

ESTACAS NERVURADAS CRAVADAS COM JATO DE ÁGUA: ANÁLISE PARAMÉTRICA DA INFLUÊNCIA DA COMPACIDADE

Cesar Alberto Ruver

Professor/Pesquisador do curso de engenharia civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul
cesar@ufrgs.br

Gabriel Villarinho van der Kouwe de Jong

Acadêmico do curso de engenharia civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul
villarinho_g@hotmail.com

Resumo. *O uso de jato de água tem sido uma alternativa técnica para a cravação de estacas pré-moldadas em solos arenosos muito compactos. Porém, esta técnica gera uma zona de descofinamento da areia em torno da estaca, que afeta a capacidade de carga. Uma das linhas de pesquisa desta área tem sido compreender a formação da geometria da zona fluidizada e como esta afeta os parâmetros geotécnicos, e conseqüentemente, a capacidade de carga. Neste sentido, o objetivo deste trabalho é avaliar a influência da compactidade na capacidade de carga de uma estaca nervurada cravada por jato de água, bem como, avaliar as deformações na zona fluidizada e não fluidizada com a variação da compactidade. Para este estudo empregou-se a modelagem numérica por elementos finitos. O estudo mostra que o aumento da compactidade, gera aumento da capacidade de carga, numa proporção logarítmica. Em termos de deformações, verifica-se que ao longo do fuste o nível de deformações independe da compactidade inicial da areia; sendo a maior diferença observada junto a ponta. Em baixa compactidade ocorre a formação de um bulbo que avança na zona não fluidizada, já para o estado muito compacto as deformações não afetam, significativamente, a areia não fluidizada.*

Palavras-chave: *Cravação por Jato de água. Análise paramétrica. Compactidade de areias.*

1. INTRODUÇÃO

Na cravação de estacas por jato de água ocorre a formação de uma zona fluidizada no entorno do elemento que é cravado. Durante a zona fluidizada ocorre o fenômeno de liquefação, que reduz consideravelmente a compactidade da areia. Como a compactidade está diretamente relacionada a resistência ao cisalhamento das areias, a capacidade de carga de estacas cravadas por jato de água é drasticamente afetada. Por este motivo, o estudo da formação desta zona tem sido objeto de estudo de vários pesquisadores, cuja forma (geometria durante e o final do fluxo de água) depende dos parâmetros geométricos do elemento de fundação, hidráulicos do jato, e geotécnico do solo (Tsinker, 1988; Gabr *et al.*, 2007; Mezzomo, 2009; Passini, 2015). Neste sentido, este trabalho pretende apresentar a modelagem numérica de uma prova de carga realizada em uma estaca nervurada cravada por jato, visando auxiliar na compreensão de como o processo de fluidização afeta os resultados a capacidade de carga.

Ademais, a modelagem numérica tem sido uma ferramenta importante na área da geotecnia. Com ela é possível analisar o comportamento tensão-deformação da estrutura em análise (Honda *et al.*, 2011;

Moayedi e Mosallanezhad; 2017). Também, a partir da calibração de um modelo-base, realizada com um número reduzido de ensaios e experimentos, é possível realizar extrapolações que permitem prever o comportamento de estruturas com características semelhantes. As extrapolações podem ser geométricas e/ou em termos das propriedades dos materiais (George e Hari, 2015; Vali et al, 2017). Desta forma, pode-se realizar um estudo paramétrico, cujo o objetivo é avaliar a sensibilidade ou o nível de resposta de uma variável dependente, variando-se as variáveis independentes (Vali et al, 2017). Assim, o objetivo deste trabalho também é mostrar a influência da variação na compactidade da areia na capacidade de carga, a partir de análise paramétrica através da modelagem numérica por elementos finitos.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O estudo é composto por três etapas: (a) execução e interpretação de prova de carga, realizada em laboratório, em modelo reduzido de uma estaca nervurada; (b) elaboração de análise numérica, em elementos finitos, com vista a modelar o ensaio realizado (calibração); e (c) efetuação uma análise paramétrica variando a compactidade de areia, conseqüentemente, os parâmetros de resistência e deformabilidade.

