

# Estudo do Comportamento Mecânico do Material de Depósito Eólico em Fortaleza Considerando Resultados de Ensaios de Laboratório e de Campo

Laura Terezinha da Silva Maia

Instituto Brasileiro de Educação Continuada, Fortaleza, Brasil, lauratsmaia@hotmail.com

Marcos Fábio Porto de Aguiar

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

Giullia Carolina de Melo Mendes

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza, Brasil, giucmendes@gmail.com

Francisco Heber Lacerda de Oliveira

Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, heber@det.ufc.br

**RESUMO:** O presente trabalho tem por objetivo analisar o comportamento mecânico de solo arenoso de depósito eólico localizado no bairro de Lourdes, em Fortaleza-CE, por meio de ensaios de caracterização, compactação, Índice de Suporte Califórnia (ISC), ensaios à percussão tipo SPT e penetrômetro dinâmico de cone (DPL). A partir dos dados de ensaio de laboratório e campo, pôde-se analisar as correlações entre ISC e  $N_{SPT}$  pelos métodos de Livneh e Ishai (1987) e Livneh e Ishai (1988). Já para as correlações entre  $N_{SPT}$  e  $N_{10}$ , analisou-se os métodos de DIN (2003), Sanchez et al. (2010) e Matos (2015). Pôde-se constatar que, dentre os métodos de correlação de ISC e  $N_{SPT}$ , o que mais se aproximou do resultado de ensaio foi Livneh e Ishai (1988), já para as correlações de  $N_{SPT}$  e  $N_{10}$ , o que mais se aproximou foi o método de Matos (2015). O trabalho mostra-se útil como referência de projeto e acompanhamento de obras em locais que comprovem materiais semelhantes, principalmente devido a correlações possíveis entre os parâmetros estudados.

**PALAVRAS-CHAVE:** Depósitos Eólicos, Caracterização de Solo, Índice de Suporte Califórnia (ISC), Penetrômetro Dinâmico de Cone (DPL), *Standard Penetration Test* (SPT).

## 1 INTRODUÇÃO

Devido a crescente demanda na construção civil, e a realização de obras em regiões litorâneas, têm-se a necessidade de conhecer o comportamento mecânico de solos arenosos, comumente presente nesses locais, com o objetivo de facilitar a interpretação de resultados de ensaios geotécnicos para utilização nos diversos projetos de engenharia.

Nesse contexto, o presente artigo tem por objetivo analisar o comportamento mecânico de solos arenosos presentes em um depósito eólico do bairro De Lourdes, na cidade de Fortaleza-CE. Para tal, foram realizados ensaios de caracterização do solo, índice de suporte Califórnia (ISC), sondagem SPT e ensaio penetrômetro dinâmico leve (DPL).

## 2 ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA

O *California Bearing Ratio* (CBR) ou Índice de Suporte Califórnia (ISC) foi criado pelo Departamento de Estradas de Rodagem da Califórnia, e consiste na determinação da relação entre a pressão necessária para produzir uma penetração de um pistão num corpo de prova de solo, e a pressão necessária para produzir a mesma penetração em uma mistura padrão de brita estabilizada granulometricamente, com o resultado expresso em porcentagem. Os procedimentos de ensaio seguem ABNT (2016), sendo divididos em três etapas: compactação do corpo de prova, obtenção da curva de expansão e a medida da resistência à penetração.

## 3 STANDARD PENETRATION TEST (SPT)

O ensaio à percussão ou *Standard Penetration Test* (SPT) é, segundo Cintra *et al.* (2013), o ensaio mais empregado em projetos de fundações do Brasil, e muitas vezes, o único a ser realizado. O referido ensaio segue ABNT (2001) e composto por três etapas: perfuração, amostragem e ensaio penetrométrico. Consiste na cravação de um amostrador padronizado, por meio de golpes de um martelo de 65 kgf, caindo de uma altura de 75 cm. À cada metro, são coletados a quantidade de golpes necessários para cravar os últimos 30 cm, denominado índice de resistência a penetração ( $N_{SPT}$  ou  $N_{30}$ ). São determinados, através desse ensaio, a posição do nível d'água, os tipos de solo por camada e os índices de resistência à penetração ( $N_{SPT}$ ), a cada metro.

