

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/266

Análise de curvas p - y em estacas de grande diâmetro a partir de instrumentação com inclinômetro – um estudo de caso

Cristiano Bitencourt Azevedo Comin

Professor, Instituto Federal do Pará, Santarém, Brasil, cristiano.comin@ifpa.edu.br

Felipe Schaedler de Almeida

Professor, PPGEC/UFRGS, Porto Alegre, Brasil, felipe.almeida@ufrgs.br

Ricardo Bergan Born

Diretor, BornSales Engenharia, Balneário Camboriú, Brasil, ricardo@bornsales.com.br

Nilo Cesar Consoli

Professor, PPGEC/UFRGS, Porto Alegre, Brasil, consoli@ufrgs.br

RESUMO: Este trabalho apresenta um estudo de caso da elaboração de curvas p - y para um sistema de estacas de grande diâmetro embutidas em um solo residual submetidas a prova de carga lateral, a partir dos deslocamentos laterais ao longo da profundidade monitorados por meio de inclinômetro tipo torpedo. As curvas propostas foram obtidas por meio da teoria clássica da análise p - y , que considera a hipótese do comportamento da estaca análogo ao de uma viga tipo Euler-Bernoulli. Os dados obtidos demonstram-se bastante adequados para análise do comportamento do sistema solo-estaca estudado quando analisados no software LPILE® em comparação com os dados experimentais. Quando comparadas com as curvas p - y obtidas para o mesmo solo em um sistema de estacas de pequeno diâmetro, as obtidas neste estudo corroboraram a premissa apontada por diversos estudos de que o uso de curvas obtidas em sistemas distintos conduz a grandes erros na previsão do comportamento, tendo neste caso aquelas obtidas em estacas de pequeno diâmetro superestimado a rigidez do solo para o sistema estudado. Os resultados obtidos demonstram como a instrumentação com inclinômetro, que possui baixo custo e é relativamente de simples execução, pode contribuir com a previsão do comportamento de estacas carregadas lateralmente.

PALAVRAS-CHAVE: Curvas p - y , Inclinômetro, Solo residual, Carregamento lateral.

ABSTRACT: This work presents a case study of the development of p - y curves for a system of large diameter piles embedded in residual soil subjected to lateral load testing, based on lateral displacements along the depth monitored using a torpedo-type inclinometer. The proposed curves were obtained through the classical theory of p - y analysis, which considers the hypothesis that the pile's behavior is analogous to that of a Euler-Bernoulli beam. The data obtained appears to be quite suitable for analyzing the behavior of the studied soil-pile system when analyzed using the LPILE® software in comparison with experimental data. When compared with the p - y curves obtained for the same soil in a system of small diameter piles, those obtained in this study corroborated the premise pointed out by several studies that the use of curves obtained in different systems leads to large errors in predicting behavior, in this case, those obtained from small diameter piles overestimated the soil stiffness for the studied system. The results obtained demonstrate how inclinometer instrumentation, which is low cost and relatively simple to implement, can contribute to predicting the behavior of laterally loaded piles.

KEYWORDS: p - y curves, Inclinometer, Residual soil, Lateral loading.

1 INTRODUÇÃO

A análise e projeto de estacas carregadas lateralmente dependem intrinsecamente da adequada compreensão do comportamento do sistema solo-estaca, compreensão esta que continua sendo um desafio atual e relevante para a engenharia geotécnica. O método p - y pode ser considerado como o que melhor

consegue simular o comportamento real do sistema estaca-solo para fundações carregadas transversalmente, sendo comumente utilizado neste tipo de projeto. No entanto, a qualidade das análises depende do conhecimento do comportamento do sistema a partir de dados experimentais, isto porque determinada curva p - y representa de forma muito particular o comportamento do sistema para o qual foi elaborada. Diversos trabalhos (O'NEILL; DUNNAVANT, 1984; DUNNAVANT; O'NEILL, 1985; JUIRNARONGRIT; ASHFORD, 2005; HEARN; EDGERS, 2010; LIU et al., 2016; VELARDE, 2016; WANG; ZHANG; DENG, 2018; WANG; BRIAUD, 2021) apontam que o uso de curvas p - y obtidas em sistemas distintos daqueles para os quais pretende-se aplicá-las, seja em geometria dos elementos ou em tipo de solos, conduzem a grandes erros na previsão do comportamento.

