

Correlações entre resultados de ensaios SPT e CPT para Areia Siltosa através do método IDW.

Emanuel Erivan Silva da Cunha

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil, emanuelerivan2@hotmail.com

Yuri Daniel Jatobá Costa

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil, ydjcosta@gmail.com

John Eloi Bezerra

Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, Brasil, johneloi@ufersa.edu.com

RESUMO: Este estudo tem como objetivo apresentar correlações entre índice de resistência à penetração do ensaio SPT (N_{SPT}) e os resultados dos testes CPT (resistência de ponta, q_c , e atrito lateral, f_s) para um depósito de areia siltosa sedimentar. As correlações foram obtidas para 88 testes SPT e oito testes CPT na cidade de Natal, situada na região Nordeste do Brasil. Dados de teste de campo foram analisados utilizando uma abordagem geoestatística simplificada. Correlações entre SPT e os dados da CPT foram desenvolvidos usando o método IDW. Foi utilizada na seleção dos furos SPT a distância máxima de 30 m entre os ensaios, com o intuito de correlacionar-se com um furo CPT específicos, sendo os dados SPT fora deste intervalo descartados. Correlações entre q_c e N_{60} com coeficientes de determinação maior do que 0,7 foram obtidos seguindo esta metodologia. Uma razão representativa q_c/N_{60} de 0,38 MPa foi encontrada para o solo investigado.

PALAVRAS-CHAVE: SPT, CPT, IDW, Correlações

1 INTRODUÇÃO

A sondagem de simples reconhecimento (SPT) ainda é o ensaio *in situ* mais comumente usado para a obtenção dos parâmetros geotécnicos necessários para a análise e projeto de fundação no Brasil. Uma razão para isso pode ser devido a falta de disponibilidade local de outros testes melhores.

No Brasil, engenheiros geotécnicos são susceptíveis de solicitar testes CPT apenas para moderada a projetos de alto risco. Como os testes CPT raramente são solicitadas na prática comum, empreiteiros locais não oferecem-los. Robertson (2012) destaca a necessidade de quebrar este ciclo. Além disso, o baixo custo é também tida como mais um argumento forte para a seleção do ensaio SPT.

Uma vez que na maioria das situações apenas os dados SPT estão disponíveis, a procura de novas correlações SPT-CPT é necessária.

No entanto, a maioria das correlações SPT-CPT disponíveis no Brasil foram estabelecidas para solos de regiões do sul do país. Novas Correções locais, para outros tipos de solo são, portanto, necessárias.

Este trabalho tem por objetivo a apresentar correlações entre o número resistência SPT (N_{SPT}), resistência de ponta do cone (q_c) e Atrito Lateral (f_s) para um depósito tropical sedimentar de areia siltosa na Região Nordeste do Brasil. As correlações foram concebidas a partir dos resultados de 88 testes SPT e oito testes CPT, que atingiu uma profundidade máxima de 35 m no sub-solo.

2 CORRELAÇÕES SPT-CPT

Estudos para estimar correlações entre a resistência de ponta do cone (q_c) e o Atrito lateral (f_s) a partir de dados do SPT usando abordagens estatísticas tem sido conduzidos para uma grande variedade de tipos de solo (Schmertmann & Palacios 1979, Robertson & CamPanella 1983, Kasim et al., 1986, Chan et al., 1988, Danziger & Velloso 1995, Politano 1999, Akca 2003), Kara & Gündüz 2010, Shahri *et al.* 2014). As correlações estatísticas a partir de regressões lineares têm sido amplamente utilizados, em particular para materiais granulares (Alonso, 1980).

A Tabela 1 apresenta uma compilação de valores de $k = q_c / N_{SPT}$ proposto para solos de regiões do sul do Brasil. Deve notar-se que algumas correlações na Tabela 1 foram propostos usando valores N_{SPT} não-corrigidos para 60% de energia.

Entre as correlações disponíveis na literatura, poucos estudos tentam descrever os métodos estatísticos utilizados para o desenvolvimento de suas correlações SPT-CPT propostas.