## 4 PENETRÔMETRO DINÂMICO LEVE (DPL)

O ensaio Dynamic Probing Light (DPL), ou

Penetrômetro Dinâmico Leve, é definido por Passos (2005) como uma ensaio que é executado por um equipamento manual de pequeno porte, projetado para auxílio de sondagens *in situ* que é, essencialmente, utilizado em solos não coesivos.

Conforme especificado em DIN (1991), o ensaio DPL consiste em registrar a quantidade de golpes aplicados para cravar uma ponteira em forma de cone por meio da queda livre de um martelo com massa de 10 kgf caindo de uma altura de 50 cm. As informações obtidas por esse ensaio são: o nível d'água e o índice de resistência à penetração ( $N_{10}$ ) que é definido como o número de golpes necessário para penetrar o cone a cada 10 cm. Conforme explicado por Nilsson (2004), com a retirada das hastes, é possível identificar, com clareza, a posição do nível d'água, uma vez que não é utilizado água durante a realização do ensaio.

## 5 CORRELAÇÕES ENTRE PARÂMETROS DO ENSAIO ISC E SONDAÇÃO SPT

Com o intuito de correlacionar resultados de ISC e SPT os autores Livneh e Ishai (1987) e (1988) propuseram expressões tais como apresentadas a seguir.

### 5.1 Livneh e Ishai (1987)

Os autores Livneh e Ishai (1987) propuseram uma correlação entre os valores de ISC e  $N_{SPT}$  para subleitos em zonas áridas, apresentada na Equação 1.

$$\log ISC = -4,16 + 5,65 \cdot (\log SPT)^{-0,25} \quad (1)$$

Onde SPT é a relação entre profundidade de penetração, em milímetros (300 mm) e o número de golpes necessários à penetração ( $N_{SPT}$ ). Logo, a correlação é dada pela Equação 2.

$$\log ISC = -4,16 + 5,65 \cdot \left[ \log \left( \frac{300}{N_{SPT}} \right) \right]^{-0,25} \quad (2)$$

### 5.2 Livneh e Ishai (1988)

Os mesmos autores, com um maior número de dados, propuseram uma nova correlação entre ISC x SPT, apresentada na Equação 3.

$$\log ISC = -5,13 + 6,55 \cdot (\log SPT)^{-0,26} \quad (3)$$

Onde SPT é a relação entre profundidade de penetração, em milímetros (300 mm) e o número de golpes necessários à penetração ( $N_{SPT}$ ). Logo, a correlação é dada pela Equação 4.

$$\log ISC = -5,13 + 6,55 \cdot \left[ \log \left( \frac{300}{N_{SPT}} \right) \right]^{-0,26} \quad (4)$$

## 6 CORRELAÇÕES ENTRE PARÂMETROS DO DPL E SPT

Devido à grande quantidade de métodos difundidos no Brasil para dimensionamento de fundações que utilizam os resultados de SPT, alguns autores propuseram correlações entre os parâmetros do ensaio DPL e SPT, tais como DIN (2003), Sanchez *et al.* (2010) e Matos (2015).

### 6.1 DIN (2003)

A norma alemã DIN (2003) sugere algumas correlações, sendo apresentada, na Equação 5, para solos granulares acima do nível d'água com  $N_{10}$  variando de 3 a 50.

$$N_{SPT} = 1,4 \cdot N_{10} \quad (5)$$

Onde  $N_{10}$  é o índice de resistência à penetração do ensaio DPL.

### 6.2 Sanchez *et al.* (2010)

Os autores Sanchez *et al.* (2010) correlacionaram, para solos arenosos, três expressões com recomendações diferentes, apresentadas nas Equações 6, 7 e 8.

$$N_{SPT} = 0,5933 \cdot N_{10}' + 0,3755 \quad (6)$$

Em que  $N_{10}'$  é a média entre todos os valores de  $N_{10}$  obtidos, a cada metro.

$$N_{SPT} = 0,6062 \cdot N_{10}'' + 0,3644 \quad (7)$$

Onde  $N_{10}''$  é a média de três valores de  $N_{10}$ , com 20cm, 30cm e 40cm mais profundos a partir do nível de início da percussão, em cada metro inteiro, para serem obtidos valores nas mesmas profundidades consideradas pelo ensaio à percussão (SPT).

$$N_{SPT} = 0,1972 \cdot N_{10}''' + 1,6854 \quad (8)$$

Sendo  $N_{10}'''$  a soma dos valores de  $N_{10}$  obtidos na penetração dos últimos 30 cm da haste, a cada metro.

