

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

Correlações entre resultados de ensaios geotécnicos de penetração de campo do tipo SPT, CPT e DP para diversos solos

Katia Vanessa Bicalho

Professora Titular, UFES, Vitória, Brasil, katia.bicalho@ufes.br

Mirella Dalvi dos Santos

Doutoranda, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, mirelladalvi@gmail.com

Maria Luiza Moraes

Mestre, UFES, Vitória, Brasil, reno@soloreno.com.br

Reno Reine Castello

Consultor e Professor aposentado, UFES, Vitória, Brasil, reno@soloreno.com.br

RESUMO: Neste trabalho são discutidos os resultados dos seguintes ensaios de campo para determinação da resistência do solo à penetração: sondagem à percussão ou sondagem de simples reconhecimento (SPT), penetração de cone (CPT), e penetrômetro dinâmico (DP). Investigam-se correlações empíricas entre os resultados dos ensaios SPT, CPT e DP para diversos solos, e incertezas envolvidas em algumas correlações previamente publicadas na literatura. Fatores como diâmetro médio da partícula, composição granulométrica, e compacidade relativa são considerados na estimativa de correlações CPT-SPT e DP-SPT. E, devido às incertezas associadas a metodologia de ensaios e heterogeneidades de solos locais, recomenda-se cautela no uso de correlações CPT-SPT e DP-SPT previamente publicadas em projetos geotécnicos.

PALAVRAS-CHAVE: Ensaios geotécnicos de penetração de campo, Correlações empíricas, Solos.

ABSTRACT: In this work, the results of the following geotechnical field soil penetration resistance tests are discussed: Standard Penetration Test (SPT), Cone Penetrometer Test (CPT), and Dynamic Probing Test (DP). The paper deals with correlations between the SPT, CPT and DP data tests for different soils, and the uncertainties involved in some correlations previously published in the literature. Factors such as mean particle diameter, particle size composition, and relative density are considered in determining CPT-SPT and DP-SPT correlations. Due to the uncertainties associated with testing methodology and local soil heterogeneities, caution is recommended before using previously published CPT-SPT and DP-SPT in design.

KEYWORDS: Geotechnical field penetration tests, Empirical correlations, Soils.

1 Introdução

Os ensaios de campo (*in situ*) aplicados à engenharia geotécnica são necessários para as análises das condições mais prováveis e mais desfavoráveis para o desenvolvimento dos projetos de engenharia. Os resultados de ensaios geotécnicos de campo para determinação da resistência do solo à penetração são utilizados para definir o comportamento geotécnico dos solos do terreno de fundação, e frequentemente considerados para estimativa de parâmetros geotécnicos relevantes no desenvolvimento de projetos e execução de fundações. Dentre os diferentes tipos de ensaios *in situ*, destacam-se o ensaio de simples reconhecimento (SPT) pela simplicidade, baixo custo e elevada experiência empírica acumulada sobre interpretação de resultados do ensaio (Kulhawy e Mayne, 1990); o ensaio de penetração de cone (CPT) pelo registro quase contínuo de resistência do solo (Robertson e Campanella 1983, Robertson 2012); e o Penetrômetro Dinâmico (DP) pela facilidade de execução e rapidez, e pouca dependência da qualidade da mão de obra. Não obtêm amostras do solo nas sondagens CPT e DP. Os ensaios SPT, CPT e DP medem diferentes índices, e possuem potencial para uso combinado para determinação do “retrato” do terreno abaixo de sua superfície, do conhecimento das características geotécnicas, e das condições do lençol d’água subterrâneo na região a ser investigada.



Este artigo compara os resultados dos ensaios SPT, CPT e DP, e investiga algumas correlações empíricas entre os resultados desses ensaios para diversos solos e regiões, as incertezas envolvidas em correlações previamente publicadas na literatura e adequações às essas correlações, levando em consideração influência da composição granulométrica em correlações CPT-SPT e DP-SPT. Geralmente as correlações empíricas são determinadas a partir de inferência estatística por meio do uso de regressão linear simples e análise dos resíduos em conjuntos de dados de diversos locais e metodologia de ensaios. São investigadas as influências do diâmetro médio da partícula, compacidade relativa e composição granulométrica em correlações CPT-SPT e DP-SPT para solos arenosos do local e característico da região metropolitana da Grande Vitória no estado do Espírito Santo. É importante mencionar que alguns resultados previamente publicados pelos autores foram reinterpretados com novos dados experimentais neste artigo.