O método de análise com uso de curvas p - y é comumente atribuído à Matlock (1970) e à Reese et al (1969; 1974; 1975) que resolveram a equação que governa o problema de uma estaca carregada lateralmente, o qual é, por essência, o método do coeficiente de reação horizontal de Winkler (1867), no qual as molas lineares de Winkler são substituídas por molas não lineares, levando em conta, assim, o comportamento não linear do solo. Estas analogias parte da premissa de que a reação do solo p em qualquer ponto ao longo da estaca é assumida como relativa ao deslocamento y no mesmo ponto (BORN, 2019). No método p - y o comportamento de uma estaca carregada lateralmente pode ser matematicamente representado, considerando-se as limitações inerentes ao processo matemático e o comportamento real do sistema estaca-solo, por equações diferenciais, conforme ilustrado de forma genérica na Figura 1. As sucessivas curvas são matematicamente compatíveis, isto é, partindo do deslocamento y pode-se derivar resultados da rotação s , curvatura k , momento fletor M , força cortante SF , e reação do solo p (BORN, 2019).

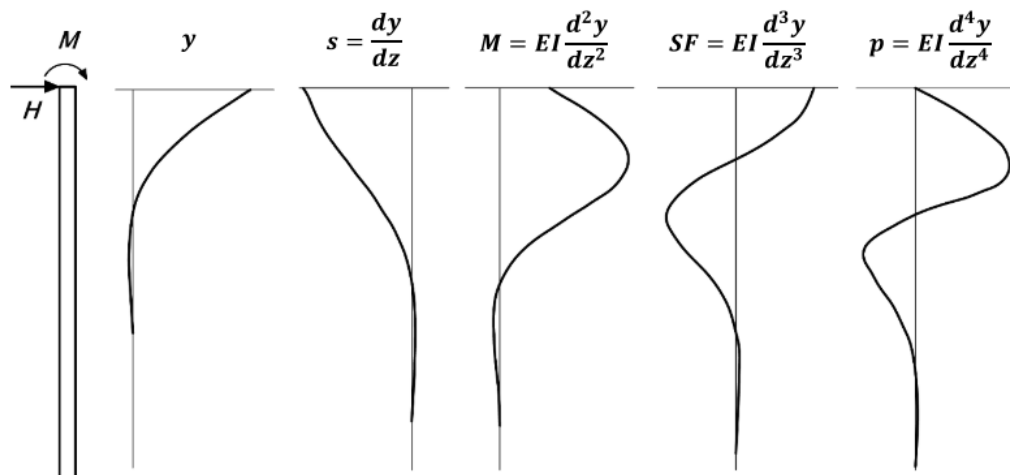


Figura 1. Forma genérica dos resultados derivados da solução completa (BORN, 2019)

Wang e Briaud (2021) destacam que o problema de uma estaca carregada lateralmente está sob investigação há algum tempo, e várias curvas p - y foram propostas, inclusive por Reese (1958, 1975), Matlock (1970), dentre outros. No entanto, as atuais curvas p - y mais aceitas foram desenvolvidas há cerca de 60 anos com base em testes de carga lateral em estacas que variavam de 0,3 a 0,6 m de diâmetro. Os diâmetros atuais das estacas podem atingir 4 m ou mais. Em seu estudo, os autores levantam uma questão muito importante no projeto de fundações submetidas a cargas laterais: “quão bem as atuais curvas p - y preveem o comportamento de estacas de grande diâmetro submetidas a carregamento lateral monotônico?”

São notórias as lacunas sobre o conhecimento real do comportamento dos mais diversos sistemas estaca-solo submetidos a carregamento lateral, que podem ser expressos pelas respectivas curvas p - y , elementos fundamentais para a elaboração de projetos de fundações seguros e eficientes. Em se tratando de solos residuais as lacunas são ainda maiores, uma vez que a grande maioria dos estudos que propuseram metodologias para criação de curvas p - y foram realizados em solos sedimentares, e ainda não há uma recomendação normativa que apresente metodologias específicas para solos residuais.

Neste contexto, o uso de inclinômetro para monitoramento de deslocamentos laterais ao longo da profundidade de uma estaca carregada lateralmente é uma alternativa bastante promissora e eficiente para a obtenção de curvas p - y . Faro (2014) frisa que o uso de um inclinômetro para medição dos deslocamentos horizontais em estacas é um processo pioneiro e inovador. O trabalho de Fellenius (1972) é um dos primeiros

a propor o uso de medições com inclinômetro para obtenção dos momentos fletores de uma estaca submetida a carregamentos. O autor apresenta os princípios de funcionamento de um inclinômetro e como as medições feitas com este, destacando que a obtenção dos esforços internos em uma estaca a partir de testes in loco podem contribuir com a melhoria do grau de segurança na previsão do comportamento das fundações.

