

## Avaliação Experimental e Numérica do Comportamento de Estaca Raiz Tracionada Embutida em Rocha de Diabásio

Luiz Felipe Goulart Fiscina  
Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, luizfiscina@gmail.com

Yuri Barbosa  
Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, ybarbosa39@gmail.com

Paulo José Rocha de Albuquerque  
Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, pjra@unicamp.br

David de Carvalho  
Unicamp, Campinas, São Paulo, Brasil, d33c@uol.com.br

**RESUMO:** Avalia-se nesse trabalho o comportamento de uma estaca raiz tracionada ( $L=12,0$  m e  $\phi=0,41$  m), submetida a carregamento estático do tipo misto, com 3 metros de embutimento em rocha de diabásio. O subsolo local é composto por uma primeira camada de 7 m de argila siltosa, seguida por 2 m de areia siltosa e 1 m de rocha de diabásio fraturada, com topo da rocha íntegra em 10 m. Os resultados da curva carga-recalque obtidos experimentalmente foram confrontados por meio de modelagem numérica do tipo axissimétrica pelo método dos elementos finitos. Verificou-se que a simulação numérica da prova de carga apresentou convergência de comportamento com a curva carga-recalque experimental. Complementarmente, por meio do modelo numérico, foi possível avaliar a transferência de carga e o desenvolvimento atrito lateral ao longo da estaca, especialmente do trecho ancorado em rocha. Foi observado que a transferência de carga se deu principalmente no primeiro metro de ancoragem em rocha e que o atrito lateral unitário nos últimos dois metros ancorados foi pouco mobilizado. O atrito lateral médio desenvolvido no trecho ancorado foi comparado com os obtidos por meio de métodos empíricos os quais se mostraram otimistas, com valores de 2,4 a 8,5 vezes superiores aos estimados por meio da simulação numérica para a carga de ruptura estrutural da estaca. Por último, uma análise numérica adicional indicou que para a carga de trabalho desejada um comprimento igual a 11 m com 1 m de embutimento em rocha seriam suficientes.

**PALAVRAS-CHAVE:** Estaca raiz em rocha, modelagem numérica, prova de carga à tração, embutimento.

**ABSTRACT:** This paper evaluates the uplift behavior of a root pile ( $L = 12.0$  m and  $\phi = 0.41$  m), subjected to a mixed static load test, with a bond length of 3 meters embedded in Diabase rock. The local subsoil consists of a first layer of 7 m of silty clay, followed by 2 m of silty sand and 1 m of fractured diabase rock, with the top of the bedrock at 10 m. The results of the load-settlement curve obtained experimentally were compared using numerical modeling of the axisymmetric type using the finite element method. It was found that the load-settlement curve of the numerical simulation showed a good fit with the experimental curve. In addition, through the numerical model, it was possible to evaluate the load transfer and the development of lateral friction along the pile, especially the section anchored in rock. It was observed that the load transfer occurred mainly in the first meter embedded in the fractured rock and that the unitary side friction in the last two meters was not fully developed, indicating a conservative design of the pile. The mean lateral friction developed in the anchored section was compared with those obtained through empirical methods, which results were optimistic, with values of 2.4 to 8.5 times higher than those estimated through numerical simulation for the structural failure load of the pile. Finally, through an additional numerical analysis, it was concluded that for the desired workload, a total length of 11 m with 1 m embedded in rock would be enough.

**KEYWORDS:** Root pile embedded in rock, numerical modeling, finite elements method, uplift load test, embedded.

## 1 Introdução

A demanda de soluções em fundações profundas que resistam a solicitações à tração é frequente em projetos de engenharia de fundações. Tais esforços podem ser do tipo permanente ou variável ao longo do tempo. O primeiro tipo abrange estruturas submetidas a tensões de tração causadas por empuxos de terra ou hidrostáticos enquanto o segundo engloba estruturas esbeltas sujeitas a esforços extensivos da ação do vento (Paschoalin Filho, 2008). Em ambos os casos é necessário obter-se a resistência geotécnica ao longo do fuste da estaca para o dimensionamento da fundação visto que a resistência de ponta é usualmente desconsiderada.

