

Modelagem numérica de prova de carga - Estudo de caso em obra geotécnica

Amanda Letícia Rocha Reis

Engenheira Civil, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Brasil, amanda-reis@ufmg.br

Talita Caroline Miranda

Professora, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Brasil, talita@etg.ufmg.br

Laísia Teresa de Mendonça

Graduanda, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Brasil, laislateresa@hotmail.com

RESUMO: O presente artigo analisa, em termos do comportamento carga-recalque, os dados de fundação de uma torre de transmissão de energia elétrica. Trata-se de um sistema de fundação composto por 8 estacas metálicas cravadas, para as quais realizou-se uma sondagem à percussão SPT e uma prova de carga estática. Objetiva-se criar modelos geométrico, geológico-geomecânico e numérico para uma estaca, bem como validar tais modelos estimados conforme informações de as built. Os parâmetros geotécnicos iniciais utilizados na simulação numérica foram estimados através de correlações empíricas a partir de valores de NSPT. Os dados foram retroanalisados por meio de modelagem numérica utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF), através do software Plaxis 2D Foundation, para fins de simulação da prova de carga, objetivando-se avaliar a ferramenta numérica. Na modelagem do comportamento tensão-deformação do solo foi utilizado o modelo constitutivo de Mohr-Coulomb. Os resultados dessas simulações numéricas foram comparados com os resultados experimentais, medidos na prova de carga. Definiu-se os parâmetros geotécnicos do solo a partir da retroanálise por meio da modelagem numérica para serem empregados em futuras simulações no maciço. Conclui-se que a previsão do comportamento da estaca modelada no software, em comparação ao resultado experimental, pode ser considerada satisfatória no trecho da curva onde há comportamento no regime elástico. Por fim, apresenta-se o passo a passo para futuros trabalhos em BIM3D para a modelagem de todo o conjunto de estacas da fundação.

PALAVRAS-CHAVE: BIM, Modelagem Numérica, Elementos Finitos.

ABSTRACT: This article analyzes, in terms of load-settlement, the foundation data of an electric power transmission tower. It is a foundation system composed of 8 driven metal piles, for which a SPT percussion sounding and a static load test were carried out. The objective is to create geometric, geological-geomechanical and numerical models for a pile, as well as to validate such estimated models according to as built information. The initial geotechnical parameters used in the numerical simulation were estimated through empirical correlations from NSPT values. The data were analyzed back through numerical modeling using the Finite Element Method (FEM), through the Plaxis 2D Foundation software, for the purpose of simulating the load test, aiming to evaluate the numerical tool. In the modeling of soil stress-strain behavior, the Mohr-Coulomb constitutive model was used. The results of these numerical simulations were compared with the experimental results, measured in the load test. The geotechnical parameters of the soil were defined from the retroanalysis through numerical modeling to be used in future simulations in the massif. It is concluded that the prediction of the behavior of the pile modeled in the software, compared to the experimental result, can be considered satisfactory in the stretch of the curve where there is behavior in the elastic regime. Finally, a step-by-step guide for future works in BIM3D is presented for the modeling of the entire set of foundation piles.

KEYWORDS: BIM, Numerical Modeling, Finite Elements.

1 INTRODUÇÃO

Para estimar a capacidade de suporte do maciço, é de suma importância que seja realizado o reconhecimento do solo na forma de investigação geotécnica, o mais detalhado possível. Neste contexto, as investigações geotécnicas, seja em campo ou em laboratório, têm como função primordial conhecer as características e os comportamentos dos solos. O método mais usual de investigação, principalmente na realidade da geotecnia brasileira, é a sondagem a percussão, executado conforme NBR 6484:2020. O processo de investigação mede um índice de resistência à cravação, chamado NSPT, além de coletar amostras dos solos desde a superfície até a profundidade investigada, para que se possa verificar de que tipo realmente se trata. Por meio do NSPT estima-se através de correlações empíricas a resistência de cada material coletado. Dependendo da área de construção da obra, da complexidade do tipo de solo e o da magnitude da edificação, o número de sondagens do tipo SPT - Standart Penetration Test aumenta e é preciso organizar e gerenciar as informações de investigação de forma adequada.

