

Correlações entre resultados de Sondagens SPT e Ensaio de Penetração Dinâmica Contínua (PD) para Areias da Grande Vitória - ES

Kátia Vanessa Bicalho

Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Brasil, kvbicalho@gmail.com

Mirella Dalvi dos Santos

Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Brasil, mirelladalvi@gmail.com

Valéria Vieira Barbieri

Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Brasil, valeriavieirabarbieri@hotmail.com

Maria Luiza Moraes

SOLO Fundações & Geotecnia Ltda, Vitória, Vitória, Brasil, ml_moraes@yahoo.com.br

RESUMO: O ensaio por Penetrômetro Dinâmico Contínuo (PD) pode ser empregado como um método rápido, fácil e econômico de investigação "in situ" complementar às sondagens SPT (Standard Penetration Test). Neste artigo investiga-se o uso dos ensaios de campo SPT e PD para avaliação de camadas superficiais (até 5,00m de profundidade) de subsolos arenosos da região da Grande Vitória localizada no estado do Espírito Santo (ES). Apresentam-se os resultados preliminares de correlações entre SPT e PD para um caso de obra localizada na região em estudo. Os subsolos arenosos da Grande Vitória, ES, possuem areia fina a média, quartzosa, menos de 5% passando na peneira nº 200, variando de fofa a compacta. As correlações determinadas para os solos arenosos da Grande Vitória, ES, são comparadas com correlações previamente publicadas na literatura. E, os resultados obtidos para os solos arenosos da Grande Vitória, ES, estão de acordo com as correlações previamente publicadas para diferentes solos arenosos e regiões geológicas. A influência da distribuição granulométrica e da compactidade relativa nos resultados obtidos é discutida neste estudo. Verifica-se um aumento da dispersão dos resultados obtidos com o aumento o diâmetro médio dos grãos de areia.

PALAVRAS-CHAVE: Ensaio SPT, Penetrômetro Dinâmico, Solos Arenosos, Correlações empíricas.

1 INTRODUÇÃO

Os resultados das sondagens SPT apesar de grosseiros e erráticos (Mello 2014) são amplamente utilizados em projetos e obras de engenharia geotécnica devido ao baixo custo, relativa simplicidade do ensaio, obtenção de amostras deformadas e o acúmulo de experiência ao longo do tempo.

O ensaio PD pode ser empregado como um método rápido, fácil e econômico de investigação "in situ" complementar às

sondagens SPT (ISSMFE 1989, Cordeiro 2004, Moraes 2008). O PD tem sido muito utilizado na região da Grande Vitória-ES porque permite avaliações contínuas para identificar mudanças pronunciadas em compactidade relativa ou consistência nos subsolos. A existência de laminações mais fracas, por exemplo, são mais facilmente detectadas pela penetração contínua do ensaio por PD do que pelo SPT (Bicalho et al. 2002, 2004a, 2004b, 2005; Bicalho e Castello 2005).

Verifica-se a necessidade de estudos para

avaliar possíveis correlações entre os valores da resistência de ponta (q_d) do ensaio de penetração contínua (PD) e o número de golpes (N_{SPT}) do ensaio SPT e os riscos associados a extrapolações dessas correlações além do banco de dados originais. Neste artigo discute o uso dos ensaios de campo de penetração SPT e PD para avaliação de camadas superficiais (até 5,00m de profundidade) de solos arenosos da região litorânea da Grande Vitória, ES. Apresenta e compara uma série de resultados dos ensaios PD e SPT executados na região em estudo.

2 LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO DA REGIÃO ESTUDADA

A cidade de Vitória, capital do ES, está situada na ilha de mesmo nome e integra o município de Vitória, formado por um arquipélago composto por 34 ilhas e por uma porção continental. A Região Metropolitana da Grande Vitória engloba o próprio município de Vitória mais os municípios de Vila Velha, Cariacica, Serra, Viana, Guarapari e Fundão. Este estudo foi realizado em Itaparica, bairro localizado na região litorânea do município de Vila Velha.

