



Sobre a Dinâmica dos Estaqueamentos - Método de Capacidade de Carga via Rede Neural

Gérson Jacques Miranda dos Anjos

Professor Associado, Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil, mirandadosanjos@gmail.com

Marcelo Seabra de Andrade

Eng. Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil, eng.marceloseabra@gmail.com

Laura Mendonça Ponte Souza

Eng. Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil, laura.souza@itec.ufpa.br

Alberto Miranda Pereira

Eng. Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil, alberto.miranda1997@gmail.com

RESUMO: Este trabalho tem como objetivo avaliar a capacidade de carga em fundações profundas através de métodos dinâmicos utilizando Redes Neurais Artificiais (RNA). O objetivo específico é desenvolver uma equação de capacidade de carga com base nos princípios da dinâmica de estaqueamento. Foram analisados 375 resultados de ensaios de capacidade de carga coletados de várias fontes na literatura nacional e internacional. Foram utilizados seis parâmetros de entrada (D , L , h , W_M , s_{10gp} , E_p) e um parâmetro de saída (Q_t). Através de um processo iterativo, identificou-se que a melhor correlação entre essas variáveis é alcançada ao utilizar duas camadas ocultas no modelo: uma com quatro nós e outra com cinco nós. A formulação proposta demonstrou um desempenho significativamente superior em relação aos métodos tradicionais, como Rankine (1862), Janbu (1953), Dinamarqueses (1957), Gates (1957), ENR Modificada (1965), WSDOT, FHWA-Gates e Long (2001). Foram utilizados vinte métodos estatísticos para classificar e determinar o melhor ajuste entre os valores calculados e medidos da capacidade de carga total.

PALAVRAS-CHAVE: Estacas, capacidade de carga, métodos dinâmicos, rede neural artificial

ABSTRACT: This research aims to evaluate the bearing capacity of deep foundations using dynamic methods, employing Artificial Neural Networks (ANN). The specific objective is to develop a bearing capacity equation based on the principles of pile dynamics. 375 results of bearing capacity tests collected from various sources in national and international literature were analyzed. Six input parameters (D , L , h , W_M , s_{10gp} , E_p) and one output parameter (Q_t) were used. Through an iterative process, it was identified that the best correlation between these variables is achieved by using two hidden layers in the model: one with four nodes and another with five nodes. The proposed formulation demonstrated significantly superior performance compared to traditional methods, such as Rankine (1862), Janbu (1953), Danish (1957), Gates (1957), Modified ENR (1965), WSDOT, FHWA-Gates, and Long (2001). Twenty statistical methods were employed to classify and determine the best fit between the calculated and measured values of total bearing capacity.

KEYWORDS: Piles, bearing capacity, dynamics methods, artificial neural network

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



1 Introdução

Desde o século passado, a monitoração da cravação de estacas é considerada de suma importância para o controle e aferição de fundações profundas. Atualmente, os métodos dinâmicos são uma ferramenta essencial para garantir a qualidade e o controle adequado das estacas cravadas. Com a evolução constante das técnicas de execução e a crescente necessidade de um controle mais rigoroso e informações detalhadas durante a cravação de estacas, surgiram diversos métodos para atender a essas demandas. Neste contexto, a introdução de metodologias baseadas na chamada "Equação da Onda", que descreve a propagação de ondas de tensão em barras, trouxe avanços significativos na técnica de monitoração das estacas. Smith (1962) introduziu a ideia de representar a cravação de uma estaca não mais como um fenômeno de impacto newtoniano entre dois corpos rígidos – como supõem as fórmulas dinâmicas – mas sim como um fenômeno de transmissão, através da estaca, de ondas de tensão.

A cravação de uma estaca é um fenômeno dinâmico: além da resistência estática do solo, há a mobilização de resistência viscosa (ou dinâmica) e, eventualmente, o aparecimento de forças inerciais. Portanto, ao utilizar as fórmulas dinâmicas, é importante considerar que a resistência oferecida pelo solo à penetração da estaca não é a capacidade de carga estática da estaca. Como as fórmulas dinâmicas são estabelecidas com base em diferentes hipóteses, seus resultados variam significativamente com coeficiente de correção que pode variar bastante (entre 2 e 10).