2.1 Execução da Prova de Carga

A prova de carga foi executada (laboratório) em um tanque metálico com diâmetro de 90 cm e com 120 cm de altura. Foi realizada a cravação, por peso próprio, de uma estaca nervurada com fuste quadrado de 8 cm e comprimento de 65 cm, composta por 3 nervuras com largura de 14 cm, espessura de 7 cm e espaçamento de 12 cm, com jato de água, com vazão de 2 m³/s, diâmetro do bico injetor de 17 mm, que corresponde a uma velocidade

do jato de 2,4 m/s. A figura 1(a) mostra uma fotografia da estaca, indicando suas dimensões.

Na execução da prova de carga foi empregada uma areia fina, sedimentar de origem eólica, obtida em uma duna praiana no interior do Campus Carreiro da Universidade Federal do Rio Grande – FURG, localizado na cidade de Rio Grande/RS, extremo sul do Brasil. Conforme a NBR 6205 (ABNT, 1995) a areia apresenta um percentual de 20% de granulometria média e 80% de granulometria fina, sendo quase isenta de material pulverulento (< 0,7%). A areia utilizada apresenta um peso específico real dos grãos de (γ_s) de 25,9 kN/m³, coeficiente de uniformidade (c_u) de 1,33, coeficiente de curvatura (c_c) de 1,17, índice de vazios mínimo (e_{min}) de 0,55, índice de vazios máximo (e_{max}) de 0,81. A partir da execução de ensaios de cisalhamento direto, realizado conforme a ASTM (2011), na densidade relativa (D_r) de 66,7%, obteve-se um ângulo de atrito de pico de 35,7° e ângulo de atrito último (pós pico) de 31,2°.

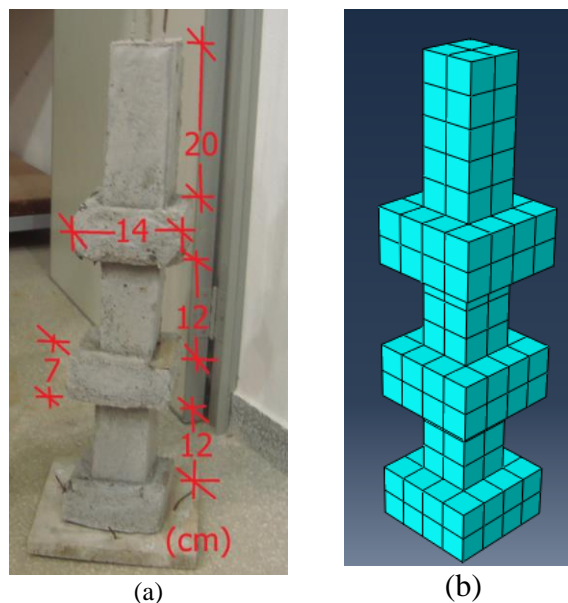


Figura 1: (a) fotografia da estaca com a indicação das dimensões; (b) malha de elementos cúbicos adotado para a estaca

Para a execução do ensaio, o tanque era preenchido com areia compactada em camadas de 10 cm por meio de compactação manual com soquete de madeira. A areia era compactada com umidade de cerca de 10% até uma densidade relativa (D_r) de 66,7%. Após o preenchimento do tanque com areia, o mesmo era preenchido com água visando a submersão da areia. Antes da cravação da estaca, era executado o ensaio de DPL (*Dynamic Penetrometer Light*) até uma profundidade de 90 cm, visando terminar a resistência da areia. Em seguida, foi feita a cravação da estaca com o jato de água ligado, sendo que a mesma se auto cravou por peso próprio. Após a cravação da estaca foi realizada as provas de carga. A prova de carga foi executada conforme a NBR 12.131 (ABNT, 2006), com dez incremental de carga de 5 kN. A carga era aplicada através de um macaco hidráulico, sendo lida por uma célula de carga com capacidade de 50 kN. Os recalques foram lidos por dois transdutores de deslocamento, instalados sobre o centro das estacas, em posições diametralmente opostos. Após a fase de carregamento foi feito o descarregamento até o alívio total da carga.