### 6.3 Matos (2015)

O autor Matos (2015) propôs uma correlação, para solos siltosos, conforme Equação 9.

$$N_{SPT} = 0,6 \cdot N_{10}^* - 7,6 \quad (9)$$

Em que  $N_{10}^*$ , é a média de três valores de  $N_{10}$ , com 20cm, 30cm e 40cm mais profundos em cada metro inteiro (exemplo: 1,20m, 1,30m e 1,40m; 2,20m, 2,30m e 2,40m e assim sucessivamente) para serem obtidos valores nas mesmas profundidades consideradas pelo

ensaio à percussão (SPT).

## 7 RESULTADOS

O presente estudo foi desenvolvido com solos de depósito eólico localizado no bairro de Lourdes, Fortaleza-CE, e consistiu na realização de ensaios de laboratório, nesse caso caracterização, compactação e Índice de Suporte Califórnia, e também ensaios de campo, como sondagens SPT e DPL. No terreno natural, foram realizados três furos de sondagem SPT e três sondagens DPL. Já no aterro, sobre o depósito eólico, foram realizados cinco furos de sondagem SPT e ensaios de compactação e Índice de Suporte Califórnia. A partir do ensaio de granulometria, realizado em cinco amostras do material do aterro, classificou-se como SP (areia mal graduada) pelo Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS). A curva granulométrica e as composições, em percentual, do material estudado são apresentadas na Figura 1 e na Tabela 1, respectivamente.

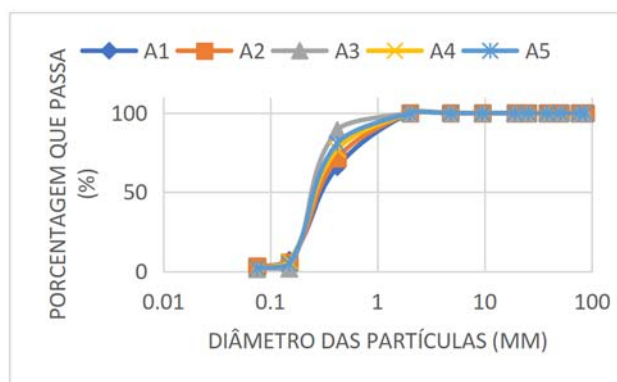


Figura 1. Curvas granulométricas das amostras de areia.

Tabela 1. Composição granulométrica do material.

Amostra	Pedregulho (%)	Areia Grossa (%)	Areia Média (%)	Areia Fina (%)	Silte e Argila (%)
A1	0	0	34,19	63,96	1,85
A2	0	0	28,7	68,16	3,15
A3	0	0	10,9	87,85	1,25
A4	0	0	23,18	75,34	1,48
A5	0	0	19,25	79	1,75

Além disso, foi realizado ensaio de compactação com as cinco amostras, na energia normal Proctor, seguindo as recomendações da ABNT (1986), cujo resultados são apresentados na Figura 2 e Tabela 2, respectivamente.

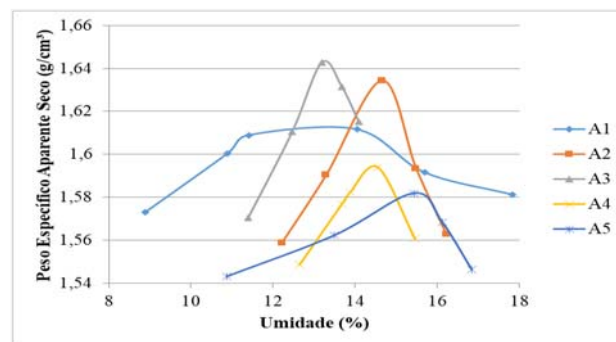


Figura 2. Curvas de compactação das amostras A1 a A5.