Conceitos de geoestatística foram incorporado em investigações mais recentes. Por exemplo, Akca (2003) apresenta um estudo realizado nos Emirados Árabes Unidos, que incluíram os resultados de 65 SPT perfurações e 101 perfurações CPT. Dados do SPT foram divididos em dois grandes grupos de acordo com sua proximidade dos furos CPT. Para aqueles furos SPT dentro de uma distância de 35 m de uma sondagem CPT específico, valores N_{60} representativos foram calculada a partir da média aritmética dos dados. O método inverso distância ponderação (IDW) foi empregados na análise dos dados a partir dos furos SPT além desta distância.

Tabela 1. Valores de k para solos brasileiros.

Referência	Solo	k (MPa)
Aoki & Velloso (1975)*	Areia	1.00
	Areia Siltosa	0.80
	Areia Argilosa	0.60
	Silte	0.40
	Silte Arenoso	0.55
	Argila Arenosa	0.35
	Silte Argiloso	0.23
Barata et al. (1978)*	Argila	0.20
	Argila Silto-Arenosa	0.15 – 0.25
Danziger & Velloso (1986, 1995) Danziger et al. (1998)	Areia Silto-Argilosa	0.20 – 0.35
	Silte, Silte arenoso, Argila arenosa	
	Silte Areno-argilos	
	Silte Argilo-arenoso, Argila silto-arenosa,	0.48
	Argila arenos-siltosa	0.38
	Silte argiloso	0.30
	Argila, Argila Siltosa	0.25
	Areia	0.57
	Areia siltosa, Argila Siltosa	0.5 – 0.64
	Silte argiloso	0.31
	Argila Arenosa	0.18 – 0.35
	Argila	0.45

* N_{SPT} Não corrigido para eficiência de 60%

3 METODOLOGIA

3.1 Localização dos dados e Geologia local

Os dados de campo utilizadas como parte desta pesquisa foram coletados a partir de testes padronizados de penetração (SPT) e testes de penetração de cone (CPT) realizados para investigação do subsolo em uma obra na cidade de Natal, situada na Região Nordeste do Brasil.

O subsolo de Natal e áreas vizinhas é composto por depósitos aluviais e coluviais de areias terciárias não consolidadas, areia argilosa, e sedimentos de areia siltosa com alguma lateralização. Recobrimo os depósitos terciários estão os depósitos quaternários de sedimentos eólicos compostos por areias de quartzo com tamanhos de grãos finos à grosseiros (Silva et al. 2002, Angelim 2006).

3.2 Investigação do local

Oitenta e oito perfurações SPT e oito furos de CPT foram levadas a cabo numa zona de 45100 m², onde o estádio foi construído. A Figura 1 mostra a distribuição dos furos CPT no local, dentro dos limites do estádio. As sondagens SPT também foram distribuídas dentro dos limites do estádio.

Os furos SPT atingiram profundidades máximas que variam de 15 m para 26 m. O número de contagem de golpe NSPT foi coletado dentro de cada metro abaixo da superfície do solo, e corresponde ao número de golpes necessários para dirigir no solo nos últimos 300 mm de um amostrador de 450 mm de comprimento. Os testes SPT foram executados de acordo com norma brasileira NBR 6484. números de golpes SPT foram corrigidos para 60% de eficiência (N60).

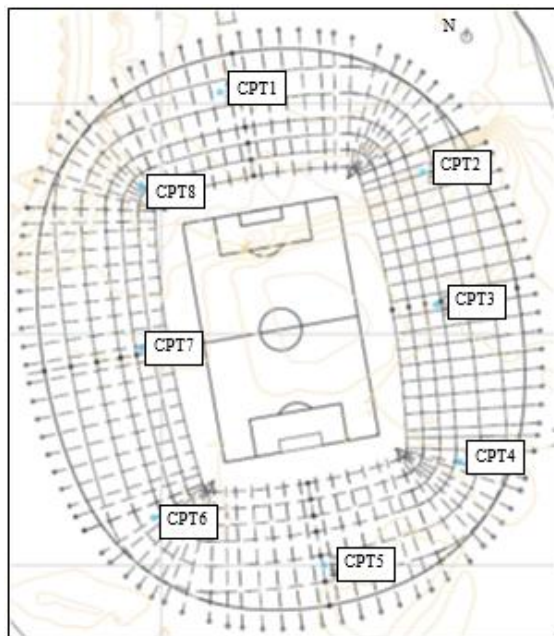


Figura 1. Localização das sondagens CPT.

