

Correlações entre compacidade relativa (C_r) e resistência à penetração (N_{SPT}) para solos arenosos

Bicalho, K. V.

Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Vitória, ES, Brasil, kvb@click21.com.br

Moraes, M. L.

UFES/ Solo Fundações & Geotecnia, Vitória, ES, Brasil, ml_moraes@yahoo.com.br

Castello, R. R.

UFES/ Solo Fundações & Geotecnia, Vitória, ES, Brasil

Resumo: As correlações empíricas relacionadas ao índice de resistência à penetração, N_{SPT} , propostas por Gibbs e Holtz (1957), Meyerhof (1957), Skempton (1986), Yoshida et al. (1988) e Cubrinovski e Ishihara (1999) foram utilizadas neste trabalho para estimativa da compacidade relativa, C_r , de terrenos arenosos da Grande Vitória, ES. As propostas analisadas apresentaram grande dispersão nos resultados de C_r para um mesmo N_{SPT} e mesma profundidade. As propostas de Skempton (1986) e Yoshida et al. (1988) apresentaram resultados mais conservadores (menores valores de C_r) para os dados analisados. Essas correlações empíricas devem ser utilizadas com critério, levando-se em conta os fatores intervenientes no SPT, experiência local e limitações dos resultados à região estudada.

Abstract: The empirical correlations proposed for estimating relative density, C_r , of sandy soils based on SPT N-values proposed by Gibbs and Holtz (1957), Meyerhof (1957), Skempton (1986), Yoshida et al. (1988) and Cubrinovski and Ishihara (1999) were evaluated in this paper. The results show that wide variations in C_r values can occur even at a given depth and constant SPT N-value. The relative density values estimated by Skempton (1986) and Yoshida et al. (1988) are lower compared with the others. Empirical correlations are derived based on a set of specified data base under specified conditions and the limitation for application of empirical correlation should be clearly considered.

1 INTRODUÇÃO

A estimativa do ângulo de atrito interno (ϕ') assumindo o critério de ruptura de Mohr-Coulomb é necessária em qualquer problema geotécnico envolvendo o fenômeno de cisalhamento (como por exemplo análises de capacidade de carga de fundações, estabilidade de taludes ou empuxos de terra). No caso de solos não coesivos, o ângulo de atrito interno (ϕ') é o principal parâmetro de resistência. Dependendo das condições de contorno assumidas, observa-se que há variação nos resultados obtidos nos ensaios de laboratório para determinação do ângulo de atrito. O ângulo de atrito interno para baixas tensões de confinamento, determinado no ensaio triaxial, sob um estado de compressões axiais simétricas é menor que o determinado sob condições de tensões planas (Ko e Davidson 1973). O valor de ϕ' de solos arenosos varia muito com a compacidade relativa (C_r) do

solo. Entretanto, na maioria das obras geotécnicas o ensaio de penetração dinâmica de simples reconhecimento (SPT) com medida do índice de resistência à penetração dinâmica (N_{SPT}) é a única fonte de informação e neste caso utilizam-se correlações empíricas em função do N_{SPT} para estimativa de parâmetros dos solos.

Projetos e/ou especificações de densificação de solos arenosos são, muitas vezes, elaborados em termos de compacidade relativa. Então os valores de N_{SPT} , antes e após densificação, têm que ser convertidos para C_r usando uma ou mais das várias correlações existentes e desenvolvidas para condições particulares. Porém, a conversão direta de N_{SPT} em C_r é incerta, porque o N_{SPT} depende de outros fatores além da compacidade e as correlações não são independentes do tipo de solo. Aumento da pressão lateral, do tempo sob pressão e da estabilidade da estrutura do solo levam a um acréscimo na resistência à penetração. Por isso tem

seu conveniente para algumas aplicações, trabalhar com uma “densidade relativa equivalente”, que seria a densidade relativa que a massa de areia, livremente depositada e normalmente adensada, teria para tais resistências à penetração (Mitchell 1981).