2.2 Calibração do Modelo Numérico por Elementos Finitos

A modelagem numérica foi realizada com o software de elementos finitos *Abaqus*. Foi estabelecida uma malha 3D, uma vez que a seção da estaca era quadrada. Por simplificação, o tanque também foi considerado quadrado com seção de 80 cm x 80 cm, bem como todas as dimensões foram definidas como múltiplas de 4 cm, sendo considerado uma altura da nervura de 8 cm e largura de 16 cm. Com isso, foi possível dividir toda a malha em elementos cúbicos de mesmo tamanho (com 4 cm de lado) com 8 nós por cubo (análise tipo C3D8). A figura 1(b) mostra a malha adotada para a estaca. A

figura 2 mostra a meia seção do modelo adotado, bem como a divisão da malha.

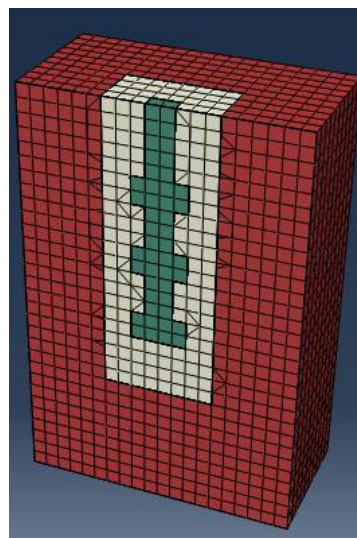


Figura 2: Meia seção do modelo numérico com a malha de elementos finitos adotada

Quanto as condições de contorno, foram impedidos os deslocamentos horizontais nas laterais em x ($\Delta y=0$) e y ($\Delta x=0$), bem como impedidos os deslocamentos em qualquer direção do fundo ($\Delta x=\Delta y=\Delta z=0$). Na interface areia compactada (não fluidizada) e areia fluidizada foi utilizado interface de contato de ligação (elemento “*tie*”). Na interface da areia fluidizada e da estaca foi empregado o elemento de contato (elemento “*contact*”), do tipo tangencial (“*penalty*” com coeficiente de atrito de 0,3) e normal (“*hard*”).

Passini (2015) em seus estudos, verificou que a zona fluidizada para os ensaios realizados em areia se estendia lateralmente até duas vezes o diâmetro das hastes metálicas utilizadas, independentemente do diâmetro das hastes e das condições hidráulicas do jato. Neste sentido, para o presente estudo foi adotada a mesma premissa na modelagem numérica, sendo que para estaca nervurada (8 cm de fuste e 16 cm de largura de nervura) adotou-se uma zona fluidizada com largura de 32 cm, praticamente coincidente a largura da

duna formada na superfície da areia ao final da cravação com jato de água (ver figuras 2 e 3).

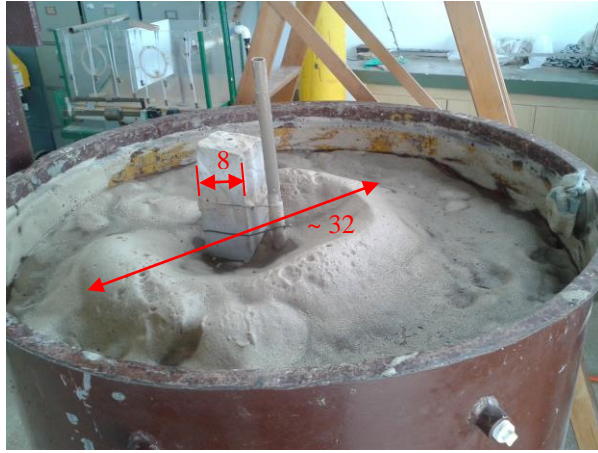


Figura 3: Vista superfície da areia ao final da cravação da estaca com jato de água

A estaca foi considerada um material com comportamento elástico linear, sendo o módulo de elasticidade (E) e o coeficiente de Poisson (ν) estimados a partir da resistência média do concreto utilizado para a confecção da estaca, conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014). Considerando que a resistência do concreto utilizado foi de 18,6 MPa, obtém-se um módulo de elasticidade da ordem de 20 MPa e o coeficiente de Poisson adotado foi de 0,2.

Para a areia foi adotado o modelo elasto-plástico com critério de ruptura de Mohr-Coulomb. Os parâmetros utilizados na modelagem numérica podem ser vistos na tabela 1. O módulo de elasticidade (E) e o ângulo de atrito (ϕ') foram estimados a partir do ensaio de DPL para a areia compactada. A figura 4 mostra o número de golpes para cravação de 10 cm ao longo da profundidade.

