com a remoção de valores discrepantes e considerando-se o solo como homogêneo em toda a profundidade ensaiada. A Figura 3 mostra os gráficos com os resultados obtidos nos ensaios de campo e com filtragem, na seqüência.

Com a aplicação, nos dados dos ensaios DPL, das rotinas de filtragem e análise de tendência de linearização (*DETREND*) no software *Mathworks Matlab* os dados discrepantes foram retirados e então as correlações geradas (SIVAKUMAR BABU *et al*, 2006). O critério de filtragem (linha de filtragem) utilizado foi baseado em valores ou pontos do gráfico que superassem uma distância de proximidade superior a duas vezes a distância média entre os pontos anterior e posterior ao observado.

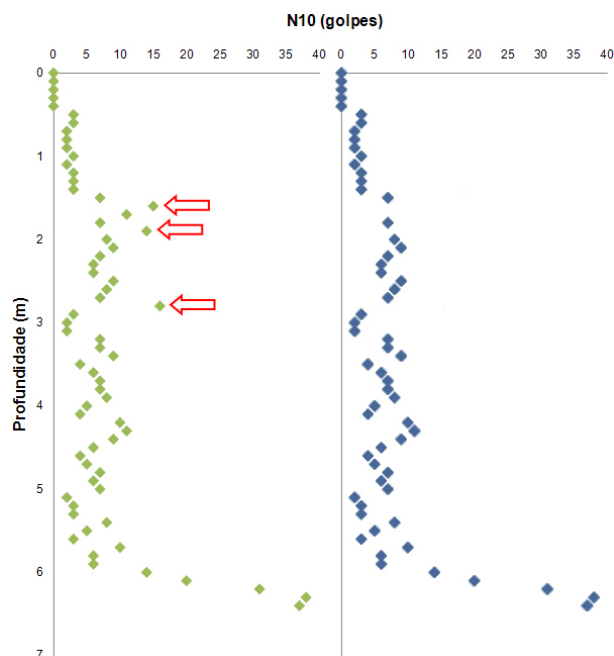


Figura 3. Gráfico com resultados obtidos nos ensaios de campo (esquerda) e com resultados filtrados (direita).

4.2 Correlações

Através das análises realizadas com os dados coletados pelos ensaios acima descritos, pôde-se avaliar a qualidade das medidas obtidas com o equipamento DPL para os solos pesquisados. Comparativamente aos dados dos ensaios CPT, e levando-se em conta o baixo custo, rápida execução e portabilidade do equipamento, pode-se dizer que o DPL é uma boa e segura alternativa de investigação, capaz de fornecer as informações sobre o subsolo necessárias para o projeto de fundações de obras de pequeno porte (NILSSON, 2001).

As Figuras 4 a 10 mostram as correlações estabelecidas entre os valores de Q_c médio (ensaio CPT e CPTu) e N_{10} (ensaio DPL) para os solos de Curitiba (3 furos de sondagem), Cascavel (3 furos de sondagem) e Guaíra (1 furo de sondagem). Para tal correlação, como mencionado anteriormente, foram utilizadas médias simples de valores de resistência à cravação no ensaio CPT, ou seja, média de 5 segmentos de 2 cm, totalizando os 10 cm de medição do DPL.

Esses pontos onde foram executados os ensaios possuem suas características de resistência medida também através de ensaio SPT, não utilizado para comparação nesse trabalho.

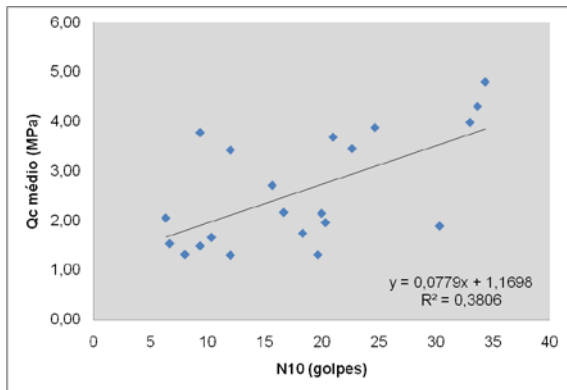


Figura 4. Correlação Q_c médio (CPT) x N_{10} (DPL) para solo da região de Curitiba – Furo CB1.

