



Modelagem Numérica do Comportamento de Estacas Nervuradas Cravadas por Jato de Água

Cesar Alberto Ruver

Professor da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, cesar@ufrgs.br

Gabriel Villarinho van der Kouwe de Jong

Graduando de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, villarinho_g@hotmail.com

Marcelo Saraiva Peres

Mestrando do Programa de Pós-Graduação Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, Brasil, marcelosrperes@gmail.com

RESUMO: A cravação de estaca por percussão, tem seu uso limitado pela resistência do solo, de modo que para altas resistências pode ocorrer ruptura/quebra da estaca pela necessidade de aumento da energia para tentar avançar com a cravação. Nestes casos, pode-se lançar mão do avanço da cravação através da utilização de jato d'água ao longo de toda a profundidade ou nas camadas mais resistentes, aliado ao processo de percussão. Ocorre que a utilização de jato d'água reduz drasticamente a capacidade de carga de estaca pelo desconfinamento e amolgamento do solo que circunda a mesma. Estudos em modelo reduzido, realizados em laboratório, tem mostrado que a capacidade de carga de estacas pré-moldadas pode ser aumentada pela introdução de nervuras laterais e/ou alargamento da base. Assim, este trabalho tem a intenção de fazer a modelagem numérica do comportamento destes modelos reduzidos. A partir dos modelos previamente calibrados obtidos de resultados de trabalhos experimentais já executados, pretende-se realizar análises (paramétrica) para diferentes geometrias das nervuras (posição, quantidade e formato) visando potencializar a capacidade de carga.

PALAVRAS-CHAVE: Cravação por Jato de Água; Estaca Nervurada; Modelagem Numérica de Estacas; Análise Paramétrica

1 INTRODUÇÃO

A cravação de estacas pré-moldadas por percussão tem sido uma das técnicas mais difundidas e econômicas para a execução de fundações profundas. No entanto, seu emprego está limitado a diversos condicionantes: (a) técnicos, relacionados a energia necessária para sua cravação ou (b) ambientais, como ruído e vibração. Milititsky et al. (2008) citam que se a energia aplicada pelo martelo for insuficiente não ocorre o avanço da cravação, especialmente em solos resistentes, que é o caso, por exemplo, das areias sedimentares do litoral sul-brasileiro. Por outro lado, se a energia for demasiada, pode

haver danificação da estaca, ocasionando quebra, fissuração ou flambagem. Outro limitante, tem sido o ruído e as vibrações, que tem restringido a utilização da técnica de cravação por percussão, cada vez mais nos grandes centros urbanos ou em área densamente edificadas (Choi et al, 2013; Moriyasu et al, 2016; Tanaka e Kusuka, 2016). Neste sentido, para contornar estes problemas, pode-se lançar mão da técnica de cravação de elementos pré-moldados por jato de água. Tsinker (1988), ainda cita que outra vantagem desta técnica tem sido a velocidade de cravação, e consequentemente, a economia de tempo. No entanto, a técnica de cravação por jato de água,



gera uma zona fluidizada no entorno do elemento que esta sendo cravado, reduzindo a compacidade do solo circundante, que consequentemente gera uma zona de baixa resistência ao cisalhamento (Tsinker, 1988; Gabr et al, 2007; Passini, 2015). Este fato, reduz consideravelmente a capacidade de carga das estacas, se comparado com a carga suportada, pela mesma estaca cravada a percussão (Moriyasu et al, 2016). Para tanto, Moriyasu et al (2016), desenvolveram no Japão, uma técnica de cravação de estacas metálicas tubulares por vibração mais jato de água, associado a injeção de nata de cimento e uso de abas metálicas laterais, de modo a formar um bulbo na base e com isso aumentar a capacidade de carga. A utilização da técnica de alargamento de seções do fuste e introdução de bulbos na base, no caso de estacas moldadas in loco, tem-se mostrado eficiente no aumento da capacidade de carga, em comparação com estacas do mesmo tipo de seção contínua, conforme reportado por diversos autores (Mohan et al, 1969; Yabuuchi e Hirayama, 1993; George e Hari, 2015; Tanaka e Kusuka, 2016; Christopher e Gopinath, 2016; Vali et al, 2017). Deste forma, este trabalho tem como objetivo realizar um estudo numérico, por elementos finitos, com vistas a potencializar a capacidade de carga de estacas nervuradas (alargamento de seção do fuste e/ou introdução de bulbo), pré-moldadas em concreto, cravadas por jato de água. Para tanto, a partir da execução de ensaios de laboratório realizado em modelo reduzido, pretende-se calibrar um modelo numérico e realizar uma análise paramétrica.

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O presente trabalho é estruturado por duas fases. A primeira fase trata da execução e interpretação de provas de carga, realizados em laboratório, em modelo reduzido de estacas. Na segunda fase efetuou-se a análise numérica em elementos finitos com vista a modelar os ensaios realizados (calibração) e, posteriormente, efetuar uma análise paramétrica variando a geometria da estaca nervurada, de

modo a obter um modelo de estaca otimizado quanto a capacidade de carga.