O trabalho apresentado por Zhang et al., (2017) avança neste sentido e mostra um fluxo de trabalho e operacional para abordar a informatização de todo o processo geotécnico de investigação, utilizado no desenvolvimento de um software em BIM (Building Information Modeling), projetado para eficiência e precisão de investigações geotécnicas, que permitiu a construção de um modelo geotécnico BIM 3D com banco de dados integrado, constantemente atualizado. O resultado observado foi uma melhor eficiência na análise e integração das informações, redução de erros, melhores conversões e abstração de dados geotécnicos, pois melhoraram significativamente a interpretação e precisão das informações, aplicadas em um estudo de caso de uma barragem.

Quanto às fundações de uma edificação, podem ser classificadas como profundas ou rasas, diretas ou indiretas, podendo ser executadas de diversas formas e com diversos tipos de materiais. O projeto geotécnico das fundações depende das informações de investigação realizadas, pois é através destas informações, aplicadas a métodos de cálculo existentes, que é possível determinar a capacidade de carga do elemento de uma fundação. Em um momento posterior, no caso de fundações profundas, a fim de testar a veracidade das informações de projeto, verificando se estes atendem à necessidade requerida, as estacas devem passar por um teste chamado “prova de carga”. Segundo NBR 6489:2019, este método de ensaio possibilita traçar a curva tensão-deslocamento e estimar parâmetros de deformabilidade e de resistência.

As informações de investigação somadas as informações de prova de carga de um elemento de fundação tornam possível, por meio de retroanálise, reavaliar os parâmetros adotados de capacidade de carga de ruptura de projeto de uma fundação, especialmente com o uso de método de modelagem numérica por meio de Elementos Finitos (FEM).

2 MODELAGEM NUMÉRICA

Este trabalho analisa e modela uma única estaca de um conjunto da fundação de Torre de Transmissão de Energia Elétrica. A Tabela 1 resume as condições de projeto da estaca.

Tabela 1. Resumo das Características de Projeto da Estaca.

Tipo	Diâmetro (m)	Comprimento Total (m)	Módulo Elástico (kN/m ²)	Peso Específico (kN/m ³)	Coefficiente de Poisson	Carga de Trabalho (kN)
Estaca Metálica Cravada	0,80	41,0	2,1 x 10 ⁸	76,5	0,3	1259

A sondagem SPT foi realizada no local de instalação da torre e indica uma camada de argila orgânica mole com 28 m de profundidade com valores de NSPT variando de 0 a 4. Os solos subsequentes identificados são: areia siltosa medianamente compacta, argila silto-arenosa, areia siltosa muito compacta e argila arenosa, conforme apresentado na Figura 1.

Para a determinação dos parâmetros de resistência e deformabilidade do solo, como Módulo de Elasticidade, Peso Específico Natural e Saturado, coeficiente de Poisson, foram utilizadas as correlações empíricas propostas por Joppert (2007), Bowles (1997), Godoy (1972) e Alonso (2019).

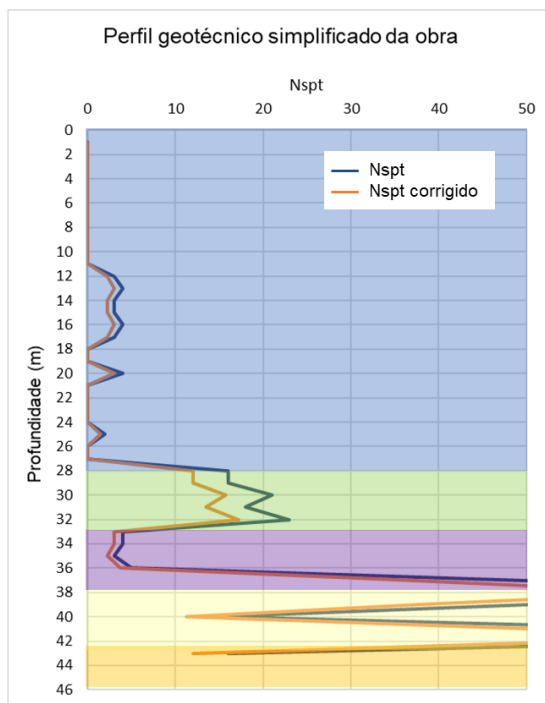


Figura 1. Valores de NSPT por profundidade - Sondagem SPT.