2 Comentários sobre a revisão bibliográfica

2.1 Correlações entre resultados de ensaios SPT-CPT

Os ensaios de campo para determinação da resistência do solo a penetração SPT e CPT são provavelmente os ensaios de campo mais utilizados em todo o mundo. O ensaio de simples reconhecimento SPT, ainda que sofra severas críticas quanto às suas limitações, é usualmente utilizado até hoje devido à experiência já adquirida para estimar propriedades dos solos a partir do índice de resistência a penetração dinâmica do amostrador padrão no solo (N_{SPT}) obtido a cada metro. De Mello (1971) se referia a sondagem SPT como “inescapável primeira indicação”. No Brasil a norma que trata do assunto é a NBR 6484, que por sua vez segue padrão internacional, entretanto o valor do N_{SPT} varia com a eficiência e recomenda-se normalizar os valores de N_{SPT} para um valor de referência padrão internacional, correspondente a uma eficiência de 60%. O ensaio de cone (CPT) é considerado um método mais recomendado de determinação da resistência do solo à penetração estática e contínua ou incremental de uma ponteira padronizada, caracterizada em componentes de resistência de ponta cônica q_c e o atrito lateral f_s . O ensaio de penetração estática CPT não obtém amostras e visa fornecer dados que permitam estimar propriedades dos solos, e complementar os resultados do ensaio SPT.

Várias correlações empíricas entre os resultados dos ensaios CPT-SPT têm sido desenvolvidas em muitos países desde os anos 50 (Meyerhof, 1956, Meigh e Nixon 1961, Schmertmann 1970, Robertson et al. 1983, Kulhawy e Mayne 1990, Acka 2003, Santos e Bicalho 2017), sendo o mais comum o uso de regressão linear simples sem intercepto para definir o coeficiente K_c (q_c/N_{SPT}). O valor de K_c apresenta uma grande variabilidade de acordo com o tipo de solo e investigação. Para areias, por exemplo, K_c varia de aproximadamente 0,2 a 1,0 (MPa). Tal variação pode ser justificada pelo uso de diferentes sistemas de classificação de solos, falta de estatística adequada nas análises dos resultados experimentais, condições locais, diferentes equipamentos e procedimentos de ensaios de campo. Fatores como diâmetro médio da partícula, composição granulométrica, e compacidade relativa podem influenciar o valor K_c para solos granulares (Santos e Bicalho 2017). Além disto, verifica-se a necessidade de correções aplicadas nos índices de penetração, para o SPT e destaca-se a correção de energia de realização do ensaio, a correção quanto ao confinamento (Mayne 2006, Shahri et al. 2014). Viana da Fonseca (1996) corrige o N_{SPT} quanto ao diâmetro do furo e comprimento das hastes. Lingwanda et al. (2014) corrigem a resistência de ponta do CPT, mas concluem não ser significativa em areias. Várias publicações que investigaram os fatores intervenientes em K_c . Os valores de D_{50} e percentual de finos são os parâmetros de mais destaque, e a tendência é de que o coeficiente K_c aumente com o aumento de D_{50} e diminua com o teor de finos em um determinado solo. Recomenda-se cautela na investigação da influência do teor finos nos valores de K_c , e o agrupamento de solos finos plásticos ou não-plásticos em uma mesma investigação. Outras influências como uso de liner no SPT, condições do nível d'água, tensão efetiva vertical e formação geológica também foram mencionadas nas investigações de valores de K_c para diversos solos e regiões. Maiores detalhes podem ser vistos nas referências citadas.

2.1.1 Correlações entre resultados de ensaios SPT-DP e CPT-DP

Os resultados dos ensaios de penetração dinâmica, DP, são utilizados no controle de compactação de aterros e complementar ao SPT devido ao registro contínuo da resistência a penetração do equipamento no solo e sua praticidade na execução. O ensaio DP consiste na determinação do número de golpes para



determinada penetração no solo, obtidos por um martelo em queda livre sobre o conjunto constituído, por um batente, um trem de varas e uma ponta cônica. Por ser um sistema de investigação muito antigo e de fácil execução, existe uma grande variedade de DP com características diferentes. Os resultados dos ensaios DP podem ser representados pelo número de golpes em cada penetração, N_{DP} , mas os autores recomendam que os resultados sejam convertidos para tensão média de penetração, q_d , pois existem diferentes penetrômetros e procedimentos de ensaio, e as diversas alternativas podem ser normalizadas para um mesmo parâmetro, q_d .

As correlações empíricas com resultados do ensaio DP, sejam elas SPT-DP ou CPT-DP, são menos numerosas e a grande maioria dessas publicações correlacionam os índices à penetração do SPT ou CPT com o número de golpes do DP por meio de regressão linear simples com intercepto. Vale ressaltar que com o número de golpes fica implícito o uso de certo procedimento específico do equipamento utilizado para realização do ensaio. Viana da Fonseca (1996) e Martins e Miranda (2003) corrigem o índice N_{SPT} quanto à energia e ao comprimento das hastes. Czado e Pietras (2012) utilizam a correção quanto à saturação recomendada pela ISO 22476-2 (2005) em NDP. Alguns valores de resultados de penetrômetros dinâmicos realizados na França para diversos solos são apresentados por Waschowski (1983). No Brasil, o ensaio DP parece ter sido usado principalmente em aplicações rodoviárias. Para aplicações em fundações começou a ser usado em Vitória, ES nos anos 80 e hoje a maioria das empresas de investigação geotécnica possuem equipamentos para o ensaio DP do tipo leve.