Tabela 2. Apresentação dos parâmetros do ensaio de compactação Proctor.

Amostra	Peso específico aparente seco (g/cm³)	Umidade ótima (%)
A1	1,61	13,3
A2	1,63	14,7
A3	1,64	13,3
A4	1,59	14,9
A5	1,58	15,5

Verifica-se, a partir dos resultados obtidos, que a umidade ótima dos solos, variou entre 13,3% e 15,5%, e que o peso específico aparente seco indicou uma variação de 1,58 a 1,64 g/cm³, apresentando assim, desvios padrão de 0,99 e 0,02, respectivamente. Observa-se ainda que o peso específico aparente seco médio para as amostras de areia é de 1,61 g/cm³ e a média da umidade ótima é de 14,34%.

Além disso, realizou-se também o ensaio de Índice de Suporte Califórnia, segundo as recomendações da ABNT (2016), obtendo assim, as capacidades de suporte e expansão das amostras, conforme Figura 3 e Tabela 3, respectivamente.

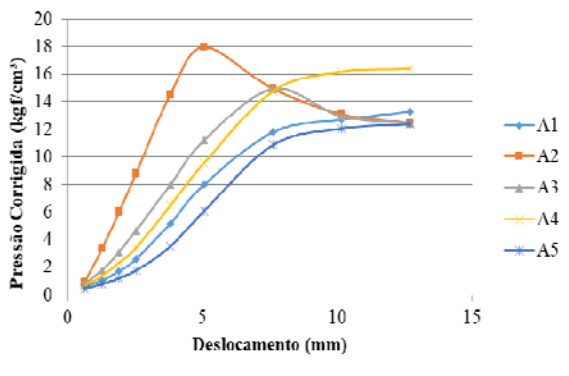


Figura 3. Curvas pressão corrigida x deslocamento para as amostras A1 a A5.

Tabela 3. Resultados do ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC).

Amostra	ISC (%)	Expansão (%)
A1	7,6	0
A2	17	0
A3	10,6	0
A4	9,1	0
A5	5,7	0

Na Tabela 4 são apresentadas as coordenadas geográficas das cinco sondagens SPT realizadas no aterro sobre depósito eólico.

Tabela 4. Coordenadas das sondagens SPT realizadas no aterro.

DATUM SIRGAS 2000		
Sondagem	Latitude (m)	Longitude (m)
SPT-01	9.585.783	559.746
SPT-02	9.585.786	559.737
SPT-03	9.585.789	559.729
SPT-04	9.585.769	559.732
SPT-05	9.585.766	559.741

De acordo com as sondagens SPT, constatou-se, no aterro, a presença de areia fina em camadas de 1,10m a 1,30m e areia fina e média pouco siltosa, até a profundidade de aproximadamente 16,00m. A Figura 4 apresenta a variação de índice de resistência à penetração dessas sondagens.

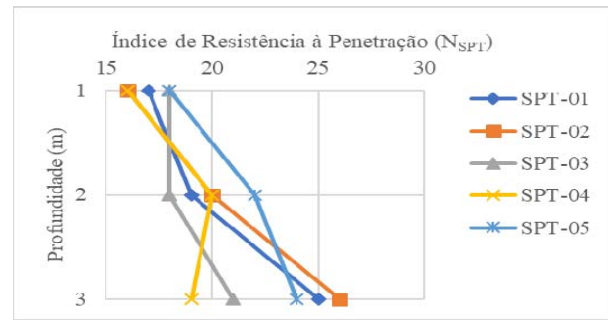


Figura 4. Variação dos  $N_{SPT}$  de acordo com a profundidade, para as sondagens SPT-01 a SPT-05.

Já para o terreno natural, são apresentadas, na Tabela 5, as coordenadas geográficas das sondagens SPT e DPL realizadas.