Uma das primeiras formulações para tratamento dos dados obtidos com inclinômetro são apresentados por Brown; Hidden e Zhang (1994), onde os autores propõem um método de derivação de curvas $p-y$ a partir de dados simples de inclinômetros usando uma técnica de regressão de mínimos quadrados, fornecendo uma espécie de calibração de curvas $p-y$, cujo objetivo foi permitir uma melhoria substancial no banco de dados de provas de carga a partir dos quais as curvas empíricas usadas no projeto são baseadas. Lin et al. (2005) propuseram modelo analítico baseado na conservação de energia do sistema estaca-solo, utilizando uma função em série de Fourier. Os autores estudaram três casos de prova de carga lateral em escala real para verificar a viabilidade da metodologia desenvolvida. Chiou, Chen e Chen (2008) propuseram um modelo regressivo para deduzir os esforços internos e as reações do solo de uma estaca submetida a prova de carga lateral a partir de dados de medições de inclinômetros. Este modelo simula a distribuição dos momentos fletores da estaca utilizando uma função composta cuja parte superior é modelada por um polinômio e a parte inferior é modelada pela função característica de uma solução analítica para uma estaca semi-infinita sob hipótese de Winkler. Wang e Briaud (2021) estudaram uma série de 46 estacas com diâmetros maiores que 1,5 m (até 3,0 m) e 64 estacas com diâmetros menores que 1,5 m tanto em areia quanto em argila. As previsões de carga e deslocamento foram realizadas usando curvas $p-y$ comumente utilizadas e o software LPILE.

O objetivo deste trabalho é propor curvas $p-y$ do solo para um sistema de estaca de grande diâmetro carregada lateralmente em um solo residual, a partir da análise dos dados experimentais de uma prova de carga lateral no qual foram monitorados os deslocamentos laterais da estaca ao longo da profundidade com uso de uma sonda inclinômetro. As análises foram realizadas considerando as formulações e hipóteses clássicas do método $p-y$.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram analisados os dados experimentais obtidos na pesquisa de mestrado de Reginato (2019), que realizou provas de carga horizontais em estacas de concreto armado em tamanho real, com a finalidade de verificar o comportamento carga versus deflexão, para estacas com comportamento rígido e com comportamento flexível, assentes em solo coesivo friccional (campo experimental de Passo Fundo - RS). Reginato (2019) monitorou, no topo da estaca, as cargas aplicadas, por meio de célula de carga, e os deslocamentos laterais, por meio de transdutores lineares de deslocamentos (LVDT), e, ao longo da profundidade, os deslocamentos laterais, por meio de inclinômetro tipo torpedo. Neste trabalho foram analisados os dados experimentais de uma das estacas com comportamento rígido (apresentando giro em torno de um ponto ao longo do fuste) ensaiadas no citado estudo, qual seja a Estaca B, ilustrada na Figura 2. A referida estaca possui diâmetro de 1,00 m e comprimento total de 5,00 m, dos quais 4,64 m embutidos em solo. Na Figura 3 são apresentados os resultados obtidos por Reginato (2019) para a referida estaca analisada.

As estacas analisadas foram construídas no campo experimental pertencente ao Centro de Tecnologia (CETEC) da Faculdade de Engenharia e Arquitetura (FEAR) da Universidade de Passo Fundo (UPF), localizado no Campus de Passo Fundo, junto à Rodovia Federal BR-285, na Cidade de Passo Fundo, região norte do estado do Rio Grande do Sul. O solo característico do campo experimental é do tipo residual homogêneo, oriundo da composição de rochas basálticas (ígneas) e de arenitos (sedimentar). Lopes Junior e Thomé (2005) caracterizaram o solo do campo por meio de ensaios de sondagem e caracterização táctil visual, revelando um perfil homogêneo, com baixo índice de resistência nos primeiros 4 metros, com N_{SPT} da ordem de 5. A partir de 4,00 metros de profundidade o índice de penetração médio no ensaio SPT é da ordem de 12, com valores mínimo de N_{SPT} de 8 e máximo de 20. As amostras coletadas no ensaio revelaram total predominância de material argiloso.

