

Estudo das Correlações entre os Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento dos Solos e o Índice de Resistência à Penetração (N_{SPT})

Daniela Fonseca Duarte Ribeiro

Engenheira civil, Instituto Brasileiro de Educação Continuada, Belo Horizonte, Brasil,
danifonribeiro@yahoo.com.br

Marcos Fábio Porto de Aguiar

Professor associado, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza, Brasil,
marcosporto@ifce.edu.br

Giullia Carolina de Melo Mendes

Graduanda em engenharia civil, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza, Brasil,

Sávio Feitosa Veríssimo

Graduando em engenharia civil, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza, Brasil, savio.fv@hotmail.com

RESUMO: O presente artigo tem como objetivo propor um estudo das correlações entre o índice de resistência à penetração (N_{SPT}) fornecido nas sondagens SPT e ângulo de atrito do solo, utilizando-se de resultados de nove sondagens à percussão e três ensaios de compressão triaxial do tipo CIU, em encosta situada na cidade de Manhuaçu-MG, pelos métodos de Peck et. Al (1953), Meyerhof (1956), De Mello (1971), Peck, Hanson e Thornburn (1974), Parry (1977), Mitchell, Guzikowski e Villet (1978), Godoy (1983), Décourt (1989), Stroud (1989), Hatanaka e Uchida (1996), Teixeira (1996). Os resultados permitiram verificar que, para o bloco 1 ensaiado, os métodos que mais se aproximaram foram de Teixeira (1996) e Peck, Hanson e Thornburn (1974). Já para o bloco 2, o valor de ângulo de atrito mostrou-se demasiadamente baixo, o que possivelmente, pode ser explicado por uma amostragem inadequada que levou ao seu amolgamento e perda das características de resistência in situ. Já para o bloco 3, percebeu-se que todos os resultados se mostraram aceitáveis, no qual o método de Stroud (1989) demonstrou maior discrepância, com variação de 16,84%. Conclui-se que, tais correlações são obtidas de maneira empírica e para condições específicas, nas quais deve-se analisar com cuidado se a situação de estudo se enquadra ou não com os estabelecidos por cada método.

PALAVRAS-CHAVE: Parâmetros de resistência dos solos. Sondagem SPT. Sondagem DPL.

ABSTRACT: This article proposes a study of the correlation between the penetration resistance index (N_{SPT}) provided in the SPT surveys, and soil friction angle, using the results of nine probes to percussion and three triaxial compression tests of the type CIU, located on the hillside in the city of Manhuaçu-MG, by the methods of Peck et. (1953), Meyerhof (1956), De Mello (1971), Peck, Hanson and Thornburn (1974), Parry (1977), Mitchell, Guzikowski and Villet (1978), Godoy (1983), Décourt (1989), Hatanaka and Uchida (1996), Teixeira (1996). The results showed that, for block 1 tested, the methods that came closest were from Teixeira (1996) and Peck, Hanson and Thornburn (1974). For block 2, the value of friction angle was shown to be too low, which may be explained by an inadequate sampling that led to its lowering and loss of in situ strength characteristics. For block 3, it was observed that all the results were acceptable, in which the method of Stroud (1989) showed a greater discrepancy, with a variation of 16.84%. It is concluded that such correlations are obtained in an empirical way and, for the specific conditions, it is necessary to analyze if the study situation fits with those established by each method

KEYWORDS: Parameters of soil resistance. SPT survey. DPL survey.

1 Introdução

Na engenharia geotécnica, o conhecimento de parâmetros dos solos, tais como coesão e ângulo de atrito são primordiais para o dimensionamento de fundações superficiais, contenções, bem como para o estudo de estabilidade de encostas, entre outros. Por outro lado, para o reconhecimento do subsolo, as sondagens SPT são as mais utilizadas no Brasil. Devido aos custos considerados elevados de ensaios de laboratório, muitos autores propuseram estudos que correlaciona o ângulo de atrito de um solo com seu índice de resistência à penetração (N_{SPT}).

