

Relação entre os Valores Obtidos com o Ensaio do Dynamic Cone Penetrometer (DCP) e a Densidade Relativa de uma Areia

Cintia Martins de Oliveira

Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul, Brasil, cintia_m.deoliveira@hotmail.com

Mariana da Silva Carretta

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, marianacarretta@gmail.com

Débora Aline Grasel

Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul, Brasil, debora.grasel@outlook.com

João Rodrigo Guerreiro Mattos

Centro Universitário Univates, Lajeado, Brasil, joao.mattos@univates.br

RESUMO: O ensaio com o *Dynamic Cone Penetrometer* (DCP) consiste na verificação da capacidade à penetração de um determinado solo. Essa penetração ocorre através de golpes, que são realizados a partir de um martelo que é solto de uma altura. Assim, a ponta cônica do equipamento penetra no solo. A vantagem deste equipamento é que o solo pode ser testado em diversos estados, como, por exemplo, do estado mais fofo ao mais compacto. Dessa forma, o objetivo principal deste trabalho é relacionar a capacidade à penetração utilizando o DCP com a densidade relativa do solo. Visando atingir tal objetivo, foi estudado um solo do município de Osório/RS, classificado pelo sistema da AASHTO como sendo do tipo A-3. Para que fosse possível realizar a comparação entre os valores obtidos com o DCP e a densidade relativa, foi necessário realizar os ensaios de caracterização, determinar os índices de vazios mínimo e máximo e medir o *Dynamic Penetrometer Index* (DPI) para diferentes compacidades do solo. Através dos estudos realizados em laboratório, obtiveram-se alguns parâmetros para analisar, tais como: o teor de umidade, o peso específico aparente seco, o índice de vazios e a densidade relativa. Diante de inúmeras análises realizadas, destaca-se que o DPI pode ser associado com parâmetros diretos e indiretos de resistência do solo. No caso deste trabalho, utilizaram-se os valores do DPI, que variaram entre 8,41 mm/golpe e 31,93 mm/golpe, para correlacionar com as densidades relativas do solo arenoso, que atingiu valores entre 0,67 e 1,00. Ao analisar os resultados obtidos, verificou-se que a densidade relativa encontrada a partir dos ensaios laboratoriais influenciou diretamente nos valores do DPI, resultando num alto coeficiente de determinação (R^2). Portanto, concluiu-se que os resultados da comparação dos valores do DPI com a densidade relativa foram satisfatórios.

PALAVRAS-CHAVE: Dynamic Cone Penetrometer, Densidade Relativa, Areia.

1 INTRODUÇÃO

O *Dynamic Cone Penetrometer* (DCP) surgiu na Austrália em 1959. Em virtude do fácil manuseio e do baixo custo, esse equipamento vem sendo bastante utilizado nas áreas de pavimentação e tem potencial para ser usado

também em fundações superficiais, uma vez que verifica a resistência à penetração do solo. Os valores encontrados com o DCP podem ser relacionados com a resistência das camadas do solo e também com a compacidade em que o mesmo se encontra. As principais vantagens do DCP são a obtenção de resultados praticamente

imediatos e a possibilidade de realizar os ensaios em pontos de difícil acesso para equipamentos maiores (DE BEER, 1991).

Sabendo que a densidade relativa influencia na resistência à penetração do solo, a presente pesquisa tem como objetivo geral comparar os resultados encontrados pelo equipamento DCP com a densidade relativa de um solo arenoso. Dessa forma, para atingir o objetivo proposto, definiram-se os seguintes objetivos específicos: realizar a caracterização do solo em laboratório; determinar o índice de vazios máximo e mínimo; e realizar o ensaio DCP para diferentes estados de compactação do solo.

2 UTILIZAÇÃO DO DCP

Quando existem limitações para os ensaios penetrométricos, Costa *et al.* (2010) recomenda utilizar um equipamento de fácil manejo e transporte, tal como o DCP, também conhecido por penetrômetro sul-africano. Portanto, o DCP surge como excelente ferramenta para analisar a capacidade de carga do solo. A Figura 1 apresenta os detalhes do equipamento DCP.