Os furos CPT atingiram profundidades máximas entre 22 m para 35 m. A fim de permitir que comparações com os resultados SPT, resistência de ponta de cone média (q_c) e a resistência de atrito Lateral (f_s) foram calculadas a partir dos perfis de CPT, no mesmo intervalo de profundidade de determinação do número NSPT dentro do solo. Os testes CPT foram realizados seguindo a Norma Brasileira NBR 12069.

3.3 Características do subsolo

A Figura 2 mostra um perfil simplificado do local estudado, bem como os resultados de oito testes de CPT. As medições da resistência de ponta cone, q_c , e atrito lateral, f_s , obtidos com os testes CPT, são plotados com a profundidade. O subsolo é composto por uma

camada superficial de areia pura com uma espessura de cerca de 3 m. Este é um meio uniformemente classificado areia de quartzo de sílica que se classifica como SP de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos. Debaxo da camada de areia encontra-se um depósito de areia siltosa, com finos não plásticos. Baseadas no tipo comportamento do solo (SBT) cartas do CPT foram usados para classificar o solo (Robertson, 2012). As camadas de solo no perfil foram classificados em zona SBT 6 (areia limpa à areia siltosa).

A Figura 3 mostra gráficos de número NSPT com profundidade para todos os 88 furos. A média NSPT e o intervalo de desvio de NSPT a partir da média são também mostradas na Figura 3 (linha grossa e as linhas tracejadas, respectivamente). A Figura 3 é uma boa indicação da grande variabilidade espacial do subsolo investigada. A ampla dispersão de os dados também indicam a necessidade de divisão subsolo em zonas de influência para os testes SPT, a fim de derivar correlações consistentes com os resultados de CPT, em vez de utilizar apenas os testes superficiais.

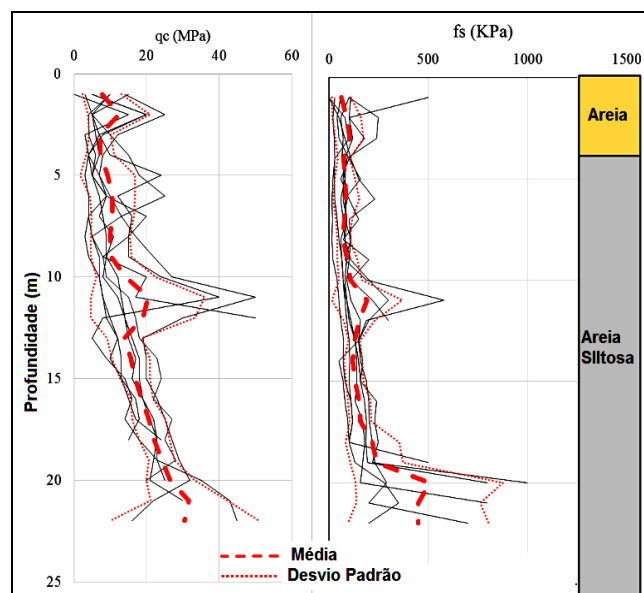


Figura 2. Perfil do local estudado e resultados CPT.

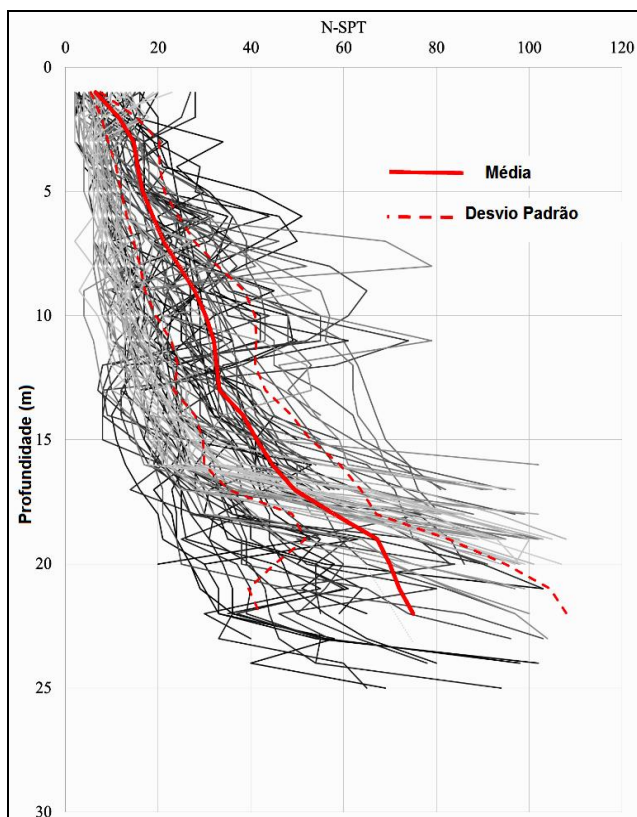


Figura 3. Variação do N_{SPT} com a profundidade.