O método mais simples de assegurar uma resistência geotécnica lateral ótima contra esforços de tração é executar estacas longas o suficiente para o desenvolvimento do atrito lateral em profundidade (Tomlinson e Woodward, 2014). Contudo, segundo esses autores, em regiões onde existe uma camada de pequena espessura de solo sedimentar ou residual antes do leito rochoso, a execução de estacas apenas em solo pode não mobilizar o atrito lateral necessário para equilibrar o sistema. Portanto, nesse caso específico, é necessário o embutimento da estaca em rocha para garantir a transferência de carga do elemento estrutural para o maciço de forma efetiva.

A resistência lateral que se desenvolve ao longo da interface rocha-estaca é um fenômeno complexo em que muitas vezes é necessário a formulação de um modelo constitutivo de deslizamento de interface, isto é, um modelo que incorpore os deslocamentos causados por solicitações cisalhantes e normais à interface (Pease e Kulhawy, 1984). No entanto, esses modelos requerem parâmetros muitas vezes não disponíveis na rotina prática da engenharia. Sendo assim, vários autores correlacionaram a resistência lateral  $q_s$  no trecho embutido em rocha com a resistência à compressão uniaxial  $q_u$  de amostras intactas como forma de tornar o pré-dimensionamento desses elementos de fundações mais funcional (Rosenberg and Journeaux, 1976; Horvath et al., 1983; Rowe e Armitage, 1987; Kulhawy e Phoon, 1993; Zhang, 1999).

A experiência atual demonstra que estruturas ancoradas em rocha do tipo injetadas com argamassa, sejam elas armadas com barras, tubos ou cabos, são os tipos de fundações mais econômicas e efetivas para combater esforços de tração (Tomlinson e Woodward, 2015). Conforme Seo et. al. (2013), as microestacas se destacam como um excelente elemento de fundação em condições onde o leito rochoso se encontra próximo à cota do terreno, principalmente devido à elevada capacidade de carga que esse tipo de fundação é capaz de mobilizar, sendo ela geotécnica ou estrutural.

Dessa forma, avalia-se nesse trabalho o comportamento de uma estaca raiz ( $L=12,0$  m e  $\phi=0,41$  m) com 3 metros de embutimento em rocha de diabásio, submetida a esforços de tração. Finalmente, a partir dos resultados da prova de carga estática à tração e de modelagem numérica por meio do software GEOSTUDIO 2012, módulo SIGMA/W, estimou-se a transferência de carga ao longo da profundidade, especialmente no trecho ancorado em rocha, para três níveis de carga: de trabalho, de ensaio e para a carga de ruptura do elemento estrutural. Os valores de atrito lateral desenvolvido pela interface rocha/estaca para o nível de carga de ruptura obtidos pela simulação foram comparados com os disponíveis pela literatura. Por último, estudou-se a influência da redução do trecho ancorado em rocha no comportamento da fundação.

## 2 Local de estudo e caracterização geotécnica

O local de estudo do presente trabalho situa-se nas proximidades da Faculdade de Engenharia Civil da Unicamp, Campinas/SP. Trata-se da construção de uma torre d'água de 36 m de comprimento e 3,9 m de diâmetro. O sistema de fundações dimensionado para esse empreendimento conta com 25 estacas raiz de diâmetro igual a 0,41 m e comprimento igual a 12 m, dos quais 9 m são executados em solo e 3 m embutidos em rocha de diabásio, tipicamente encontrada na região da cidade Campinas/SP.

Para o desenvolvimento do projeto de fundações, foi executada uma campanha de investigação geotécnica composta por três sondagens rotativas com o objetivo de se avaliar as características do trecho rochoso o qual se encontrava em média a uma profundidade de cerca de 9,0 metros em relação à cota do terreno. Adicionalmente, quatro ensaios SPT's executados no local de implantação da torre foram utilizados para avaliar a resistência do solo residual acima do leito rochoso composto basicamente por uma camada de 7 m de argila siltosa seguida de uma camada de 2 m de areia siltosa. A Figura 1 ilustra o desenvolvimento do número de golpes  $N_{SPT}$  ao longo da profundidade, em termos de valores médios, mínimos e máximos das

quatro sondagens envolvidas na investigação geotécnica. A Tabela 1 apresenta as principais características obtidas pelas sondagens rotativas.