Correlações empíricas somente devem ser utilizadas com critério, levando-se em conta os fatores intervenientes no SPT, experiência local e limitações dos resultados à região estudada. Segundo Schmertmann (1975) a estimativa de C_r através do N_{SPT} pode facilmente envolver um erro de $\pm 20\%$. Décourt (1989) analisou a dispersão nos resultados de correlações entre C_r e N_{SPT} e a sua complexidade, e concluiu que há pouco interesse prático em se conhecer C_r quantitativamente. Pacheco (1978) já havia verificado a imprecisão da determinação de C_r por meio de σ'_v e N_{SPT} . Críticas semelhantes são direcionadas às correlações entre ϕ' e C_r pois essas correlações parecem ser obtidas para um dado solo ou local sem garantir sua aplicabilidade a outros locais. Este trabalho discute a grande dispersão nos resultados da estimativa da C_r de terrenos arenosos da Grande Vitória, ES, obtida através das correlações empíricas entre C_r e N_{SPT} propostas por Gibbs e Holtz (1957), Meyerhof (1957), Skempton (1986), Yoshida et al. (1988) e Cubrinovski e Ishihara (1999). Estes resultados são utilizados para avaliar a classificação qualitativa dos solos não coesivos proposta pela norma brasileira NBR-6484 (ABNT, 2001) que relaciona diretamente o valor de N_{SPT} aos estados de compactidade do solo.

2 ESTIMATIVA DE C_r ATRAVÉS DO N_{SPT}

Várias correlações empíricas têm sido propostas na literatura para estimar C_r em função do N_{SPT} e da tensão efetiva (Gibbs e Holtz 1957, Meyerhof 1957 e Skempton 1986). Essas correlações podem ser escritas na forma geral:

$$C_r (\%) = \sqrt{\frac{N_{SPT,60}}{a\sigma'_v + b}} \times 100 \quad (1)$$

onde $N_{SPT,60}$ é o N_{SPT} corrigido para uma energia de 60% e σ'_v é a tensão efetiva vertical na profundidade (kPa). A Tabela 1 apresenta os valores dos coeficientes a e b recomendados por Gibbs e Holtz (1957), Meyerhof (1957) e Skempton (1986). A Figura 1 mostra a variação da C_r com o N_{SPT} proposta por Gibbs e Holtz (1957) para areias grossas e finas saturadas ($C_r > 40\%$). As diferenças observadas na Figura 1 entre as curvas propostas para areias finas saturadas e as propostas para areias grossas saturadas mostram que a relação entre C_r e N_{SPT} depende da granulometria do solo.

Yoshida et al. (1988) propõem:

$$C_r (\%) = 25 \cdot \sigma'_v{}^{-0,12} \cdot N_{SPT,60}{}^{0,46} \times 100 \quad (2)$$

Lade et al. (1988) discutem a variação do índice de vazios mínimo (estado mais compacto), máximo (estado mais fofo), respectivamente, e_{\min} e e_{\max} , com a porcentagem de finos não-plásticos (por volume) para uma areia. A razão entre os tamanhos médios D_{50} (50% do solo tem diâmetro inferior) dos grãos da areia e dos finos não-plásticos usados nos ensaios ($D_{50,areia}/D_{50,finos}$) foi de 4,2. Percebe-se que, à medida que a porcentagem de finos/volume aumentou de 0 a 30%, os valores de e_{\max} e e_{\min} diminuíram. Isso corresponde à fase onde os finos tendem a preencher os espaços vazios entre as partículas da areia. Entre 30% e 40% a variação de índices de vazios é pequena, mas quando essa porcentagem passa de 40% os valores de e_{\max} e e_{\min} aumentam, o que corresponde à fase onde as partículas maiores perdem o contato entre si e ficam dispersas numa massa de finos.

Cubrinovski e Ishihara (1999) incluíram o valor de D_{50} (mm) na correlação empírica $C_r - N_{SPT}$ proposta, tal que:

$$C_r (\%) = \left[\frac{N_{SPT,78} \left(0,23 + \frac{0,06}{D_{50}} \right)^{1,7}}{9} \cdot \left(\frac{98}{\sigma'_v} \right)^{0,5} \right]^{0,5} \times 100$$

onde $N_{SPT,78}$ é o N_{SPT} corrigido para uma energia de 78%. A correlação empírica $C_r - N_{SPT}$ sugerida por Cubrinovski e Ishihara (1999) foi obtida para solos granulares com granulometria variando de areias siltosas a pedregulhos.