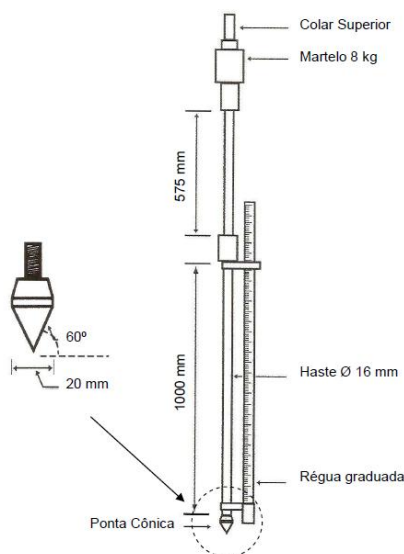


Figura 1. Equipamento DCP (Fonte: Benevides, 2012).

O DCP é um equipamento que possui um martelo, que é solto pelo operador em queda livre e é conduzido por uma haste metálica que transfere para outra haste que possui uma ponta cônica que ao receber a energia aplicada penetra no solo. Ao lado desse conjunto há uma régua,

também metálica, que permite verificar a leitura de penetração do equipamento no solo. Este equipamento deve atender às exigências da ASTM D-6951:2009.

A partir do ensaio DCP, obtém-se o *Dynamic Penetrometer Index* (DPI), que consiste na penetração dinâmica da ponta cônica no solo quando aplicado os golpes do martelo. Portanto, o DPI, expresso em mm/golpe, é obtido a partir da penetração e do número de golpes aplicado em cada ensaio (WU e SANGARD, 2007).

Desde que se iniciaram os estudos com o DCP, despertou o interesse de correlacionar o DPI com outros parâmetros. Após estudos realizados, verificou-se que é possível correlacionar o DPI com o *California Bearing Ratio* (CBR), com a resistência à compressão simples (RCS), com a resistência à penetração do SPT (N_{SPT}) e com o peso específico aparente seco (γ_d) do solo (COSTA *et al.*, 2010).

Através de estudos realizados por Benevides (2012), constatou-se que a densidade relativa (DR) influencia na capacidade penetrométrica do solo e, portanto, pode-se relacionar o DPI com a DR. A relação é inversamente proporcional, ou seja, quanto maior a DR do solo, menor será o DPI.

A DR representa quão compacto está um solo arenoso, sendo que ela é obtida em função do índice de vazios do solo *in situ*, do índice de vazios do solo no seu estado mais fofo e do mais compacto (PINTO, 2006).

A resistência de um solo arenoso, para fins de pavimentação, pode ser obtida a partir do CBR, já para engenharia de fundações pode ser obtida pelo ângulo de atrito interno do solo (ϕ'). Ambos os parâmetros são correlacionáveis com a compactação do solo. Segundo Schnaid (2000), correlacionar a densidade relativa com parâmetros de resistência é uma prática bastante usual na engenharia.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Origem e formação da areia de Osório

O solo do município de Osório/RS formou-se a partir do Sistema Depositional Laguna Barreira III, sendo que esse atinge desde Torres/RS até o

Chuí/RS, possuindo fácies arenosas praial e marinho raso. O solo de Osório/RS é classificado como Neossolo Quartzarênico Órtico Típico, já que possui o teor de argila inferior a 15% e apresenta grãos soltos de quartzo. Portanto, este solo é considerado bem drenado (STRECK *et al.*, 2008).

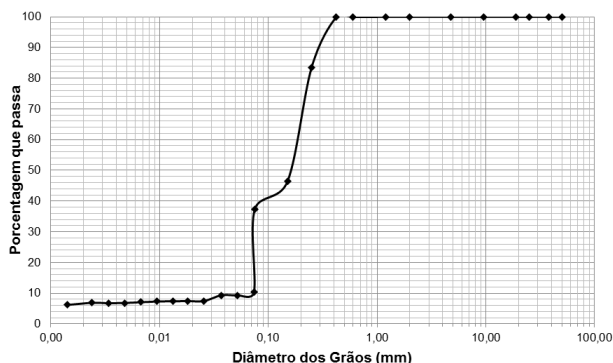
A areia de Osório/RS possui granulometria fina e uniforme. Além disso, não possui impurezas e matéria orgânica em sua composição. Os grãos são angulares e apresentam rugosidade relativamente moderada (ROSA, 2009).