3 Apresentação e discussão de resultados experimentais obtidos na região da Grande Vitória, ES

Os dados experimentais apresentados neste artigo foram obtidos na região da Grande Vitória (GV) no estado do Espírito Santo (ES). A região constituída, predominantemente, de solos sedimentares de origem marinha, possui uma geologia acidentada e escarpada com frequentes afloramentos de rochas graníticas ou gnáissicas e morros que funcionam como um escudo impedindo a ação homogênea de agentes marinhos e/ou agentes aluviais. As sondagens SPT e DPSH foram determinadas em um terreno localizado na região metropolitana de Vitória, ES. As correlações foram obtidas para areias finas a médias, quartzosas, geralmente limpas (menos de 5% passando na peneira nº 200) e compactidade relativa variando de fofa a compacta (Tabela 1). Foram realizados 8 furos do tipo SPT e 6 do DPSH na Obra. Como os resultados de cada equipamento utilizado foram obtidos em diferentes intervalos de leituras, para minimizar a variabilidade vertical do intervalo foram comparados os valores de leituras N_{SPT} a cada 0,3 m de cada metro ensaiado, compreendido entre $z+15$ e $z+45$ cm, para uma dada profundidade z , e os valores médios de N_{DPL} registrados a cada 0,2 m e convertidos para q_d , e os correspondentes valores de q_c do CPT (mecânico) obtido a cada 0,25m para cada metro ensaiado.

O equipamento DPSH utilizou um martelo de 64 kg solto a uma altura de queda de 45 cm. Os valores de K_c [MPa] para as areias da GV-ES foram 0,55 quando não houver correção da eficiência do SPT e 0,44 para quando houver correção para 60%. Os resultados obtidos estão de acordo com as propostas de Danziger e Velloso (1995) – $K_c = 0,60$. Cordeiro (2004) apresenta K_c de 0,40, variando de 0,2 a 0,80 (MPa) para estes mesmos dados e sem padronização de energia. Nas análises entre os ensaios geotécnicos tipo SPT e CPT para areias da GV - ES os resíduos foram descritos com distribuição normal.

Moraes (2008) analisou correlações do número de golpes do SPT, NSPT, com a resistência dinâmica de ponta, q_d , de penetrômetros pesados para alguns locais na Grande Vitória, ES (GV-ES). Foram investigadas areias marinhas, fina a média, quartzosas. A Tabela 2 apresenta alguns resultados obtidos por Moraes (2008) entre correlações empíricas entre resultados dos ensaios SPT e DP para as areias investigadas da GV-ES. Correlações entre SPT e DP são menos frequentes na literatura, sendo mais rotineiro o uso da regressão linear com intercepto levando-se em conta o número de golpes de ambos os ensaios. Vale ressaltar que há diferentes tipos de equipamentos de penetração dinâmica, em que consideram diferentes alturas de queda ou massa do martelo de bater. Dessa forma, ao se considerar o número de golpes deste ensaio geotécnico, faz-se necessário não agrupar diferentes tipos de equipamento.

Observa-se que os valores do coeficiente q_d/q_c sugeridos por Waschkowski (1983) podem variar entre 0,5-1,0 (areias e pedregulhos; areias siltosas ou argilosas compactas a muito compactas), 1,0 (argilas, siltes e vasas normalmente adensadas; areias fofas ou medianamente compactas), e 1,0-2,0 (argilas e siltes pré-adensados). A equivalência entre q_c e q_d como proposto por Waschkowski (1983) não foi observada para os



dados investigados das areias sedimentares limpas da GV-ES. Viana da Fonseca (1996) afirma que $q_d/q_c = 1,0$ é válida apenas para solos sedimentares e quando não há ocorrência de heterogeneidade.

Tabela 1. Principais características granulométricas das areias da GV-ES investigadas.

Descrição	Areia quartzosa, fina a média, com pequena fração de grossa e pedregulhos
Forma dos Grãos	Angular e subangular
Diâmetro médio das partículas – D50	entre 0,31 e 0,55 mm
Percentual de finos que passa na peneira nº 200	entre 0 e 8% (*)

(*) maioria menor que 5%.

Tabela 2. Principais correlações empíricas SPT-DP para as areias investigadas da GV-ES.