Tabela 1 – Valores dos coeficientes a e b sugeridos na literatura para Equação 1

a	b	Referências
0,24	17	Meyerhof (1957)
0,23	16	Gibbs e Holtz (1957)
0,28	27	Skempton (1986) (*)
0,26	46	Skempton (1986) (**)

Nota: (*) areias normalmente adensadas com D_{50} (mm) entre 0,28 e 0,30 (caso 1); (**) areias normalmente adensadas com D_{50} (mm) entre 0,45 e 0,46 (caso 2).

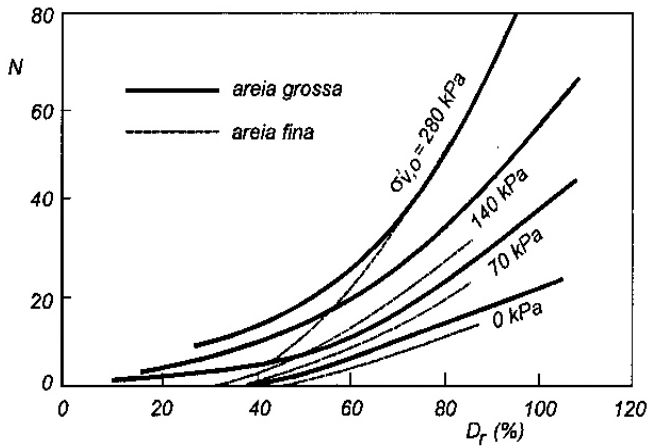


Figura 1: Compacidade relativa de areias em função do N_{SPT} (Gibbs e Holtz 1957).

A norma brasileira NBR-6484 (ABNT, 2001) sugere uma classificação qualitativa do solo relacionando diretamente o valor de N_{SPT} aos estados de compacidade dos solos não coesivos (Tabela 2). Na Tabela 2 apresenta-se também os resultados sugeridos por Mitchell (1981) para relacionar N_{SPT} aos estados de compacidade dos solos não coesivos. As diferenças entre os valores de N_{SPT} e os correspondentes estados de compacidade dos solos observadas na Tabelas 2 são principalmente devidas as diferenças no valor da energia do ensaio SPT adotado como referência internacional (60% da energia teórica de queda livre) e os valores médios de energia sugeridos para o SPT brasileiro (entre 72% e 82,3% da energia teórica).

3 ESTUDO DE CASO

3.1 Perfil típico da Grande Vitória, ES

Segundo Castello e Polido (1986, 1988) a região de Vitória, ES, é dividida em “domínios” geotécnicos, cujas características principais são apresentadas através de perfis geotécnicos típicos de diversos bairros, baseados em investigações com ensaios de campo (SPT e CPT) e ensaios de laboratório. Destaca-se na geologia local o fato de que os sedimentos marinhos de baixada comumente constituem sopé de morros, com ocorrência de camadas de argilas vermelhas ou variegadas, tipicamente coluviais, entremeadas nas camadas de solos sedimentares, assim como matações e blocos de rochas e também transições abruptas de argila mole para rocha sã que apresentam mergulhos com grandes declividades ($> 45^\circ$), como exemplificado na Figura 2.