2.1 Execução dos Ensaios

Os ensaios em modelo reduzido, realizados em laboratório, foram executados em um tanque metálico com diâmetro de 90 cm e com 120 cm de altura. Foram realizados três ensaios de modelos de estacas pré-moldada em concreto, sendo: (a) Ensaio 1 - quadrada de 8 cm x 8 cm e 65 cm de comprimento, cravada a percussão com a queda livre de uma massa de aço com de 164 kg a uma altura de 50 cm; (b) Ensaio 2 - cravação da mesma estaca por peso próprio, 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; e (c) Ensaio 3 - cravação de uma estaca nervurada, com 3 nervuras com largura de 14 cm, espessura de 7 cm e espaçamento de 12 cm, por peso próprio, com jato de água, com as mesmas características hidráulicas da estaca anterior. A figura 1 mostra uma fotografia das estacas, indicando as dimensões.

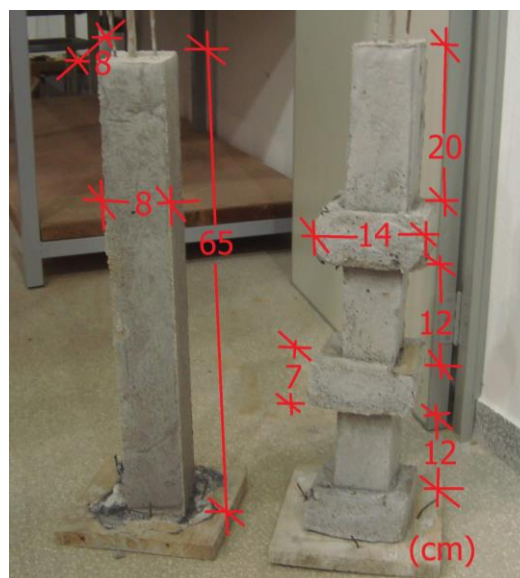


Figura 1: Fotografia dos modelos de estacas empregado no estudo com a indicação das dimensões

Na execução dos ensaios foi empregada uma areia fina, sedimentar de origem eólica, típica do litoral sul-brasileiro, 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 6.205 (ABNT, 1995) a areia apresenta um percentual de 20% de granulometria média e 80% de granulometria fina, sendo isento de material pulverulento ($< 0,5\%$). A areia utilizada apresenta um peso específico real dos grãos de (γ_s) de $25,9 \text{ kN/m}^3$, 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 $35,7^\circ$ e ângulo de atrito último (pós-pico) de $31,2^\circ$.

Para a execução de cada um dos ensaios, o tanque era preenchido com areia compactada em camadas de 10 cm. A areia era compactada com umidade de cerca de 10% até uma densidade relativa (D_r) de 66,7%, sendo após preenchido com água visando a submersão da areia. Antes da cravação das estacas, era executado o ensaio de DPL (*Dynamic Penetrometer Light*) até uma profundidade de 90 cm, visando terminar a resistência a penetração da areia. Em seguida, eram cravadas as estacas (percussão ou jato de água).

As provas de carga foram executadas 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 eram lidos por dois transdutores de deslocamento instalados sobre o centro das estacas em posições diametralmente opostos. Segundo a NBR 12.131 (ABNT, 2006), o incremento de carga seguinte, somente deverá ser aplicado após a estabilização dos recalques (diferença de 5% entre duas leituras de recalque sucessivas, em relação ao recalque total do incremento) do atual incremento de carga. Nos ensaios realizados, a estabilização ocorria em menos de um minuto; no entanto, cada incremento era deixado por pelo menos 5 minutos. Após a fase de carregamento, era feito o descarregamento

até o alívio total da carga.

2.2 Modelagem Numérica

Para a modelagem numérica utilizou-se o software *Abaqus*. A modelagem foi realizada em uma malha 3D, uma vez que a seção dos modelos de estacas são quadradas. Por simplificação, o tanque também foi considerado quadrado com seção de 80 cm x 80 cm, bem como todas as dimensões eram múltiplos 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 2(a) mostra um exemplo de malha adotada para a estaca do ensaio 3.

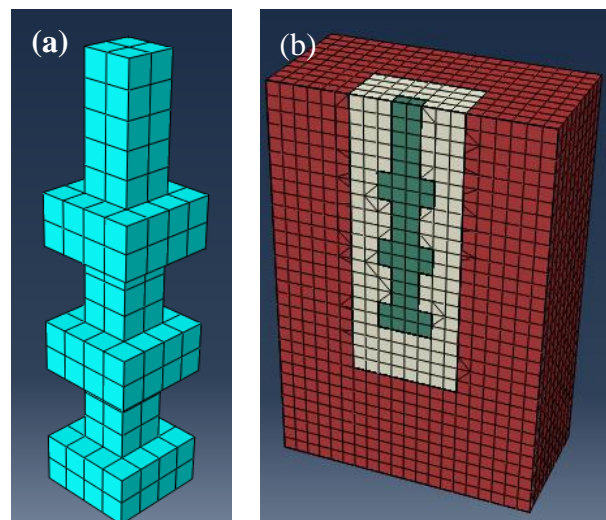


Figura 2: Malha de elementos finitos do ensaio 3 adotada para o (a) modelo de estacas e (b) o conjunto estaca, areia fluidizada e não fluidizada