Equipamento	Correlações entre resultados SPT-DP
Queda de 0,45 m e martelo de 64 kg	$q_d = (0,43 \pm 0,03) \times N_{SPT}$ (em MPa)
Queda de 0,40 m e martelo de 65 kg	$q_d = (0,48 \pm 0,10) \times N_{SPT}$ (em MPa)
Queda de 0,75 m e martelo de 65	$q_d = (0,58 \pm 0,02) \times N_{SPT}$ (em MPa)

4 Considerações finais

Este artigo discute algumas correlações previamente publicadas entre os resultados dos ensaios SPT (N_{SPT}), CPT (q_c , resistência de ponta) e DP para diversos solos. Conclui-se que as incertezas envolvidas em algumas correlações previamente publicadas na literatura, quanto a caracterização do solo, estatística adequada, padronização de equipamento e procedimentos, aumentam a variabilidade das correlações e, portanto, devem ser observadas quando se deseja utilizar uma correlação pré-existente ou elaborar novas propostas. Correlações entre CPT-SPT são as mais numerosas na literatura, sendo o mais comum o uso de regressão linear simples sem intercepto, com valores de K_c (MPa) entre 0,2 a 1,0. Essa variação pode ser justificada pelo uso de diferentes sistemas de classificação de solos, falta de estatística adequada nas análises dos resultados experimentais, condições locais, diferentes equipamentos e procedimentos de ensaios de campo. Fatores como diâmetro médio da partícula, composição granulométrica, e compactidade relativa podem influenciar o valor K_c para solos granulares.

Recomenda-se que os resultados dos ensaios DP sejam convertidos para tensão média de penetração, q_d , pois existem diferentes penetrômetros e procedimentos de ensaio, e as diversas alternativas podem ser normalizadas para um mesmo parâmetro, q_d . Os valores do coeficiente q_d/q_c podem variar entre 0,5 e 2,0 dependendo do tipo de solo e ocorrência de heterogeneidade. Devido a variedade e heterogeneidade de solos naturais as correlações empíricas apresentam limitações e devem ser obtidas ou verificadas a nível regional.

AGRADECIMENTOS

A primeira autora agradece ao CNPq pela bolsa de produtividade de pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ackal N. (2003) Correlation of SPT-CPT data from the United Arab Emirates. Engineering Geology 2003;67(3e4):219e31.
- Czado, B. Pietras, J.S. (2012). Comparison of the Cone Penetration Resistance Obtained in Static and Dynamic Field Tests. AGH Journal of Mining and Geoengineering 36 (1).



- Danziger B R, Velloso, DA (1995). Correlations between the CPT and SPT for some Brazillian soils, Proc. of the International Symposium on Cone Penetration Testing, Swedish Geotechnical Society, Linköping, Sweden, 4-5 October, CPT'95, 2, 155-159.
- Folque, J. (1988). Modernas tendências nas técnicas de ensaio em Mecânica dos Solos. Informação Técnica - ICT, Geotecnia ITG15, Lisboa.
- Kulhawy, F.H., Mayne, P.W. (1990). Manual on estimating soil properties for foundation design. New York: Electric Power Research Inst., Geotechnical Engineering Group, (EPRI EL-6800): 2-36 to 2-28.
- Lingwanda, M.I., Larsson, S., Nyaoro, D.L. (2014). Correlations of SPT, CPT and DPL Data from Sandy Soil in Tanzania. Geotech Geol Engineering. Springer International Publishing. Switzerland.
- Mayne P.W. (2006). In situ test calibrations for evaluating soils parameters. Geosystem Engineering Group. Atlanta, USA.
- Meigh, A.C., Nixon. I.K. (1961). Comparison of in-situ tests of granular soils. Proceedings of 5th international Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Paris.
- Mello, V. F. B. de. (2014). Geotecnia do subsolo e de materiais terrosos pedregosos construídos: primórdios, questionamentos, atualizações. Oficina de Textos. São Paulo, Brazil.
- Meyerhof, G.G. (1956). Penetration tests and bearing capacity of cohesionless soils. Journal of the soil mechanics and foundation division, ASCE, Vol. 82, No. SM1, 1956: 1-19.
- Robertson P.K. (2012). Cone penetration test (CPT)-based soil behavior type (SBT) classification system an update
- Robertson, P.K., Campanella, R.G. (1983) Interpretation of cone penetrometer test, Part I: Sand. *Canadian Geotechnical Journal*, 20 (4), p.718-733.
- Schmertmann J.H. (1970). Static cone to compute settlement over sand. Journal Soil Mechanics and Foundations Division 96. ASCE. 1011-1043.
- Shahri A.A. Juhlin C., Malemir A. (2014). A Reliable Correlation of SPT-CPT data for Southwest of Sweden. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering* 19, 1013-1032.
- Viana da Fonseca A.J.P. (1996). Geomecânica dos solos residuais do granito do Porto. Critérios para dimensionamento de fundações directas. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.
- Waschkowski E. (1983). Le Pénétromètre Dynamique. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées 125, 95-103.