Tabela 2 – Estados de compacidade de solos não coesivos (NBR6484-ABNT, 2001 e Mitchell, 1981)

N_{SPT} (*)	N_{SPT}	Designação
Mitchell (1981)	(ABNT)	
< 4	≤ 4	Muito fofa (o)
4-10	5 a 8	Fofa (o)
-----		Pouco compacta (o)
10-30	9 a 18	Medianamente compacta (o)
30-50	19 a 40	Compacta (o)
>50	> 40	Muito compacta (o)

(*) Na tensão efetiva vertical de 100 kPa

3.2 Apresentação e análise dos resultados

O valor da energia do ensaio SPT adotado como referência internacional é de 60% da energia teórica de queda livre (ISSMFE, 1989) enquanto que os valores médios de energia sugeridos para o SPT brasileiro variam entre 72% e 82,3% da energia teórica (Décourd 1989; Cavalcante 2002). Nesse trabalho foi adotado para a energia teórica o valor de 75% e, portanto, os valores de N_{SPT} de campo serão majorados em 25%, obtendo-se assim o valor do

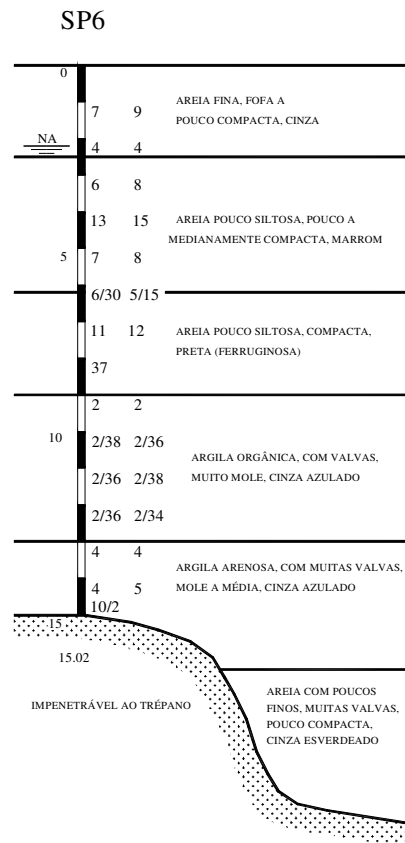


Figura 2 - Perfil geotécnico típico de Vitória, ES (Castello e Polido, 1986)

número de golpes corrigido para energia de 60%, $N_{SPT,60}$ através da relação:

$$N_{SPT,60} = N_{SPT,75} \frac{75}{60}$$

$$N_{SPT,60} = N_{SPT,75} \times 1,25 \quad (4)$$

A Figura 3 apresenta a variação dos valores estimados para a compacidade relativa do terreno natural (areia fina) com a profundidade segundo as correlações propostas por Gibbs e Holtz (1957), Meyerhoff (1957) e Skempton (1986) (areias normamente adensadas com D_{50} (mm) entre 0,28 e 0,30 (caso 1) e 0,45 e 0,46 (caso2)). Nas equações foram utilizados os valores de $N_{SPT,60}$ nas respectivas profundidades. Verifica-se uma grande variação das previsões de acordo com cada método, com diferenças entre os valores de C_r previstos em até 45%. Segundo as correlações propostas por Skempton (1986), uma variação de aproximadamente 0,15 mm no D_{50} (caso 1 e caso2) implicou em uma variação de cerca de 10% no valor de C_r . Houve maior concordância entre os métodos de Gibbs e Holtz (1957) e Meyerhoff (1957). Para profundidades maiores que 7m e correspondentes tensões efetivas maiores que 80 kPa a correlação proposta por Gibbs e Holtz (1957) apresentou maiores valores de C_r .

A correlação entre N_{SPT} e C_r proposta por Skempton (1986) para areias normamente adensadas com D_{50} (mm) entre 0,45 e 0,46 (caso2) forneceu os menores valores de C_r . A Figura 4 mostra a influência do valor de D_{50} nas equações propostas por Skempton (1986) (casos 1 e 2) e Cubrinovski e Ishihara (1999) para areias finas e areias médias. O aumento do valor de D_{50} reduziu o valor C_r .