Tabela 5. Coordenadas dos pontos de sondagem SPT e DPL em terreno natural

DATUM SIRGAS 2000		
Sondagem	Latitude (m)	Longitude (m)
SPT-01	9.585.719	559.858
SPT-02	9.585.734	559.843
SPT-03	9.585.790	559.862
DPL-01	9.585.728	559.841
DPL-02	9.585.786	559.861
DPL-03	9.585.721	559.854

De acordo com as sondagens SPT realizadas, constatou-se, assim como nas sondagens de aterro, que o solo é constituído de areia fina e areia fina e média pouco siltosa, com variação de  $N_{SPT}$  de acordo com a Figura 5.

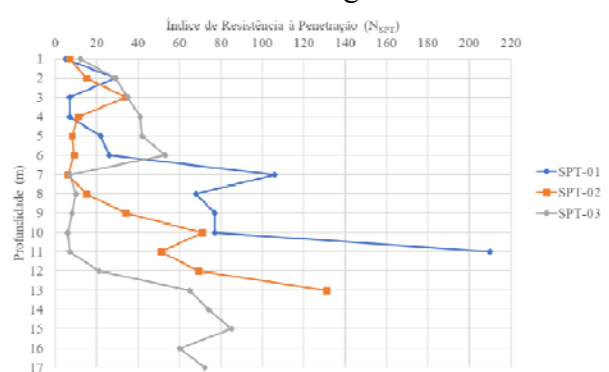


Figura 5. Variação de  $N_{SPT}$  para as sondagens executadas em terreno natural.

Já a variação de  $N_{10}$  apresentada pelas

sondagens DPL são apresentadas na Figura 6.

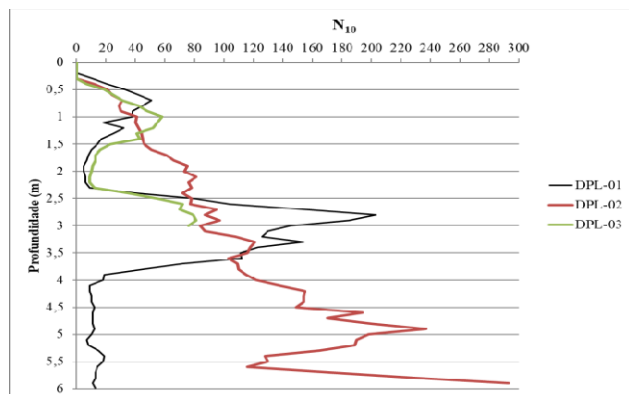


Figura 6. Variação de  $N_{10}$  de acordo com a profundidade, para as sondagens DPL-01 a DPL-03.

### 7.1 Análise dos Resultados

Com o objetivo de realizar as correlações propostas nesse trabalho, optou-se por realizar a média dos resultados de ISC. Quanto às sondagens SPT referentes ao aterro, optou-se por utilizar as médias de  $N_{SPT}$ , a cada profundidade. Os parâmetros utilizados são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Valores de ISC e  $N_{SPT}$  adotados nas análises do aterro.

Parâmetro	Resultado Adotado		
Profundidade	1 m	2 m	3 m
ISC (%)	10	10	10
$N_{SPT}$ (golpes)	17	20	23

Com isso, pôde-se obter os resultados de ISC pela correlações propostas, conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 7. Valores de ISC obtidos pelas correlações propostas.

Profundidade (m)	ISC (%)		
	Ensaio ISC	Livneh e Ishai (1987)	Livneh e Ishai (1988)
1	10	15	11
2	10	18	13
3	10	21	17

Percebeu-se que, a correlação pelo método de Livneh e Ishai (1988) aproximou-se mais da média de ISC obtido em laboratório. Acredita-se que, esse fato é devido ao método ter passado por um processo de ajuste, no qual resultou em correlações mais apuradas.

Quanto aos resultados de SPT e DPL do terreno natural, optou-se por realizar as correlações, a cada metro, do  $N_{SPT}$  com a média de  $N_{10}$  para os 20cm, 30cm e 40cm abaixo de cada metro inteiro, considerando a profundidade atingida pelo ensaio SPT. Nas Tabelas 8 a 10, são apresentadas as estimativas de  $N_{SPT}$  com os métodos DIN (2003), Sanchez *et al.* (2010), Matos (2015). No caso de Sanchez *et al.* (2010) optou-se estimar pela Equação 7, que considera os parâmetros de  $N_{10}$  de forma similar aos demais.