4 ANÁLISE POR IDW

Os métodos baseados no inverso da potência da distância, consistem na atribuição de diferentes pesos às amostras de tal maneira que a influência de determinada amostra em relação à outra diminui com o aumento da distância entre elas. Logo, as amostras localizadas próximo ao nó a ser estimado recebem peso maior que os pontos mais distantes.

Com principais vantagens dessa ferramenta, Landim (2003) cita:

- Matematicamente simples;
- Disponível em diversos softwares;
- Indicado para avaliar variações de pequenas amplitudes;
- Utiliza pouco tempo de computação;
- Tem algoritmo bem conhecido.

De forma sucinta pode-se representar a mais simples equação que descreve o método como:

$$z' = \frac{(z_1/d_1) + (z_2/d_2) + (z_3/d_3)}{(1/d_1) + (1/d_2) + (1/d_3)} \quad (1)$$

Onde:

- z' é o valor a ser estimado;
- z_1, z_2 e z_3 são os valores amostrais;
- e d_1, d_2 e d_3 são as distâncias que as amostras z_1, z_2 e z_3 estão do ponto a ser estimado.

Na tentativa de melhor representar o perfil dado pelos boletins de sondagem SPT, utilizou-se o método determinístico IDW para interpolação de um perfil a partir dos boletins contidos na zona de influência delimitada por um raio de 35 m, distância máxima onde os resultados dos ensaios ainda apresentam correlações entre si. Logo foi possível a determinação de correlações entre q_c , resistência de ponta dos ensaios de cone e os ensaios SPT contidos na circunferência delimitada pelo raio citado tendo o centro nas coordenadas do ensaio CPT. Dessa forma o perfil SPT interpolado apresentado na Figura 4, cujas coordenadas coincidem com a localização do ensaio do cone, foi combinado com o ensaio do cone para gerar correlações entre q_c , f_s e N_{SPT} .

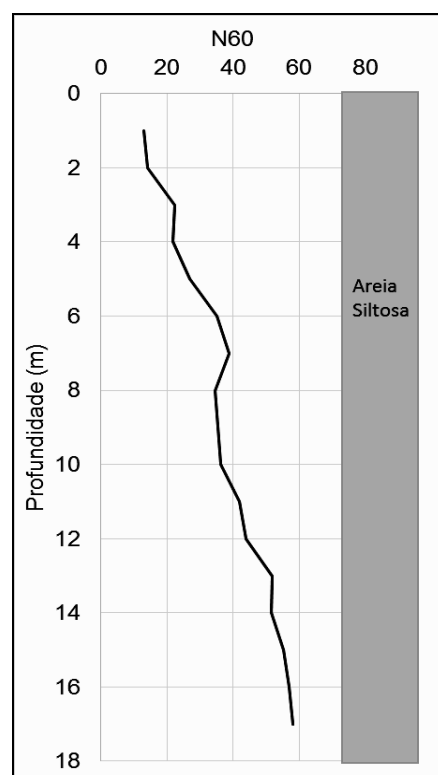


Figura 4. Perfil interpolado através de IDW para região do CPT-1.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Abordagem da Média Aritmética

Numa primeira abordagem, uma correlação entre os resultados SPT e CPT foi obtida por meio do cálculo da média aritmética dos valores. Nesta abordagem simples, todos os dados foram usados independentemente da distância a partir dos furos de CPT. Nenhuma tentativa foi feita para escolher dados específicos do SPT. 402 pares de valores de q_c - N_{60} foram combinados, resultando numa razão média q_c/N_{60} (k) de 0,6 (com um desvio padrão de 0,4) para o depósito de areia siltosa.