As análises aqui apresentadas foram realizadas a partir da hipótese da teoria de viga clássica (viga de Euler-Bernoulli), na qual a reação do solo é obtida a partir da quarta derivada do deslocamento lateral. Conhecendo a reação do solo e o respectivo deslocamento lateral, em cada profundidade e passo de carga, é possível propor as curvas $p-y$ para o sistema analisado. Estas análises foram realizadas no software *Mathcad*®, com uso de funções próprias de ajuste por mínimos quadrados, em quatro processos de derivação, em cada um dos quais a estaca foi analisada por segmentos, com comprimento de aproximadamente um terço do

comprimento total dela, de modo que os resultados representassem com maior fidedignidade possível o comportamento da estaca em cada ponto ao longo da profundidade. Ao final de cada processo de derivação, os resultados obtidos em cada ponto foram compilados e ajustados para obtenção de uma representação global do comportamento, para posterior uso no processo seguinte. A partir da análise do monitoramento realizado nos ensaios de Reginato (2019), para o deslocamento lateral e carregamento, para cada incremento de carga, são propostas as curvas p - y para o solo do sistema.

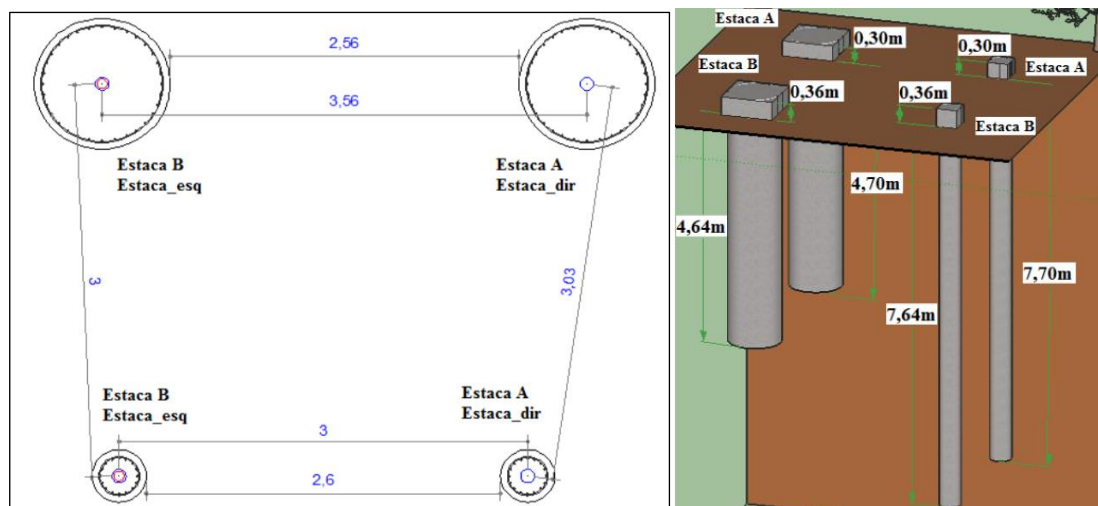


Figura 2. Vistas superior e esquemática em elevação das estacas ensaiadas por Reginato (2019)