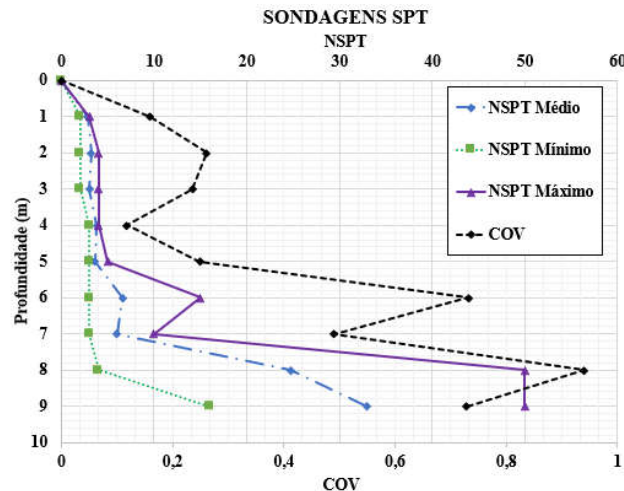


Figura 1. Desenvolvimento de  $N_{SPT}$  ao longo da profundidade

Tabela 1. Características gerais obtidas pelas sondagens rotativas

Ensaio	Camadas (m)	Principais descontinuidades	% de Recuperação	RQD (%)	Grau de Alteração	Grau de Faturamento	Grau de Ocorrência
SR-01	9 a 10	-	50%	0%	5	-	4
	10 a 14	SH e R	100%	99%	1	1	1
SR-02	9 a 11	-	0%	0%	5	-	4
	9 a 13,5	SH, SV, I e R	99%	72%	1,5	2	1,5
SR-03	9 a 10	-	0%	0%	5	-	4
	11 a 14,5	SH, SV, I e R	100%	90%	1,5	2	1,5
SR-04	9 a 10	-	23%	0%	5	-	4
	11 a 13,5	SH, SV e R	98%	95%	1	1,5	1

Nota: SH = Sub-Horizontais; SV = Sub Verticais; I = Inclinadas; R = Rugosa.

### 3 Métodos empíricos para estimar a resistência lateral na interface rocha-estaca

A partir da década de 1970 diversos métodos foram propostos para avaliar a resistência lateral última de estacas ancoradas em rocha (Musarra, 2014). A maioria deles correlacionam a resistência lateral de ruptura ( $q_{sr}$ ) com a resistência à compressão uniaxial de amostras de rocha intactas ( $q_u$ ) em conjunto com parâmetros de ajuste ( $C_s$  e  $\alpha_s$ ). A equação geral é mostrada abaixo:

$$\frac{q_{sr}}{p_A} = C_s \times \left(\frac{q_u}{p_A}\right)^{\alpha_s} \quad (1)$$

Onde:  $C_s$  = parâmetro que depende da rugosidade na interface rocha-estaca;  $\alpha_s$  = parâmetro de ajuste de cada método e  $p_A$  = pressão atmosférica (100 kPa). Complementarmente, Seo et. al. (2013) apresenta diversos valores de  $C_s$  e  $\alpha_s$  obtidos por literatura especializada.

O FHWA (2010), que trata sobre o dimensionamento e construção de estacas escavadas de grande diâmetro, sugere a equação a seguir para estimar os valores de  $q_{sr}$  a partir do RQD e um fator de ajuste de superfície  $c_e$ .

$$\frac{q_s}{p_A} = 0,65 \times c_e \times \sqrt{\frac{q_u}{p_A}} \quad (2)$$

O FHWA (2005), que versa sobre o dimensionamento e a construção de microestacas, sugere a adoção de faixa de valores de  $q_{sr}$  obtidos de acordo com a experiência americana em estruturas ancoradas em solo e/ou rocha. De acordo com essa norma, o engenheiro projetista deve assumir a microestaca ancorada em rocha como sendo do Tipo A, isto é, concretada apenas com a ação da gravidade, visto que a pressão de injeção pouco influenciará no acréscimo de capacidade de carga na interface rocha-estaca. Para rochas do tipo ígneas ou metamórficas, caso do presente estudo, a faixa de valores sugeridos pela FHWA (2005) é de  $1.380 \text{ kPa} \leq q_{sr} \leq 4200 \text{ kPa}$ . Adicionalmente, essa norma enfatiza que essa metodologia de cálculo pode ser usada tanto para estacas comprimidas como tracionadas.