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 ($\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0$). Nas zonas de contato entre diferentes materiais, foram consideradas duas condições: (a) ligação (elemento “*tie*”) ou (b) contato (elemento “*contact*”), do tipo tangencial (“*penalty*” com coeficiente de atrito de 0,3) e normal (“*hard*”). Na interface areia compactada (não fluidizada)



e areia fluidizada foi utilizada a interface de contato de ligação. No ensaio 1, a zona de interface entre areia compactada e estaca foi do tipo ligação. No ensaio 2, na interface da areia fluidizada e a estaca, na ponta até a metade do comprimento da estaca, foi utilizado o elemento de ligação e, na metade até o topo, foi utilizado o elemento de contato. No ensaio 3, a interface da areia fluidizada e a estaca foi empregado o elemento de contato.

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 para a estaca sem nervura (lado de 8 cm), a zona fluidizada abrange uma largura de 16 cm e para a estaca com nervura (16 cm de lado junto a nervura) adotou-se uma zona fluidizada com largura de 32 cm. A figura 2(b) mostra um exemplo, em meia seção da malha do modelo do ensaio 3.

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 da concreto utilizado para a confecção dos modelos, conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014). Considerando que a resistência do concreto utilizado foi de 18,6 MPa, obteve-se um módulo de elasticidade (E) da ordem de 20 MPa e o coeficiente de Poisson (ν) de 0,2.

Para a areia (fluidizada e não fluidizada) 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 dos ensaios de DPL para a areia compactada. A figura 3 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. 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_0) pode ser estimado pela equação de Jaky (1944, apud Lambe e Whitmann, 1969), cujo valor é da ordem de 0,5 para a areia, e sendo considerado 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 indispensável a consideração da dilatância. Neste sentido, considerou-se uma dilatância como sendo dois terços do ângulo de atrito ($\psi = 2/3.\phi'$).

Tabela 1. Propriedades dos materiais empregados na modelagem numérica

Parâmetro	Concreto	Ensaio	1	2	3
		F	NF		
$N_{SPT,médio}$		~ 3	7,13	9,63	9,75
D_r		~30%	-	-	-
ρ_{sub} (g/cm ³)	mesmo que NF	1,2 ou 3	0,85	0,89	0,81
E (MPa)	20.000	10,2	24,2	32,7	33,2
ν	0,2	0,3			
ϕ' (°)	-	25,1	29,3	31,2	31,3
ψ (°)	-	6,3	19,5	20,8	20,9
c' (kPa)	-	8			
k_0	1,0	~0,5			

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

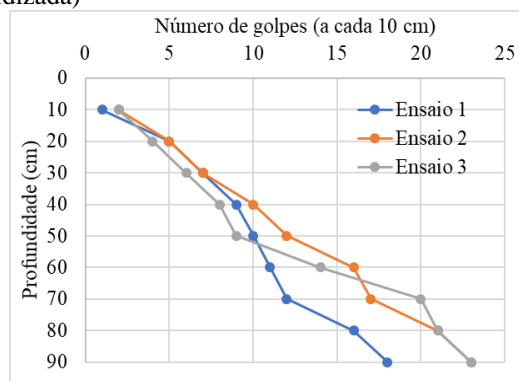




Figura 3. Resultado dos ensaios de DPL ao longo da profundidade do tanque

Para as estacas cravadas com jato de água ocorre a formação de zona fluidizada no entorno da estaca, que altera as características de compactidade da areia, e consequentemente, as propriedades mecânicas são alteradas. Mezzomo (2009) e Passini (2015) verificaram que independentemente da compactidade original da areia ($D_r = 50$ e 90%), das características hidráulicas do jato e das condições de cravação (suspensas ou peso próprio) a compactidade 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 o estado muito fofo e fofo. A partir do N_{SPT} considerado, foi possível a determinação dos parâmetros da areia fluidizada (tabela 1).

Ainda, 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.

Por fim, 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 deslocamentos verticais de 25 a 50 mm no topo e no centro do modelo de estaca, dividido em incrementos de 2% .

2.3 Análise Paramétrica

A modelagem numérica estabelecida no item 2.2, serviu para calibração e a reprodução dos três ensaios de prova de carga realizados em laboratório. A partir destes modelos foi possível estabelecer uma análise paramétrica de modo a

simular qual seria a resposta para diferentes tipos configurações de estacas nervuradas. Neste sentido, foram simuladas estacas com uma e duas nervuras, com igual espessura e largura, dispostas em diferentes posições ao longo do fuste. O objetivo deste estudo foi identificar qual configuração oferece uma maior capacidade de carga. Uma vez identificada a melhor configuração, em termos de posição e quantidade de nervuras, variou-se a largura e espessura das nervuras de modo a verificar sua influência na capacidade de carga. A tabela 2 mostra as configurações e combinações testadas na análise paramétrica.