A Figura 5 apresenta a variação dos valores estimados para a compacidade relativa do terreno natural arenoso com a profundidade segundo as correlações propostas por Gibbs e Holtz (1957), Skempton (1986), Yoshida et al. (1988) e Cubrinovski e Ishihara (1999) para o SP6 do perfil apresentado na Figura 2. Verifica-se uma grande variação das previsões de acordo com cada método, com diferenças entre os valores de C_r previstos em até 45%. Houve maior concordância entre os métodos de Skempton (1986) e Yoshida et al. (1988). A correlação entre N_{SPT} e C_r proposta por Yoshida et al. (1988) forneceu os menores valores e a proposta de Cubrinovski e Ishihara (1999) forneceu os maiores valores, inclusive com $C_r > 100\%$ que implica em uma inconsistência na definição de C_r (valores de índice de vazios inferiores ao valor mínimo correspondente ao estado mais compacto). Para profundidades maiores que 7m e correspondentes tensões efetivas maiores que 80 kPa a correlação proposta por Gibbs e Holtz (1957) apresentou valores de C_r maiores que os valores sugeridos por Cubrinovski e Ishihara (1999)

para a mesma profundidade. A norma brasileira NBR-6484 (ABNT, 2001) sugere a classificação qualitativa do terreno arenoso de pouco compacto a medianamente compacto (Tabela 2), ou seja valores de $C_r < 65\%$, e portanto inferiores aos valores obtidos com as correlações propostas por Gibbs e Holtz (1957) e Cubrinovski e Ishihara (1999).

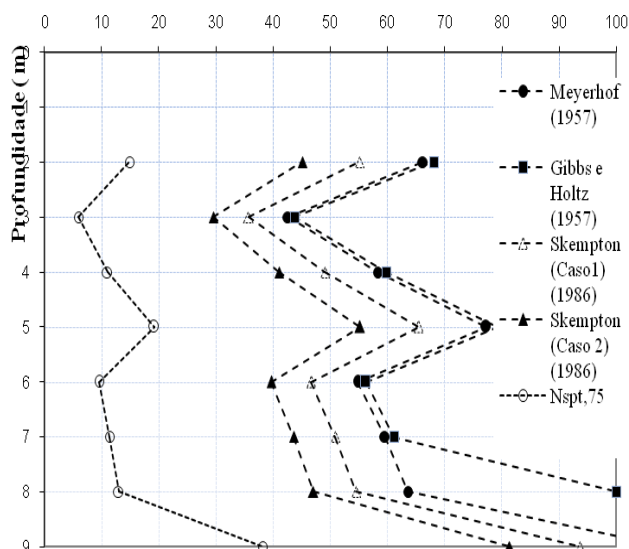


Figura 3: Estimativa da compacidade relativa geral do terreno natural (SP6) – Equação 1

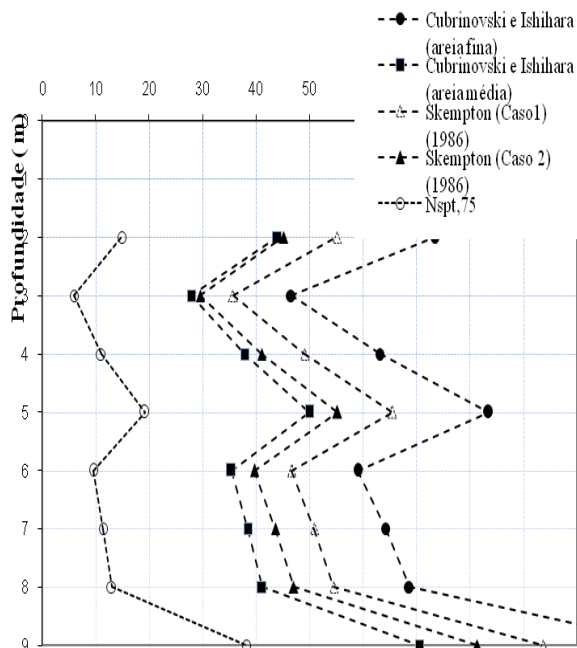


Figura 4: Estimativa da compacidade relativa geral do terreno natural (SP6) – areias médias e finas