As formas de observação da resposta à cravação de uma estaca podem consistir em riscar uma linha horizontal na estaca com uma régua apoiada em 2 pontos da torre do bate-estacas, aplicar 10 golpes do martelo, riscar novamente, medir a distância entre os dois riscos e dividir esta distância por 10, obtendo-se a "nega" (Figura 1a). A outra maneira consiste em fixar uma folha de papel ao fuste da estaca e, no momento do golpe, deslizar um lápis na horizontal com o auxílio de uma régua apoiada em pontos fora da estaca. Nesse caso, o lápis deixará marcado no papel o movimento da estaca ao receber o golpe indicando a "nega" e o repique (Figura 1b). A ABNT NBR 6122/2019 define nega como sendo “a medida da penetração permanente de uma estaca, causada pela aplicação de um golpe de martelo ou pilão, sempre relacionada com a energia de cravação. Dada a sua pequena grandeza, em geral é medida para uma série de dez golpes”. Neste trabalho, a nega será indicada por s , quando de tratar da penetração da estaca para um golpe do martelo, e por s_{10gp} quando tratar da penetração da estaca para 10 golpes do martelo.

Atualmente, o monitoramento da cravação usa medidores com dois tipos de instrumentos (instalados em pares opostos): (i) acelerômetros, que após a integração das acelerações no tempo, fornecem o registro das velocidades e deslocamentos, e (ii) extensômetros ou defôrmetros, que medem as deformações, permitindo o registro das tensões ou força (Figura 1c). Os resultados do monitoramento são analisados pela Equação de Onda aplicada à cravação de estacas.

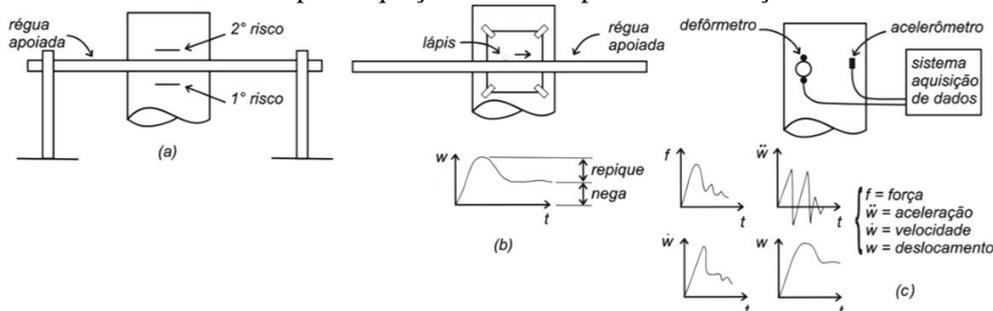


Figura 1. Medidas de nega, repique e monitoramento eletrônico em uma estaca.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



2 Fórmulas Dinâmicas segundo a Teoria de Choque

De acordo com Danziger & Lopes (2021), as fórmulas dinâmicas baseiam-se no princípio da conservação de energia, ou seja, igualam a energia potencial do martelo ao trabalho realizado na cravação da estaca. Algumas fórmulas introduziram um fator de eficiência no sistema de cravação. Isso é representado pela Equação 1, conforme mostrado a seguir,

$$\eta \cdot W_M \cdot h = R \cdot s + Y \quad (1)$$

onde η é a eficiência do martelo de cravação; W_M é o peso do martelo; h é a altura de queda do martelo; R é a resistência à cravação da estaca; s é a nega ou penetração da estaca (por golpe); e Y são as perdas de energia por deformações elásticas e no choque (energia não empregada para fazer a estaca penetrar). A Figura 2 mostra um gráfico resistência *versus* deslocamento, onde é possível observar a nega (s) e o repique elástico (c), para a aplicação de um golpe do martelo.

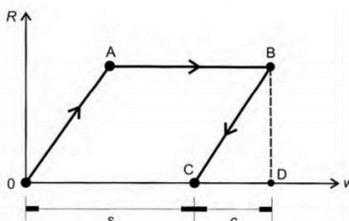


Figura 2. Gráfico força-deslocamento para um golpe.