5.2 Correlações de q_c e N_{60}

Na tentativa de reduzir a influência da variabilidade espacial do solo, os resultados de CPT foram correlacionados com valores de N_{60} recolhidos dentro da zona de influência de cada furo CPT, definida por um círculo com raio igual ao menor intervalo encontrado na análise variográfica, ou seja, 35 m (ver Secção 4). A área estudada foi, assim, dividida em oito zonas distintas de influência, e oito correlações CPT-SPT diferentes foram estabelecidos para essas zonas.

A Figura 5 mostra a relação entre q_c e N_{60} para as Zonas 1 a 8. Os pontos de dados experimentais de cada zona de influência foram ajustados usando uma aproximação linear que passa através da origem. Tabela 2 apresenta a razão $k = q_c/N_{60}$ encontrados a partir dos ajustes lineares para as Zonas 1 a 8. Os resultados do coeficiente de determinação (R^2) da Tabela 2 mostram a boa aproximação alcançado entre as variáveis correlacionadas.

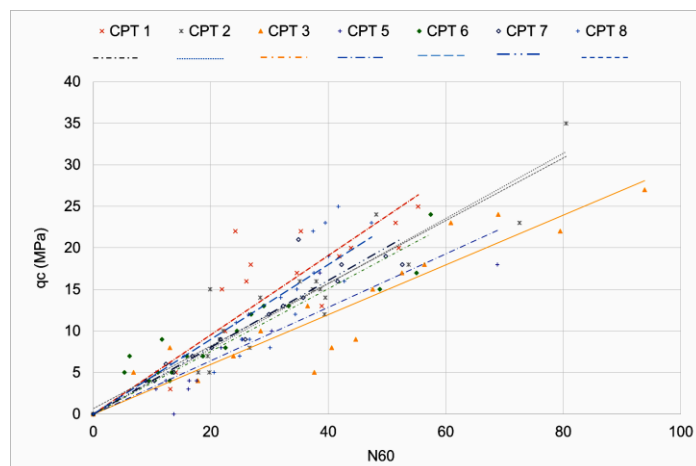


Figura 5. Correlações entre q_c e N_{60} para as zonas de influência dos furos do CPT.

A Figura 6 mostra a correlação de N_{60} e q_c obtidos utilizando os pontos de dados a partir de todos os oito zonas. Uma razão k de 0,38 MPa, foi obtida para o solo de acordo com esta análise. Este valor é inferior ao intervalo descrito por Danziger et al. (1998) para depósitos de areia siltosas residuais no Brasil, que está na faixa de 0,5-0,64.

Tabela 2. Valores de k para zonas de influência.

Zona CPT	k (MPa)	R^2
1	0,42	0,711
2	0,39	0,843
3	0,29	0,853
5	0,22	0,570
6	0,37	0,798
7	0,40	0,868
8	0,45	0,749

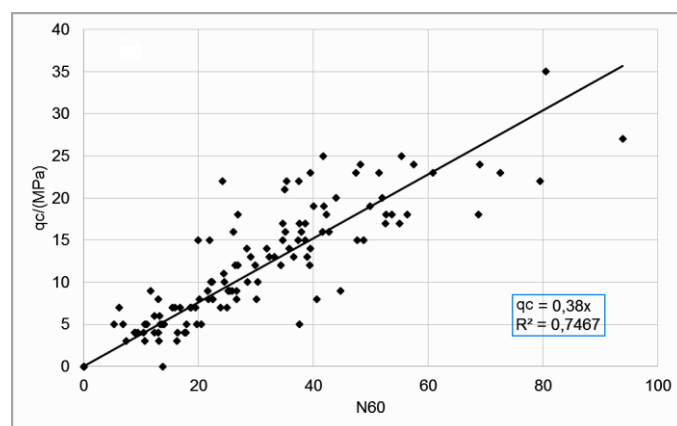


Figura 6. correlação geral entre q_c e N_{60} para o solo investigado.

5.3 Correlações de f_s e q_c / N_{60}

A Figura 7 mostra o atrito lateral f_s como uma função de $(q_c/Pa)/N_{60}$ para as zonas de influência de 1 a 8. A resistência de ponta do cone foi normalizada pela pressão atmosférica Pa ($Pa = 100 \text{ kPa}$). Uma regressão linear que passa através da origem foi ajustada aos pontos experimentais. A Tabela 3 apresenta a relação $f_s \cdot N_{60} / (q_c / Pa)$ encontrados com os ajustes lineares, para as zonas 1 a 8.