A formação dos solos sedimentares da região costeira do Brasil é atribuída principalmente aos episódios de variações do nível relativo do mar

(transgressão e regressão) ocorridos durante o Período Quaternário e tais ciclos transgressivos-regressivos deram origem aos sedimentos pleistocênicos e holocênicos (Castello e Polido 1988, Souza et al. 2005). De acordo com a subdivisão esquemática da costa brasileira em cinco setores (norte, nordeste, leste, sudeste e sul), o estado do ES pertence ao setor da Costa Leste ou Oriental compreendido entre a Baía de Todos os Santos (BA) e Cabo Frio (RJ).

São solos compostos por sedimentos marinhos, com camadas de areias superficiais geralmente heterogêneas e com compacidade relativa variada, provavelmente, devido às estratificações ocorridas durante as variações do nível relativo do mar ao longo dos anos. As areias da região em estudo têm propriedades de índices bem similares (forma dos grãos, granulometria, e constituição). Apresentam-se

como areias fina a média, quartzosa, angular e sub-angular, menos de 5% passando na peneira nº 200, coeficiente de uniformidade, C_u médio entre 1,65 e 3,65, Peso específico aparente seco entre 13,6 kN/m³ e 16,6 kN/m³, e compacidade relativa variando de fofa a compacta (Moraes 2008).

3 CARACTERÍSTICAS DOS ENSAIOS

3.1 Ensaio SPT

A utilização do ensaio SPT se deve à sua simplicidade e ao baixo custo. No Brasil o ensaio é normatizado pela NBR 6484 e segue padrão internacional (ISSMFE, 1989). A sondagem divide-se praticamente em duas etapas distintas: uma de perfuração e outra de amostragem/ensaio. Na primeira etapa é feita a perfuração com trado ou trépano de lavagem com o auxílio de circulação d'água. Na segunda etapa, o amostrador padrão é inserido até o fundo da perfuração. Como resultado da sondagem obtém-se para cada metro sondado um ensaio de penetração dinâmica (ensaio penetrométrico) e uma amostra para identificação das camadas de solo. Também observa-se a profundidade onde ocorre o lençol freático do terreno. O resultado do ensaio de penetração é o índice de resistência à penetração (N_{SPT}), ou seja, números de golpes para os 30 cm finais. Décourt et al. (1989) mencionam que o número de golpes para penetrar os 15 cm intermediários seria cerca de 75% maior do que o dos 15 cm iniciais. E o número de golpes para penetrar os 15 cm finais seria cerca de 40% maior do que o dos 15 cm intermediários. Aspectos relevantes no SPT são seu baixo custo, facilidade de execução, possibilidade de sua aplicação a quase todos os tipos de solos, inclusive rochas brandas, a possibilidade de se coletar amostras amolgadas, determinar a profundidade do lençol freático, grande disponibilidade de equipamentos, além de fornecer indicações da consistência. Apesar das limitações, o N_{SPT} têm sido utilizado para a estimativa do ângulo de atrito e compacidade relativa das areias (Bowles 1996).

3.2 Ensaio PD

O penetrômetro dinâmico contínuo (PD) está especificado na “Referência Internacional para Procedimentos de Ensaio para Sondagem Dinâmica-DP” (ISSMFE 1989). É normalizado pela Norma Alemã DIN 4094 (Miguel et al. 2005).

Diferente do SPT, esse ensaio prescinde de pré-furo, o que pode alterar as condições naturais do solo. As vantagens do PD também incluem traçado contínuo com a profundidade do solo e quase independência da qualidade da mão de obra. Adicionalmente, para os equipamentos mais leves, PDL, tem-se a total portabilidade do equipamento. O uso do PD é recomendado para controle de compactação (resistência e espessura das camadas), para controle superficial do subsolo de apoio de sapatas, para avaliação superficial de subsolos (o primeiro resultado do SPT só ocorre a 1 m de profundidade), e para verificação de resultados do SPT.