Aplicando a Lei da Restituição de Newton para o choque entre dois corpos (martelo e estaca), é possível estimar a perda de energia como demonstrado na Equação 2,

$$Y = \frac{(1 - e^2) \cdot W_M \cdot P \cdot h}{W_M + P} \quad (2)$$

onde e é o coeficiente de restituição e P é o peso da estaca. Assim, a Equação 1 pode ser reescrita na forma da Equação 3. Quando se considera $\eta = 1$ (sem perdas) e $e = 0$, tem-se a chamada Fórmula dos Holandeses:

$$\frac{W_M \cdot h \cdot [\eta \cdot W_M + e^2 P + (\eta - 1) \cdot P]}{W_M + P} = R \cdot s \quad (3)$$

A seguir, serão apresentadas várias metodologias para o cálculo da capacidade de carga usando métodos dinâmicos. As unidades do Sistema Internacional de Unidades (SI) serão utilizadas. No entanto, algumas metodologias foram desenvolvidas com coeficientes empíricos, exigindo a utilização das unidades originais para as quais as formulações foram concebidas. Entre esses métodos, destacam-se: Gates (1957), WSDOT e FHWA-Gates (USDOT). As metodologias mencionadas serão apresentadas com os respectivos fatores de conversão de unidades para o SI.

As simbologias e unidades adotadas para as metodologias apresentadas são as seguintes: Q_r é a resistência a penetração da estaca (em kN); W_M é o peso do martelo (em kN); P é o peso da estaca (em kN); h é a altura de queda do martelo (em m); L é o comprimento da estaca (em m); E_p é o módulo de Young do material da estaca (kPa); A é a área da seção transversal da estaca (em m²); η é a eficiência do martelo de cravação; e s é a penetração da estaca por golpe (em m/golpe). Na Equação 4, a formulação proposta de Rankine (1862 *apud* Lowery Jr *et al.*, 1968).

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



$$Q_t = \frac{2 \cdot A \cdot E_p}{L} \left[-s + \sqrt{s^2 + \frac{W_M \cdot h}{\left(\frac{A \cdot E_p}{L}\right)}} \right] \quad (4)$$

A formulação proposta por Janbu (1953 *apud* Gallegos, 2014) é mostrada na Equação 5. Ela utiliza constantes empíricas e considera a relação entre os pesos da estaca e do martelo, além das perdas de energia por compressão elástica da estaca. O autor da metodologia recomenda a adoção de um fator de correção igual a 2.

$$Q_t = \frac{\eta \cdot W_M \cdot h}{s \cdot \left[C_d \left(1 + \sqrt{1 + \frac{\lambda}{C_d}} \right) \right]} \quad (5)$$

onde $C_d = 0,75 + 0,15 \cdot (P/W_M)$; e $\lambda = \eta \cdot W_M \cdot h \cdot L / (A \cdot E_p \cdot s^2)$.

Soresen e Hansen (1957 *apud* Danziger & Lopes, 2021) propuseram uma equação obtida por meio de análises dimensionais, que considera apenas a perda de energia devido à deformação elástica da estaca e a eficiência do martelo. Esse método, também conhecido na literatura geotécnica como "Fórmula dos Dinamarqueses", é apresentado na Equação 6.

$$Q_t = \frac{\eta \cdot W_M \cdot h}{s + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2 \cdot \eta \cdot W_M \cdot h \cdot L}{A \cdot E_p}}} \quad (6)$$

Recomenda-se $\eta = 0,70$ para martelos de queda livre operados por guincho e $\eta = 0,90$ para martelos automáticos, com fator de correção igual a 2,0. Sugere-se, ainda, como orientação para cravação, os valores mostrados na Tabela 1:

Tabela 1. Valores indicativos para o sistema de cravação.

Tipo de Estaca	$(\eta h)_{\text{máx}}$	$(W_M/P)_{\text{mín}}$
Pré-moldada de concreto	1 m	0,5
Metálica	2 m	1,5
Madeira	4 m	0,75

Long *et al.* (2009) destacam que Gates originalmente desenvolveu sua fórmula dinâmica de cravação de estacas em 1957. A formulação empírica, foi adaptada para as unidades do SI pelos autores do presente trabalho e é mostrada na Equação 7. A eficiência recomendada para o método de Gates é de 0,75 para martelos de queda livre e 0,85 para outros tipos de martelos.

$$Q_t = 103,55 \sqrt{\eta \cdot h \cdot W_M} \cdot \log \left(\frac{0,25}{s} \right) \quad (7)$$

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.