Finalmente, o valor de  $q_u$  utilizado nesse trabalho para estimar os valores de  $q_{s(\text{rocha})}$  no trecho embutido em rocha será o mesmo do fornecido pelo IPT, citado em Chiossi (2013), para rocha de diabásio encontrada no município de Campinas ( $q_u = 162 \text{ MPa}$ ).

#### 4 Capacidade estrutural da seção transversal e módulo de elasticidade da estaca

A armação utilizada na estaca raiz analisada consistiu em sete barras de 20 mm de diâmetro associada a um tirante central de 60,9 mm de diâmetro que foi utilizado como auxílio para a execução da prova de carga estática. Tanto as barras como o tirante possuem tensão de escoamento ( $f_{yk}$ ) iguais a 600 MPa. Com isso, foi possível estimar a resistência estrutural admissível à tração da estaca a partir da proposta de Alonso (1993).

Nessa proposta, não se leva em conta a resistência da argamassa à tração visto que essa pode ser considerada desprezível para os níveis de tensões que esse elemento pode alcançar. Adicionalmente, devido aos efeitos de fissuramento da argamassa quando submetida a esse tipo de esforço, deve-se considerar uma redução de 2 mm da espessura da armadura devido aos efeitos de corrosão. Finalmente, tem-se que os valores de resistência estrutural admissível e de ruptura para a estaca em questão são iguais  $P_{adm} = 1.200 \text{ kN}$  e  $P_{rup} = 2.700 \text{ kN}$ , respectivamente.

O módulo de elasticidade da estaca foi calculado a partir da equação do módulo composto teórico cujo valor é proporcional à área e o módulo dos materiais pertencentes à seção transversal da estaca (Fellenius, 2019). Devido ao tipo de solitação e ao nível de fissuração que a argamassa pode estar sujeita, o módulo de elasticidade da argamassa para o presente estudo foi considerado igual a zero. Sendo assim, o módulo da estaca raiz foi calculado a partir do módulo composto teórico como sendo igual a 7 GPa. Ressalta-se que valores da ordem dessa grandeza também foram observados no trabalho de Paschoalin Filho (2008) cujo trabalho analisou estacas raiz instrumentadas e tracionadas de mesma dimensão ( $L=12 \text{ m}$  e  $\phi=0,41 \text{ m}$ ) e executadas na mesma região geotécnica. Dessa forma, é razoável a utilização do módulo composto teórico para obtenção do módulo de deformabilidade da estaca o qual será utilizado na avaliação numérica.

#### 5 Prova de Carga e Simulações Numéricas

A prova de carga seguiu as premissas da NBR 12.131/2006, sendo utilizado o carregamento do tipo misto. Destaca-se que foram realizados um total de 10 estágios de 130 kN, totalizando uma carga de ensaio de 1300 kN. Para esse elemento, a carga geotécnica de trabalho máxima fornecida em projeto foi de 650 kN.

Com o objetivo de se obter os valores de transferência de carga ao longo do trecho ancorado para a carga de trabalho, de ensaio e de ruptura do elemento estrutural, foi executada uma simulação numérica baseada no método dos elementos finitos com a utilização do software GeoStudio, módulo tensão-deformação Sigma/W. A análise numérica foi realizada a partir de uma modelagem do tipo axissimétrica, dividida em três fases: perfuração, concretagem e carregamento por estágios (simulando um ensaio da prova de carga estática real). Destaca-se que a simulação foi estendida de 10 para 21 estágios de 130 kN com o objetivo de avaliar a mobilização do atrito lateral na interface rocha-estaca na carga de ruptura do elemento estrutural.

Os modelos e parâmetros geotécnicos de entrada utilizados na simulação numérica (Tabela 5) foram obtidos a partir de correlações com o  $N_{SPT}$  para a camada de solo e por meio do RQD e de  $q_u$  para a rocha de diabásio, todas obtidas por meio da literatura especializada (Kulhawy e Goodman, 1987; Joppert Jr. 2007; Ameratunga et. al., 2016; Das, 2017).