3.2 Coleta e preparação da amostra

A amostra de solo utilizada nesta pesquisa foi armazenada em sacos plásticos vedados para que não ocorresse o contato com algum agente que pudesse contaminá-la. A preparação das amostras para os ensaios seguiu às especificações da NBR 6457:1986.

3.3 Ensaios de caracterização da amostra

Através do peneiramento (fino e grosso) e do ensaio de sedimentação, foi possível desenhar a curva granulométrica da amostra de solo estudada. Na Figura 2, observa-se que a granulometria da amostra não apresenta nenhuma fração de pedregulho, pouca presença de silte e argila e o material predominante é areia. Os coeficientes de curvatura e uniformidade são: $C_c = 0,74$ e $C_u = 5,43$, respectivamente. Portanto, trata-se de uma areia mal graduada.



3.5 Moldagem dos corpos-de-prova

Os corpos de prova (CP's) foram moldados com a utilização de 3 moldes do ensaio de CBR acoplados e com uma cinta lateral na junção para evitar a perda de material e umidade. Visando ter uma ampla gama de densidades, as moldagens foram feitas com diferentes umidades e variando o número de golpes aplicado em cada camada. Dessa forma, definiu-se que as umidades seriam de 3, 6, 9 e 12% e o número de golpes por camada compactada seriam de 5, 10, 20, 30 e 40. Portanto, realizou-se a combinação de todas essas umidades e golpes, totalizando, assim, 20 CP's moldados. Ao término da compactação, rasava-se o excesso de solo com régua biselada e pesava-se o molde com material úmido dentro. Conhecido o volume dos moldes, então era possível determinar o peso específico natural (γ) e também realizou-se a medição do teor de umidade (w) do solo, possibilitando, então, o cálculo do peso específico aparente seco (γ_d) para cada CP moldado. A umidade do CP foi determinada através da média de três amostras colocadas na estufa para secagem. Salienta-se que os CP's moldados com 12% de umidade acabaram ficando, na verdade, com aproximadamente 10%, pois a água excedente acabava exsudando entre o cilindro e a base do molde.

3.6 Determinação da densidade relativa

A densidade relativa (DR) foi definida a partir da comparação do índice de vazios natural (e) da areia com o seu índice de vazios mínimo ($e_{\min}$) e máximo ($e_{\max}$). Portanto, a DR é obtida através da Equação 1.

$$DR = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (1)$$

Inicialmente, verificou-se o índice de vazios mínimo e máximo, conforme a NBR 12051:1991 e NBR 12004:1990, respectivamente. Para essa análise, obteve-se $e_{\min} = 0,565$ e $e_{\max} = 0,810$. Entretanto, como a norma destaca que o procedimento indicado não

garante que sejam atingidos os valores mínimos e máximos do índice de vazios, foram calculados também os índices de vazios com os resultados dos ensaios de Proctor para averiguar se era possível obter-se um valor diferente. A partir dessa análise, verificou-se que $e_{\min} = 0,491$ para a areia estudada. Portanto, para fins de determinação da DR, empregaram-se como referências o $e_{\min} = 0,491$ e o $e_{\max} = 0,810$.

3.7 Ensaio DCP

O ensaio DCP foi realizado conforme a ASTM D-6951:2009. Inicialmente, confeccionou-se o molde a partir de 3 cilindros de CBR acoplados, e no fundo se utilizou um suporte de madeira MDF, para que quando a ponta cônica batesse no fundo do molde, não danificasse a mesma. Na Figura 4, pode-se observar como foi feita a realização do ensaio com o DCP.



Figura 4. Realização do ensaio com o DCP.