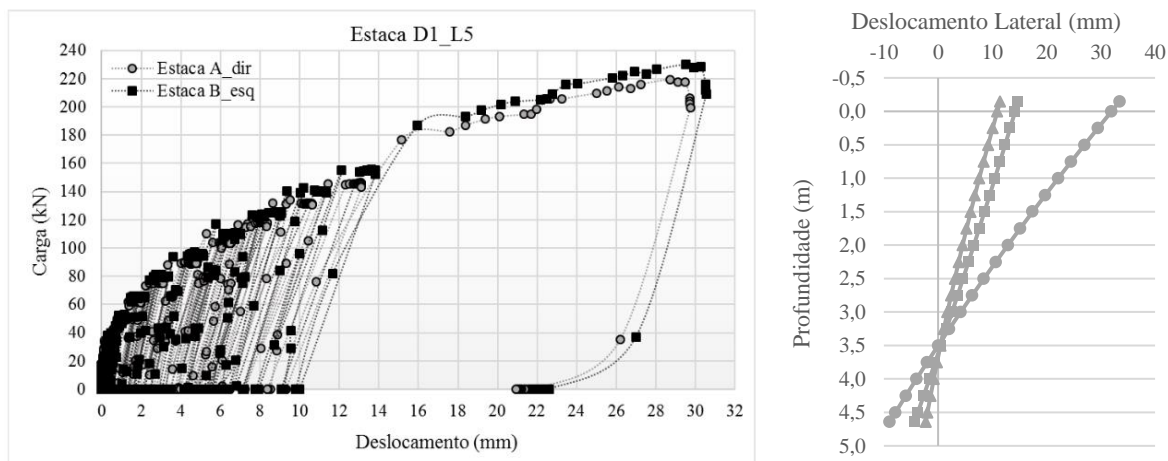


Figura 3. Curva Carga X Deslocamento lateral das estacas $D=1,00$ m realizadas por Reginato (2019) e deslocamentos laterais experimentais na estaca B para os incrementos de carga de 135 kN, 150 kN e 220 kN, respectivamente

O monitoramento dos deslocamentos laterais foi realizado por Reginato (2019) por meio de lançamento de inclinômetro tipo torpedo no interior dos tubos posicionados nos seus centros. O aparelho utilizado é da marca Geokon, modelo GK - 604D, composto por quatro componentes: uma sonda inclinômetro (sensor torpedo); uma unidade de leitura, para leitura e armazenamento dos dados; um módulo remoto, na qual contém um cabo (com marcações a cada 0,5 metros) conectado diretamente na sonda (a unidade de leitura e o módulo remoto se comunicam de forma wireless por bluetooth); e uma polia, responsável pelo travamento do cabo, fundamental na execução das medições.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir dos dados experimentais de uma das estacas com comportamento rígido ensaiadas por Reginato (2019) foi realizada a análise analítica considerando a hipótese da teoria de viga clássica, conforme descrito

no item anterior. Na Figura 4 são apresentados os valores dos resultados de momentos fletores, esforços cortantes e reação no solo calculados neste estudo. Para otimização dos trabalhos, foram analisados os resultados para os incrementos de carga de 220 kN (carga máxima da prova de carga), 150 kN e 135 kN, apresentados nas figuras, respectivamente, da direita para a esquerda, nesta ordem (para momento e cortante, e inversamente para a reação do solo). É possível observar compatibilidade da configuração destes em termos de comportamento da estaca, com destaque para a compatibilidade de localização em profundidade do momento fletor máximo com o esforço cortante nulo, e do ponto de giro da estaca (deslocamento lateral nulo) com a reação do solo nula. De posse dos resultados da reação mobilizada no solo, foram plotadas as curvas $p-y$ para o sistema, que são apresentadas na Figura 5.

Foi realizada uma análise comparativa dos resultados obtidos com os estimados pelo modelo numérico elaborado no software *LPile*, no qual o solo foi representado pelas curvas $p-y$ obtidas por Born (2019) normalizadas para o diâmetro da estaca em análise (1,00 m). A partir deste modelo numérico, foram extraídas as curvas $p-y$ teóricas do sistema estaca-solo do experimento de Reginato (2019), que são comparadas com as obtidas nos cálculos a partir dos dados experimentais de campo. Na Figura 6 são plotadas as curvas $p-y$ proposta neste estudo e as curvas extraídas do modelo no *LPile* com o solo sendo representado pelos dados do estudo de Born (2019). É possível observar que as curvas propostas divergem consideravelmente das extraídas do modelo numérico, sendo da ordem de 50% destes.

Ainda visando comparar os resultados da presente pesquisa com os estimados pelo comportamento do sistema a partir do solo representado pelas curvas $p-y$ de Born (2019), realizaram-se duas análises do sistema estaca-solo de Reginato (2019) no *LPile* representando o solo com as curvas $p-y$ aqui propostas. Na primeira análise, o solo foi modelado em camadas conforme as profundidades para as quais as curvas $p-y$ propostas são elaboradas, conforme Figura 5. Os resultados desta primeira análise comparativa são apresentados na Figura 7.

É possível observar que os resultados do modelo numérico no qual o solo é representado pelas curvas $p-y$ propostas neste estudo convergem consideravelmente melhor com os dados experimentais do que os resultados do modelo em que o solo é representado pelas curvas $p-y$ de Born (2019). Uma hipótese que poderia justificar esta divergência maior é o fato de que o estudo de Born (2019) analisou estacas flexíveis e com diâmetros da ordem de 5 (cinco) vezes menores que os estudados por Reginato (2019), fator que acarreta distintas mobilizações do solo, tanto em profundidade quanto em torno do fuste da estaca (no sentido transversal da mesma). É importante destacar que, na análise cujos resultados são apresentados na Figura 7, a carga máxima obtida para o estudo com as curvas proposta neste trabalho foi de 150 kN devido esta ser a máxima que o software conseguiu calcular, em decorrência da baixa rigidez de algumas curvas $p-y$ (as das profundidades maiores) e impossibilidade de resolução para cargas superiores.