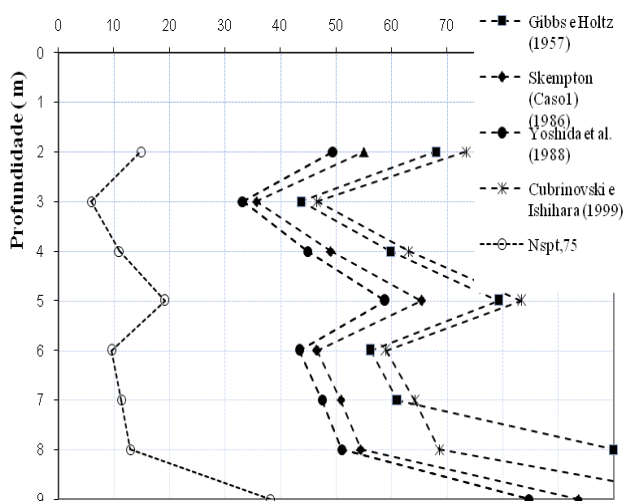


Figura 5: Estimativa da compactação relativa geral do terreno natural (SP6)

4 CONCLUSÕES

As correlações empíricas relacionadas ao N_{SPT} propostas por Gibbs e Holtz (1957), Meyerhoff (1957), Skempton (1986), Yoshida et al. (1988) e Cubrinovski e Ishihara (1999) foram utilizadas para estimativa da C_r de um terreno arenoso localizado na Grande Vitória, ES. As correlações propostas por Skempton (1986) (areias normamente adensadas com D_{50} (mm) entre 0,45 e 0,46 - caso2) e Yoshida et al. (1988) apresentaram resultados mais conservadores (menores valores de C_r) para os dados analisados. As correlações analisadas apresentaram grande dispersão nos resultados de C_r observando-se resultados muito diferentes para um mesmo N_{SPT} e mesma profundidade. Essas correlações empíricas devem ser utilizadas com critério, levando-se em conta os fatores intervenientes no SPT, experiência local e limitações dos resultados à região estudada.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 6484**: Execução de sondagens de simples reconhecimento dos solos (SPT): método de ensaio. Rio de Janeiro, 2001.
- Castello, R. R.; Polido, U. F. Algumas características de adensamento das argilas marinhas de Vitória-ES. In: VIII COBRAMSEF – 8º Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, Porto Alegre, RS. **Anais...**, 1986.
- Castello, R. R.; Polido, U. F. Tentativa de sistematização geotécnica dos solos quaternários de Vitória, ES. In: Depósitos quaternários das

baixadas litorâneas brasileiras: origem, características geotécnicas e experiências de obras. Rio de Janeiro, RJ: ABMS. **Anais...**, v. 2, p. 3.1-3.23, 1988.

- Cavalcante, E. H. **Investigação teórico-experimental sobre o SPT**. Tese de Doutorado, Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, 2002.
- Cubrinovski, M.; Ishihara, K. Empirical correlation between SPT N-values and relative density for sandy soils. **Soils and Foundations**, v. 39, n. 5, p. 61-92, 1999.
- Cubrinovski, M.; Ishihara, K. Maximum and minimum void ratio characteristics of sands. **Soils and Foundations**, v. 42, n. 6, p. 65-78, 2002.
- Gibbs, H. J.; Holtz, W. G. Research on determining the density of sands by spoon penetration testing. In: IV INTERNATIONAL Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Londres, **Proceedings...** v. 1, p. 35-39, 1957.
- Ko, H.; Davidson, L. W. Bearing Capacity of footing in plane strain. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE**, v. 99, n. SM1, p. 1-23, 1973.
- Lade, P. V.; Liggio, C. D.; Yamamuro, J. A. Effects of non-plastic fines on minimum and maximum void ratios of sand. **Geotechnical Testing Journal, ASTM**, v. 21, n. 4, p. 336-347, 1988.
- Liao, S.; Whitman, R. V. Overburden correction factor for SPT in sand. **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE**, v. 112, n. 3, p. 373-377, 1986.
- Mitchell, J. K. Soil Improvement: state-of-the-art report. In: X International Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering. Stockholm. **Proceedings...**, v. 4, p. 509-565, 1981.
- Skempton, A. W. Standard penetration test procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, ageing and overconsolidation. **Géotechnique**, v. 36, n. 3, p. 425-447, 1986.