Em 1965, o *Michigan State Highway Department* (Departamento de Rodovias do Estado de Michigan) propôs uma versão modificada do ENR (*Engineering News Record*) como resultado de uma pesquisa abrangente para comparar a eficácia de diversas fórmulas dinâmicas na previsão da capacidade de carga de estacas. Essa versão ajusta a fórmula do original do ENR, multiplicando-a por um fator específico. Aqui será a *Modified ENR*, como na Equação 8,

$$Q_t = \frac{\eta \cdot h \cdot W_M}{s + z} \times \frac{W_M + n^2 P}{W_M + P} \quad (8)$$

onde $z = 0,00254$ m (martelos à vapor) e $0,0254$ m (queda livre); n é o coeficiente de restituição.

De acordo com Long *et al.* (2009), o *Washington Department of Transportation* (WSDOT) realizou mudanças significativas na formulação original de Gates. O método é mostrado na Equação 9, que já incorpora os fatores de conversão de unidades para o SI. A eficiência recomendada para o método WSDOT é de 0,55 para todos os tipos de estacas cravadas com um martelo de ar/vapor, 0,37 para martelos a diesel de em estacas de concreto e madeira, 0,47 para estacas de aço cravadas com um martelo a diesel e 0,35 para todas as estacas cravadas com um martelo a diesel (uso de estaca com base fechada).

$$Q_t = 21,65 \cdot \eta \cdot h \cdot W_M \cdot \ln\left(\frac{0,25}{s}\right) \quad (9)$$

O *Federal Highway Administration* (FHWA) recomenda uma modificação da fórmula original de Gates, conforme demonstrada no trabalho de Long *et al.* (2009) e será denominada como FHWA-Gates (ou USDOT). Sendo uma formulação desenvolvida com coeficientes empíricos, a equação apresentada na forma modificada incorpora os fatores de conversão ao SI.

$$Q_t = 211,41 \sqrt{\eta \cdot h \cdot W_M} \cdot \log\left(\frac{0,25}{s}\right) - 444,822 \quad (10)$$

Long (2001 *apud* Long *et al.* 2009) propôs uma correção da equação original de Gates conforme equação mostrada a seguir:

$$Q_{t(\text{Long})} = 0,25 \cdot Q_{t(\text{Gates})}^{1,35} \quad (11)$$

“O número de fórmulas dinâmicas chega à centena. Na literatura técnica encontram-se algumas revisões dessas fórmulas, baseadas em comparações de resultados de provas de carga estáticas com previsões pelas diferentes fórmulas (p.ex., Olsen e Flaate, 1967; Tavenas e Andy, 1972; Poulos e Davis, 1980). Na revisão feita por Poulos e Davis (1980), por exemplo, a fórmula da *Engineering News Record* é considerada pouco confiável, pois foram encontrados valores de F numa ampla faixa, enquanto as fórmulas de Janbu e dos Dinamarqueses apresentam valores de F com menor dispersão e bastante próximos de 2. Os autores têm uma boa experiência com esta última fórmula para estacas metálicas e pré-moldadas de concreto” (Velloso & Lopes, 2010).

3 Dados de Estudo

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



Na elaboração deste trabalho, foram analisados 375 casos provenientes da literatura nacional e internacional. Dentre eles, pode-se citar os trabalhos de Jayaweera (2009), Robinson *et al.* (2002), Albuquerque (1996), Gonçalves *et al.* (2000), Gonçalves *et al.* (2007), Aoki (1997), Andraos (2009), Medrano (2014), Marchezini (2013), Cavassani (2005) e Mantuano (2018), bem como resultados provenientes de banco de dados pessoal dos autores. As informações utilizadas neste estudo incluíram o tipo de ensaio, o diâmetro da estaca (D), o comprimento da estaca (L), a altura de queda do martelo (h), o peso do martelo (W_M), a nega para 10 golpes (s_{10gp}), o módulo de elasticidade da estaca (E_p) e a carga máxima de ensaio (Q_{max}). A fim de proporcionar uma síntese do conjunto de dados empregado nas análises, a Tabela 2 exibe medidas descritivas essenciais, incluindo a média (μ), os valores máximos e mínimos, o desvio padrão (σ), a curtose e a assimetria. O estudo abrangeu 375 ensaios, dos quais 45 foram ensaios estáticos e os 330 restantes foram ensaios de carregamento dinâmico. Os dados referentes ao diâmetro e altura de queda do martelo apresentaram consistência na faixa central, com valores próximos à média, indicando homogeneidade na amostra analisada. Essa situação pode ser visualizada graficamente, com os valores de curtose e assimetria, reforçando matematicamente a informação exibida nos histogramas (Figura 3). A utilização de histogramas permite identificar dados de entrada com distribuição próxima à normal, tornando-os mais adequados como entrada no modelo proposto.

