

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/112

Previsão do Comportamento de Estacas Hélice Contínua a Partir de Inteligência Artificial

Lucas Marques Pires da Silva

Engenheiro, Benthic, Rio de Janeiro, Brasil, lucas.silva@coc.ufrj.br

Gustavo Vaz de Mello Guimarães

Professor, Instituto Politécnico/UFRJ, Macaé, Brasil, guimaraes@macae.ufrj.br

Gleyce de Souza Baptista

Engenheira, Benthic, Rio de Janeiro, Brasil, gleycesouzaa@gmail.com

Matheus Candal Reis Fernandes

Engenheiro, Benthic, Rio de Janeiro, Brasil, matheus.fernandes@coc.ufrj.br

Hugo Santos de Assis

Engenheiro, Consultor, Macaé, Brasil, hugoassis94@gmail.com

RESUMO: O conceito de aprendizado de máquina vem sendo empregado largamente em diversas áreas da indústria, mas na geotecnia esse conceito ainda não é tão explorado. Essas técnicas, que inclusive são creditadas de prever o comportamento humano, também tem o potencial de prever o comportamento do solo. Porém, cabe ressaltar que para o aprendizado de máquina funcionar bem, ele deve ser “ensinado” a partir de um banco de dados confiável. Neste contexto, a partir da análise de nove provas de carga estáticas, realizadas em estacas hélice contínua em território brasileiro, empregou-se um método desenvolvido através de uma rede neural artificial (RNA) para prever as curvas “carga *versus* recalque” das respectivas estacas. A comparação entre o desempenho das provas de carga e os resultados da previsão pela RNA foi considerado promissor para oito das nove provas de carga.

PALAVRAS-CHAVE: Inteligência Artificial. Comportamento do Solo. Estaca Hélice Contínua. Curva Carga *vs* Recalque.

ABSTRACT: The concept of machine learning has been widely employed in various industries, but in geotechnics, this concept is not yet so explored. These techniques, which are also credited with predicting human behavior, also have the potential to predict soil behavior. However, it is worth noting that for machine learning to work well, it must be 'taught' from a reliable database. In this context, based on the analysis of nine static load tests conducted on continuous helical piles in Brazilian territory, a method developed using an artificial neural network (ANN) was employed to predict the 'load versus settlement' curves of the respective piles. The comparison between the performance of the load tests and the results of the prediction by the ANN was considered promising for eight out of the nine load tests.

KEYWORDS: Artificial Intelligence. Soil Behavior. Continuous Flight Auger Pile. Load Settlement Curve.

1 INTRODUÇÃO

Desde os trabalhos pioneiros de Riemann (1851), problemas envolvendo mais de três variáveis têm se tornado cada vez mais comuns. Devido à limitação da compreensão humana em relação a três dimensões, a resolução de problemas multidimensionais tem sido desafiadora. A correlação de um valor com duas ou mais variáveis representa um desafio significativo para os seres humanos.

Para abordar essa dificuldade, Rosenblatt (1957) desenvolveu uma metodologia para ajustar funções lineares de múltiplas variáveis, permitindo a resolução de problemas binários. Essa técnica é conhecida como “*perceptron*” e quando combinadas entre si (diversos “*perceptrons*”) formam uma rede neural.

As redes neurais artificiais (RNAs) são sistemas de processamento maciçamente paralelos e distribuídos, compostos por unidades de processamento simples. Estes sistemas possuem a capacidade intrínseca de armazenar conhecimento experimental e torná-lo disponível para uso posterior (Adaptado de Dantas Neto, 2004).

Araújo *et al.* (2016) menciona que a aplicação de redes neurais artificiais na estimativa de recalques em estacas pode ser uma alternativa aos métodos empíricos ou semiempíricos utilizados na maioria dos projetos de fundações profundas.

Portanto, este trabalho busca contribuir, a partir de inteligência artificial, com a previsão do comportamento de estacas hélice contínua, que além da previsão de recalques, poderia ser extrapolada, sendo útil até para avaliar a capacidade de carga das fundações.