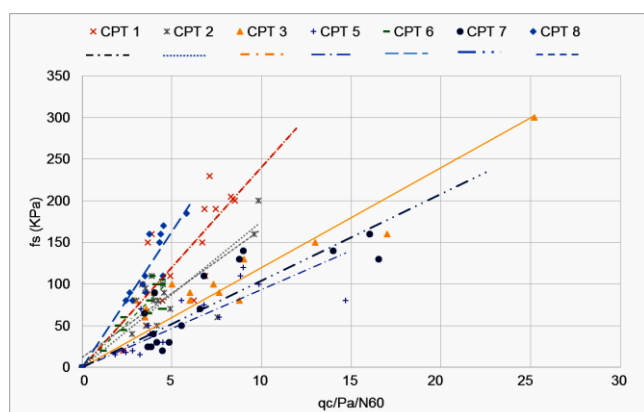


Figura 7. Correlações entre f_s e $(q_c / Pa) / N_{60}$ para as zonas de influência dos furos do CPT.

Table 3. Valores de $f_s \cdot N_{60} / (q_c / Pa)$

Zona CPT	$f_s \cdot N_{60} / (q_c / Pa)$	R^2
1	240,10	0,660
2	174,55	0,651
3	119,86	0,839
5	93,72	0,605
6	214,11	0,788
7	104,23	0,719
8	325,83	0,846

A Figura 8 mostra a correlação entre f_s e $(q_c / Pa) / N_{60}$ obtidos utilizando os pontos de dados de todas as oito zonas, selecionados de acordo com a abordagem baseada no IDW descrito anteriormente. Um valor de 160,01 foi encontrado para a relação $f_s \cdot N_{60} / (q_c / Pa)$ para o solo investigado.

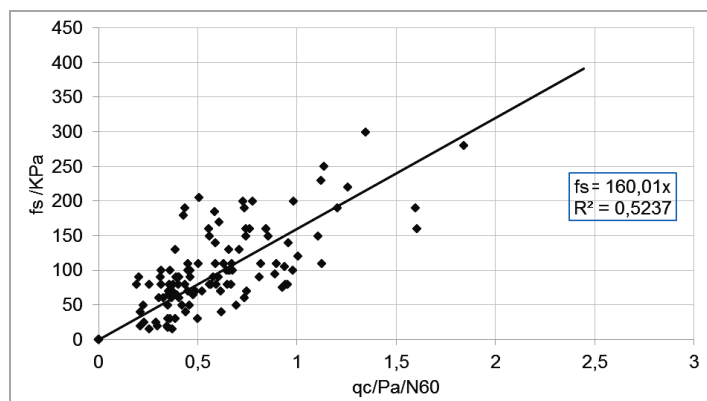


Figura 8. correlação geral entre f_s e $(q_c / Pa) / N_{60}$ para o solo investigado.

6. CONCLUSÕES

Uma análise de correlações entre dados SPT e CPT para um depósito de areia siltosa sedimentar na região Nordeste do Brasil foi apresentado neste trabalho. A investigação incluiu resultados de 88 SPT perfurações e oito perfurações CPT.

Uma análise preliminar consistiu em encontrar uma relação entre resistência de ponta do cone (q_c) e o N_{SPT} corrigido para 60% de eficiência (N_{60}) através do cálculo da média aritmética. Devido à grande dispersão dos valores causadas pela variabilidade espacial do solo, nenhuma correlação entre q_c e f_s foi encontrado com esta abordagem.

Na tentativa de reduzir o efeito de variabilidade espacial do solo, uma zona de influência de cada furo CPT. Apenas valores N_{60} dentro de uma faixa de 35 m foram escolhidos para correlacionar com os dados de um CPT específico. Esta abordagem levou a boas correlações com comparativamente altos coeficientes de Determinação. Uma relação representativa $k = q_c / N_{60}$ de 0,38 MPa foi encontrado para o depósito de areia siltosa. Esta relação situou-se abaixo da faixa relatada na literatura para depósitos de areia siltosas de origem residual no Brasil.