A base do DCP era posicionada na extremidade do molde, sendo que a ponta cônica ficava no centro do molde. Depois de posicionado o equipamento, iniciavam-se os golpes com o martelo e assim a ponta cônica penetrava no solo. A cada golpe aplicado anotava-se o valor da penetração no solo, a partir da leitura na régua. Quando a ponta batia no fundo do molde se encerrava o ensaio. Assim, era retirado o equipamento de dentro do

solo e eram coletadas as amostras de solo úmido, para que em seguida fossem transferidas para a estufa. Assim, verificavam-se as umidades para cada ensaio realizado.

A partir da primeira leitura realizada na régua (L_1), da penúltima leitura realizada na régua (L_n) e do número de golpes (n), calculou-se o DPI (em mm/golpe) para cada ensaio realizado, conforme Equação 2.

$$DPI = \frac{L_n - L_1}{n - 1} \quad (2)$$

Com os resultados do DPI, plotou-se o mesmo em função da umidade, do índice de vazios, do peso específico aparente seco e da densidade relativa para avaliar as relações entre cada um desses parâmetros.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Realizaram-se, no total, 20 ensaios empregando o DCP na areia com diferentes compacidades. As Figuras entre 5 e 8 apresentam os resultados obtidos com o DCP para as diferentes umidades de moldagem e número de golpes por camada.

Para cada umidade de moldagem, realizaram-se cinco ensaios, sendo que cada um deles obteve uma DR no CP, conforme apresentado na legenda das Figuras 5 até 8. No geral, observou-se que a medida que aumentou a compactidade do solo, foram necessários aplicar mais golpes para chegar até o fundo do molde. Assim, para essas análises, os resultados foram considerados válidos e satisfatórios.

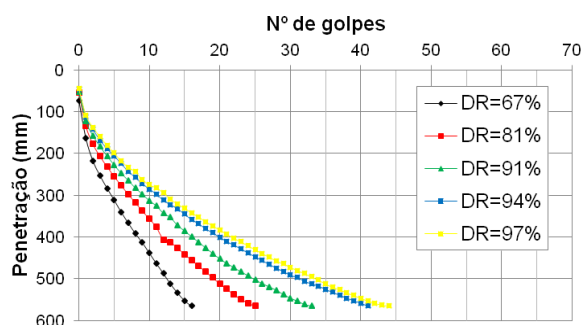


Figura 5. Resultados com a umidade de moldagem de 3%.

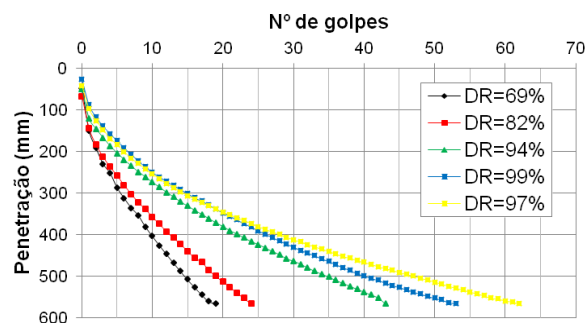


Figura 6. Resultados com a umidade de moldagem de 6%.

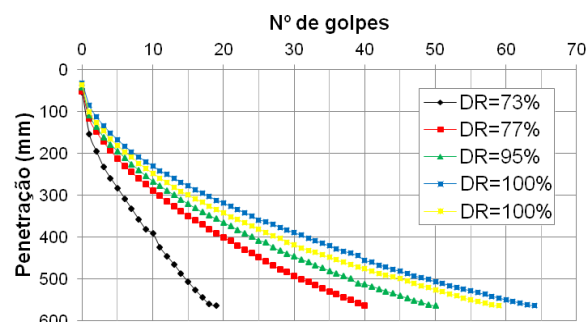


Figura 7. Resultados com a umidade de moldagem de 9%.

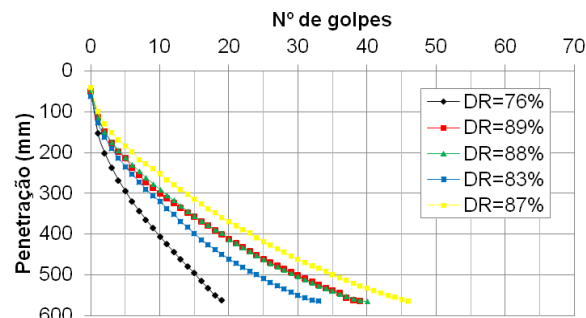


Figura 8. Resultados com a umidade de moldagem de 12%.