2 DATA MINING E RNA

Buscando criar um banco de dados para avaliar a metodologia de RNA proposta pela UFC (2016)¹, foram coletadas diversas provas de cargas disponíveis na literatura. Este processo de coleta é comumente denominado *data mining* (mineração de dados).

2.1 Banco de dados

O presente estudo de caso se fundamentou na análise de um banco de dados composto por nove ensaios de provas de carga estáticas conduzidos em diferentes regiões do Brasil coletados nos seguintes trabalhos: Alledi *et al.* (2006), Mantuano (2013), Neto (2002), Côrrea *et al.* (2016) e Dutra (2022). Todas as estacas examinadas são do tipo hélice contínua.

A distribuição geográfica das estacas investigadas, a partir do *data mining* realizado neste estudo, destaca suas localizações por estado. A Bahia, situada na região Nordeste, apresenta a menor distribuição com uma estaca, representando 11% das estacas. Na região Sudeste, a distribuição é mais expressiva, com o Espírito Santo e o Rio de Janeiro registrando cada um 22% (2 estacas) e 11% (1 estaca), respectivamente. São Paulo destaca-se com a maior concentração, possuindo 56% das estacas totais (5 estacas).

2.2 Método UFC (2016)

O método descrito pela UFC (2016) consiste em um modelo de previsão de recalques em estacas que emprega uma rede neural artificial do tipo *perceptron*. O método utiliza uma rede com camada de entrada, camada de saída e quatro camadas ocultas, arquitetura A:10-12-8-6-4-1, conforme ilustrado na Figura 1. A métrica de avaliação do modelo foi realizada com o coeficiente de correlação, resultando em um valor de 0,99 para o treinamento e 0,96 para os dados de teste, após $2,5 \times 10^6$ iterações.

Este método foi apresentado por Dantas Neto *et al.* (2016). A abordagem visa determinar a capacidade de carga à ruptura geotécnica das estacas a partir da relação entre carga aplicada e recalque observado.

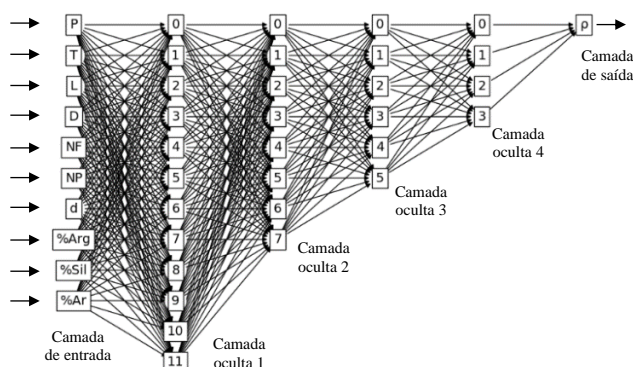


Figura 1. Arquitetura do modelo – Adaptado de Dantas Neto *et al.* (2016)

¹ O método UFC (2016) foi nomeado com base no trabalho de Dantas Neto *et al.* (2016). Destaca-se que a sigla UFC significa Universidade Federal do Ceará. A nomenclatura facilita a referência nesta pesquisa.

Considerando o comportamento das estacas e os mecanismos de transferência de cargas entre a estaca e o solo circundante, a rede neural desenvolvida sugere que o recalque total experimentado pela estaca é influenciado por diversas variáveis, tais como as características de resistência e deformabilidade dos materiais constituintes do subsolo e da estaca, assim como as características geométricas da estaca e a carga atuante no sistema solo-estaca.

As principais fases do desenvolvimento deste modelo, conforme descrito pela UFC (2016), compreenderam: (i) levantamento e coleta de dados; (ii) definição das variáveis a serem consideradas pelo modelo neural; (iii) tratamento dos dados coletados; e (iv) treinamento e validação do modelo.

Para a construção do modelo, foram utilizados dados provenientes de sondagens à percussão com medida de N_{SPT} e ensaios de carga estática realizados em um conjunto de 199 estacas. Esses dados foram extraídos de três fontes distintas: Amâncio (2013), Silveira (2014) e Dantas Neto *et al.* (2014). Todos as provas de carga utilizadas para a elaboração do método da UFC (2016) foram executadas em território brasileiro. A Figura 2 mostra a distribuição por região das localizações das estacas.