Tabela 5. Modelos e parâmetros estimados para simulação numérica

Material	Profundidade	Modelo	E (MPa)	c' (kPa)	$\phi'$ (°)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\nu$
Argila siltosa	0 – 7 m	Elasto-plástico	6,58	18,5	23	18	0,30
Areia siltosa	7 – 9 m	Elasto-plástico	57,85	0	35	20	0,30
Rocha de diabásio fraturada	9 – 10 m	Elasto-plástico	9720	5346	30	26	0,24
Rocha de diabásio íntegra	10 – 14 m	Elasto-plástico	43000	9153	45	26	0,24
Estaca	-	Elástico linear	7000	-	-	25	0,20

## 6 Resultados e Discussões

Na Figura 2 a seguir são apresentadas as curvas carga-recalque experimental e modelada numericamente. Para a curva obtida experimentalmente, tem-se deslocamentos na carga de trabalho e na de ensaio de 4,58 e 12,36 mm, respectivamente. É possível observar também que, após o segundo estágio de incremento, a curva apresenta comportamento linear até a carga de ensaio de 1300 kN, indicando um comportamento essencialmente elástico como consequência do trecho ancorado.

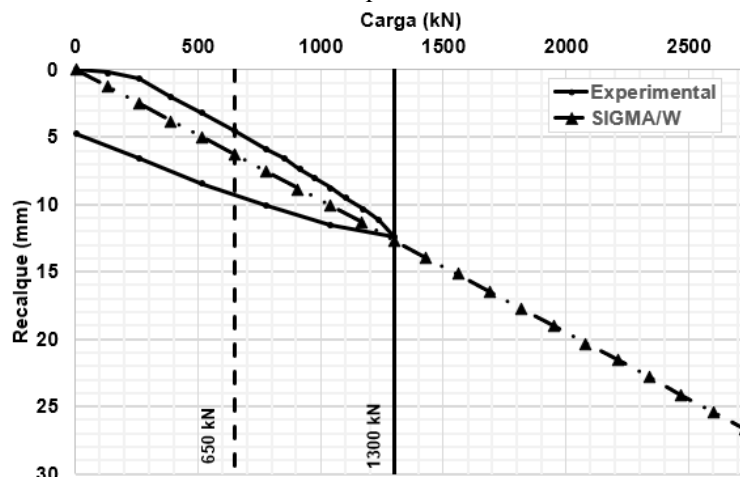


Figura 2. Curvas carga-recalque experimental e modeladas

Quanto à curva modelada, o comportamento apresentou boa semelhança ao resultado experimental. Adicionalmente, essa curva apresentou um comportamento linear até a capacidade estrutural da estaca, com inclinação próxima à prova de carga real. Os deslocamentos obtidos pela simulação para a carga de trabalho e última de ensaio foram de 6,30 mm e 12,62 mm, respectivamente, sendo 37% e 2% superiores aos obtidos pela prova de carga.

Na Figura 3-a são apresentadas as curvas de transferência de carga para as cargas de 650, 1300 e 2730 kN. Pode-se observar que o trecho ancorado absorve cerca de 77% da carga total aplicada sendo 99% dela dissipada ainda no primeiro metro de embutimento em rocha, indicando um dimensionamento conservador da estaca. Esse fato foi comprovado a partir de uma simulação adicional considerando o comprimento embutido em rocha igual a 1 m. Para esse cenário, o desenvolvimento da curva carga-recalque se mostrou idêntica à simulada com 3 m de embutimento e o trecho ancorado em rocha absorveu cerca de 81% da carga total aplicada, apontando que um comprimento ancorado igual 1 m seria suficiente para equilibrar as solicitações de trabalho da estaca analisada.

Na Figura 3-b são apresentadas as curvas de atrito lateral unitário para as mesmas cargas mencionadas na Figura 3-a. É possível verificar que existe um aumento considerável dos valores de atrito lateral unitário na interface Areia Siltosa – Rocha Fraturada (Figura 3-b, cota: 9,0 m). Tal comportamento é explicado devido à mudança significativa dos parâmetros de resistência mecânica entre as interfaces. Observa-se também um comportamento não linear no desenvolvimento do atrito lateral na interface rocha-estaca, apresentando um valor de pico no início do trecho ancorado (Figura 3-b, cota: 9,0 m). Esse valor sofre uma redução expressiva

à medida que a carga é dissipada ao longo da profundidade. Nesse gráfico é possível verificar também que o trecho referente à rocha íntegra com RQD = 90% mobilizou pouco atrito lateral visto que a camada superior, referente à rocha fraturada, absorveu quase a totalidade do carregamento.