Por último, a geoestatística é uma ferramenta essencial para a realização de correlações SPT-CPT dos mais refinadas, e seu uso deve ser mais disseminado.

REFERÊNCIAS

- Akca, N. 2003. Correlation of spt-cpt data from the United Arab Emirates. *Engineering Geology*.v.67, 219-231.
- Alonso, U. R. 1980. Correlations between results of static and dynamic penetration tests for the City of São Paulo. *Solos e Rochas*. Vol, 3. Nº 3, p. 19-25. [in Portuguese]
- Angelim, L. A. A.; Nesi, J. R.; Torres, H. H. F.; Medeiros, V. C.; Santos, C. A.; Junior, J. P. V.; Mendes, V. A. (1ª ed.) 2006. *Geologia e Recursos Minerais do Estado do Rio Grande do Norte*. Recife. CPRM. [in Portuguese]
- Aoki, N.; Velloso, D.A. 1978. An approximate method to estimate the bearing capacity of piles. In: Panamerican Conf. Soil Mech. Found. Eng., 5, Buenos Aires, 1975. Proc., Buenos Aires, Huella Estudio Grafico, 1975, V.1, pp. 367-376.
- Barata E., et al. 1978. Uplift Tests on Drilled Piers and Footings Built in Residual Soil. In: *VI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações*. Proc., Rio de Janeiro. v. 3. pp. 1-37. [in Portuguese]
- Brazilian Association of Technical Standards. 1991. *NBR 12069: Soil - Cone penetration test - CPT in situ - Test method*. 10p. [in Portuguese]
- Brazilian Association of Technical Standards. 2001. *NBR 6484: Soil - Standard penetration test - SPT - Soil sampling and classification - Test method*. 17p. [in Portuguese]
- Chan, C.T; Duan, S.W; Kao, T.C. 1988. SPT-CPT correlations for granular soils. In: *1st International Symposium on Penetration Testing*, Orlando, Flórida. Vol. 1, p. 335-339, USA.
- Danziger, B.R.; Velloso, D.A. 1986. Study on correlations between SPT and the result of continuous penetration tests. In: *VIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações*. Proc., Porto Alegre. v. 6. pp. 103-113. [in Portuguese]
- Danziger, B.R.; Velloso, D.A. 1995. Correlation between the CPT and the SPT for some Brazilian soils. In: *International Symposium on Penetration Testing*, Proc., Linkoping, Sweden, pp. 155-160.
- Danziger, F. A. B.; Politano, C. F. & Danziger, B. R. 1998. CPT - SPT correlations for some Brazilian residual soils. In: *Geotechnical Site Characterization*. Proc. 1st Int. Conf. on Site Characterization, ISC'98, Atlanta, USA, Balkema, vol. 2, pp. 907-912.
- Kara, O.; Gündüz, Z. 2010. Correlation between cpt and spt in adapazari, turkey. In: *2nd international symposium on cone penetration test*. Huntington Beach, California. Proceedings. California.
- Kasim, A. G.; Chu, M.; Jensen, C. N. 1986. Field correlation of cone and standard penetration tests. *Jornal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 112, pp. 368- 372.
- Politano, C. F. 1999. *Correlations between results of CPT and SPT in residual soils*. 210 p. Master Dissertation – Federal University of Rio de Janeiro – COPPE. Rio de Janeiro. [in Portuguese]
- Robertson, P.K. 2012. Interpretation of in-situ tests – some insights. In: *Geotechnical and Geophysical site characterization 4*. Coutinho & Mayne, eds., Vol. 1, pp. 3-24. 2013. Taylor & Francis, London.
- Schmertmann, J.H.; Palacios, A. 1979. Energy dynamics of spt. *Journal of soil mechanics and foundation division – ASCE*, v.105, nº8, p.909-926.
- Silva, E.A.J.; Santos JR., O.F.; Jesus, A.P.; Amaral, R.F. (2002) Geological, geomorphologic and geotechnical characterization of sediments of the south sector of Natal/RN, with base in analysis of SPT tests. In: *10º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental*. Proc., Ouro Preto. [in Portuguese]
- Shahri, A.A, Juhlin, C. and Malemir A. (2014) “A reliable correlation of SPT-CPT data for southwest of Sweden”, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 19, 1013-1032