São considerados quatro tipos de penetrômetros: o PDL (PD leve), o PDM (PD médio), o PDP (PD pesado) e o PDSP (PD super pesado). Os mais utilizados parecem ser o PDL (Figura 1) pela portabilidade e o PDSP porque utiliza o equipamento similar ao SPT onde apenas se substitue o amostrador pela ponteira cônica. As variações vão desde martelo com 10kg, queda de 50cm, ponta de 3,57cm de diâmetro até martelo com 63,5kg, queda de 75cm, ponta de 0,5cm de diâmetro e ainda admite o uso de outros tipos de equipamentos (ISSMFE 1989).

O objetivo do PD é medir o esforço necessário para fazer penetrar uma ponteira em forma de cone através do solo, obtendo-se assim valores que sejam proporcionais às suas propriedades mecânicas. A cravação da ponteira cônica ocorre através da queda livre de um martelo, elevado a uma determinada altura, que cai sobre uma “cabeça de bater” (rigidamente ligada às hastes).

A resistência à penetração (q_d) é definida como o número de golpes necessários para cravar a ponteira numa extensão de solo (que pode ser de 10 em 10cm até 30 em 30cm). Normalmente, as penetrações são de 20 em

20cm e as hastes devem ser giradas de metro em metro (ou menos) e o torque medido para se estimar o atrito lateral (Castello et al. 2001).

A resistência dinâmica de ponta (q_d) do PD é:

$$q_d = \left(\frac{PHN}{A_s} \right) \left(\frac{P}{P + P'} \right) \quad (1)$$

Onde: P = peso do martelo de cravação, P' = peso das hastes, cabeçote e ponta, H = altura de queda do martelo, N = número de golpes do martelo para penetração no trecho, A = área de ponta do cone, s = trecho penetrado pela ponta para N golpes.

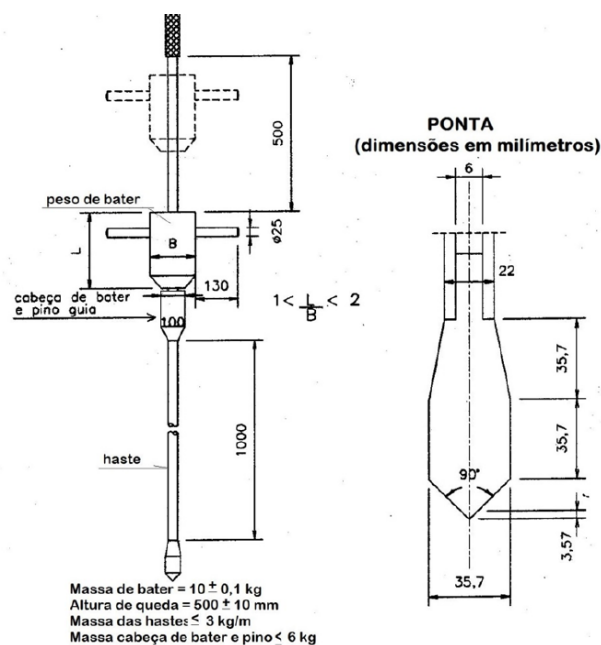


Figura 1. Esquema do PD Leve (Castello et al. 2001).

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Descrição do Local, Ensaios e Subsolos

A área em estudo tem aproximadamente 9000m², sendo que cerca de 30% corresponde à área para estacionamento. Foram realizadas 17 sondagens SPT e 17 sondagens com PD, locadas lado a lado, distanciadas de um metro (Figura 2). Três sondagens SPT foram até 35,45m de profundidade e as demais até 25,45m o que possibilitou o traçado de perfis geotécnicos. Foram executados ensaios de

caracterização nas amostras amolgadas obtidas nas sondagens SPT.

As sondagens por penetrômetro dinâmico (PD) foram executadas até 5,00m de profundidade (na Figura 3 tem-se um perfil geotécnico típico até esta profundidade). Os resultados das análises de correlações entre os ensaios SPT e PD obtidos neste artigo são, portanto, restritos à profundidade de 5,00 metros. As principais características do penetrômetro dinâmico (PD) utilizado na obra em estudo estão descritas na tabela 1.

Tabela 1. Principais características do penetrômetro dinâmico (PD) utilizado na obra em estudo.