Badillo e Rodriguez (1976) apresentam uma relação entre o número de golpes do ensaio DPL e SPT, sendo que para areia, dois golpes do ensaio DPL correspondem a um golpe do ensaio de SPT ($2.N_{DPL} = 1.N_{SPT}$). Desta forma, é possível determinar o N_{SPT}

equivalente ao longo da profundidade e um $N_{SPT,médio}$, que foi determinado entre as profundidades de 50 e 90 cm.

Tabela 1: Propriedades dos materiais empregados na modelagem numérica

Parâmetro	Concreto	Areia	
		F	NF
$N_{SPT,médio}$	-	~ 3	9,75
D_r	-	~ 30%	~ 66%
ρ_{sub} (g/cm ³)	0,805		
E (MPa)	20.000	10,20	33,20
ν	0,2	0,3	
ϕ' (°)	-	25,1	31,3
ψ (°)	-	6,3	20,9
c' (kPa)	-	8,0	
k_o	1,0	0,5	

F = areia fluidizada; NF = areia compactada (não fluidizada)

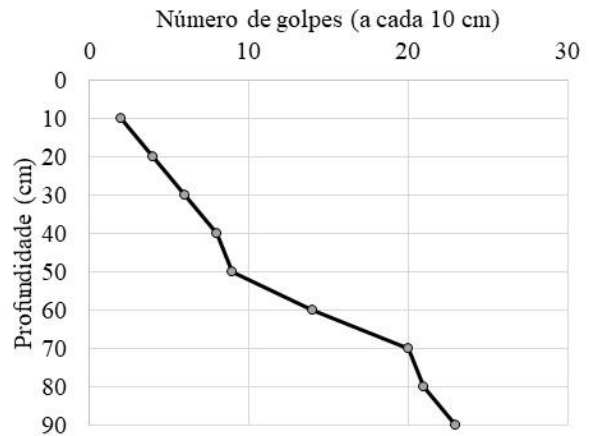


Figura 4: Resultado do ensaio de DPL

A partir do $N_{SPT,médio}$ determinou-se os valores de E com base na tabela elaborada por Clayton (1993, apud Schnaid, 2009) e os valores de ϕ' como a média das equações de Teixeira (1996, apud Schnaid, 2009) e Hatanaka e Uchida (1996, apud Schnaid, 2009). O valor do coeficiente de empuxo em repouso (K_o) pode ser estimado pela equação de Jaky (1944, apud Lambe e Whitmann, 1969), cujo valor é da ordem de 0,5 para a areia, sendo considerado como 1,0 para a

estaca. Segundo Das (2007), o coeficiente de Poisson de areia varia entre 0,2 a 0,4, sendo considerado um valor de 0,3 neste trabalho. Por tratar-se de uma areia, que no estado denso e confinado, apresenta aumento de volume, na modelagem numérica é imprescindível a consideração da dilatação. Neste sentido, considerou-se uma dilatação como sendo dois terços do ângulo de atrito ($\psi = 2/3.\phi'$).

Para as estacas cravadas com jato de água ocorre a formação de zona fluidizada no entorno da estaca, que altera as características de compacidade da areia, e conseqüentemente, as propriedades mecânicas são alteradas. Mezzomo (2009) e Passini (2015) verificaram que independentemente da compacidade original da areia ($D_r = 50$ e 90%), das características hidráulicas do jato e das condições de cravação (suspensas ou peso próprio) a compacidade final da zona fluidizada fica em torno de 30% (estado fofo). Neste sentido, foi considerado um N_{SPT} em torno de 3, que segundo Clayton (1993, apud Schnaid, 2009) é a transição entre a compacidade muito fofo e fofo. A partir do N_{SPT} considerado, foi possível a determinação dos parâmetros da areia fluidizada (tabela 1).

Por fim, conforme citado por Zhan et al (2012) e Lacouture e Suárez (2018), mesmo se tratando de areia solta, sem coesão, é fundamental na modelagem numérica se considerar um valor de intercepto coesivo maior que zero (neste trabalho $c' \sim 8$ kPa), caso contrário o modelo numérico não converge.