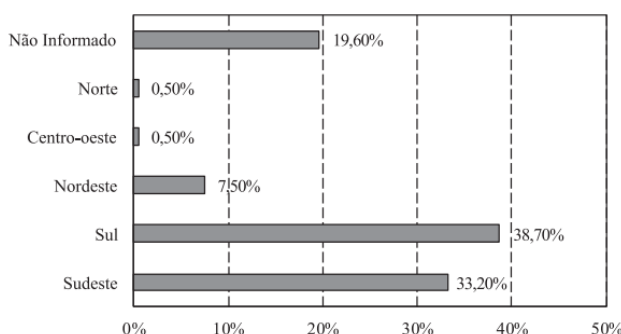


Figura 2. Quantidade de estacas por região – Adaptado de Dantas Neto *et al.* (2014)

O método da UFC (2016) diz que o recalque é função do tipo de estaca, comprimento da estaca, diâmetro da estaca, N_{SPT} , distância da ponta até o impenetrável a percussão SPT, tipo de solo (areia, silte ou argila) e a carga aplicada na estaca. A tabela 1 fornece um resumo dos valores máximos e mínimos utilizados para a elaboração do método da UFC (2016).

Tabela 1 – Valores máximos e mínimos utilizados na RNA - Adaptado de Dantas Neto *et al.* (2016)

Variável	Tipo	Aquisição	Mínimo	Máximo
Tipo da estaca – T			1	3
Comprimento – L (m)		Prova de carga estática	3	60
Diâmetro – D (m)			0,08	1,7
Soma do N_{SPT} ao longo do fuste – NF			6	990
N_{SPT} na ponta da estaca até o impenetrável	Entrada	Sondagem à percussão	2	40
Distância da ponta da estaca até o impenetrável – d (m)			0	4
Percentual de argila do perfil – Arg (m/m)			0%	100%
Percentual de silte do perfil – Sil (m/m)			0%	100%
Percentual de areia do perfil – Ar (m/m)			0%	100%
Carga – P (kN)			0	16.653
Recalque – ρ (mm)	Saída	Prova de carga estática	0	189,4

O recalque previsto consiste em duas componentes distintas: a primeira componente, Δp_0 , é imediata e é calculada para uma carga inicial de valor muito pequeno. A segunda componente está relacionada aos recalques subsequentes, os quais são calculados em função da primeira componente, para os outros estágios da prova de carga.

3 RESULTADOS

Os resultados são apresentados por meio de gráficos comparativos entre a previsão do modelo e os dados experimentais das estacas analisadas. A avaliação desses resultados é realizada qualitativamente, considerando a adequação das previsões aos dados experimentais.

3.1 Alledi *et al.* (2006) – EH1 e EH2

A Figura 3 apresenta os resultados do método aplicado à prova de carga da estaca EH1 para dois casos distintos: quando Δp_0 é igual a zero e quando Δp_0 é diferente de zero, comparados com os dados experimentais correspondentes.

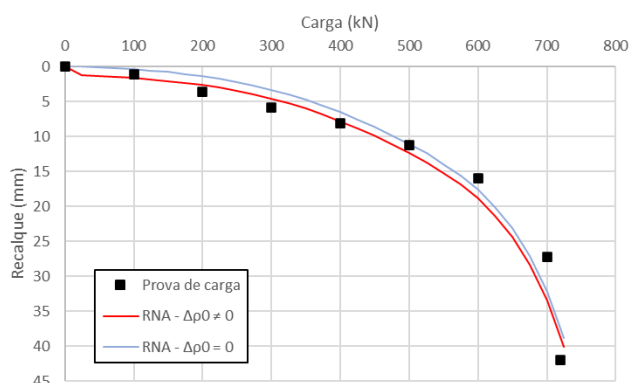


Figura 3 - Previsão da curva carga-recalque de EH1 em comparação à prova de carga real.