O presente trabalho tem por objetivo realizar um estudo das correlações entre o índice de resistência à penetração (N_{SPT}) e o ângulo de atrito do solo, pelos métodos propostos pelos autores Peck *et. al* (1953), Meyerhof (1956), De Mello (1971), Peck, Hanson e Thornburn (1974), Parry (1977), Mitchell, Guzikowski e Villet (1978), Godoy (1983), Décourt (1989), Stroud (1989), Hatanaka e Uchida (1996), Teixeira (1996).

Para tal, em encosta no município de Manhuaçu-MG, foram realizados três furos de sondagem SPT e coletados três blocos de amostra indeformada, submetidos a ensaios de compressão triaxial estático do tipo CIU.

2 Correlações entre o índice de resistência à penetração n e o ângulo de atrito interno (ϕ)

Diante do cenário de escassez de ensaios de laboratório na prática de engenharia, muitos autores propuseram correlações entre o índice de resistência à penetração (N_{SPT}) e o ângulo de atrito (ϕ), dentre eles, Peck *et al.* (1953), Meyerhof (1956), De Mello (1971), Peck, Hanson e Thornburn (1974), Parry (1977), Mitchell, Guzikowski e Villet (1978), Godoy (1983), Décourt (1989), Stroud (1989), Hatanaka e Uchida (1996), e Teixeira (1996), conforme apresentados à seguir.

2.1 Peck *et al.* (1953) e Meyerhof (1956)

Os autores Peck *et al.* (1953) e Meyerhof (1956) propuseram correlações entre o ângulo de atrito (ϕ) e o índice de resistência à penetração (N_{SPT}), conforme apresentado na Figura 1.

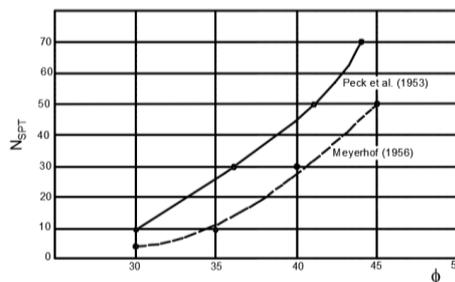


Figura 1. Correlações de N_{SPT} e ϕ propostos por Peck *et. al* (1953) e Meyerhof (1956).

2.2 De Mello (1971)

O autor De Mello (1971) propôs uma correlação, apresentada por Velloso e Lopes (2010) entre o índice de resistência à penetração das areias e o ângulo de atrito efetivo, apresentando, graficamente, em função da tensão vertical efetiva ($\sigma'_{v,0}$), conforme Figura 2.

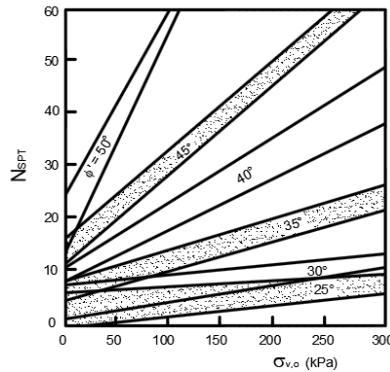


Figura 2. Correlação entre o N_{SPT} e a $\sigma'_{v,0}$ proposta por De Mello (1971).

2.3 Peck, Hanson e Thornburn (1974)

Os autores Peck, Hanson e Thornburn (1974) propuseram uma correlação gráfica, apresentada na Figura 3, para solos granulares, que segundo Schnaid e Odebrecht (2012) resulta, em geral, em estimativa conservadora para projetos rotineiros.

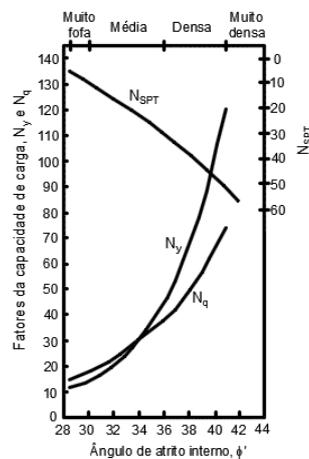


Figura 3. Correlação entre N_{SPT} e ângulo de atrito interno (ϕ'), em função dos fatores de capacidade de carga e da capacidade dos solos granulares.