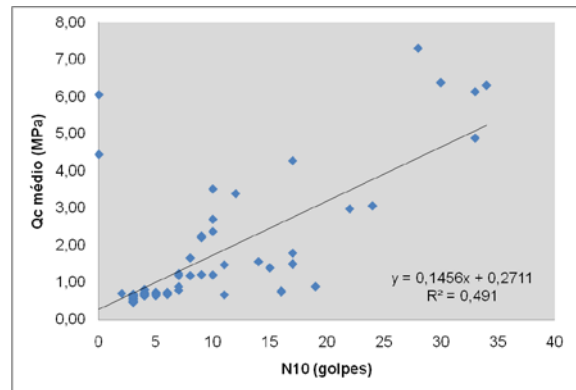


Figura 8. Correlação Q_c médio (CPT) x N_{10} (DPL) para solo da região de Cascavel – Furo CV2.

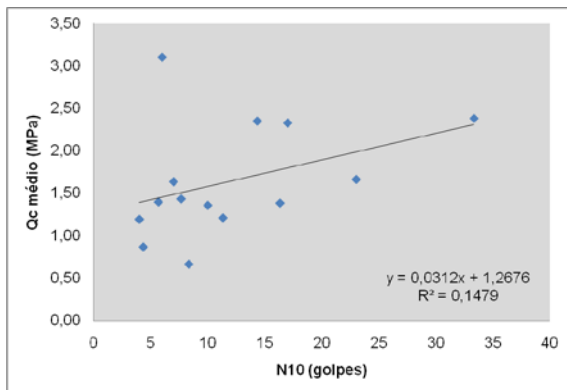


Figura 5. Correlação Q_c médio (CPT) x N_{10} (DPL) para solo da região de Curitiba – Furo CB2.

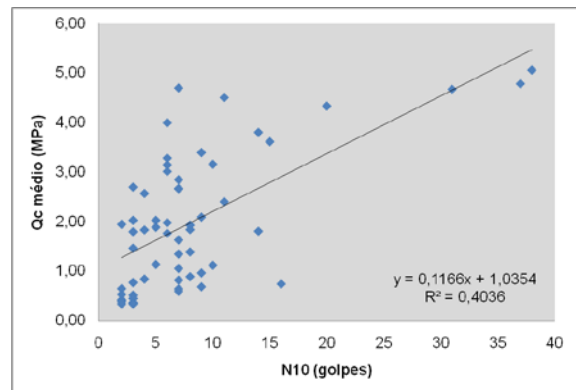


Figura 9. Correlação Q_c médio (CPT) x N_{10} (DPL) para solo da região de Cascavel – Furo CV3.

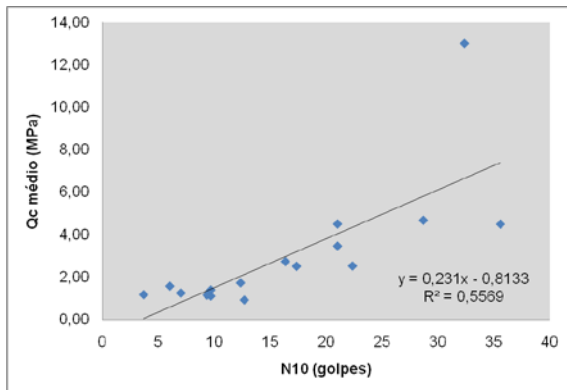


Figura 6. Correlação Q_c médio (CPT) x N_{10} (DPL) para solo da região de Curitiba – Furo CB3.

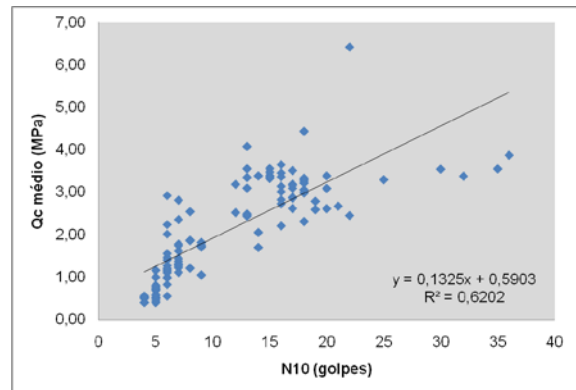


Figura 10. Correlação Q_c médio (CPT) x N_{10} (DPL) para solo da região de Guaíra – Furo GR1.

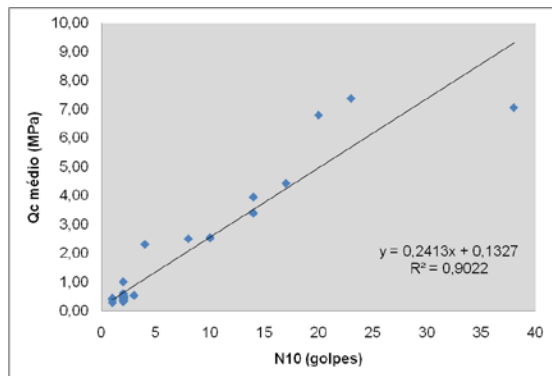


Figura 7. Correlação Q_c médio (CPT) x N_{10} (DPL) para solo da região de Cascavel – Furo CV1.