A Figura 4 apresenta os resultados do método aplicado à prova de carga da estaca EH2 para dois casos distintos: quando Δp_0 é igual a zero e quando Δp_0 é diferente de zero, comparados com os dados experimentais correspondentes.

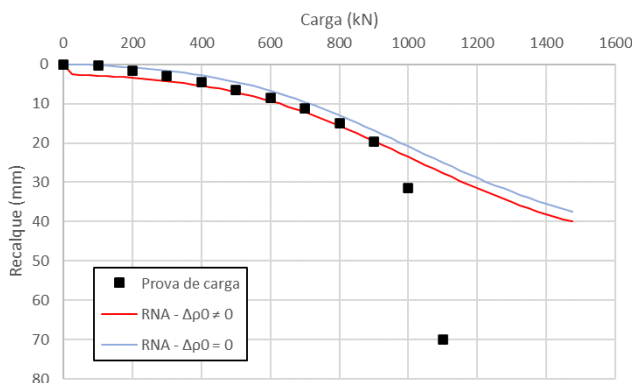


Figura 4 - Previsão da curva carga-recalque de EH2 em comparação à prova de carga real.

3.2 Mantuano (2013) – SA25

A Figura 5 apresenta os resultados do método aplicado à prova de carga da estaca SA25 para dois casos distintos: quando Δp_0 é igual a zero e quando Δp_0 é diferente de zero, comparados com os dados experimentais correspondentes.

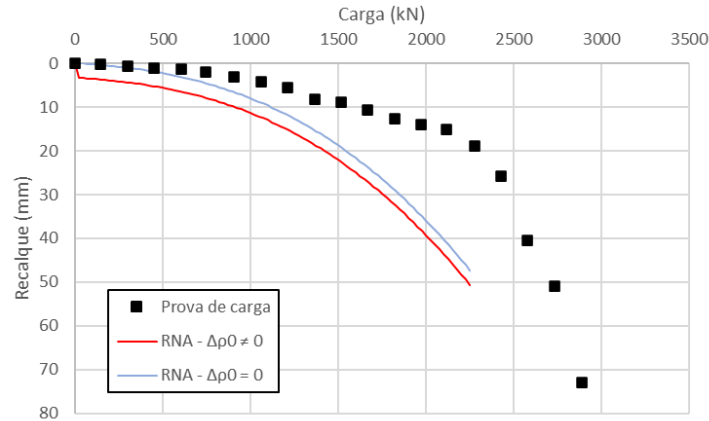


Figura 5 - Previsão da curva carga-recalque de SA25 em comparação à prova de carga real.

3.3 Neto (2002) – EHC2, EHC4 e EHC6

A Figura 6 apresenta os resultados do método aplicado à prova de carga da estaca EHC2 para dois casos distintos: quando $\Delta\rho_0$ é igual a zero e quando $\Delta\rho_0$ é diferente de zero, comparados com os dados experimentais correspondentes.

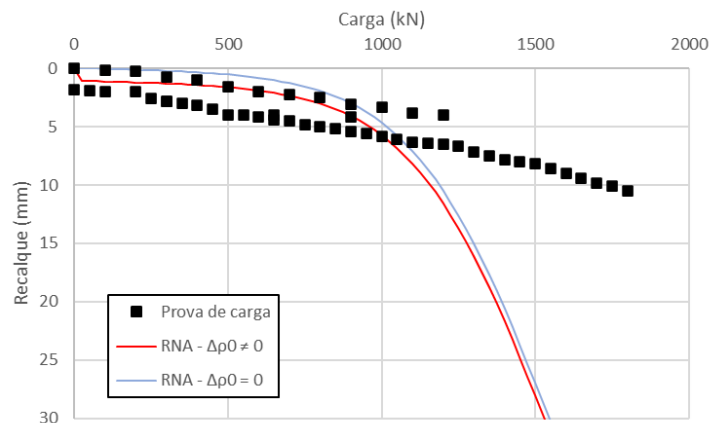


Figura 6 - Previsão da curva carga-recalque de EHC2 em comparação à prova de carga real.