2.4 Parry (1977)

O método proposto por Parry (1977) objetiva estimar a capacidade de suporte de solos não coesivos, correlacionando ao N_{SPT} e a profundidade, apresentada na Figura 4.

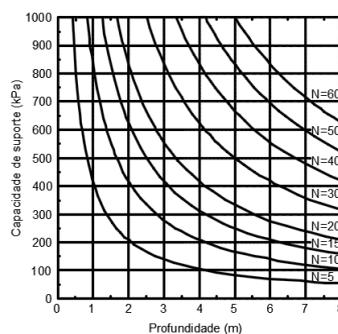


Figura 4. Correlação da capacidade de suporte do solo, índice de resistência à penetração e profundidade, segundo o método de Parry (1977).

O autor também propôs uma correlação entre o ângulo de atrito e o N_{SPT} em função da tensão vertical efetiva no nível do N_{SPT} obtido, conforme a expressão:

$$\phi = 25 + 28 \cdot \left(\frac{N_{SPT}}{\sigma'_{v0}} \right)^{0,5} \quad (1)$$

2.5 Mitchell, Guzikowski e Villet (1978)

Os autores Mitchell, Guzikowski e Villet (1978) propuseram uma correlação gráfica entre N_{SPT} e ângulo de atrito levando em consideração o efeito da pressão vertical efetiva ($\sigma'_{v,0}$), conforme Figura 5.

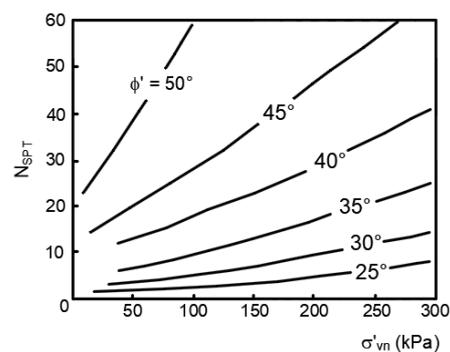


Figura 5. Relação de ϕ em função de N_{SPT} e σ'_{vn} de acordo com Mitchell, Guzikowski e Villet (1978).

2.6 Godoy (1983)

Uma das formulações empíricas para a estimativa do ângulo de atrito quanto tem-se o índice de resistência à penetração (N_{SPT}) é proposta por Godoy (1983):

$$\phi = 28^\circ + 0,4 \cdot N_{SPT} \quad (2)$$

Vale salientar, que sua utilização é restrita às areias.

2.7 Décourt (1989)

Décourt (1989), estudou as diferenças entre areias recém depositadas como quando ensaiadas em laboratório e areias naturais influenciadas pelo fator idade. O autor correlacionou os valores de $N(60)$, correspondente a 60% da eficiência mecânica padronizada internacionalmente do índice de resistência á penetração com o ângulo de atrito efetivo das areias, conforme Figura 6.

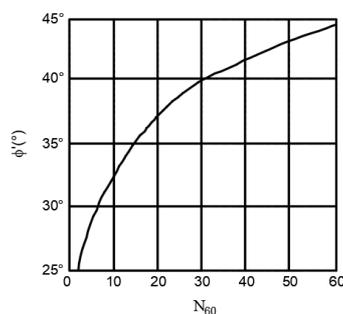


Figura 6. Ângulo de atrito em função de N_{60} , pelo método de Décourt (1989).

2.8 Stroud (1989)

Baseado em uma gama de resultados de ensaios de placa em areias, considerando as condições normalmente adensadas e pré-adensadas, Stroud (1989) propôs uma relação entre ângulo de atrito efetivo e o índice de resistência à penetração com 60% da eficiência mecânica padronizada internacionalmente, conforme Figura 7.