Chama-se atenção ao fato de que, para algumas umidades, ocorreu da compactidade do CP ter diminuído ao ser aplicado mais golpes por camada durante a sua moldagem. Por se tratar de uma material granular, que por sua natureza não apresenta um comportamento regular na compactação, entende-se que isso seja aceitável.

Ainda, verifica-se, pelas Figuras de 5 a 8, que para a umidade de moldagem de 12% a resistência à penetração do solo sofreu uma redução nos casos onde a DR também reduziu. Por fim, destaca-se que pelo procedimento de compactação empregado na moldagem dos CP's

não foi possível obter nenhum areia com densidade fofa.

4.1 Influência do teor de umidade no valor do DPI

De posse dos resultados obtidos, verificou-se como o teor de umidade influencia no valor da capacidade à penetração no solo, expresso em termos do DPI. Na Figura 9, apresenta-se os dados plotados do DPI em função da umidade para os 20 CP's ensaiados. Analisando o gráfico gerado, evidencia-se que os teores de umidade dos CP's ficaram próximos aos teores de moldagem, exceto os com teores mais elevados, que, como já mencionado, observou-se que a água percolava na junção da parede lateral do cilindro com a base do molde utilizado.

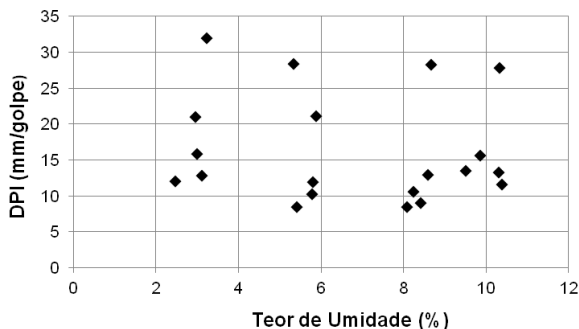


Figura 9. Valor do DPI em função do teor de umidade.

Pela Figura 9, observa-se que não é possível evidenciar uma tendência para a relação entre os valores do DPI obtidos e os teores de umidades respectivos. Portanto, verificou-se que a umidade não é uma variável que possa ser estimada apenas com o valor do DPI.

Os resultados mostraram que foi possível obter quase o mesmo valor do DPI com umidades diferentes e, além disso, também com quase a mesma umidade se obteve valores do DPI diferentes. Dessa forma, entende-se que o ensaio de DCP, para os dados analisados, não é sensível ao teor de umidade do solo.

4.2 Influência do peso específico aparente seco no valor do DPI

Conhecidos o volume e o peso do cilindro utilizado para moldar os CP's, bem como o teor

de umidade de cada CP, foi possível determinar o γ_d do solo em cada ensaio realizado com o DCP. A Figura 10 exibe a relação do DPI em função do γ_d .

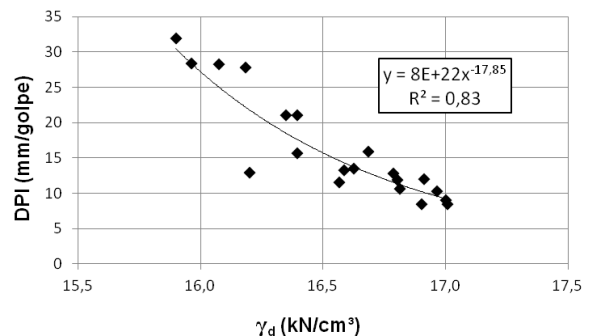


Figura 10. Valor do DPI em função do peso específico aparente seco.

Na Figura 10, fica evidente que os resultados do DPI apresentam uma boa relação com o γ_d , uma vez que apresentou um coeficiente de determinação (R^2) de 0,83. A relação estabelecida entre o DPI e o γ_d é inversamente proporcional, o que está de acordo com o esperado.