4.3 Interpretação dos resultados

Concluída a etapa de correlações entre os parâmetros definidos, Q_c médio e N_{10} , partiu-se para a interpretação dos gráficos e valores obtidos. Os dados analisados são considerados correlacionáveis quanto mais próximo de 1 (um) o seu valor de R-quadrado estiver. Para o caso contrário, valores de R-quadrado próximos de 0 (zero) são considerados não correlacionáveis.

Pegando-se como ponto inicial o solo da região de Curitiba, o que contata-se é a pouca

correlação dos resultados obtidos pelo ensaio CPT e DPL, com R-quadrado variando entre 0,1479 e 0,5569. Isso se dá, em partes, devido a falta de homogeneidade dos solos da Formação Guabirotuba, e, em partes, pela sua alta variação de composição de camada para camada.

Para o caso do Furo CB2, onde o valor de R-quadrado, ou Coeficiente de Correlação, é igual a 0,1479, pode-se admitir que é nula a correlação entre os dois ensaios. Observando o comportamento dos valores observados, constata-se que existe uma grande dispersão entre os valores da correlação e a linha central de tendência.

Partindo-se para a análise dos dados do solo da região de Cascavel, o que registra-se é a menor variabilidade dos resultados, ou seja, o ensaio DPL tem comportamento mais parecido ao do ensaio CPT. Os valores de R-quadrado entre 0,4036 e 0,9022, em especial o caso do Furo CV1, comprovam a tendência de linearização dos dados.

Em casos como ao do Furo CV1, pode-se assumir a equivalência dos ensaios. Nesse caso, a correlação estabelecida é linear, passando quase pelo zero do gráfico. Resumidamente, esse foi o ensaio com melhor correlação entre os ensaios CPT e DPL, com valor de R-quadrado próximo de 1 (um).

Para o solo de Guaíra, menos estudado por razões logísticas de projeto, o que se registrou foi uma correlação próxima aos 60% de todos os valores. Os dados apresentaram pouca variação nos primeiros metros, com crescente variabilidade, conforme se aumentava a profundidade, decorrentes da formação geológica da região e também da profundidade mais elevada do ensaio nessa região, aproximadamente 11,3 m enquanto na região de Curitiba e Cascavel não ultrapassou os 8 m.

5 CONCLUSÕES

Tem havido certa resistência quanto à utilização do ensaio DPL para determinação da resistência do solo por não haver estudos suficientes para validação de seus resultados, ao ponto de tornar-

se ínfima sua utilização no Brasil. Por outro lado, com esse trabalho, torna-se notório seu desempenho quando comparado ao ensaio CPT, haja vista sua limitação de profundidade, fator decisivo na escolha do ensaio.

Quanto ao seu comportamento em diversos tipos de formação de solos, principalmente em regiões onde não se observa a Formação Guabirotuba, o DPL apresenta desempenho semelhante ao CPT, em proporção Q_c médio $\times N_{10}$ e nas profundidades alcançadas. Embora as correlações melhores sejam observadas na região de Cascavel (valores de R-quadrado entre 0,4036 e 0,9022), as profundidades divergiram devido a esbeltez do equipamento DPL, limitado a 12 m de profundidade ou outros critérios de parada estabelecidos por norma.

Acredita-se que, com um estudo mais detalhado nessas mesmas regiões, bem como em outras formações de solo do estado, as correlações possam ser melhoradas e critérios mais apurados de filtragem e seleção de sítios para ensaios possam ser criados.

AGRADECIMENTOS

Ao LACTEC pela colaboração prestada a este trabalho e pela bolsa do primeiro autor.

REFERÊNCIAS

- NILSSON, T.U. *O Penetrômetro Portátil DPL Nilsson*. 2001. Thomas Nilsson Geoconsultores Ltda., Curitiba.
- NILSSON, T.U. *Estatística e Correlações*. 2006. Thomas Nilsson Geoconsultores Ltda., Curitiba.
- SIVAKUMAR BABU, G.L.; SRIVASTAVA, A.; MURTHY, D.S.N. *Reliability analysis of the bearing capacity of a shallow foundation resting on cohesive soil*. Can. Geotech. J. 43, 2006. p. 217–223.
- ZHANG, L.; TANG, W.H.; ZHANG, L.; ZHENG, J. *Reducing Uncertainty of Prediction from Empirical Correlations*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 130, No. 5, May 2004, p. 526-534.