A modelagem numérica foi dividida em duas etapas: (a) fase de tensões geostático e (b) fase de carregamento das estacas. Na fase geostática, utilizou-se as tensões efetivas, para tanto considerou-se o peso específico submerso e por motivos de convergência do modelo foi adotado o mesmo valor tanto para a areia como para a estaca, conforme sugestão de Lacouture e Suárez (2018). Na fase de

carregamento, aplicou-se um deslocamento vertical total de 25 mm no topo e no centro do modelo de estaca, dividido em incrementos de 2% .

2.3 Análise Paramétrica

A partir da calibração do modelo numérico, reportado no item anterior foi possível se estabelecer a análise paramétrica com vista analisar a influência da compacidade da areia não fluidizada. Nesta análise estabeleceu-se uma variação dos valores de N_{SPT} , com base nas compacidades estabelecidas na NBR 6484 (ABNT, 2001) e determinou-se a variação dos parâmetros de resistência (ϕ' , e respectivo ψ) e deformabilidade (E), com base nas equações apresentadas por Schnaid (2009), como já citado anteriormente.

Tabela 2: Parâmetros variados na análise paramétrica

Compacidade	N_{SPT}	ϕ' (°)	ψ (°)	E (Mpa)
Fofo	3	25,1	16,8	10,2
Pouco compacto	5	27,4	18,2	17,0
Mediamente compacto	9,75	31,3	20,9	33,2
Mediamente compacto	18	36,7	24,5	64,6
Compacto	30	41,7	27,8	102,0
Compacto	40	45,4	30,3	136,0
Muito compacto	50	48,7	32,5	170,0

A tabela 2 apresenta o resumo dos parâmetros utilizados na análise paramétrica. Não se alterou as condições geométricas da estaca, do tanque e da zona fluidizada (justificado pelas razões já citados anteriormente). Também não se alterou as propriedades geotécnicas da areia da zona fluidizada (mesma em todas as análises), pois como já citado, independentemente do estado

de compacidade inicial a densidade relativa da zona fluidizada permanece em 30%.

3. RESULTADOS

A figura 5 mostra os resultados da prova de carga e do modelo numérico obtido por elementos finitos. Na figura 5 também são mostrados os critérios de ruptura adotados pela NBR 12.131 (ABNT, 1991), que é dado pela equação 1; e pela norma americana, ASTM D 1143 (ASTM, 2007), que estabelece a carga de ruptura como sendo 15% do diâmetro/lado da estaca.

$$\rho = \frac{P.L}{A.E} + \frac{D}{30} \quad (1)$$

Onde: ρ = recalque na ruptura (m); P = carga de ruptura (kN); L = comprimento da estaca (0,65 m); A = seção da estaca (0,0064 m²); E = módulo de elasticidade da estaca (20.000 kPa); D = diâmetro da estaca (= 0,0903 m – equivalente à área da estaca)

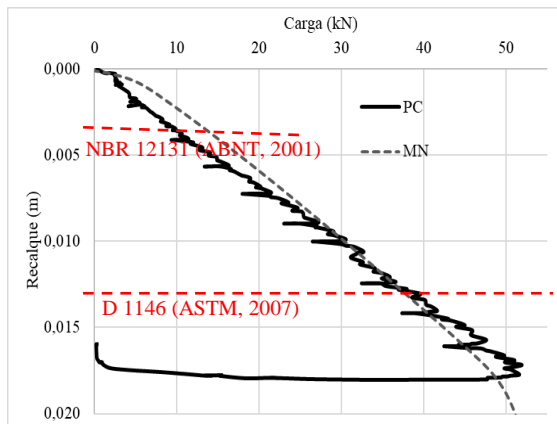


Figura 5: Resultado da prova de carga (PC) e da modelagem numérica (MN)

Em análise aos resultados das provas de carga, atendendo os critérios da NBR 12.131 (ABNT, 2006), verifica-se uma carga de ruptura de 8,26 kN para um recalque de 3,09 mm. Agora, pela ASTM D 1143 (ASTM,

2007), que considera um recalque maior, obtém-se uma carga de ruptura de 35,8 kN, para um recalque de 12 mm. Pela figura 5, verifica-se a modelagem numérica se ajusta adequadamente aos ensaio do início ao fim da curva.