Tabela 2. Combinações de nervuras testadas na análise paramétrica

Modelo	F	1/3	2/3	T
Ensaio 3				
A	ME	ME	ME	
B				
D				
E				
F				
G				
H				
I				
J				
K				
M				
N	ME		ME	
O	ME e DL		ME e DL	

Obs.: Posição das nervuras: F = fundo; 1/3 = a 20 cm do fundo; 2/3 = a 40 cm do fundo; e T = topo da estaca. ME = metade de espessura (4 cm) e DL = dobro da largura (32 cm)

3 RESULTADOS

A figura 4 mostra os resultados das três provas de carga, bem como o critério de ruptura adotado pela NBR 12.131 (1991), que é dado pela equação 1. Em análise aos resultados das provas de carga, atendendo os critérios da NBR 12.131 (ABNT, 2066), verifica-se que o ensaio 1, modelo de estaca cravada a percussão, apresenta uma carga de ruptura da ordem de 24,52 kN para um recalque de 3,14 mm. Já o ensaio 2, a mesma estaca que ensaio 1, cravada com jato de água, verifica-se uma carga de ruptura de 4,71 kN para um recalque de 3,03 mm. E por fim, o ensaio 3, estaca dotada de



nervuras, cravada com jato de água, apresenta uma carga de ruptura de 8,26 kN para um recalque de 3,09 mm.

dos recalques (redução da rigidez), enquanto que as estacas cravadas com jato de água mantém a rigidez mesmo a grandes deslocamentos.

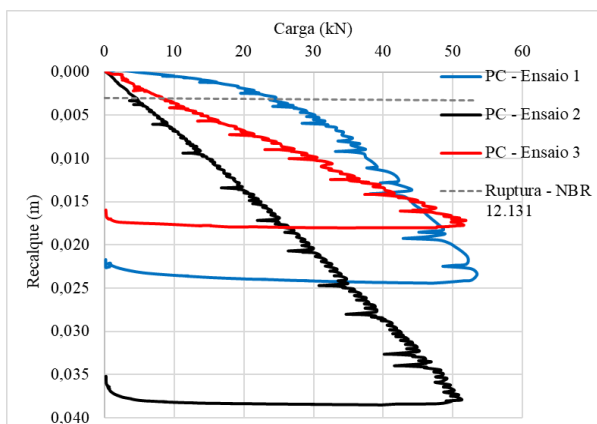


Figura 5: Resultado das provas de carga (PC)

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

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)

Por meio deste resultados é possível verificar que houve uma drástica redução (seis vezes) da capacidade de carga, na comparação da cravação por jato de água e cravação por percussão. Agora comparando-se a capacidade de carga da estaca nervurada verifica-se que esta apresenta quase o dobro (1,74 vezes) da capacidade de carga em relação a estaca convencional cravada por jato de água. Agora, considerando grandes recalques da ordem de 17 mm (equivalente a $D/5$), observa-se que a estaca nervurada (ensaio 3) apresenta uma carga de 51,8 kN, enquanto que a estaca cravada a percussão (ensaio 1) apresenta uma carga de 47 kN e mesma estaca cravada com jato de água apresenta uma carga de 22,52 kN (ensaio 2). Portanto, a capacidade de carga da estaca nervurada cravada com jato de água, supera a capacidade de carga da estaca convencional (seção contínua) cravada a percussão, a grandes deslocamentos. Isso pode ser constatado pelo fato da estaca cravada a percussão apresentar perda da capacidade de suporte com o aumento

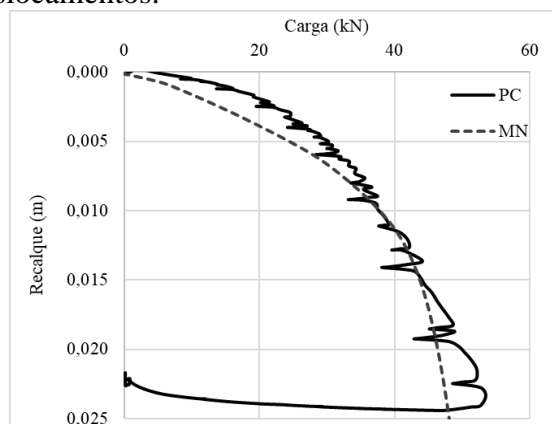


Figura 6: Comparação dos resultados da prova de carga (PC) e modelo numérico (MN) do ensaio 1.