PONTEIRA		MARTELO	
Diâmetro (mm):	51,00	Peso (kg):	65
Área (mm ²):	2043	Queda (mm):	750
Penetrações (mm):	200		

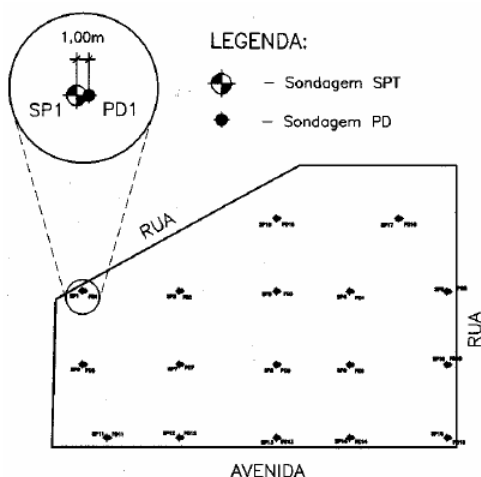


Figura 2. Planta com sondagens SPT e PD.

Até os 10,00 metros de profundidade tem-se um subsolo formado, em geral, por camadas de areia média e fina, variando de fofa a pouco compacta, de cores cinza, marrom, vermelha ou amarela (a Figura 3 mostra um perfil típico até a profundidade de 5,00 metros). Foi detectada a presença de pedregulhos e detritos vegetais em alguns pontos localizados. O nível d'água do lençol freático estava em torno de 1,35m de profundidade. As camadas subjacentes não são descritas aqui por não serem motivo de estudo neste artigo. As figuras 4 e 5 mostram a

variação dos valores de N_{SPT} e q_d com a profundidade.

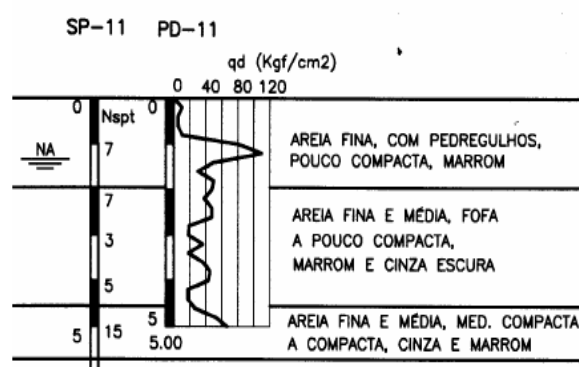


Figura 3. Perfil geotécnico típico das camadas superficiais (sondagens SPT e PD).

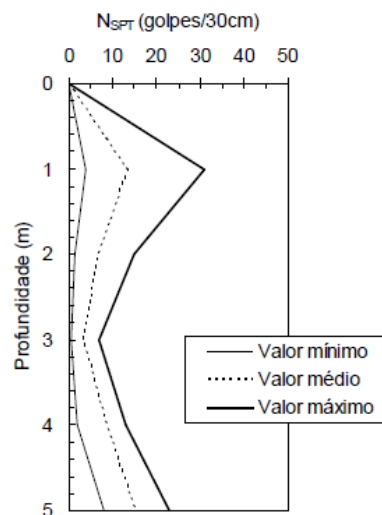


Figura 4. Variação do N_{SPT} com a profundidade.

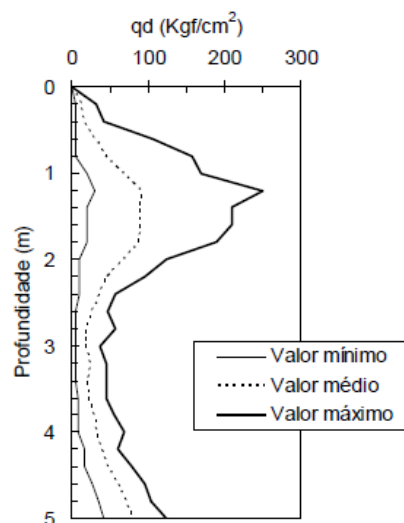


Figura 5. Variação de q_d com a profundidade.