Tabela 2. Medidas descritivas do conjunto de dados do estudo.

Parâmetro	Mínimo	Média aritmética	Máximo	Desvio Padrão	Curto e	Assimetria
D (m)	0,141	0,551	1,200	0,229	-0,081	0,594
L (m)	3,000	17,941	40,000	6,925	0,017	0,564
h (m)	0,200	1,373	4,000	0,658	1,305	0,944
W_M (kN)	15,000	51,290	85,000	19,488	-1,273	-0,215
s_{10gp} (mm/10gp)	0,300	35,326	275,000	39,001	12,705	3,049
E_p (GPa)	19,273	43,940	210,000	48,266	8,002	3,142
Q_{max} (kN)	244,000	2822,795	12324,000	2130,252	4,107	1,886

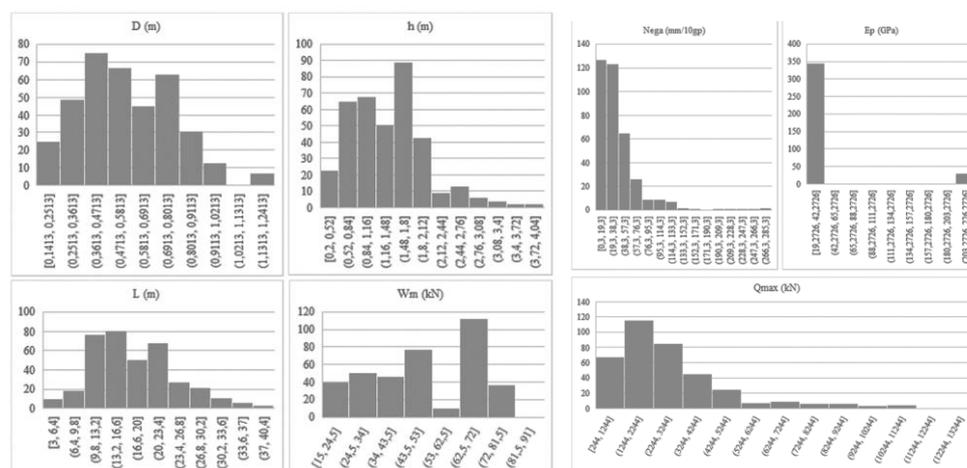


Figura 3. Histogramas das distribuições dos conjuntos de dados - D, L, h, W_M , s_{10gp} , E_p e Q_{max} .

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.



O presente trabalho apresenta uma metodologia desenvolvida a partir de Rede Neural Artificial (RNA), denominada *Anjos et al.* A rede neural artificial é um modelo computacional inspirado no funcionamento do cérebro humano, composta por uma rede de neurônios interconectados em camadas ocultas. Essas camadas são categorizadas em camada de entrada, camada(s) oculta(s) e camada de saída.

Durante o processo de treinamento, a rede neural ajusta os pesos das conexões entre neurônios para minimizar o erro entre as previsões e os valores reais (obtidos a partir das provas de carga). As funções de ativação desempenham um papel essencial na RNA, introduzindo não-linearidade no modelo e permitindo que ele aprenda e estabeleça relações complexas nos dados. Para esse propósito, a função de ativação tangente hiperbólica (\tanh) é uma das opções comuns.