Tabela 8. Valores de  $N_{SPT}$  e  $N_{10}$  dos ensaios e  $N_{SPT}$  estimados pelos métodos propostos, para SPT-01 e DPL-03.

Profundidade (m)	$N_{10}$ médio (golpes)	$N_{SPT}$ (golpes)	$N_{SPT}$ estimado (golpes)		
			DIN (2003)	Sanchez et al. (2010)	Matos (2015)
1	45	5	63	27	19
2	18	29	25	11	3

Tabela 9. Valores de  $N_{SPT}$  e  $N_{10}$  dos ensaios e  $N_{SPT}$  estimados pelos métodos propostos, para SPT-02 e DPL-01.

Profundidade (m)	$N_{10}$ médio (golpes)	$N_{SPT}$ (golpes)	$N_{SPT}$ estimado (golpes)		
			DIN (2003)	Sanchez et al. (2010)	Matos (2015)
1	24	7	33	14	6
2	18	15	25	11	3
3	134	34	187	81	72
4	9	11	12	5	-3
5	14	8	19	8	0

Tabela 10. Valores de  $N_{SPT}$  e  $N_{10}$  dos ensaios e  $N_{SPT}$  estimados pelos métodos propostos, para SPT-03 e DPL-02.

Profundidade (m)	$N_{10}$ médio (golpes)	$N_{SPT}$ (golpes)	$N_{SPT}$ estimado (golpes)		
			DIN (2003)	Sanchez et al. (2010)	Matos (2015)
1	42	12	58	25	17
2	78	29	109	47	39
3	105	35	147	64	55
4	149	41	208	90	81
5	181	42	253	110	101

As Figuras 7 a 9 apresentam os gráficos de variação de  $N_{SPT}$  pelos métodos propostos e no próprio ensaio.

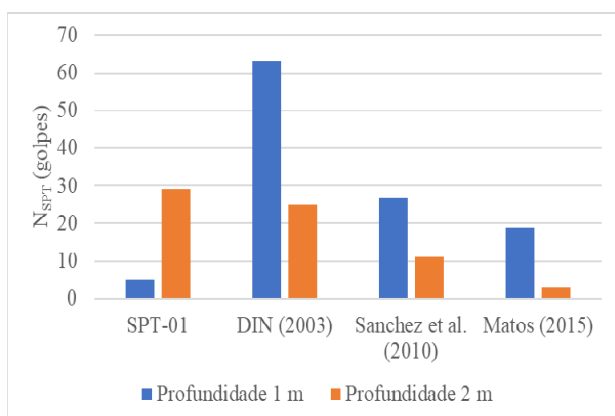


Figura 7. Comportamento gráfico do  $N_{SPT}$  para DPL-03, de acordo com cada método.

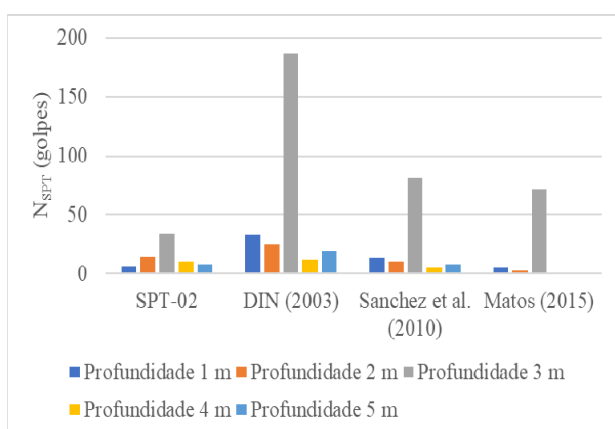


Figura 8. Comportamento gráfico do  $N_{SPT}$  para DPL-01, de acordo com cada método.