4.3 Influência do índice de vazios no valor do DPI

A partir dos resultados obtidos para cada ensaio de DCP, gerou-se a influência do índice de vazios (e) na capacidade penetrométrica do solo, dada pelo valor do DPI. A Figura 11 mostra a relação encontrada entre esses dois parâmetros.

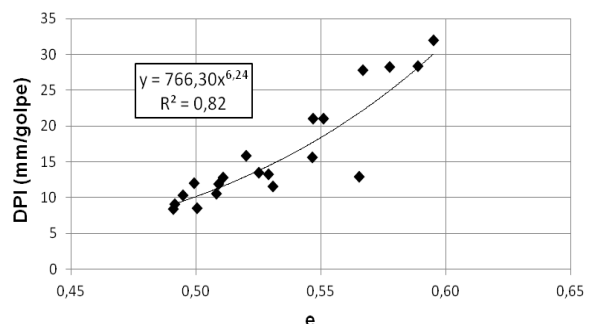


Figura 11. Valor do DPI em função do Índice de vazios.

A Figura 11 mostra que na maioria dos ensaios foram obtidos índices de vazios com

pouca variação, situados entre 0,49 e 0,60. A relação entre os dois parâmetros analisados mostrou que existe uma boa dependência entre eles ($R^2=0,82$) e que são diretamente proporcionais. Conforme esperado, para os maiores valores de índice de vazios encontraram-se maiores valores do DPI, ou seja, quanto maior o índice de vazios menor a capacidade penetrométrica do solo.

4.4 Influência da densidade relativa no valor do DPI

Visando entender o DPI em função da DR, plotou-se todos os resultados dos 20 experimentos realizados. Na Figura 12, apresenta-se a relação obtida entre a DR e o DPI.

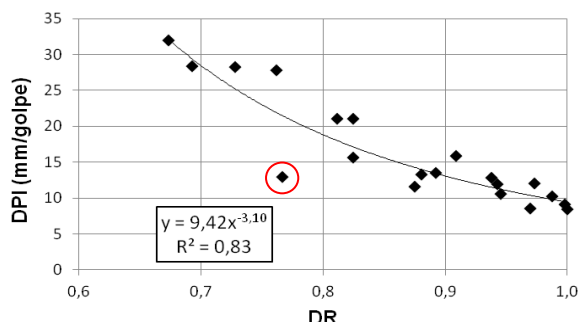


Figura 12. Valor do DPI em função da densidade relativa.

Embora o valor do R^2 tenha mostrado uma boa relação entre o DPI e a DR, verificou-se que um dos dados (circulado na Figura 12) está bem disperso em relação aos demais. Dessa forma, decidiu-se pela exclusão do mesmo para verificar se ocorre um aumento do R^2 .

Outros dados foram excluídos mas não resultaram em aumento do R^2 . Então, ao final da análise, constatou-se que realmente só um dos dados é disperso em relação aos demais, trata-se do CP com DR igual a 0,77 e que resultou num DPI de 12,97 mm/golpe.

Assim, plotou-se novamente os dados do DPI em função da DR com a exclusão do valor disperso. Na Figura 13, pode ser observado a relação encontrada entre o DPI e a DR para a areia do município de Osório/RS nas condições ensaiadas e com a exclusão dos valores dispersos encontrados no ensaio do DCP.

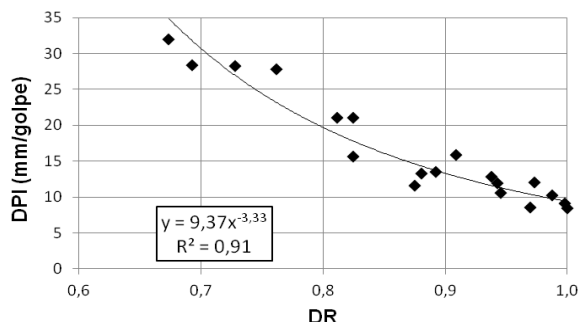


Figura 13. Valor do DPI em função de densidade relativa.