O ângulo de atrito foi estimado através do NSPT pelas equações de Godoy (1) e de Teixeira (2).

$$\phi = 28^\circ + 0,4N_{SPT} \quad (1)$$

$$\phi = \sqrt{20N_{SPT}} + 15^\circ \quad (2)$$

O fenômeno da dilatância na mecânica dos solos refere-se ao processo de expansão da massa de solo provocada por tensões cisalhantes atuantes. Segundo Bolton (1986), para areias em quartzo, o ângulo de dilatância (ψ) pode ser estimado pela seguinte expressão:

$$\psi = \phi - 30^\circ \text{ se } \phi > 30^\circ \quad (3)$$

$$\psi = 0 \text{ se } \phi < 30^\circ \quad (4)$$

A Tabela 2 apresenta os parâmetros do solo considerados, inicialmente, como inputs para o software de análise numérica.

Tabela 2. Resumo dos parâmetros do solo – estimativa inicial.

Solo	Consistência ⁽¹⁾	$N_{SPT, \text{médio}}$	ϕ ($^\circ$)	E_s (kN/m ²)	γ_{nat} (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	$\nu^{(6)}$	$\psi^{(5)}$ ($^\circ$)	$c^{(6)}$ (kPa)
Argila orgânica	Muito mole	1	22 ⁽⁷⁾	1x10 ³⁽²⁾	11 ⁽²⁾	11 ⁽²⁾	0,45	0	5
Areia siltosa	Medianamente compacta	14	32 ⁽⁷⁾	5x10 ⁴⁽²⁾	18 ⁽⁴⁾	20 ⁽⁴⁾	0,2	2	0
Argila silto-arenosa	Mole	3	26 ⁽⁷⁾	2,5x10 ³⁽²⁾	18 ⁽²⁾	19 ⁽²⁾	0,45	0	15
Areia siltosa	Muito compacta	43	40 ⁽⁷⁾	9 x10 ⁴⁽³⁾	21 ⁽⁸⁾	21 ⁽⁴⁾	0,4	10	0
Argila arenosa	Rija	12	28 ⁽⁷⁾	2,5x10 ³⁽³⁾	19 ⁽²⁾	19 ⁽²⁾	0,45	0	50

(1) Referência: ABNT NBR 6484 (2020);

(2) Referência: Joppert (2007);

- (3) Referência: Teixeira e Godoy (1996);
- (4) Valor médio obtido pelas referências: Joppert (2007) e Godoy (1972);
- (5) Referência: Bolton (1986);
- (6) Referência: Godoy (1972);
- (7) Valor médio obtido pelas referências: Joppert (2007), Wolff (1989), Godoy (1972) e Teixeira (1996);
- (8) Valor médio obtido pelas referências: Joppert (2007), Godoy (1972) e Bowles (1997);

A estaca em análise é cravada em direção inclinada 1(H):4(V). Em uma modelagem geométrica, as dimensões em geral devem assegurar que o comportamento do objeto em estudo não seja influenciado pelas restrições dos contornos do modelo, dessa forma, extrapolou-se o resultado da sondagem SPT até 65 m de profundidade.

Para visualização do sistema de fundação, solo e estaca, foi gerado o modelo geométrico com o auxílio do software Autodesk AutoCAD 2021. Para isso, primeiramente foram obtidas as curvas de nível do terreno no qual localiza-se a torre de transmissão e onde foi executada a sondagem SPT. As curvas de nível foram obtidas por meio de shapefile do banco de dados do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) e sobrepostas no Google Earth Pro. Em seguida, realizou-se corte no terreno, através do qual, por meio de compatibilização com os litotipos identificados na sondagem SPT, foi obtido o perfil estratigráfico do solo, conforme Figura 2