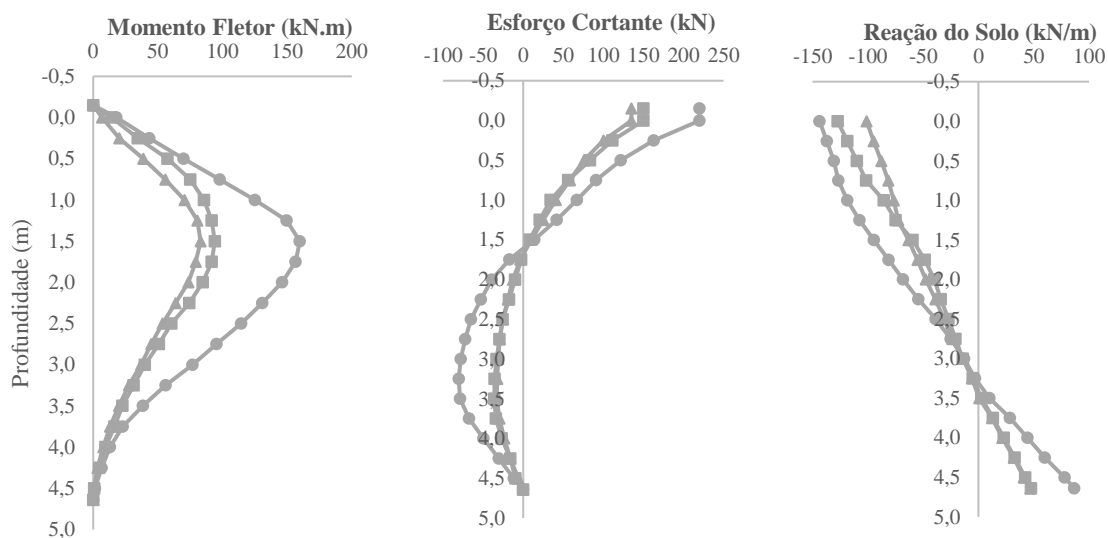


Figura 4. Momentos fletores, esforço cortante e reação do solo calculados para os incrementos de carga de 135 kN, 150 kN e 220 kN, respectivamente

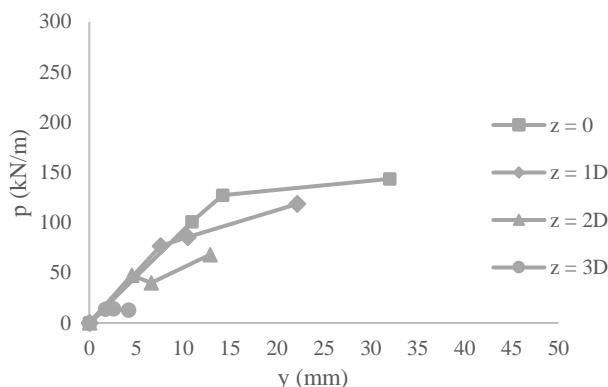


Figura 5. Curvas p - y propostas a partir das análises realizadas com os dados experimentais de Reginato (2019)

Já na segunda análise, o solo foi modelado em todo o seu perfil pela curva p - y do topo, representada na Figura 5 pela curva “ $z=0$ ”. Esta opção por utilizar somente a curva de topo se justificou pelo interesse em avaliar a convergência do modelo numérico considerando uma relação p - y que conseguiu mobilizar uma maior carga no solo. Aqui é importante lembrar que na prova de carga realizada por Reginato (2019) os deslocamentos máximos obtidos não conseguiram mobilizar toda resistência do solo. Sabe-se que em estacas com comportamento rígido a mobilização do solo tende a ser menor em profundidade que no topo. Assim, considerou-se nesta opção de modelagem da segunda análise a hipótese de que as curvas p - y das maiores profundidades representam o solo com maior divergência do comportamento real.