A Figura 7 apresenta os resultados do método aplicado à prova de carga da estaca EHC4 para dois casos distintos: quando $\Delta\rho_0$ é igual a zero e quando $\Delta\rho_0$ é diferente de zero, comparados com os dados experimentais correspondentes.

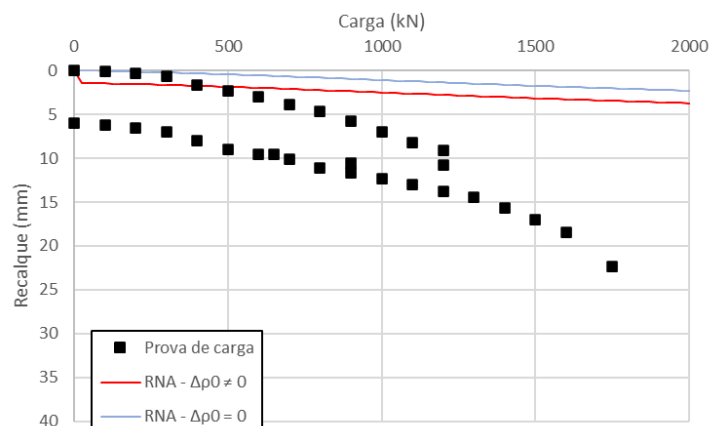


Figura 7 - Previsão da curva carga-recalque de EHC4 em comparação à prova de carga real.

A Figura 8 apresenta os resultados do método aplicado à prova de carga da estaca EHC6 para dois casos distintos: quando Δp_0 é igual a zero e quando Δp_0 é diferente de zero, comparados com os dados experimentais correspondentes.

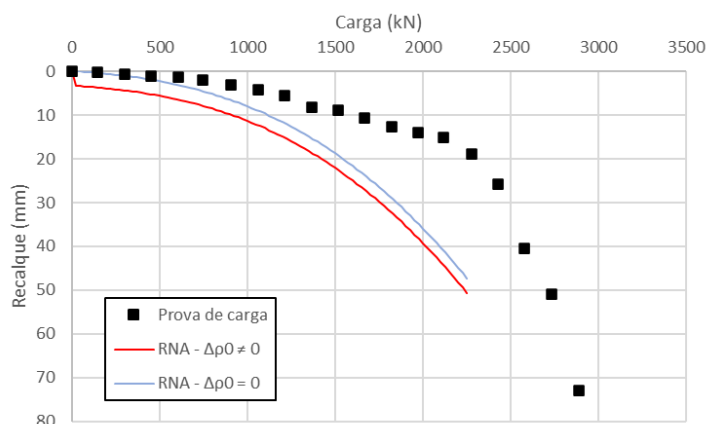


Figura 8 - Previsão da curva carga-recalque de EHC6 em comparação à prova de carga real.

3.4 Corrêa *et al.* (2016) – ET-1 e ET-2

A Figura 9 apresenta os resultados do método aplicado à prova de carga da estaca ET-1 para dois casos distintos: quando Δp_0 é igual a zero e quando Δp_0 é diferente de zero, comparados com os dados experimentais correspondentes.

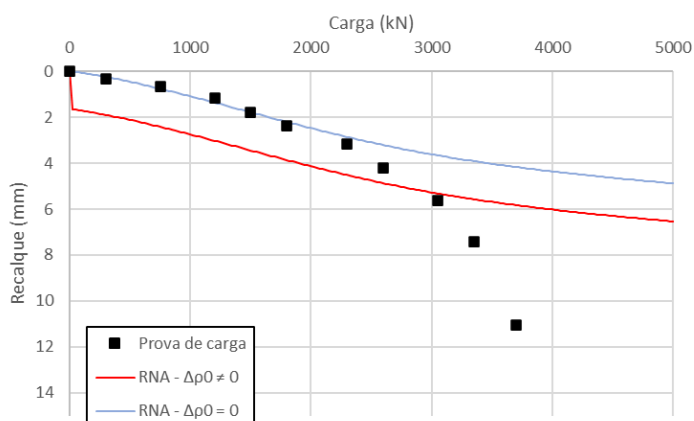


Figura 9 - Previsão da curva carga-recalque de ET-1 em comparação à prova de carga real.