Uma vez calibrado o modelo, efetuou-se a análise paramétrica, alterando-se o E , ϕ e ψ da areia, conforme os valores apontados na tabela 2. A figura 6 apresenta as curvas de carga x recalque. Já a figura 7 mostra os valores de carga, considerando a carga máxima obtida para um recalque de 25 mm, e considerando os critérios de ruptura na ANBT (2001) e ASTM (2007). E a figura 8, mostra as cargas da figura 7, em função da curva do ensaio calibrada ($N_{SPT} = 9,75$).

Pela figura 6, verifica-se quanto maior o valor de N_{SPT} , maiores são as cargas resistidas para um mesmo recalque. Pela figura 7, verifica-se que a relação da carga, no recalque de 25 mm, apresenta um crescimento potencial com o N_{SPT} . Já para as cargas, considerando os dois critérios de ruptura considerados, mostram uma relação de aumento logarítmico. Pela relação entre as cargas dos modelos paramétricos pelas cargas do ensaio (figura 8), considerando o modelo calibrado, verifica-se que quanto maiores os recalques, maior é a diferença entre as cargas, com o aumento do N_{SPT} .

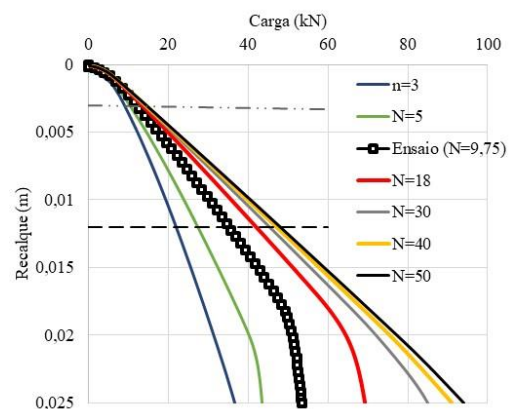


Figura 6: Curvas de carga x recalque obtidas na análise paramétrica

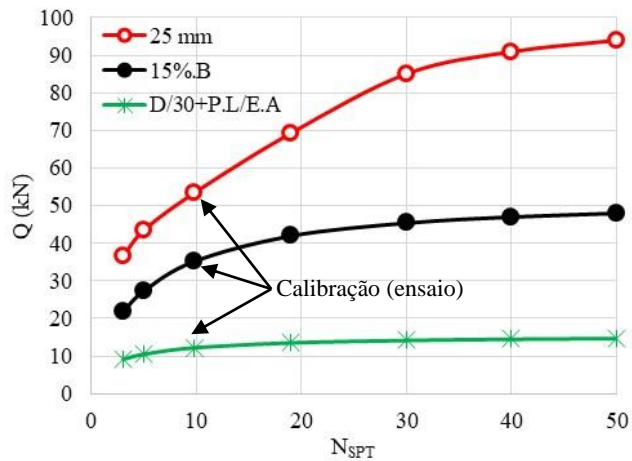


Figura 7: Cargas x N_{SPT} para diferentes critérios de ruptura

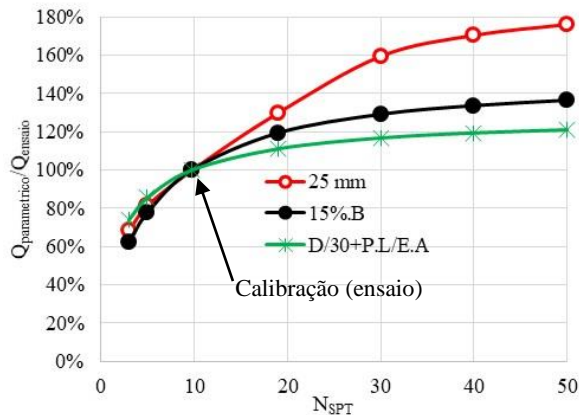


Figura 8: Razão entre as cargas da análise paramétrica pela carga do ensaio x N_{SPT}

As figuras 9 e 10, mostram as malhas de deformação ao final do carregamento (recalque de 25 mm), respectivamente, para o N_{SPT} de 3 (compacidade muito fofa) e 50 (muito compacto). Inicialmente, observa-se que para ambos os casos, houve um deslocamento contínuo e uniforme da areia contida entre as nervuras independentemente da compacidade, de modo a formar um cilindro cortante contido entre a primeira e última nervura (base). Também é possível se observar que o distúrbio lateral (ao longo do fuste) abrangeu a mesma largura, não indo até a fronteira entre a areia não fluidizada.