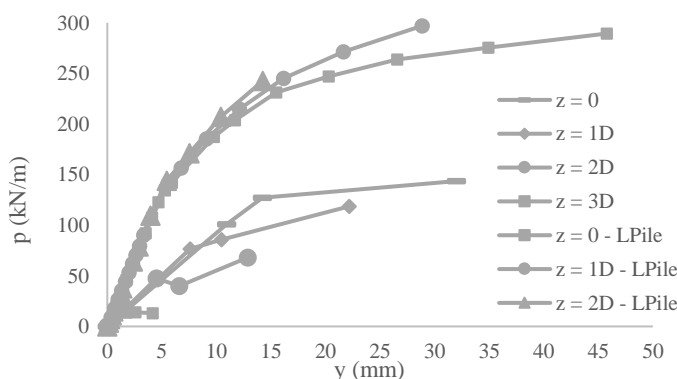


Figura 6. Curvas p - y propostas a partir das análises realizadas X curvas p - y obtidas a partir da análise no $LPile$ com dados de Born (2019)

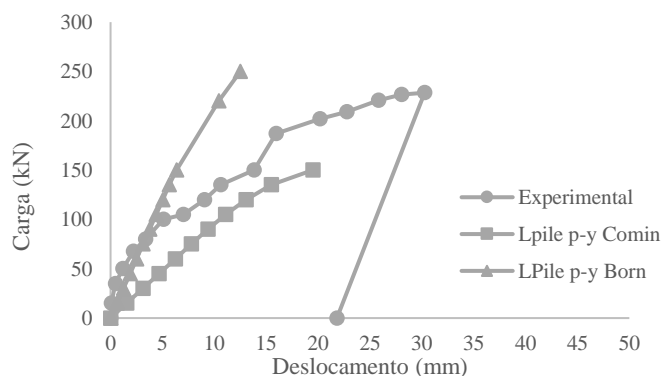


Figura 7. Análise comparativa da curva Carga X Deslocamento entre os modelos numéricos e experimental, com uso das curvas p - y propostas em cada profundidade

Os resultados da segunda análise são apresentados na Figura 8. Nesta, o modelo numérico conseguiu analisar o sistema para cargas superiores às alcançadas na primeira análise, conforme pode-se observar nos dados. Observa-se também que a previsão do comportamento carga X deslocamento com as curvas aqui propostas apresentaram resultados sensivelmente melhores que os anteriores em relação a convergência com os experimentais, especialmente para as cargas maiores (a partir de 150 kN).

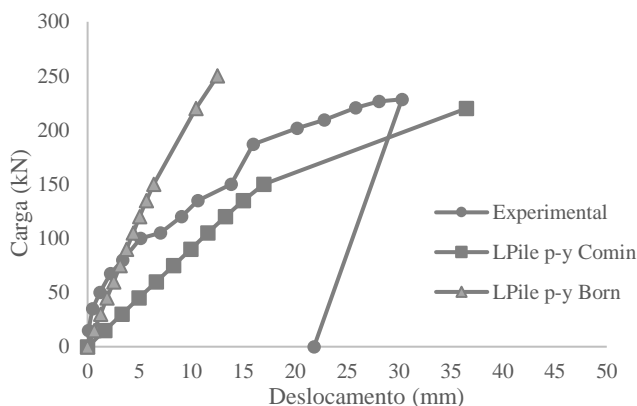


Figura 8. Análise comparativa da curva Carga X Deslocamento entre os modelos numéricos e experimental, com uso da curva p - y do topo em topo perfil do solo

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através das análises realizadas foi possível reproduzir matematicamente o comportamento de uma das estacas rígidas submetidas a prova de carga lateral por Reginato (2019), com razoável aproximação dos resultados estimados na análise numérica realizada por meio do software *LPile* com os experimentais, bem como foi possível propor curvas p - y para o solo no sistema estudado.

No entanto, os resultados das curvas p - y ficaram limitados aos deslocamentos obtidos nas provas de carga, que podem ser considerados pequenos para um sistema de estaca carregada lateralmente. Além disso, os resultados da relação carga mobilizada no solo X deslocamento divergiram dos valores obtidos por Born (2019) para o mesmo solo, na ordem de 50% dos valores do referido autor.