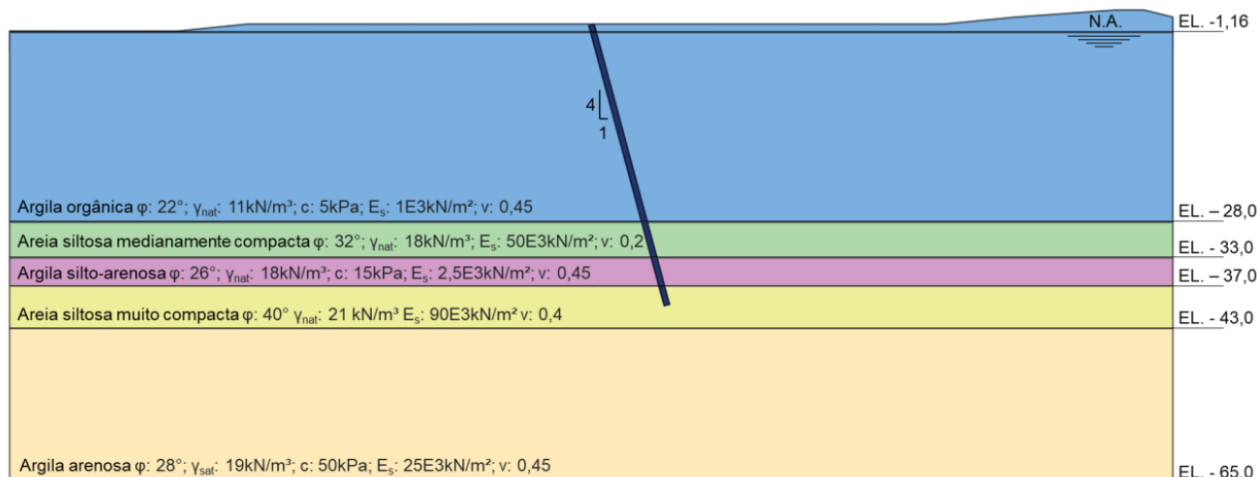


Figura 2. Modelo Geométrico – Perfil Estratigráfico.

Dentre as metodologias, destaca-se como uma das ferramentas de melhor desempenho na modelagem de fundações profundas, o método dos elementos finitos (FEM) na análise do comportamento tensão *versus* deformação. No FEM, a geometria submetida aos carregamentos e condições de contorno é subdividida em pequenas partes, denominadas de elementos, os quais passam a representar o domínio contínuo do problema. A divisão da geometria em pequenos elementos permite resolver um problema complexo, subdividindo-o em problemas mais simples, o que possibilita ao computador realizar com eficiência estas tarefas.

A obtenção de resultados numéricos confiáveis depende não somente das condições de interfaces adotadas, mas também do refinamento dos parâmetros utilizados na calibração do modelo. A discretização da malha de elementos finitos e a adequada definição das condições de contorno permitem a maior aproximação do modelo às condições reais, e a conformidade entre os resultados numérico e experimental pode ser mais bem representada após escolha adequada do modelo construtivo dos materiais.

A partir da discretização geométrica do modelo, com a utilização de *software* de análise numérica, são obtidas, a partir de equações matemáticas, resultados em termos de tensões, deformações e deslocamentos. O ensaio de prova de carga foi utilizado como modelo para calibração do modelo numérico.

2.1. Ensaio de Prova de Carga Estática

Neste trabalho, optou-se por utilizar os dados de carga aplicada e de deformação gerada na prova de carga durante o carregamento, desconsiderando a etapa de descarregamento.

2.2. Retroanálise dos Dados

Após a primeira análise com os dados geológico-geotécnicos estimados com base na literatura e correlações empíricas, executou-se um ajuste do modelo a fim de se obter uma curva carga *versus* recalque o mais próximo possível da obtida no ensaio *in situ*. Esse processo consistiu na alteração manual dos parâmetros do solo, *inputs* do *software*, de modo a estimar as características reais do terreno quanto ao seu comportamento de deslocamento.

Tabela 3. Resumo dos parâmetros do solo – resultados da retroanálise.