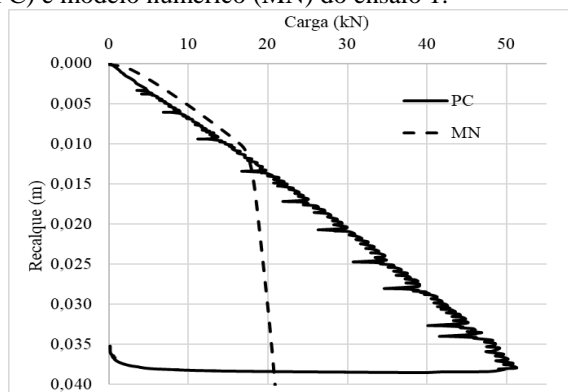


Figura 7: Comparação dos resultados da prova de carga (PC) e modelo numérico (MN) do ensaio 2.

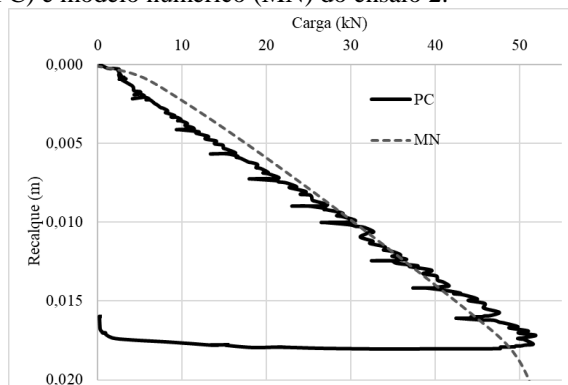


Figura 8: Comparação dos resultados da prova de carga (PC) e modelo numérico (MN) do ensaio 3.

As figuras 6 a 8 apresentam as respostas do modelo numérico em relação aos resultados dos ensaios de prova de carga. Verifica-se a modelagem numérica se ajusta adequadamente aos ensaios do início ao fim, exceto para o ensaio 2, onde a curva modelada adere ao



ensaio até certa de um terço da carga do ensaio, corresponde a um recalque da ordem de 15 mm, ou seja, muito superior a capacidade de carga dada pela equação 1.

A primeira parte da análise paramétrica consistiu em analisar a incorporação de uma nervura, verificando-se sua influência na capacidade de carga em diferentes posições ao longo do fuste. A figura 9 mostra os resultados, onde é possível verificar uma diminuição da capacidade de carga (cerca da metade), independentemente da posição em que se coloca a nervura, em relação ao ensaio 3, que é composta por três nervuras.

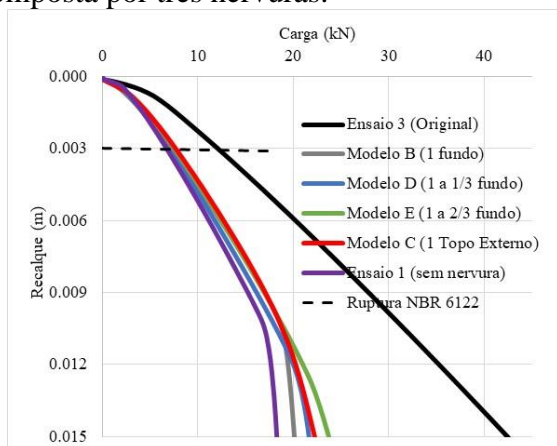


Figura 9: Análise paramétrica considerando uma nervura em diferentes posições

Agora, analisando individualmente as estacas com um nervura, pode-se observar que posicionar a nervura no fundo representa a menor resistência. Já a melhor posição da nervura é a 40 cm do fundo (equivalente a 2/3 da altura). Isso indica que para adoção de uma nervura, a melhor posição em termos de capacidade de carga, é na metade superior do fuste. Os resultados na análise paramétrica contradizem os resultados de laboratório obtidos por Christopher e Gopinath (2016), que verificaram que quanto mais afastado a nervura for do fundo menor a capacidade de carga e menor a taxa até um certo limite de altura quando a capacidade de carga permanece constante. Porém segundo o autor, os ensaios foram realizados com a introdução dos modelos de estaca a medida que o tanque era preenchido por areia, não passando por nenhum processo de cravação. Já no presente estudo as estacas foram

cravadas por jato de água, alterando as condições da areia junto ao fuste da estaca.