A Figura 10 apresenta os resultados do método aplicado à prova de carga da estaca ET-2 para dois casos distintos: quando Δp_0 é igual a zero e quando Δp_0 é diferente de zero, comparados com os dados experimentais correspondentes.

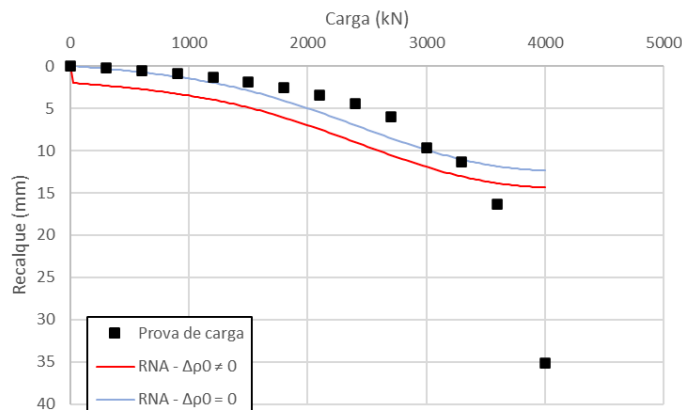


Figura 10 - Previsão da curva carga-recalque de ET-2 em comparação à prova de carga real.

3.5 Dutra (2022) – PC002

A Figura 11 apresenta os resultados do método aplicado a estaca PC002 para dois casos distintos: quando $\Delta\rho_0$ é igual a zero e quando $\Delta\rho_0$ é diferente de zero, comparados com os dados experimentais correspondentes.

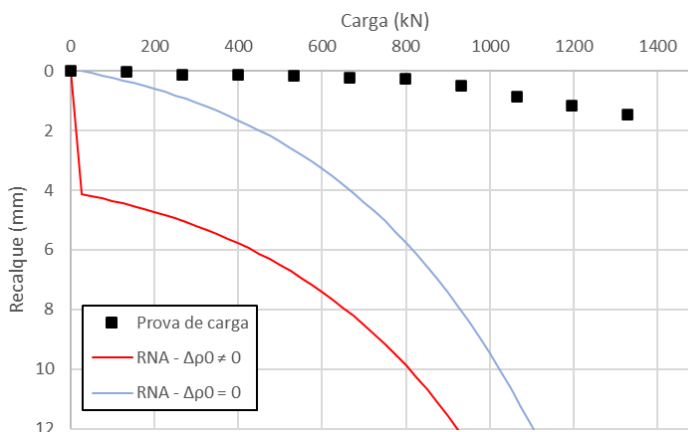


Figura 11 - Previsão da curva carga-recalque de PC002 em comparação à prova de carga real.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

Foram utilizadas nove provas de carga estáticas realizadas em estacas hélice contínua no Brasil. O método da UFC (2016), baseado em uma RNA com arquitetura A:10:14:8:4:2:1 e coeficiente de correlação igual a 0,96 para os dados de teste, foi empregado para obter as curvas "carga vs recalque" para cada estaca ensaiada.

Vale lembrar que o método da UFC (2016) impõe algumas restrições que limitam a validade de aplicação do método. Estas restrições estão associadas à tipos e geometria de estacas, N_{SPT} , estratigrafia do solo e tipo de carregamento.

É importante ressaltar que, entre as nove estacas do tipo hélice contínua analisadas, cinco delas (EH1, EH2, SA25, EHC6, PC002) estão em conformidade com os critérios de aplicação do método. Isso implica que seria razoável esperar uma correspondência satisfatória entre o desempenho do teste de carga e as previsões da RNA.