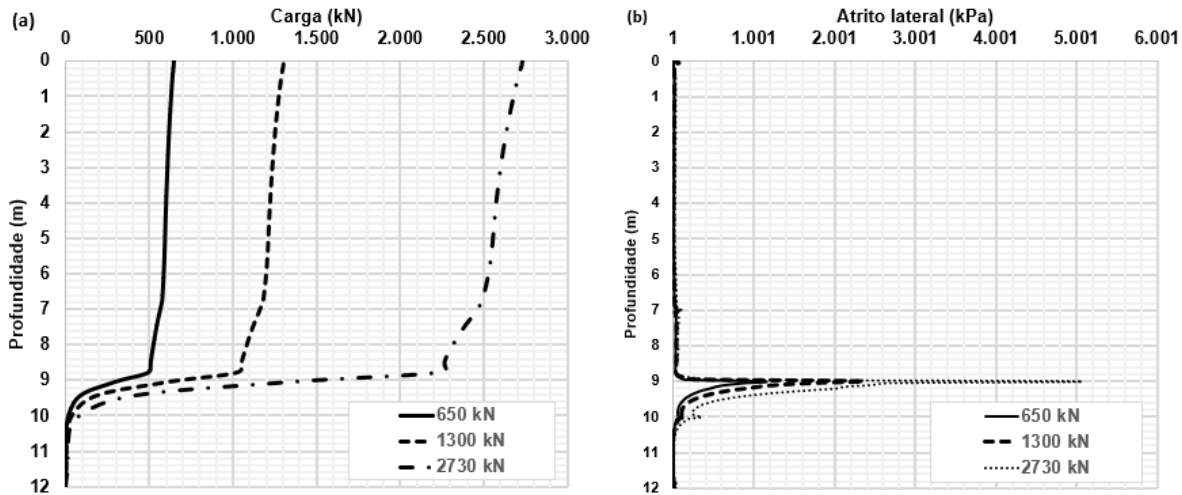


Figura 3. (a) Transferência de carga e (b) atrito lateral ao longo da profundidade obtidas pela simulação

A partir dos valores da Figura 3-b estimou-se os valores médios de atrito lateral unitário em cada camada geotécnica representativa para as cargas de 650 kN, 1300 kN e 2730 kN (Figura 3).