4.2 Correlações entre N_{SPT} e q_d

Considerando que os dois índices de resistência avaliados (N_{SPT} e q_d) são influenciados pelas tensões efetivas e o fato de que o penetrômetro dinâmico utilizado possui similaridades com o ensaio SPT (tripé, peso do martelo, altura de queda e diâmetro da ponteira) optou-se aqui pela não correção dos dois índices quanto à tensão efetiva e à energia do ensaio.

O ensaio SPT fornece um valor único de N_{SPT} para cada metro, ou seja, para uma profundidade z qualquer (onde z é um número inteiro) o N_{SPT} é obtido no trecho compreendido entre $z+0,15m$ a $z+0,45m$. O ensaio PD, por sua vez, fornece valores de q_d a cada 200mm. Assim, adotou-se como critério para análise dos dados que o valor de q_d a ser comparado será o valor médio obtido entre as profundidades z e $z+0,40m$. A correlação utilizada neste artigo é:

$$q_d = K N_{SPT} \quad (2)$$

A seguinte correlação linear foi obtida para os resultados avaliados:

$$q_d = 5,7145 \cdot N_{SPT} \quad (3)$$

onde q_d é dado em kgf/cm^2 .

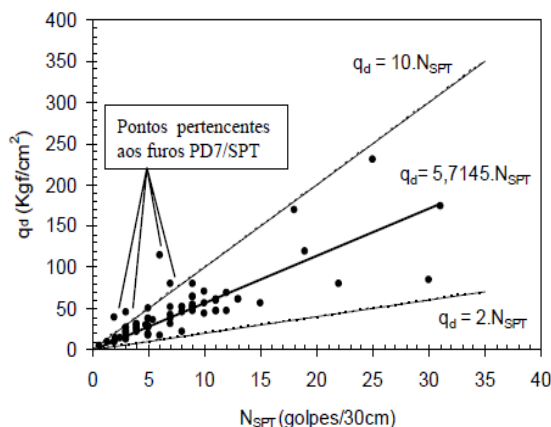


Figura 6. Correlação N_{SPT} x q_d para areias estudadas.

Os dados, em sua maioria, estão compreendidos por valores de K entre 2 e 10 (Figura 6), sendo q_d dado kgf/cm^2 . Os pontos localizados fora desta faixa pertencem apenas às sondagens PD7 e SP7. Para essas sondagens houve uma grande discordância entre os valores

de N_{SPT} e q_d para a mesma profundidade. Como os furos estavam distanciados de apenas um metro, pode ser que houvesse algum material mais resistente, detectado apenas pela penetração contínua do PD na profundidade avaliada. Na figura 7 observa-se que a relação entre os valores médios de q_d e N_{SPT} não é constante ao longo da profundidade analisada (a relação varia entre 1,00 e 2,00m em alguns trechos investigados).

Outra observação importante é quanto à dispersão dos dados apresentados na figura 6, onde há um comportamento diferenciado para valores de $N_{SPT} > 15$.

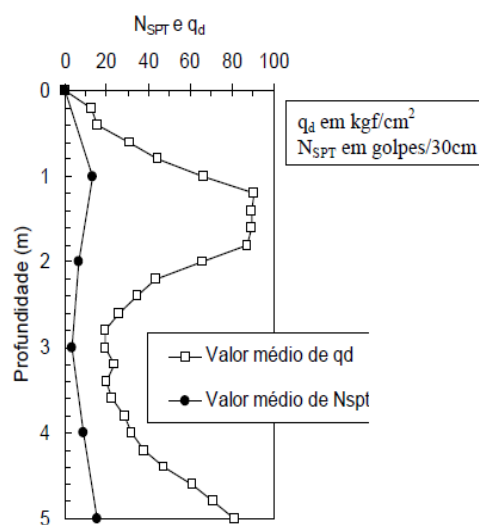


Figura 7. Variação N_{SPT} e q_d com profundidade (valores médios).