Com efeito, quatro estacas analisadas (EH1, EH2, SA25 e EHC6) de fato apresentaram uma correspondência entre desempenho e previsão. No entanto, apenas uma estaca (PC002) não apresentou uma boa concordância entre o desempenho da prova de carga e as previsões da RNA. Uma possível explicação para esse resultado é que o banco de dados utilizado para treinar a rede neural no modelo da UFC (2016) pode não

ter sido suficiente para capturar o comportamento específico do solo na região Nordeste, onde a estaca PC002 foi executada e testada.

Em relação a outras quatro estacas (EHC2, EHC4, ET-1 e ET-2), os critérios de aplicação do método não foram respeitados. No entanto, ainda assim, foi observado algum nível de concordância entre o desempenho e as previsões. As estacas EHC2 e EHC4 foram submetidas a ciclos de carga e descarga, o que pode ter influenciado o desempenho do teste de carga, sendo que tal tipo de carregamento não foi considerado na previsão da RNA. Por outro lado, as estacas ET1 e ET2 foram executadas em solos de alta resistência na ponta, uma condição que se assemelha a um engaste, mas que não foi contemplada pelo método original.

No geral a comparação e avaliação qualitativa entre o desempenho das provas de carga e as previsões pela RNA pode ser considerada promissora, especialmente nas regiões de linearidade dos gráficos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alledi, C. T. D. B.; Polido, U.; Albuquerque, P.J.R. (2006) *Provas de Carga em Estacas Hélice Contínua Monitoradas em Solos Sedimentares*. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 13, Curitiba. Anais. Curitiba: ABMS.
- Amancio, L. B. *Previsão de Recalques em Fundações Profundas Utilizando Redes Neurais Artificiais do Tipo Perceptron*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Fortaleza, 94p., 2013.
- Araújo, C. B. C.; Dantas Neto, S. A.; Anjos, G. J. M. (2016) *Estimativa de Recalque em Estacas Utilizando Redes Neurais Artificiais*. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 18, Belo Horizonte, ABMS.
- Corrêa, C. N.; Falconi, F.; Rocha, L. M. B.; Maset, V. L. (2016) *Prova de Carga Estática Prévia em Estaca Hélice Contínua Monitorada no Interior do Estado de São Paulo*. Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 18, Belo Horizonte, ABMS.
- Dantas Neto, S.A. (2004) *Avaliação das Propriedades dos Ligantes e das Misturas Asfálticas Modificados com Borracha Granulada de Pneus Usados*. Tese (Doutorado em Geotecnia), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 265p.
- Dantas Neto, S.A.; Silveira, M.V.; Amâncio, L.B.; Anjos, G.M. (2014). *Pile Settlement Modeling with Multilayer Perceptrons*. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, v. 19, pp. 4517- 4528.
- Dantas Neto, S. A.; Silveira, M. V.; Anjos, G. J. M.; Moura, A. S. (2016). *Modelo de Previsão de Recalques em Estacas Hélice Contínua, Metálicas e Escavadas Através de Redes Neurais Artificiais*, Revista Geotecnia, Lisboa, v. 136, p. 27-47.
- Dutra, C. S. (2022) *Estaca Hélice Contínua: Comparação da Capacidade de Carga à Ruptura Geotécnica entre Metodologias Semiempíricas Nacionais e Internacional*. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Campus Macaé.
- Mantuano, R. M. (2013) *Comparação entre os Métodos de Dimensionamento e Influência do Processo Executivo no Comportamento de Estacas Hélice*. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica.
- Neto, J. A. A. (2002) *Análise do Desempenho de Estacas Hélice Contínua e Ômega – Aspectos Executivos*. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Riemann, G. F. B. (1851) *Grundlagen für eine allgemeine Theorie der Funktionen einer veränderlichen complexen Größe*. Tese (Doutorado) – Universidade de Göttingen, Göttingen.
- Rosenblatt, F. (1957) *The Perceptron, a Perceiving and Recognizing Automaton Project Para*. Cornell Aeronautical Laboratory.
- Silveira, M.V. *Modelo Neuronal para Previsão de Recalques em Estacas Hélice Contínua, Metálica, e Escavada*. Dissertação (Mestrado). – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Fortaleza, 107p., 2014.