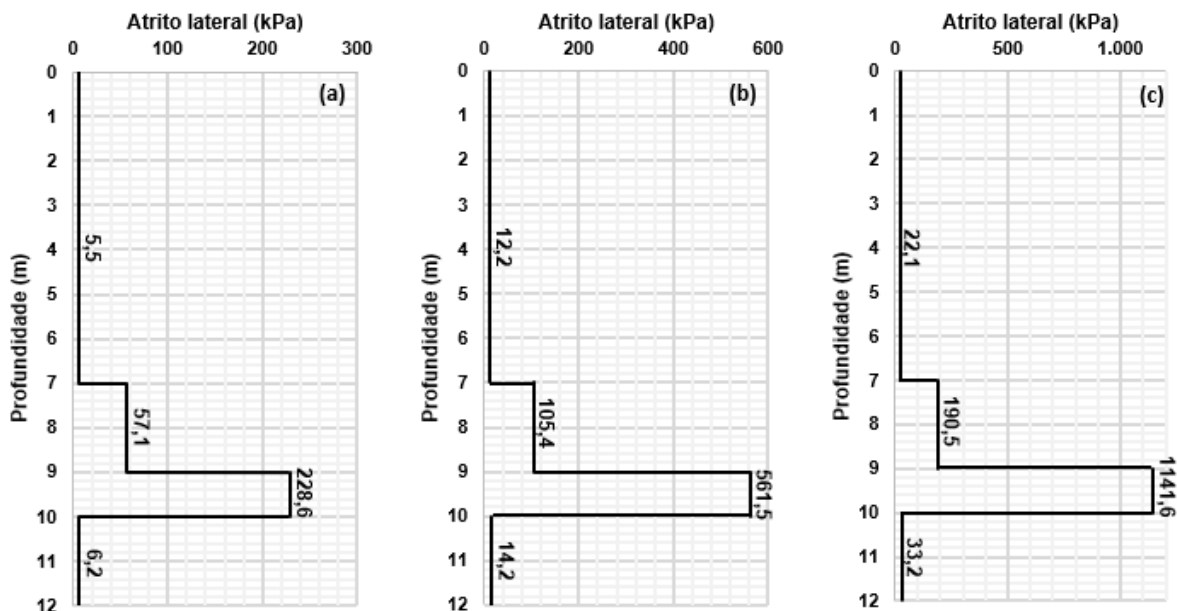


Figura 3. Atrito lateral médio para as cargas de (a) 650 kN; (b) 1300 kN e (c) 2730 kN obtidas pela simulação

Os valores médios de atrito lateral mobilizados no trecho ancorado obtidos pela simulação ( $q_{sr, \text{simulação}}$  médio) para a carga última estrutural de 2730 kN foram comparados com os obtidos por meio dos métodos citados na seção 3 (Tabela 4). De forma geral, os resultados provenientes dos métodos mostraram-se de 2,4 a 8,5 vezes superiores aos valores médios obtidos pela simulação para o trecho ancorado em rocha, com exceção dos métodos FHWA (2005) e FHWA (2010) para a camada entre 9 e 10 m. Este fato pode ser explicado pelo elevado valor de  $q_u$  utilizado para a rocha de diabásio em questão para estimativa dos valores de  $q_s$ .

Tabela 4. Valores de  $q_{sr}$  estimados por meio de métodos empíricos e obtidos por meio de simulação numérica para a carga última estrutural

Método	Camada	RQD (%)	$q_u$ (MPa)	$\alpha_s$	$C_s$	$c_e$	$q_{sr,métodos}$ (kPa)	$q_{sr,simulação}$ por camada (kPa)	$q_{sr,simulação}$ médio (kPa)
Rosenberg and Journeaux (1976)	9 a 10 m	0	162	0,52	1,09	-	5086	1141	587
	10 a 12 m	90	162					33	
Horvath et al. (1983)	9 a 10 m	0	162	0,5	0,63	-	2536	1141	587
	10 a 12 m	90	162					33	
Rowe and Armitage (1987)	9 a 10 m	0	162	0,5	1,42	-	5715	1141	587
	10 a 12 m	90	162					33	
Kulhawy and Phoon (1993)	9 a 10 m	0	162	0,5	0,71	-	2858	1141	587
	10 a 12 m	90	162					33	
Zhang (1999)	9 a 10 m	0	162	0,5	0,63	-	2536	1141	587
	10 a 12 m	90	162					33	
FHWA (2010)	9 a 10 m	0	162	-	-	-	-	1177	587
	10 a 12 m	90	162					0,85	
FHWA (2005)	9 a 10 m	0	162	-	-	-	-	1380	587
	10 a 12 m	90	162					33	

## 7 Conclusões

Avaliou-se nesse trabalho o comportamento de uma estaca raiz embutida em rocha submetida a esforços de tração a partir dos resultados de uma prova de carga estática e de uma simulação numérica com o auxílio do software GeoStudio 2012.

Em relação a curva carga-recalque, a simulação numérica apresentou bom comportamento quando comparada aos resultados experimentais. Ambas as curvas apresentaram um desenvolvimento linear até a carga de ensaio, não evidenciando uma ruptura geotécnica. De forma complementar, simulou-se o comportamento carga-recalque para a carga de ruptura estrutural da estaca e, da mesma forma, não se evidenciou a ruptura geotécnica.

O atrito lateral unitário obtido por meio da simulação apresentou grande desenvolvimento de na interface estaca - rocha de diabásio fraturada, localizada em uma profundidade de 9 m, resultando em uma elevada transferência de carga nesse trecho. A camada de rocha íntegra não apresentou mobilização suficiente para análise da transferência de carga ao longo de sua profundidade. Desta maneira, uma simulação com embutimento de apenas 1 m, em rocha fraturada, foi executada. Tal simulação apresentou um comportamento da curva carga-deslocamento idêntica à simulação com 3 m de embutimento, evidenciando a possibilidade de economia caso a prova de carga tivesse sido realizada anteriormente à obra, conforme sugere a NBR 6122/2019.