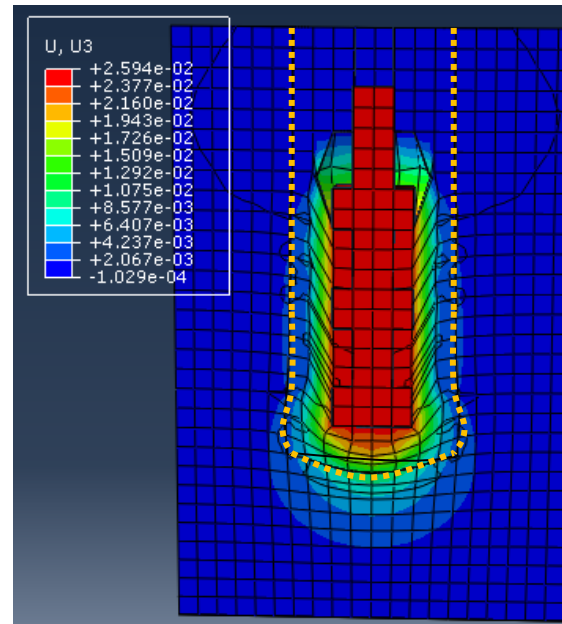


Figura 9: Deformação da malha após um recalque de 25 mm, para um N_{SPT} de 3

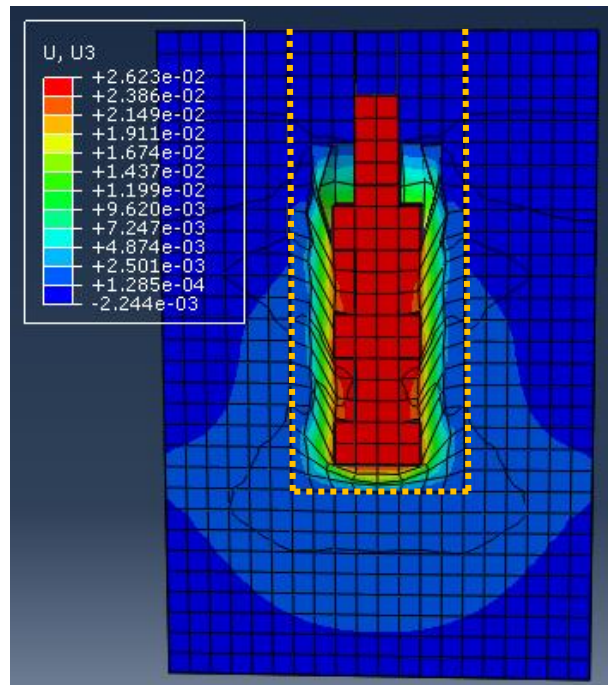


Figura 10: Deformação da malha após um recalque de 25 mm, para um N_{SPT} de 50

A principal diferença se observa próximo a base da fundação. Para o modelo com areia muito fofa ($N_{SPT} = 3$), verifica-se a formação de um bulbo de deformações junto a

nervura da base, avançando mais para o fundo, mas também afetando a lateral (ver linha pontilhada), de modo a atingir e deformar a areia não fluidizada. Para o modelo com areia muito compacta ($N_{SPT} = 50$), verifica-se que as deformações junto a areia não fluidizada são insignificantes, de modo que as deformações, predominantemente, ocorrem na areia fluidizada. Analisando mais especificamente a base, para a areia muito compacta, verifica-se que o bulbo de deformações, fica restrito entre a base da fundação e o fundo da areia não fluidizada. Isso ocorre pelo fato de a areia contida nesta região ser muito fofa e a estaca ao ser mobilizada, proporciona a compactação desta areia.

4. CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo mostrar a influência da compactação da areia no comportamento de estacas nervuradas cravadas com jato de água. A partir deste trabalho foi possível observar:

- A modelagem numérica por elementos finitos possibilitou a reprodução da prova de carga realizada com grande precisão;

- A calibração do modelo numérico, possibilitou a execução de uma análise paramétrica, para diferentes níveis de compactação, desde muito fofo (equivalente a um $N_{SPT}=3$) até muito compacto (equivalente a um $N_{SPT}=50$);

- Para análise paramétrica verificou-se um aumento logarítmico da capacidade de carga com o aumento da compactação (representado pelo aumento do N_{SPT});

- Independentemente, da compactação, a deformação lateral é a mesma ao final do carregamento (recalque de 25 mm), conforme demonstrado pela modelagem numérica;

- O bulbo de deformações na base da areia muito fofa avança além da areia não fluidizada. Já o bulbo para a areia muito compacta, fica restrito a areia fluidizada.

Agradecimentos

Os autores gostariam de expressar seus agradecimento ao CNPq, pelos recursos financeiros destinados ao projeto nº 475198/2011-5, contemplado no Edital Universal n. 14/2011.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. **D 1143 - Standard Test Methods for Deep Foundations Under Static Axial Compressive Load**. West Conshohocken, PA, USA, 2007;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6502: Solos e Rochas**. Rio de Janeiro, 1995;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 12131: Estacas- Prova de carga estática: método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2006;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014;

BADILLO, E. J., RODRIGUEZ, A. R. **Mecanica Del Suelos – Tomo I**, 3ª ed., Limusa, Mexico, 1976, 644 p.;

DAS, B. M. **Principles of Foundation Engineering**, 6th ed., Thomson, Toronto, Canada, 2007, 750 p.;

GABR, M. A., BORDEN, R. H., SMITH, A. W., DENTON, R. L. Laboratory Characterization of Jetting-Induced Disturbance Zones. In: GEO-DENVER, 2007, Denver, **Anais...**, New Peaks In Geotechnics.

GEORGE, B. E., HARI, G. (2015). Numerical Investigation of Under Reamed Pile. In: THE SIXTH INTERNACIONAL

- GEOTECHNICAL SYMPOSIUM, 2015, . Chennai, India. 4p. **Anais...**;
- HONDA, T.; HIRAI, Y.; SATO, E. Uplift Capacity on Balled and Multi-Belled Piles in Dense Sand. *Soil and Foundations*. **Japanese Geotechnical Society**, Vol. 51, nº 3, 483-496, 2011;
- LACOUTURE, W. F., SUÁREZ, L. C. **Pile Group Analysis in Abaqus. PDF Tutorial**. Universidad Del Norte, Barranquilla, Colombia, 2018;
- LAMBE, T. W., WHITMAN, R. V. **Soil Mechanics**, John Wiley & Sons, New York, NY, USA, 1969, 553 p.;
- MEZZOMO, S. M. **Estudo dos Mecanismos de Fluidização de Areia com Jato de Água**. 2009. Dissertação (Mestrado em geotecnia - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil): Universidade Federal do Rio Grande do Sul/UFRGS, Porto Alegre/RS, 230 p., 2009;
- MOAYEDI, H.; MOSALLANEZHAD, M. Uplift resistance of belled and multi-belled piles in loose sand. **Measurement**. Elsevier, 190, 346–353, 2017;
- PASSINI, L. B. **Instalação e Capacidade de Carga Axial de Estacas Modelo Fluidizadas em Solos Arenosos**. 2015. Tese (Doutorado em geotecnia - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil): Universidade Federal do Rio Grande do Sul/UFRGS, Porto Alegre/RS, 275 p., 2015;
- SSHNAID, F. **In Situ Testing in Geomechanics**, 1st ed., Taylor & Francis, New York, NY, USA, 2009, 329 p.;
- TSINKER, G. Pile Jetting. **Journal of Geotechnical Engineering**, ASCE, Vol. 114, nº. 3, 1988, p. 326-334;
- VALI, R., KHOTBEHSARA, E. M., SABARIAN, M., Li, J., MEHRINEJAD, M., JAHANDARI, S. A Three-Dimensional Numerical Comparison of Bearing Capacity and Settlement of Tapered and Under-Reamed Piles. **International Journal of Geotechnical Engineering**. Taylor & Francis Group, June, 2017;
- ZHAN, Y-G., WANG, H., LIU, F-C. Modeling Vertical Bearing Capacity of Pile Foundation by Using ABAQUS. **The Electronic Journal of Geotechnical Engineering (EJGE)**, v. 17, p. 1855-1965, 2012..