Uma vez determinadas as melhores variáveis, o próximo passo é definir o número de camadas (*layers*) e o número de nós (*hidden nodes*) da RNA. Após um processo de tentativa e erro, identificou-se que o modelo apresenta uma melhor correlação usando duas camadas ocultas. A primeira camada possui 4 nós, e a segunda camada possui 5 nós. A Figura 4 apresenta a arquitetura da rede e a função de ativação nas duas camadas ocultas é a tangente hiperbólica.

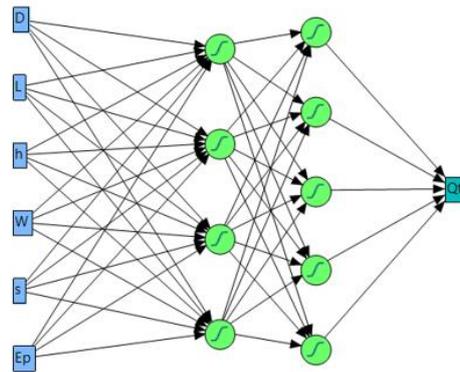


Figura 4. Modelo da arquitetura de rede para previsão da capacidade de carga.

O modelo de rede neural artificial proposto foi submetido a um processo de treinamento e validação com o auxílio computacional. O treinamento envolveu a apresentação dos dados para que a rede pudesse aprender padrões e ajustar seus parâmetros. Obteve-se, então, a formulação mostrada na Equação 12. O processo demonstrou a eficácia do modelo na resolução do problema.

$$Q_t = -4550,012.HH1 - 9563,39388.HH2 - 1219,66272.HH3 - 574,49785.HH4 - 1676,68471.HH5 + 10318,28461 \quad (12)$$

$$H1 = \tanh [-4,99570.D + 0,17137.L + 0,58816.h + 0,12872.W_M - 0,00555.s_{10gp} + 0,00785.E_p - 6,96395] \quad (13)$$

$$H2 = \tanh [1,06243.D - 0,04157.L - 0,43541.h - 0,03354.W_M + 0,03101.s_{10gp} - 0,00751.E_p + 3,44299] \quad (14)$$

$$H3 = \tanh [7,11422.D - 0,06176.L - 1,30027.h + 0,02139.W_M + 0,00446.s_{10gp} + 0,00314.E_p - 3,21004] \quad (15)$$

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.



$$H4 = \tanh [0,02529.D + 0,01433.L + 0,20104.h + 0,01218.W_M - 0,00199.s_{10gp} + 0,00191.E_p - 1,62052] \quad (16)$$

$$HH1 = \tanh [-0,10514.H1 - 0,49534.H2 - 0,03208.H3 - 1,01356.H4 - 0,44073] \quad (17)$$

$$HH2 = \tanh [0,72920.H1 + 1,04634.H2 - 1,10764.H3 - 1,49725.H4 + 0,43025] \quad (18)$$

$$HH3 = \tanh [-0,56957.H1 + 0,04971.H2 - 0,15123.H3 - 0,62071.H4 + 0,31218] \quad (19)$$

$$HH4 = \tanh [-0,27644.H1 - 0,41722.H2 - 0,06765.H3 - 1,63401.H4 + 0,63620] \quad (20)$$

$$HH5 = \tanh [1,17886.H1 - 0,04797.H2 + 0,42217.H3 - 0,22568.H4 - 0,55537] \quad (21)$$

Na Figura 5 é apresentado um gráfico comparando os valores medidos e calculados pelo modelo proposto. As unidades dos parâmetros a serem utilizadas na formulação são as mesmas que são indicadas na Tabela 2.