4.3 Correlações entre N_{SPT} e q_c

Através do ensaio de penetração estática (CPT) são obtidos parâmetros que podem ser relacionados diretamente à capacidade de carga das fundações (Danziger e Velloso 1986, Bowles 1996). A correlação entre a resistência de ponta do cone q_c (kgf/cm^2) e o correspondente valor de N_{SPT} são geralmente apresentados na literatura como:

$$K = \left(\frac{q_c}{N_{SPT}} \right) \quad (4)$$

Para as areias de Vitória, foram obtidos valores de K entre 7 e 10 (Castello e Polido 1994) e entre 2 e 8 (Cordeiro 2004). Estes

resultados estão de acordo com prévias publicações. Danziger e Velloso (1986) obtiveram $K = 6$ (areia) e $K = 5,3$ (areia siltosa, argilosa, silto-argilosa ou argilo-siltosa) para areias do Rio de Janeiro. Politano et al. (2001) obtiveram K variando de 2 a 10 para areias do Rio de Janeiro, São Paulo e Rio Grande do Sul (solos residuais).

Segundo Waschowski (1983) a relação entre as resistências de ponta do penetrômetro dinâmico (q_d) e do cone (q_c) para areias fofas e pouco compactas seriam equivalentes:

$$\frac{q_d}{q_c} \cong 1 \quad (5)$$

Assumindo que a correlação proposta por Waschowski (1983), Eq. 5, aplica-se para as areias estudadas, os resultados preliminares de correlações encontrados para a região em estudo e apresentados na Figura 6 confirmam os valores obtidos por publicações prévias para correlações empíricas entre q_c e N_{SPT} (Danziger e Velloso 1986, Politano et al. 2001, Castello e Polido 1994, Cordeiro 2004).

Correlações empíricas lineares entre q_c (MPa) e N_{SPT} foram apresentadas por várias publicações, e os resultados apresentados na Tabela 2 indicam pouca variação dos resultados para areias de diferentes compacidade relativa. Observa uma tendência de redução da razão q_c/N_{SPT} com o aumento da compacidade relativa das areias.

Robertson et al. (1983) definiram uma correlação entre q_c e N_{SPT} em função do tamanho médio dos grãos, D_{50} variando entre 0,001mm a 1mm (argila à areia grossa). Observa-se um aumento da razão q_c/N_{SPT} e uma maior dispersão dos resultados com o aumento de D_{50} . Os resultados obtidos de $(q_c/p_a)/N_{SPT}$ variam de aproximadamente 0,5 à 7 para D_{50} entre 0,01 e 1 mm.

5. CONCLUSÕES

Investigam-se correlações entre os valores da resistência de ponta (q_d) do ensaio de penetração dinâmica contínua (PD) e o número de golpes (N_{SPT}) do ensaio SPT para areias da

região da Grande Vitória-ES. As conclusões preliminares são:

Os resultados indicam uma correlação linear entre N_{SPT} e q_d (kgf/cm²), com valores de K entre 2 e 10. Estes valores estão de acordo com a literatura (Danziger e Velloso 1986, Politano et al. 2001, Castello e Polido 1994, Cordeiro 2004). Verifica-se um aumento da dispersão dos resultados obtidos com o aumento o diâmetro médio dos grãos de areia.

Os resultados também sugerem equivalência entre cones dinâmicos e estáticos. Resultados semelhantes foram encontrados para outros casos de obras da região da Grande Vitória-ES (Moraes 2006).

Tabela 2. Correlações publicadas entre SPT e CPT.

Descrição	Correlação (MPa)	R ²
Todos os dados	$q_c = 0,43 N_{SPT}$	76%
Até 30 golpes	$q_c = 0,51 N_{SPT}$	75%
Areia fofa	$q_c = 0,62 N_{SPT}$	94%
Areia pouco compacta	$q_c = 0,53 N_{SPT}$	80%
Areia medianamente compacta	$q_c = 0,56 N_{SPT}$	72%
Areia compacta	$q_c = 0,47 N_{SPT}$	79%
Areia muito compacta	$q_c = 0,41 N_{SPT}$	76%

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às empresas SOLO-Fundações e Geotecnia Ltda e STAN-Fundações e Construções Civas Ltda pelo fornecimento dos dados de suas obras. E, ao CNPq e FAPES pelo apoio financeiro para a pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas (2001). NBR 6484: Solo – Sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio. Rio de Janeiro.
- Albiero, J. H. (1990). Correlação entre Resistência de Cone (q_c) e Resistência à Penetração (SPT) para Solos Lateríticos, IX COBRAMSEF, Salvador, Bahia, Vol.