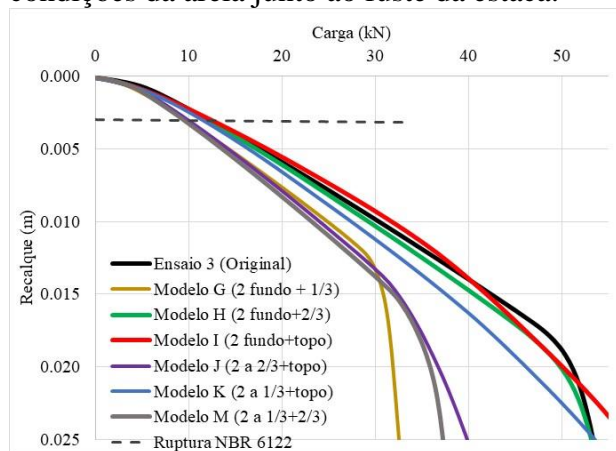


Figura 10: Análise paramétrica considerando duas nervuras em diferentes posições

Na figura 10 é mostrado a análise paramétrica considerando duas nervuras alternado as posições ao longo do fuste. Nesta análise, verifica-se que o posicionamento de duas nervuras, sendo uma no fundo e a outra no topo ou a 40 cm do fundo (cerca de 2/3 da altura), apresenta um resposta de capacidade de carga muito próxima da estaca com três nervuras. Isso indica que adoção de um nervura intermediária, torna-se desnecessária. Comparando-se as figura 9 e 10, verifica-se que na incorporação de duas nervuras em vez de uma, já ocorre um considerável aumento da capacidade de carga (quase o dobro), independentemente da posição das nervuras. Já a incorporação de uma terceira nervura, não traz grandes ganhos de capacidade de carga. Esta mesma constatação foi verificada por Christopher e Gopinath (2016), que verificaram que o aumento de capacidade de carga de uma nervura para duas nervuras foi de 1,85 vezes; enquanto que a introdução de uma terceira nervura representou um aumento de somente 20% na capacidade de carga. Já o estudo numérico realizado por de George e Hari (2015) com estacas de verdadeira grandeza escavadas, em solo argiloso, mostraram um aumento de 102% a compressão com a adoção de uma nervura, situada na ponta da estaca, em relação a estaca sem nervura. Já a adoção de uma segunda nervura fez aumentar a capacidade de



carga em 180%, em relação a estaca sem nervura.

A figura 11 apresenta a análise paramétrica ilustrando a influência da alteração geométrica das nervuras, tanto em termos de espessura e largura das nervuras. Realizou-se uma análise considerando a estaca com as três nervuras (ensaio 3), porém com a metade de espessura (4 cm). Inicialmente, verifica-se que a mudança da espessura da nervura não alterou os resultados. O mesmo ocorre para o modelo H (com uma nervura no fundo e outra a 40 cm do fundo), onde a redução da espessura de 8 cm para 4 cm (modelo N) também não alterou a capacidade de carga das estacas. Por fim, considerou-se o modelo O (com duas nervuras com espessura de 4 cm) com o dobro da largura – 16. Para esta estaca, verifica-se um considerável aumento da capacidade de carga, chegando o dobro do valor. Isso mostra que a largura da nervura tem papel fundamental na capacidade de carga, enquanto que a espessura não.

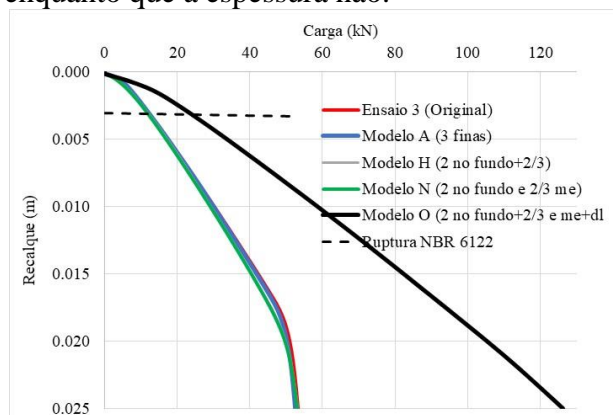


Figura 11: Análise paramétrica considerando diferentes espessuras e larguras das nervuras

Para entender o funcionamento das estacas nervuradas e confirmar as conclusões acima referidas é interessante a observação dos diagramas de recalque das estacas e deformação da massa de solos obtidos através da modelagem numérica. Estes diagramas são mostrados nas figuras 12 e 13. A figura 12 mostra o avanço do recalque e deformação do solo para o ensaio 3 no início e no final do ensaio. Analisando a figura 12(a) é possível verificar que ocorre uma compressão do solo abaixo das nervuras e da base; bem como um

deslocamento lateral junto as nervuras; e um desprendimento de solo sobre as nervuras (formando um vazio). Ao longo do carregamento formam-se bulbos de compressão abaixo das nervuras que vão avançando com a profundidade até atingirem as nervuras inferiores. Esta mesma observação foi verificada por Yabuuchi e Hirayama (1993) em seus ensaios de laboratório. Ao final do ensaio, verifica-se a formação de um cilindro de ruptura condicionado entre a nervura superior e a nervura inferior (base) (figura 12b).

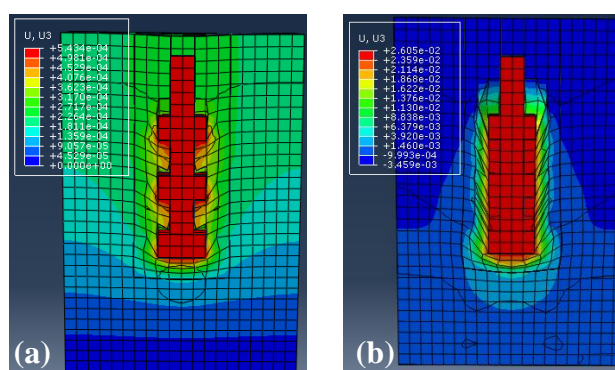


Figura 12: Diagrama de recalques da estaca e deformação da massa do solo no (a) início do carregamento (recalque de 0,44 mm) e (b) no final do carregamento (recalque de 25 mm) para o ensaio 3 (estaca com três nervuras)