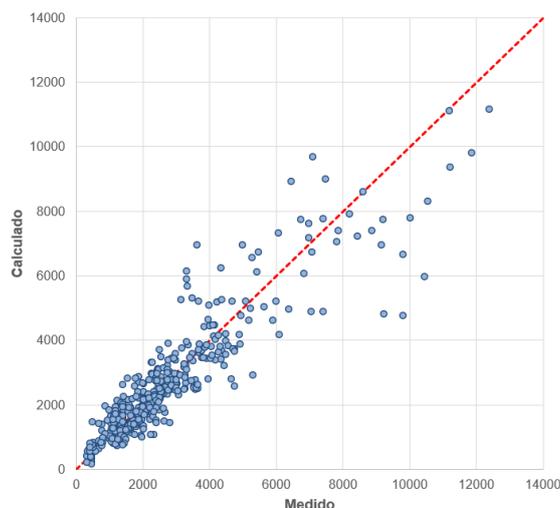


Figura 5. Valores medidos versus calculados para o método Anjos *et al.*

Foram empregados vinte métodos estatísticos para classificar e determinar o método de melhor desempenho quando analisando os valores calculados e medidos da capacidade de carga total, incluindo o método proposto. Dentre os métodos estatísticos, destacam-se: Ranking Distance (RD); Coeficiente de determinação (r^2); Erro Absoluto Médio (MAE); Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE); Erro Percentual Absoluto Médio (MAPE); Índice de Concordância de Willmott (d); Índice de Mielke Modificado (λ); Índice de Performance (ρ); Índice de Referência (IR), dentre outros. Além disso, realizou-se um ajuste posterior através da multiplicação de um coeficiente α em cada metodologia. Um ranking foi elaborado, abrangendo as metodologias em suas formas originais e melhoradas, conforme apresentado na Tabela 3. Observou-se que a metodologia proposta demonstrou um desempenho superior em relação às

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



demais, destacando-se como líder na classificação. O destaque quando da inclusão do coeficiente α foi com relação a forte melhoria do método de Rankine (usando $\alpha=0,285$). O método proposto (com ou sem a inclusão de α mostrou-se superior em relação aos métodos tradicionais.

Tabela 3. Classificação dos modelos de previsão da capacidade de carga

Ordem	Capacidade de Carga (Q_i)		
	Métodos Originais	Métodos Melhorados	α
1	Anjos <i>et al.</i> (2022)	Anjos <i>et al.</i> (2022)	0,987
2	Janbu (1953)	Rankine (1862)	0,285
3	FHWA-Gates (USDOT)	Dinamarqueses (1957)	0,525
4	Gates (1957)	WSDOT	0,656
5	WSDOT	Janbu (1953)	1,041
6	Dinamarqueses (1957)	Long (2001)	0,506
7	Long (2001)	FHWA-Gates (USDOT)	0,960
8	Rankine (1862)	Gates (1957)	1,589

4 Conclusões

Os métodos dinâmicos tornaram-se imprescindíveis para garantir a qualidade e o adequado controle das estacas cravadas, com diversas metodologias para atender às demandas desse cenário desafiador. Neste estudo, a análise estatística foi usada para classificar e correlacionar os valores calculados e medidos da capacidade de carga total (incluindo uma nova metodologia).

A análise envolveu a avaliação de 375 casos provenientes da literatura nacional e internacional. O modelo de Rede Neural Artificial (RNA) proposto demonstrou eficácia na resolução do problema e na realização de previsões altamente precisas. A formulação proposta para a capacidade de carga é apresentada na Equação 12, porém, ressalta-se que esta equação sugerida deve ser aplicada exclusivamente aos dados dentro das faixas de valores mostradas na Tabela 2. As formulações dinâmicas não devem ser utilizadas isoladamente, mas sim de maneira complementar, visando obter valores de capacidade de carga com maior grau de confiabilidade em comparação com outras metodologias.

Nesse contexto, foram aplicados vinte métodos estatísticos para avaliar o desempenho das diferentes metodologias, incluindo o novo método proposto, que obteve uma performance significativamente superior em comparação com as metodologias tradicionais já consolidadas na literatura. Além disso, a aplicação de um coeficiente de melhoria (α) resultou em previsões mais precisas para o método proposto, bem como para os métodos de Rankine e Dinamarqueses, com valores específicos de α atribuídos a cada um (0,987, 0,285 e 0,525, respectivamente). Alguns métodos apresentaram mudanças expressivas ao serem otimizados pelo coeficiente α , resultando em significativas alterações em relação às suas versões originais. Por exemplo, na metodologia proposta por Long (2001), foi necessário aplicar uma redução de 50% do valor original obtido, enquanto que no método proposto, o coeficiente α utilizado foi menos sensível ($\alpha = 0,987$).

Diante disso, é crucial destacar que o ensaio de carregamento dinâmico é a forma mais adequada para prever a análise dinâmica em estacas e, portanto, não deve ser negligenciado em relação ao conteúdo deste estudo.