Analisando as Figuras 12 e 13, percebe-se que, realmente, o valor de DPI excluído estava muito disperso dos demais. Com o novo ajuste potencial o valor do R^2 subiu de 0,83 para 0,91, portanto, o novo modelo matemático explica melhor a natureza dos dados analisados.

Após a análise de regressão, verificou-se que a relação entre os valores obtidos com o ensaio do DCP e a DR da areia de Osório/RS é dada pela Equação 3.

$$DPI = 9,37 \cdot DR^{-3,33} \quad (3)$$

Salienta-se que, na Equação 3, o DPI é o *Dynamic Penetrometer Index* (em mm/golpe) e a DR é a densidade relativa (em decimal). Devido a simplicidade do modelo proposto, imagina-se que o mesmo possa ser extrapolado para estimativa de outros parâmetros da areia, tais como o *California Bearing Ratio* (CBR) e o ângulo de atrito interno (ϕ), por exemplo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com os resultados e análises apresentadas neste trabalho, apresenta-se de maneira resumida as principais conclusões da pesquisa:

Com relação ao ensaio do DCP, verificou-se que é um ensaio relativamente fácil, ágil e prático. E, a partir desse, é possível analisar de maneira simples a capacidade penetrométrica do solo através do DPI.

Em geral, os ensaios mostraram que conforme aumenta a densidade relativa do solo, o valor do número de golpes para penetração da ponta cônica do DCP também aumenta. Isso demonstra que o ensaio do DCP é confiável.

Constatou-se que o DPI tem boa relação com os seguintes parâmetros: peso específico aparente seco, índice de vazios e densidade relativa. Entretanto, aparentemente, o DPI não é influenciado pelo teor de umidade.

Embora o procedimento de moldagem dos CP's não tenha permitido que a areia ficasse em compacidade considerada fofa, foi possível verificar que a densidade relativa exerce grande influência no DPI.

O modelo de regressão proposto neste trabalho para relacionar o DPI com a compacidade da areia de Osório/RS foi considerado satisfatório (com elevado coeficiente de determinação). Além disso, devido ao êxito dos resultados e a simplicidade do modelo proposto, acredita-se que o mesmo possa ser extrapolado para ser correlacionado com o CBR para fins de pavimentação e, além disso, correlacionado com o ângulo de atrito interno para estimativa da capacidade de suporte de fundações superficiais em areias.

REFERÊNCIAS

- American Society for Testing and Materials (2009). *ASTM D-6951: Standard Test Method for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in shallow pavement Applications*, 7 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1986). *NBR 6457: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*. Rio de Janeiro, 9 p.
- _____. (1990). *NBR 12004: Solo – Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos*. Rio de Janeiro, 6 p.
- _____. (1991). *NBR 12051: Solo – Determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos*. Rio de Janeiro, 14 p.
- Benevides, L.D. (2012). *Avaliação do uso do DCP em areias para controle da capacidade de carga em fundações diretas e controle de compactação de aterros*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 98 p.
- Costa, Y.D.J.; Oliveira Neto, J.A. e Santos Júnior, O.F. (2010). Influência da energia de compactação em resultados de ensaios com o Cone de Penetração Dinâmica (DCP). *Anais do XV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, Gramado, 5 p.
- De Beer, M. (1991). Use of the dynamic cone penetrometer in the design of road structures, *Geotechniques in the African environment*, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, p. 167-183.
- Pinto, C.S. (2006). *Curso básico de mecânica dos solos*, 3. ed. Oficina de Textos, São Paulo, 354 p.
- Rosa, F.D. (2009). *Efeito do estado de tensões de cura no comportamento de uma areia artificialmente cimentada*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 191 p.
- Schnaid, F. (2000). *Ensaio de campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações*, Oficina de Textos, São Paulo, 189 p.
- Streck, E.V. et al. (2008). *Solos do Rio Grande do Sul*, EMATER/RS, UFRGS, Porto Alegre, 222 p.
- Wu, S. e Sangard, S. (2007). *Use of dynamic cone penetrometer in subgrade and base acceptance*, FHWA/ODOT, Research Development, Ohio University, 120 p.