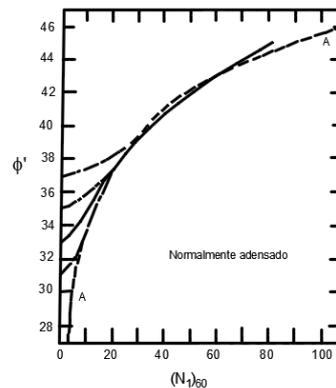


Figura 7. Relação de ângulo de atrito e N_{60} , proposta por Stroud (1989).

2.8 Hatanaka e Uchida (1996) e Teixeira (1996)

Segundo Schnaid e Odebrecht (2012), as expressões usualmente adotadas na estimativa do ângulo de atrito interno são as propostas por Hatanaka e Uchida (1996) e Teixeira (1996), como seguem, respectivamente:

$$\phi = 20^\circ + \sqrt{15,4 \cdot N_{60}} \quad (3)$$

$$\phi = 15^\circ + \sqrt{24 \cdot N_{SPT}} \quad (4)$$

Onde: ϕ é o ângulo de atrito e N_{60} é o índice de resistência à penetração com 60% da eficiência mecânica padronizada internacionalmente.

3 Metodologia

Foram realizados, em encosta às margens da BR-116, no município de Manhuaçu-MG, três furos de sondagem SPT. Além das sondagens, com o objetivo de realizar ensaios triaxiais, foram coletados três blocos de amostras indeformadas, em três pontos diferentes, nas profundidades de 5,00m, 2,50m e 5,00m, respectivamente.

Com os resultados de N_{SPT} obtidos nas sondagens e com os parâmetros de resistência dos ensaios triaxiais, objetiva-se realizar os estudos dos métodos de correlação entre N_{SPT} e ângulo de atrito, apresentados nesse artigo.

4 Resultados

A partir dos dados obtidos pelas sondagens SPT constatou-se a presença de argila arenosa, silte arenoso e argila siltosa, com variação de N_{SPT} conforme Figura 8. As características das amostras indeformadas são apresentadas na Tabela 1.

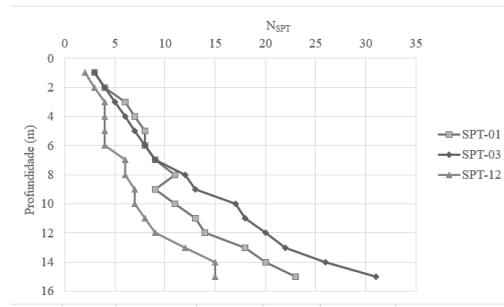


Figura 8. Variação do N_{SPT} para os furos SPT-01, SPT-03 e SPT-12.

As características das amostras indeformadas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Características dos blocos de amostra indeformada.

Bloco	Tipo de Solo	Profundidade (m)
1	Silte arenoso	5,00
2	Argila arenosa	2,50
3	Silte arenoso	5,00

Vale ressaltar que, apesar das amostras do bloco 1 e 3 serem do mesmo tipo de solo e extraídos da mesma profundidade, foram coletados em pontos diferentes, dessa forma, analisados separadamente. As amostras foram submetidas à ensaios triaxiais do tipo adensado e não drenado (CIU), com tensões confinantes de 25 kPa, 75 kPa e 100 kPa, para o bloco 1 e 3, e 10 kPa, 25 kPa e 50 kPa para o bloco 2. As envoltórias de Mohr-Coulomb em termos de tensões totais e efetivas são apresentados nas Figuras 9 a 14.

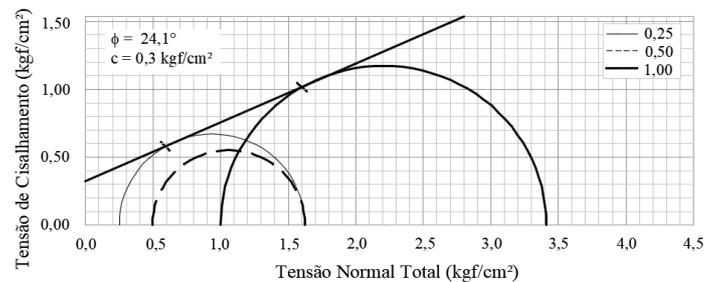


Figura 9. Envoltória de Mohr-Coulomb em termos de tensões totais para a amostra do bloco 1.