Em relação as estimativas da capacidade de carga do trecho embutido em rocha, em geral nada pode-se afirmar quanto à precisão dos métodos utilizados. Isto ocorre pelo fato de a rocha em questão ser de ótima qualidade, gerando altas estimativas de capacidade de carga que limitariam a prova de carga à capacidade estrutural da estaca ( $P_{rup} = 2.700$  kN). Desta maneira, a partir da simulação numérica para esse estágio de carga, o atrito encontrado apresenta-se abaixo das estimativas. Exceção disso foram os métodos FHWA (2005) e FHWA (2010), que indicaram estimativas próximas aos valores observados na carga de 2700 kN, entre as camadas de 9 e 10 m de profundidade. Por último, evidenciou-se nesse trabalho que a utilização de métodos numéricos em conjunto com resultados de prova de carga e sondagens bem executadas pode auxiliar o engenheiro geotécnico a definir de forma mais efetiva o comportamento de uma fundação ancorada em rocha.



## AGRADECIMENTOS

À CAPES e ao CNPq, pela concessão das bolsas de estudos oferecidas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alonso, U. R. (1993) Reavaliação do dimensionamento estrutural de estacas raiz face à exigência do ensaio MB 3472 da ABNT. *Revista Solos e Rochas*, v. 16, n. 16.
- Ameratunga, J., Sivakugan, N., Das, B. M. (2016) Standard Penetration Test. In: *Correlations of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering*. Springer, New Delhi, p.87-113.
- ABNT (2019). NBR 6122. *Projeto e execução de fundações*. ABNT, Rio de Janeiro.
- ABNT (2006). NBR 12131. *Estacas- Prova de carga estática: método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- Chiossi, N. (2013) *Geologia de Engenharia*. São Paulo: Oficina de Textos.
- Das, B. M. (2017) *Princípios de Engenharia de Fundações*, 1ª ed, Cengage Editora.
- Federal Highway Administration (2005) *Micropile design and construction*, U. S. Publication No. FHWA-NHI-05-039, Department of Transportation.
- Federal Highway Administration (2010) *Drilled shafts: Construction procedures and LRFD design methods.* Publication No. FHWA-NHI-10-016, FHWA GEC 010, U.S. Dept. of Transportation.
- Fellenius, F. H. (2019) *Basics os Foundations Design*. Eletronic ed. Sidney, British Columbia: www.fellenius.net.
- Hovarth, R., Kenney, T., Kozicki, P. (1983) Methods of improving the performance of drilled piers in weak rock. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 20, p.758-772.
- Joppert Jr, I. (2007) *Fundações e contenções de edifícios: qualidade total na gestão do projeto e execução*. Editora Pini.
- Kulhawy, F., Goodman, R. E. (1987) Foundations in rock. *Ground Engineer's reference book*. p.55-1.
- Kulhawy, F., Phoon, K. (1983) Drilled shaft side resistance in clay soil to rock. In: *Conference on design and performance of deep foundations: piles and piers in soil and soft rock*, 38. *Proceedings...*ASCE Geotechnical Special Publication, p. 172-183.
- Musarra, M. D. (2014) *Análise de comportamento de estaca barrete embutida em rocha*. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo / USP, 254 p.
- Paschoalin Filho, J. A. (2008) *Estudo do comportamento a tração axial de diferentes tipos de estacas em solo de diabasio da região de Campinas/SP*. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas, 427 p.
- Pease, K. A., Kulhawy, F. H. (1984) Behavior of Rock Anchors And Sockets. In: *The 25<sup>th</sup> US Symposium on Rock Mechanics – USRMS*.
- Rosenberg, P., Journeaux, N. (1976). Friction and end bearing tests on bedrock for high capacity socket design. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 13, p.234-333.
- Rowe, R., Armitage, H. (1987) Theoretical solutions for axial deformation of drilled shafts in rock. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 24, n. 1, p.126-142.
- Seo, H., Prezzi, M., Salgado, R. (2013) Instrumented static load test on rock-socketed micropile. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, v. 139, n. 12, p.2037-2047.
- Tomlinson, M., Woodward, J. (2014) *Pile design and construction practice*, 6<sup>th</sup> ed., CRC Press.
- Zhang, L. (1999) *Analysis and design of drilled shafts in rock*. Ph.D. dissertation. Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, MA.