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.





REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albuquerque, P. J. R. (1996) *Análise do comportamento de estaca pré-moldada de pequeno diâmetro, instrumentada, em solo residual de diabásio da região de Campinas*. Dissertação de Mestrado – FEAGRI, Unicamp, 1996, 170f.
- Andraos, N. C. (2009) *Ensaio de Carregamento Dinâmico em Estacas Moldadas In Loco: Contribuições para a seleção do sistema de impacto e amortecimento a partir de retro-análise*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Construção Civil da UFPr, Curitiba, 2009.
- Aoki, N. (1997) *Determinação da capacidade de carga última de estaca cravada em ensaio de carregamento dinâmico de energia crescente*. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.
- ABNT (2019). NBR 6122. *Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro.
- Cavassani, M. R. P. (2005) *Avaliação da capacidade de carga de estacas metálicas tubulares de alta resistência através de provas de carga dinâmica de energia crescente*. Dissertação de mestrado - Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 198p.
- Danziger, B. R., Lopes, F. R. (2021) *Fundações em Estacas*, 1ª ed, LTC Editora, Rio de Janeiro.
- Gallegos, R. V. (2014) *Aplicabilidade da equação de onda e de fórmulas dinâmicas na estimativa da capacidade de carga em estaca*. Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, 198 p.
- Gonçalves, C., Andreo, C. S., Bernardes, G. P., Fortunato, S. G. S. (2000) *Controle de fundações profundas através de métodos dinâmicos*. 1. ed. São Paulo: [s. n.], 2000.
- Gonçalves, C., Bernardes, G. P., Neves, L. F. S. (2007) *Estacas Pré-Fabricadas de Concreto: Teoria e Prática*, 1ª Ed. São Paulo. Oficina de Textos.
- Jayaweera, M. S. R. (2009) *Capacity Estimation of Piles Using Dynamic Methods*. MSc in Foundation Engineering & Earth Retaining Systems. University of Moratuwa. Sri-Lanka.
- Long, J., Hendrix, J., Jaromin, D. (2009) *Comparison of five different methods for determining pile bearing capacities*, Report No. 0092-07-04, Wisconsin Department of Transportation.
- Lowery, L. L., Finley, J. R., Hirsch, T. J. (1968) *A Comparison of Dynamic Pile Driving Formulas with the Wave Equation*. Texas Transportation Institute, Texas A & M University.
- Mantuano, R. M. (2018) *Contribuição à confiabilidade de estacas metálicas por meio da interpretação de ensaios de carga e aplicação da teoria bayesiana*. (Mestrado) UERJ.
- Marchezini, S. F. (2013) *Comparação entre Métodos Estáticos e Dinâmicos de Previsão de Capacidade de Carga em Estacas Assentes em Solo Tropical*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 171p.
- Medrano, M. L. O. (2014) *Avaliação de métodos dinâmicos baseados em nega e repique elástico: estudo de caso*. 236f. Dissertação – EESC, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.
- Michigan State Highway Commission (1965). *A Performance Investigation of Pile Driving Hammers and Piles*. Final Report. Research Project 61 F-60. Lansing, March 1965.
- Olsen, R., Flaate, K., (1967) *Pile Driving Formulas for Friction Piles in Sand*. *ASCE JSMFC*, Vol. 93, SM6, November 1967, pp. 279-297.
- Poulos, H. G., Davis, E. H. (1980) *Pile foundation analysis and design*. John Willey, New York.
- Robinson, B., Rausche, F., Likins, G. E. (2002) *Dynamic Load Testing of Drilled Shafts at National Geotechnical Experimentation Sites*. *Deep Foundations 2002, An International Perspective on Theory, Design, Construction, and Performance*, GSP No. 116.
- Smith, E. A. (1962). *Pile-Driving Analysis by the Wave Equation*, *JSMFDivision*. ASCE.
- Tavenas, F., Andy, R., (1972) *Limitations of the driving formulas for predicting the bearing capacities of piles in sand*. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 14, nº1, pp. 34-51.
- Velloso, D. A.; Lopes, F. R. (2010) *Fundações Vol. Único*. São Paulo, SP, Oficina de Textos, 2

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.