A formação do mesmo cilindro ocorre na figura 13(a), que corresponde ao modelo, com duas nervuras (uma na base e outra a 40 cm – cerca de 2/3). Isso confirma que para o ensaio 3, a nervura intermediária (situada a cerca de 1/3 da base) não faz nenhum efeito em termo de capacidade de carga, o que pode ser evidenciado pelas curvas de carga x recalque da figura 10. Ainda analisando a figura 13, pode-se observar os bulbos de deformação formados pelas estacas com nervura junto a base (fundo) (figura 13b) e localizada a 40 cm da base (figura 13c), respectivamente. Para a estaca com nervura no fundo, verifica-se a formação de um buldo de compressão na base e um desconfinamento de solo junto ao fuste, enquanto que para a outra estaca (13c) verifica-se a formação de dois bulbos de compressão, ou seja, uma zona de maior mobilização de resistência, o que demonstra uma maior capacidade de carga, como já citado e mostrado pela figura 9. E por fim, a



figura 12(b) e 13(d) mostra a formação de cilindro cisalhante que é limitado pelo diâmetro das nervuras, mostrando que as estacas nervuradas funcionam como se fossem estacas de seção contínua com mesmo diâmetro das nervuras (e não diâmetro do fuste).

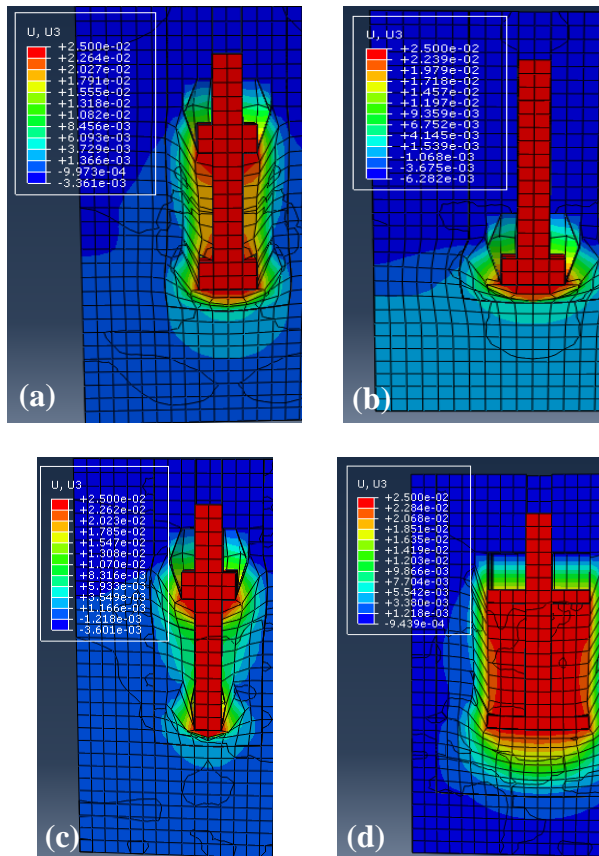


Figura 13: Diagrama de recalques da estaca e deformação da massa do solo no para o (a) modelo J; (b) modelo B; (c) modelo E; e (d) modelo O, ao final do carregamento (recalque de 25 mm)

Os resultados apresentados, corroboram com os resultados obtidos por George e Hari (2015) que observaram comportamentos semelhantes entre estacas de seção contínua com diâmetro de 500 mm e estacas nervuradas com fuste de 300 mm e nervuras com diâmetro de 500 mm. George e Hari (2015) salientam que a formação de um cilindro cisalhante somente ocorre quando a zona de compressão da nervura superior atingir a nervura inferior, sendo que para tanto o afastamento entre as nervuras para estacas comprimidas e assentes e areias deve ser da ordem de 1,25 a 1,50 vezes o diâmetro/lado da nervura, porém os autores realizam um

número limitado de análises, considerando uma nervura sempre junto a base. já neste estudo, considerando a cravação de estacas por jato de água, verificou-se que o mais importante não é a distância entre as nervuras, pois não necessariamente um menor afastamento resultou em maiores resistência, mas sim, o posicionamento e a distribuição das nervuras ao longo do fuste.

4 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi mostrado que a utilização de jato de água para cravação de estacas pré-moldadas de seção contínua afeta drasticamente a capacidade de carga se comparado com a cravação por percussão. Pois o jato de água gera uma zona fluidizada, que provoca o desconfinamento da areia e conseqüentemente, a redução da resistência ao cisalhamento. Por outro lado, este problema pode ser contornado através da utilização de estacas nervuradas, que proporcionam um ganho de resistência. Inclusive, mostrou-se que a capacidade de carga destas estacas é superior as estacas cravadas por percussão, considerando os resultados das provas de carga realizada em laboratório, para grandes recalques.