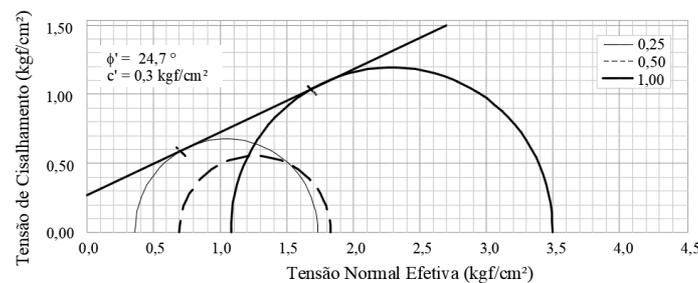


Figura 10. Envoltória de Mohr-Coulomb em termos de tensões efetivas para a amostra do bloco 1.

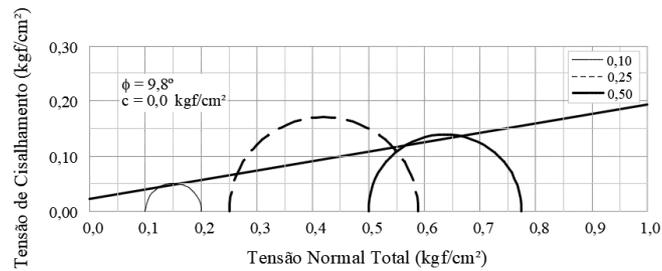


Figura 11. Envoltória de Mohr-Coulomb em termos de tensões totais para a amostra do bloco 2.

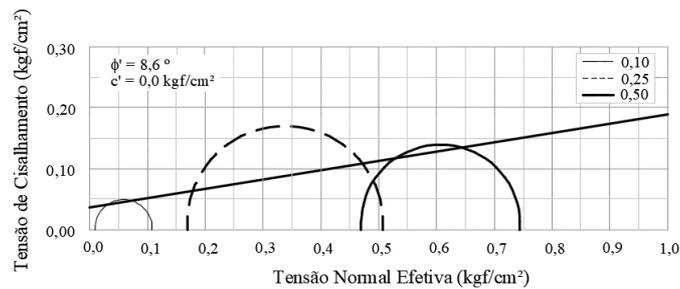


Figura 12. Envoltória de Mohr-Coulomb em termos de tensões efetivas para a amostra do bloco 2.

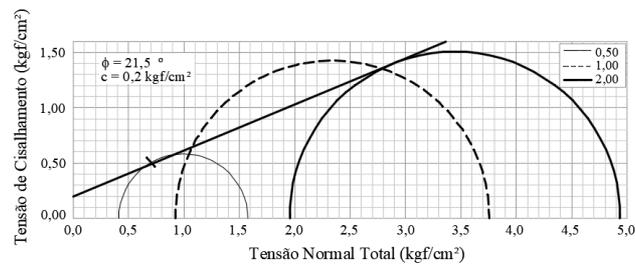


Figura 13. Envoltória de Mohr-Coulomb em termos de tensões totais para a amostra do bloco 3.

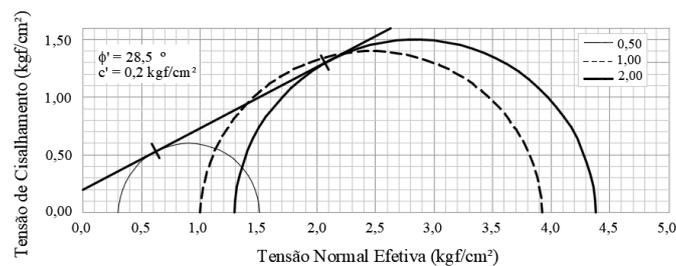


Figura 14. Envoltória de Mohr-Coulomb em termos de tensões efetivas para a amostra do bloco 3.