Solo	Consistência	ϕ (°)	E_s (kN/m ²)	γ_{nat} (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	ν	ψ (°)	c (kPa)
Argila orgânica	Muito mole	28	3×10^4	15	15	0,3	0	15
Areia siltosa	Medianamente compacta	34	7×10^4	18	20	0,35	4	0
Argila silto-arenosa	Mole	29	5×10^4	18	19	0,35	0	20
Areia siltosa	Muito compacta	44	1×10^5	22	22	0,4	14	0
Argila arenosa	Rija	33	4×10^4	19	19	0,4	0	50

Simulou-se o carregamento da estaca com aplicação da carga tendo direção inclinada. Foram consideradas 10 etapas de carregamento, com incremento de 30,2 tons em cada estágio. A Figura 3 e a Figura 4 ilustram, de forma exagerada, a deformação final obtida para o sistema de fundação ensaiada, solo-estaca, para a modelagem numérica.

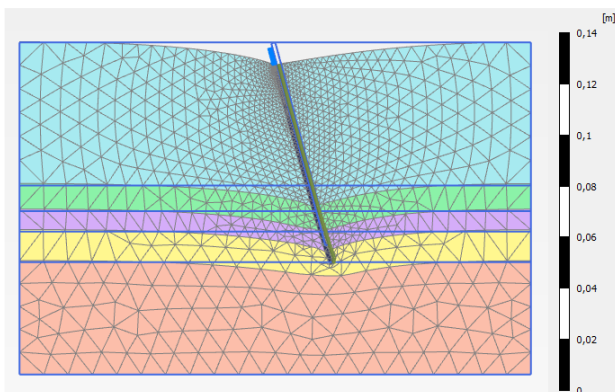


Figura 3. Deformação final do sistema solo-estaca

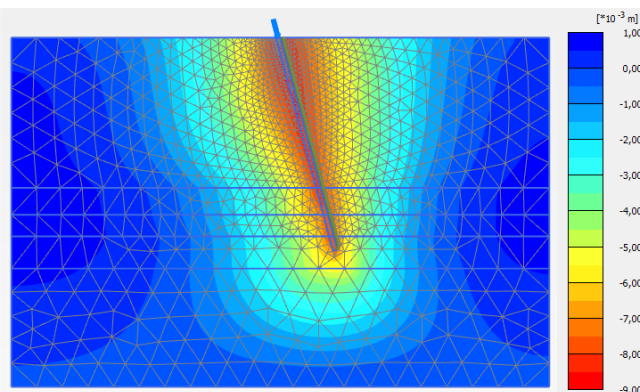


Figura 4. Modelagem numérica – Carga de 3020kN

2.3. MODELO NUMÉRICO

Segundo Cintra e Aoki (2010), a capacidade de carga do elemento de fundação por estaca se trata do valor da força correspondente à máxima resistência que o sistema pode oferecer ou do valor representativo da condição de ruptura do sistema, em termos geotécnicos.

A carga última (R) é atingida após mobilização total do sistema e corresponde a soma das parcelas de contribuição R_L e R_p , do atrito lateral e da resistência de ponta. Desta forma, a capacidade de carga das fundações profundas pode ser estimada a partir de formulações semiempíricas e confrontada com valores experimentais obtidos em provas de carga estáticas ou dinâmicas.

$$R = R_L + R_p \quad (5)$$

Os métodos semiempíricos mais utilizados pelos projetistas de fundações do Brasil são os métodos de Aoki e Velloso (1975), Décourt-Quaresma (1978) e Teixeira (1996), os quais foram adotados para fins de comparação neste trabalho. Foram obtidos os seguintes resultados para capacidade de carga da estaca em análise.

Tabela 4. Comparação entre capacidades de carga.

Capacidade de carga (kN)	Projeto (Prova de Carga)	Método semiempírico mais conservador	Média entre os métodos semiempíricos
	3015	3745	4301

2.4. ESTIMATIVA DOS RECALQUES

A aplicação de uma carga vertical na cabeça de uma estaca provocará dois tipos de deformações: encurtamento elástico da própria estaca, como peça estrutural submetida a compressão (ρ_e); e deformações verticais de compressão dos estratos de solo subjacentes à base da estaca, até o indeslocável (ρ_s). Considerando esses dois fatores, a cabeça da estaca sofrerá um recalque (ρ), ou um deslocamento total, vertical, para baixo, igual a:

$$\rho = \rho_e + \rho_s \quad (6)$$

A Tabela 5 apresenta a comparação entre os valores máximos de recalque obtidos pela prova de carga, pelo método analítico e pelo modelo numérico.