Na análise comparativa entre os resultados dos modelos numéricos no *LPile* com os dados experimentais em termos de carga x deslocamento lateral, os que consideraram o solo a partir das curvas p - y propostas neste projeto apresentaram convergência com o experimental muito melhor que os do modelo que consideram o solo a partir das curvas de Born (2019). Estes dados sugerem que as hipóteses consideradas nas análises podem ser válidas e corroboram os apontamentos de diversos estudos sobre a obtenção de previsões de comportamento com consideráveis erros quando do uso de curvas p - y obtidas em sistemas distintos daqueles que se está calculando.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Born, R. B. *Análise Experimental do Comportamento de Estacas Carregadas Lateralmente em um Solo Residual*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2019.
- Brown, D. A.; Hidden, S. A.; Zhang, S. Determination of P-Y Curves Using Inclinometer Data. *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, v. 17, n. 2, p. 150–158, 1994.
- Chiou, J.-S.; Chen, C.-H.; Chen, Y.-C. Deducing pile responses and soil reactions from inclinometer data of a lateral load test. *SOILS AND FOUNDATIONS - Japanese Geotechnical Society*, v. 48, n. 5, p. 609–620, out. 2008.
- Dunnivant, T. W.; O'Neill, M. W. *Performance, analysis, and interpretation of a lateral load test of a 72-inch-diameter bored pile in overconsolidated clay*. Houston: University of Houston, Dept. of Civil Engineering, 1985.

- Faro, V. P. *Carregamento Lateral em Fundações Profundas Associadas a Solos Tratados: Concepção, Provas de Carga e Diretrizes de Projeto*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.
- Fellenius, B. H. Bending of Piles Determined by Inclinomater Measurments. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 9, p. 25–32, 1972.
- Hearn, E. N.; Edgers, L. *Finite Element Analysis of an Offshore Wind Turbine Monopile*. GeoFlorida 2010: Advances in Analysis, Modeling & Design. Anais...2010.
- Juirnarongrit, T.; Ashford, S. A. *Effect of pile diameter on the modulus of sub-grade reaction*. Univesity of California. San Diego. 2005.
- Lin, S. S. et al. Lateral performance of piles evaluated via inclinometer data. *Computers and Geotechnics*, v. 32, n. 6, p. 411–421, set. 2005.
- Liu, R. et al. Behavior of Monopile Foundations for Offshore Wind Farms in Sand. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, v. 142, n. 1, jan. 2016.
- Lopes Junior, L. S.; Thomé, A. *Provas de Carga Estática em Estacas Escavadas de Pequeno Diâmetro, Executadas na Região de Passo Fundo, Rio Grande do Sul*. In: Seminário de Engenharia Geotécnica do Rio Grande do Sul (GEORS 2005), Passo Fundo/RS, 2005.
- Matlock, H. *Correlation For Design of Laterally Loaded Piles in Soft Clay*. Offshore Technology Conference. Anais...1970.
- O'Neill, M. W.; Dunnavant, T. W. *A Study of the Effects of Scale, Velocity, and Cyclic Degradability on Laterally Loaded Single Piles in Overconsolidated Clay*. University of Houston, Department of Civil Engineering, 1984.
- Reese, L. C. (1958). "Discussion on soil modulus for laterally loaded piles." *Trans. ASCE*, 123, 1071-1074.
- Reese, L. C.; CoX, W. R. Soil Behavior from Analysis of Tests of Uninstrumented Piles Under Lateral Loading. *ASTM STP 444*, p. 160–176, 1969.
- Reese, L. C.; Cox, W. R.; Koop, F. D. *Analysis of Laterally Loaded Piles in Sand*. Offshore Technology Conference. Anais...Dallas: 1974.
- Reese, L. C.; Cox, W. R.; Koop, F. D. *Field Testing and Analysis of Laterally Loaded Piles om Stiff Clay*. Offshore Technology Conference. Anais...Dallas: 1975.
- Reginato, N. Da C. *Concepção e Análise de Fundações Profundas Submetidas ao Carregamento Lateral em Solo Coesivo Friccional*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2019.
- Velarde, J. *Design of Monopile Foundations to Support the DTU 10 MW Offshore Wind Turbine*. 2016. (M. Sc. Thesis) - Department of Marine Technology – Group of Marine Structures, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.
- Wang, A.; Zhang, D.; Deng, Y. Lateral response of single piles in cement-improved soil: numerical and theoretical investigation. *Computers and Geotechnics*, v. 102, p. 164–178, 1 out. 2018.
- Wang, Y.-C.; Briaud, J.-L. Large Diameter Piles Under Lateral Loading-A Database Study. *ISSMGE International Journal of Geoengeering Case Histories* ©, v. 6, n. 2, p. 41–66, 2021.
- Winkler, E. *Die Lehre von der Elasticitaet und Festigkeit*. Praga: 1867.