A Tabela 2 e 3, apresentam os resultados dos parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb em termos de tensões totais e efetivas, respectivamente.

Tabela 2. Parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb em termos de tensões totais.

Bloco	Parâmetros de Resistência de Mohr-Coulomb	
	Ângulo de Atrito (ϕ)	Coesão (kPa)
1	24,1°	30
2	9,8°	0
3	21,5°	20

Tabela 3. Parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb em termos de tensões efetivas.

Parâmetros de Resistência de Mohr-Coulomb		
Bloco	Ângulo de Atrito (ϕ)	Coesão (kPa)
1	24,7°	30
2	8,6°	0
3	28,5°	20

5 Análise dos Resultados

Visando um resultado mais coerente com a situação de campo, os ângulos de atrito obtidos nos ensaios triaxiais serão comparados com as obtenções de ângulo de atrito pelos métodos citados nesse trabalho, a partir dos N_{SPT} da sondagem mais próxima. Para os blocos 1 e 2, utilizou-se como parâmetro de entrada, o N_{SPT} do SPT-01, na profundidade de 5,00 m e 2,50 m, respectivamente. Já para o bloco 3, utilizou-se a média do N_{SPT} das sondagens SPT-03 e SPT-12, na profundidade de 5,00 m. Os valores de N_{SPT} utilizados nas correlações são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Índices de resistência à penetração utilizados como parâmetro de entrada nas correlações entre ϕ e N_{SPT} .

ϕ e N_{SPT} .	
Bloco	N_{SPT}
1	8
2	4
3	6

Dessa forma, são apresentados na Tabela 5, os valores de ângulo de atrito obtidos pelos métodos de Peck et al (1953), Meyerhof (1956), De Mello (1971), Peck, Hanson e Thornburn (1974), Parry (1977), Mitchell, Guzikowski e Villet (1978), Godoy (1983), Décourt (1989), Stroud (1989), Hatanaka e Uchida (1996), Teixeira (1996).

Tabela 5. Resultados de ângulo de atrito obtidos pelos métodos citados.

Método	Ângulo de atrito (ϕ)		
	por bloco		
	1	2	3
Ensaio triaxial	25,3	8,6	29,1
Peck et al. (1953)	-	-	-
Meyerhof (1956)	33	30	31
De Mello (1971)	32	28	30
Peck, Hanson e Thornburn (1974)	30	28	29
Parry (1977)	33	35	32
Mitchell, Guzikowski e Villet (1978)	35	30	32
Godoy (1983)	31	30	30
Décourt (1989)	32	27	29
Stroud (1989)	35	33	34
Hatanaka e Uchida (1996)	31	28	30
Teixeira (1996)	29	25	27

Dentre os métodos, o de Peck *et al.* (1953) não pôde ser utilizado, por não haver correlações para índices de resistência à penetração inferiores a 10 golpes.

As variações, em percentual, entre as correlações e os resultados do ensaio triaxial são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Diferenças percentuais entre os ângulos de atrito pelo ensaio triaxial e pelo métodos propostos.

Método	Variação (%)		
	Bloco 1	Bloco 2	Bloco 3
Peck et al. (1953)	-	-	-
Meyerhof (1956)	+30,43	+248,84	+6,53
De Mello (1971)	+26,48	+225,58	+3,09
Peck, Hanson e Thornburn (1974)	+18,58	+225,58	-0,34
Parry (1977)	+30,43	+306,98	+9,97
Mitchell, Guzikowski e Vilet (1978)	+38,34	+248,84	+9,97
Godoy (1983)	+22,53	+248,84	+3,09
Décourt (1989)	+26,48	+213,95	-0,34
Stroud (1989)	+38,34	+283,72	+16,84
Hatanaka e Uchida (1996)	+22,53	+225,58	+3,09
Teixeira (1996)	+14,62	+190,70	-7,22