Tabela 5. Comparação entre recalques.

Recalque (mm)	Prova de carga	Estimado por método analítico	Modelo Numérico (retroanalisado)
	27	29	9

2.5. COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS

Como dito anteriormente, a retroanálise dos parâmetros geotécnicos do solo é baseada na curva carga *versus* deslocamento obtida no ensaio de prova de carga. A Figura 5 apresenta gráfico comparativo entre as curvas resultantes do ensaio *in situ* e da retroanálise dos parâmetros.

A curva carga-recalque obtida na modelagem numérica representa, de uma forma geral, comportamento mais rígido para os solos. Nota-se uma boa compatibilidade entre as curvas para os carregamentos iniciais, sobretudo até a carga de trabalho estabelecida em projeto e o máximo suportado pela estaca como elemento estrutural, igual a 1259 kN.

A *Building Smart*, organização mundial de desenvolvedoras de tecnologia para o setor da construção, define BIM como uma representação digital das características físicas e funcionais de uma edificação, que permite integrar de forma sistêmica e transversal as várias fases do ciclo de vida de uma obra com o gerenciamento de todas as informações disponíveis em projeto, formando uma base confiável para decisões durante o seu ciclo de vida, definido como existente desde a primeira concepção até à demolição.

A grande vantagem do uso do BIM no contexto da geotecnia está na interoperabilidade entre modelos, permitindo a atualização de todos automaticamente, como por exemplo, a partir da inclusão de informações extras de investigação geotécnica e/ou de informações de instrumentação de uma obra, todos os modelos são atualizados com os novos dados. Assim, é possível realizar a retroanálise dos modelos de fluxo e de tensão-deformação do maciço.

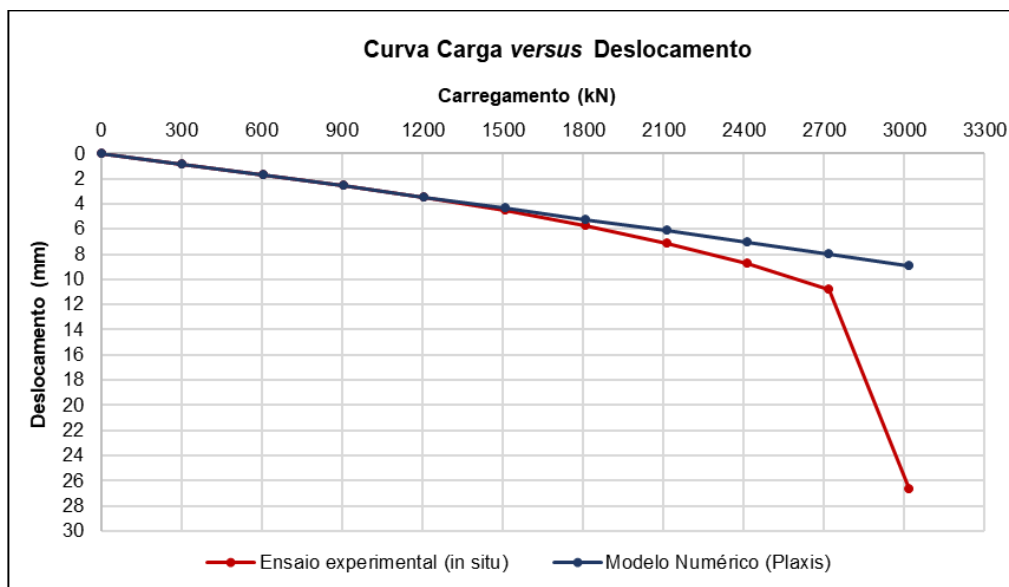


Figura 5. Comparação entre curvas carga-recalque.

A estaca em análise é parte de uma estrutura maior composta por uma torre metálica e por 4 blocos de fundação de concreto, cada um com 8 estacas cravadas. Ainda, essa torre faz parte de um conjunto de outras estruturas similares que compõem uma rede de transmissão de energia elétrica. Percebe-se, portanto, a necessidade de trabalhar com os dados de forma mais integrada a fim de otimizar os projetos, o tempo e o custo da construção. Assim, indica-se a adoção da metodologia BIM, com o propósito de modelar tridimensionalmente o conjunto de estacas da torre.