Efetuu-se ainda uma modelagem numérica dos ensaios realizados, de modo a calibrar um modelo que permitiu a elaboração de uma série de análises paramétricas visando verificar qual seria o melhor formato das estacas nervuradas com vista a potencializar ainda mais a capacidade de carga. Na análise paramétrica, verificou-se que o modelo otimizado de estaca nervurada é aquele dotado de duas nervuras, sendo uma disposta na base da estaca e outra a 40 cm da base (cerca de 2/3 do comprimento da estaca), considerando um comprimento total de 65 cm.

Para análise paramétrica, verificou-se que quanto maior a largura das nervuras maior é a capacidade de carga. Por outro lado, verificou-se não há influência da espessura das nervuras.

Pelo diagrama de deformações do solo, verifica-se que a capacidade de carga é potencializada quando a zona de compressão da



nervura superior atinge a nervura inferior, de modo que ocorre a formação de um cilindro cisalhante limitado pela largura das nervuras.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq, pelos recursos financeiros destinados ao projeto contemplado no Edital Universal n. 14/2011.

REFERÊNCIAS

- American Society for Testing and Materials (ASTM) (2011). D3080 - Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. West Conshohocken, PA, USA, 9p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1995). NBR 6502. Solos e Rochas. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2006). NBR 12131. Estacas- Prova de carga estática: método de ensaio. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014). NBR 6118. Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro.
- Badillo, E. J., Rodriguez, A. R. (1976) *Mecánica Del Suelos – Tomo I*, 3ª ed., Limusa, MEX, 644 p.
- Choi, Y., Kim, D.-C., Kim, T.-H. (2016). Field Evaluation of the Vertical Bearing Capacity of a Screw Pretensioned Spun High-Strength Concrete Pile. *Marine Georesources & Geotechnology*. Taylor & Francis, 34, p. 474-485.
- Christopher, T.; Gopinath. B. (2016). Parametric Study of Under-Reamed Piles in Sand. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, v. 5 (7), p. 577-581.
- Das, B. M. (2007) *Principles of Foundation Engineering*, 6th ed., Thomson, Toronto, CAN, 750 p.
- Gabr, M. A., Borden, R. H., Smith, A. W., Denton, R. L. (2007) Laboratory Characterization of Jetting-Induced Disturbance Zones. In: *Geo-Denver 2007: New Peaks In Geotechnics*.
- George, B. E., Hari, G. (2015). Numerical Investigation of Under Reamed Pile. In: *The Sixth International Geotechnical Symposium*. Chennai, India. 4p.
- Lacouture, W. F., Suárez, L. C. (2018) *Pile Group Analysis in Abaqus*. PDF Tutorial. Universidad Del Norte, Barranquilla, Colombia.
- Lambe, T. W., Whitman, R. V. (1969) *Soil Mechanics*, John Wiley & Sons, New York, NY, USA, 553 p.
- Mezzomo, S. M. (2009) *Estudo dos Mecanismos de Fluidização de Areia com Jato de Água*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul/UFRGS, 230 p.
- Militsky, J., Consoli, N. C., Schnaid, F. (2008) *Patologia das Fundações*. Oficina de Textos, Porto Alegre, RS, Brasil, 207p.
- Mohan, D., Murthy, V.N.S., Jain, G.S. (1969). Design and Construction of Multi-Underreamed Piles. In: *Proceeding of 7th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*. México City, Mexico, v. 2, p. 183-186.
- Moriyasu, S., Morikawa, Y., Yamashita, H., Taenaka, S. (2016). Evaluation of the Vertical Bearing Capacity of Steel Pipe Piles Driven by the Vibratory Hammer Method with Water and Cement Milk Jetting. In: *The 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Japanese Geotechnical Society Special Publication, p. 1291-1295.
- Passini, L. B. (2015) *Instalação e Capacidade de Carga Axial de Estacas Modelo Fluidizadas em Solos Arenosos*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul/UFRGS, 275 p.
- Schnaid, F. (2009) *In Situ Testing in Geomechanics*, 1st ed., Taylor & Francis, New York, NY, USA, 329 p.
- Tanaka, H., Kusaka, H. (2016) *Challenges Up to the Present and for the Future on Installation Technologies and Design of Steel Pipe Piles*. Technical Report, Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report, nº 113, p. 24-33.
- Tsinker, G. (1988) Pile Jetting. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 114, nº. 3, p. 326-334.
- Vali, R., Khotbehsara, E. M., Sabarian, M., Li, J., Mehrinejad, M., Jahandari, S. (2017). 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.
- Yabuuchi, S.; Hirayama, H. (1993). *Bearing Mechanisms of Nodal Piles in Sand*. Deep Foundations on Bored and Auger Piles. Balkema, Rotterdam. P. 333-336.
- Zhan, Y.-G., Wang, H., Liu, F.-C. (2012) Modeling Vertical Bearing Capacity of Pile Foundation by Using ABAQUS. *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering (EJGE)*, v. 17, p. 1855-1965.