Nota-se uma discrepância entre as correlações obtidas para a amostra do bloco 2 e seu resultado no ensaio triaxial. Acredita-se que, mesmo tendo sido retirada a uma profundidade inferior ao demais blocos, o ângulo de atrito apresentou-se demasiadamente baixo, podendo ser explicado por algum erro no momento da coleta, levando ao amolgamento da amostra. Percebe-se que, para o bloco 1, as variações apresentaram-se entre +22,53% e 38,34%, exceto os métodos de Peck, Hanson e Thornburn (1874) e Teixeira (1996), que apresentaram variações de 18,58% e 14,62%, respectivamente. Já o bloco 3, apresentou variações de ângulo de atrito entre -7,22% e +9,97%, com excessão do método de Stroud (1989), que variou +16,84% do ângulo de atrito obtido no ensaio triaxial.

6 Considerações finais

Considerando as correlações apresentadas e suas variações com relação ao resultado de ângulo de atrito obtido no ensaio triaxial, pôde-se perceber que, dentre os três blocos de amostra, o bloco 3 apresentou menores variações, e o bloco 2 mostrou-se mais discrepante, o que levanta a hipótese de amolgamento da amostra indeformada no processo de retirada. Apesar de apresentarem variações, não sugere-se erros nas correlações, uma vez que as mesmas são obtidas em condições particulares de campo e não podem ser aplicadas em outras condições sem um estudo mais aprofundado. Além disso, os ensaios de campo e de laboratório são influenciados por diversas condições, como amostragem, amolgamento, energia no ensaio SPT, dentre outras, que podem levar a resultados diferentes das condições in situ. Sugere-se a realização de novos estudos com ensaios triaxiais, na condição drenada, para análise das variações pelos métodos propostos e o ângulo de atrito obtido em laboratório.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa do autor 3 e a Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) pela bolsa do autor 4.

REFERÊNCIAS

- Décourt, L. (1989). The standard penetration test. State-of-the-art-report. Proceedings of the XIIIICSMFE, Rio de Janeiro, v. 4, p. 2405-2416.
- De Mello, V. F. B. (1971). The standard penetration test: state-of-the-art-report. 4th Pan-American Conf. Soil Mech. Found. Eng., Puerto Rico, v. 1, p. 1-86.
- Godoy, N. S. (1983). Estimativa da capacidade de carga de estacas a partir de resultados de penetrômetro estático. Palestra. São Carlos (SP): Escola de Engenharia de São Carlos – USP.
- Hatanaka, M. e Uchida, A. (1996). Empirical correlation between penetration resistance and effective friction of sand soil. Soils Found., v. 36, n. 4, p. 1-9.
- Meyerhof, G. G., 1956. "Penetration Tests and Bearing Capacity of Cohesionless Soils." Journal of the Soil Mechanics Division, ASCE, Vol. 82, SM1, pp. 1-12.
- Mitchell, J. K., Guzikowski, F., Villet, W. C. B. (1978). The measurement of soil properties in situ – present methods – their applicability and potential. US Dept. of Energy Report. Berkeley: Dept of Civil Engineering, University of California.
- Parry, R.H.G. (1977). "Estimating Bearing Capacity in Sand from SPT Values." Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 103, No. GT9, pp. 1112-1116.
- Peck, R.B., Hanson, W.E. and Thornburn, T.H. (1953). Foundation Engineering. John Wiley & Sons, New York.
- Peck, R.B., Hanson, W.E. and Thornburn, T.H. (1974). Foundation Engineering. John Wiley & Sons, N.Y.
- Schnaid, F. e Odebrecht, E. (2012). Ensaio de campo e suas aplicações à engenharia de fundações. São Paulo: Oficina de Textos.
- Stroud, M. A. (1989). The standard penetration test – its application and interpretation. In: GEOTECH. CONF. ON PENETRATION TESTING IN THE UK, Birmingham. Proceedings... London: Thomas Telford.
- Teixeira, A. H. (1996). Projeto e execução de fundações. Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, SEFE, São Paulo, v.1, p. 33-50.
- Velloso, D. A.; Lopes, F. R. (2010). Fundações: Volume 2 – Fundações Profundas. São Paulo: Editora Oficina de Textos.