Para isso, utilizam-se os parâmetros geotécnicos do solo retroanalisados, conforme Tabela 3, uma vez eles correspondem à uma aproximação das condições reais do terreno. O passo a passo para a modelagem em BIM 3D está descrito a seguir:

- Criar o modelo geométrico do conjunto de estacas utilizando o *software* Autodesk Civil 3D;
- Criar o modelo geomecânico a partir da sondagem existente, com os parâmetros do solo obtidos por retroanálise em FEM para a prova de carga em uma estaca;
- Importar os dois modelos para o *software* Plaxis 3D Foundation, simular as etapas construtivas da obra, execução e carregamento das estacas, e, em seguida, simular os esforços de vento;
- Avaliar, em ambiente tridimensional, os carregamentos e as interações entre solo e estrutura devido ao efeito de grupo das estacas.

3 CONCLUSÕES

Diante do apresentado, conclui-se que a previsão do comportamento da estaca modelada no *software* Plaxis 2D Foundation, em comparação ao resultado experimental do ensaio de prova de carga, pode ser considerada satisfatória no trecho da curva onde o comportamento tensão versus deformação encontra-se no regime elástico.

Ressalta-se que para valores próximos à carga de trabalho da estaca isolada de 1.259 kN o carregamento imposto para esta única estaca, no modelo computacional, apresentou-se compatível com os resultados experimentais de prova de carga, indicando que os parâmetros obtidos por meio da retroanálise do solo podem ser adotados para avaliação do comportamento do conjunto de estacas.

Para trabalhos futuros sugere-se que seja feita a modelagem tridimensional em BIM, como já explorado anteriormente. Também pode-se analisar, por meio da modelagem numérica com FEM, o impacto de variações do comprimento e diâmetro das estacas no comportamento de deformabilidade do solo. Essa análise gera informações que garantem a otimização do projeto de fundação.

Além disso, como visto nos resultados deste trabalho, o modelo de Mohr-Coulomb não é o mais adequado para a modelagem do solo em condições plásticas. Portanto, indica-se a análise e comparação pelo modelo de endurecimento do solo, ou *Hardening Soil*, por meio do *software* Plaxis 3D Foundation.

Por fim, a avaliação comparativa entre os resultados obtidos com auxílio do Plaxis 2D Foundation e os valores experimentais contribuem para validação do modelo numérico e permite uma melhor compreensão do comportamento das fundações em estaca cravada em solos característicos da região de estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6484: (2020) - Solo — Sondagem de simples reconhecimento com SPT — Método de ensaio. Rio de Janeiro.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6489 (2019) - Solo - Prova de carga estática em fundação direta. Rio de Janeiro, 2019.

ALONSO, U. R. (2019) *Dimensionamento de Fundações Profundas*.

AOKI, Nelson; VELLOSO, Dirceu de Alencar. (1975) *An Approximate Method to Estimate the Bearing Capacity of Piles*. In: V CONGRESSO PANAMERICANO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES. Buenos Aires, 1975.

CINTRA, J.C.; AOKI, N.; ALBIERO, J.H. (2011) *Fundações Diretas: Projeto Geotécnico*. Oficina de Textos.

CINTRA, J.C.; AOKI, N. (1996) *Fundações por Estacas: Projeto Geotécnico*. Oficina de Textos, 2011.
TEIXEIRA, A. H.; GODOY, N. S. Análise, Projeto e Execução de Fundações Rasas. In: Hachich, W. et al. *Fundações: teoria e prática*. São Paulo.

DÉCOURT, L.; QUARESMA, A R. (1978) *Capacidade de Carga de Estacas a Partir de Valores de SPT*. Rio de Janeiro.

VELLOSO, D.A; LOPES, F.R. (2011) *Fundações*. Vol. 1 e Vol.2. Oficina de Textos, 2011.

ZHANG, J.; WU, C.; WANG, L.; MAO, X.; WU, Y. (2017). *Building information modelling review with potential applications in tunnel engineering of China*. Royal Society Open Science. Vol. 4