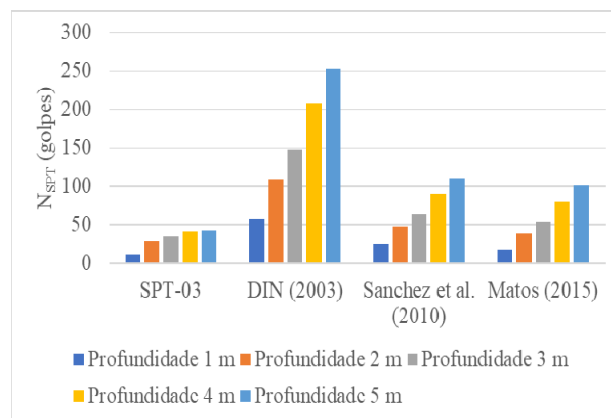


Figura 9. Comportamento gráfico do  $N_{SPT}$  para DPL-02, de acordo com cada método.

Percebeu-se que, para as correlações utilizando os valores de  $N_{10}$  do ensaio DPL-03, para a profundidade de 1m, o método de Matos (2015) aproximou-se mais, já DIN (2003) foi o que apresentou resultado mais discrepante. Enquanto que, para a profundidade de 2m, o método de Matos (2015) afastou-se mais e DIN (2003) apresentou resultados mais próximos. Já para DPL-01, para a profundidade de 2m e 5m, o método que mais se aproximou foi de Sanchez et al. (2010), e para a profundidade de 4m, a aproximação foi maior para DIN (2003). Para DPL-02, o método que mais se aproximou, para todas as profundidades analisadas foi de Matos (2015).

## 8 CONCLUSÃO

Nesse artigo, pôde-se analisar correlações entre ISC e  $N_{SPT}$ , bem como  $N_{SPT}$  e  $N_{10}$ . Ambos os parâmetros são importantes na execução de projetos, seja de aterros ou de fundações. Sabe-se que é muito comum a realização de sondagens SPT, nesse sentido, buscar por correlações entre o parâmetro  $N_{SPT}$  e outros, constitui-se uma relevante contribuição para elaboração de projetos e acompanhamento de obras geotécnicas. Com base nos dados aqui apresentados e em sua análise, percebeu-se uma maior aproximação, nesse caso de estudo, dos

valores de ensaios e das correlações apresentadas por Livneh e Ishai (1988), para  $ISC \times N_{SPT}$ , e também o método de Matos (2015) para  $N_{SPT} \times N_{10}$ .

Dessa forma, alerta-se para a importância de estudos de correlações locais, que visem aproximar ainda mais as correlações, bem como possibilitar, de forma segura e econômica, suas utilizações em projetos.

## AGRADECIMENTOS

Agradece-se ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa do autor<sup>3</sup>.

## REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1986). NBR 7182: Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2001). NBR 6484: Sondagens de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 9895: Solo - Índice de suporte Califórnia (ISC) - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT.
- Cintra, J. C. A.; Aoki, N.; Tsuha, C.H.C.; Giacheti, H.L. (2013). Fundações: Ensaios estáticos e dinâmicos. São Paulo: Oficina de Textos.
- Deutsches Institut Für Normung. (1991). DIN 4094: Erkundung und Untersuchung des Baugrunds. Berlin: Beuth.
- Deutsches Institut Für Normung. (2003). DIN 1054: Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau. Berlin: Beuth.
- Livneh, M. e Ishai, I. (1987). The relationship between SPT and in situ CBR values for subgrades and pavements in Arid Zones, proc. 8th Asian Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Kyoto.
- Livneh, M. e Ishai, I. (1988). The relationship between in situ CBR test and various penetration tests, Proc. 1st Int. Symp. On Penetration Testing, ISOPT-1, Orlando.
- Matos, Y.M.C. (2015). Verificação da Aplicação de Sondagens com o Penetrômetro Dinâmico Leve (DPL) em Projetos de Fundações para Pequenas Edificações. 2015. 76 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil). Universidade de Fortaleza, Fortaleza.
- Nilsson, T. O. (2004). Penetrômetro portátil DPL NILSSON. SEFE V/BIC II, São Paulo.
- Passos, P. G. O. (2005) Melhoramento de solos arenosos com estacas de areia e brita. 141 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília.
- Sanchez, P. F. et al. (2010). Estudo da Viabilidade do Uso do Penetrômetro Dinâmico Leve (DPL) para Projetos de Fundações de Linhas de Transmissão em Solos do Estado do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, Gramado.