- 2, p. 187-194.
- Bicalho, K. V., Castello, R. R. e Polido, U. F. (2002). Improvement of Loose Sand with Clayey Bands by Sand Columns. ASCE Geotechnical Special Publication, Vol. 116, 2, p. 1166-1173.
- Bicalho, K. V., Castello, R. R. e D'Andrea, R. (2004a). The densification of loose sand using compaction piles. Fifth International Conference on Cases Histories in Geotechnical Engineering, New York, NY, USA.
- Bicalho, K. V., Castello, R. R. e Moraes, M. L. (2004b). Contribuição ao estudo de melhoramento de solos arenosos fofos por estacas de compactação. 9º Congresso Nacional de Geotecnia, Aveiro, Portugal, III, 177-184. (in Portuguese).
- Bicalho, K. V. e Castello, R. R. (2005a). Improvement of loose sandy soil foundation by compaction piles In: 16 International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Osaka. Japão, XVI ICSMGE. Rotterdam, Netherlands: Mill Press, 2005. V. 3, p. 1155-1158.
- Bicalho, K. V., Castello, R. R. e Moraes, M. L. (2005b). Loose sandy soil densification by compaction piles In: 6 th International Conference on Ground Improvement Techniques, Coimbra. Portugal, Vol. 1. P. 169-176.
- Bowles, J. E. (1996). Foundation analysis and design. 5th ed. USA: McGraw Hill, p. 162-163.
- Castello, R. R. e Polido, U. F. (1988). "Sistematização geotécnica dos solos quaternários de Vitória, ES". Anais do Simpósio sobre: Depósitos Quaternários das Baixadas Litorâneas Brasileiras: Origem, Características Geotécnicas e Experiências de Obras, ABMS, Rio de Janeiro. Tema 3.
- Castello, R. R. e Polido, U. F. (1994). Comunicação Pessoal. Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Espírito Santo.
- Castello, R. R.; Polido, U. F., Bicalho, K. V. e Ribeiro, R. C. H. (2001). Recalques observados de sapatas em solos terciários de São Paulo. Solos e Rochas, São Paulo, Vol. 24, n. 2.
- Cordeiro, D. D. (2004). Obtenção de Parâmetros Geotécnicos de Areias por meio de Ensaio de Campo e de Laboratório, Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, 198 p.
- Danziger, B. R. e Velloso, D. de A. (1986). Correlações entre SPT e os resultados dos ensaios de penetração contínua. VIII COBRAMSEF, Porto Alegre, RS, Vol. VI, p. 103-113.
- ISSMFE (1989). Technical Committee On Penetration Testing Of Soils – TC 16, "Report with Reference Test Procedures CPT-SPT-DP-WSR". Information N. 7, Sewdsh Geotechnical Institute.
- Mello, V. F. B. de (2014). Geotecnia do subsolo e de materiais terrosos-pedregosos construídos: primórdios, questionamentos, atualizações. Oficina de Textos, São Paulo.
- Miguel, M. G., Gomes, C. L. M., Silva e D. F. da, Pedrolli, K. D. (2005). Caracterização Geotécnica do Solo Laterítico de Londrina/PR por meio de Ensaio Dinâmico e Estático. 11º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia Ambiental, ABGE, Florianópolis, Santa Catarina, p. 1830-1844.
- Moraes, M. L. (2006). Estacas de Compactação para Melhoramento de Solos Arenosos Fofos: Análise de Casos de Obras. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES. (em andamento).
- Politano, C. F., Danziger, F. A. B. e Danziger, B. R. (2001). Correlações entre resultados de CPT e SPT em solos residuais. Solos e Rochas, São Paulo, Vol. 24, n. 1, p. 55-71.
- Souza, C. R. de G., Suguio K., Oliveira, A. M. dos S. e Oliveira, P. E. de. (2005). Quaternário do Brasil. Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, ed. Holos, São Paulo, Brasil, p. 102-104.
- Waschkowski, E. (1983). Le Pénétrômetre Dynamique. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n. 125, p. 95-103.