

# Sobre Métodos de Capacidade de Carga Geotécnica para Estaca Raiz usando Ferramental Estatístico e RNA

Gérson Jacques Miranda dos Anjos  
Professor, UFPA, Belém - PA, Brasil, mirandadosanjos@gmail.com

Marcelo Seabra de Andrade  
Graduado em engenharia civil, UFPA, Belém - PA, Brasil, eng.marceloseabra@gmail.com

Alberto Miranda Pereira  
Engenheiro Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil, alberto.miranda1997@gmail.com

**RESUMO:** As estacas do tipo raiz compõem a classe de estacas escavadas em que há grande uso em todo o território brasileiro. A partir de um conjunto de 60 provas de carga que serão analisadas com o uso de ferramental estatístico, objetiva-se chegar a uma formulação de carga total com melhor desempenho em relação às demais formulações sugeridas na literatura geotécnica. Ainda, os métodos mais usados na literatura podem ser combinados com o intuito de melhorar a previsão entre valores calculados e medidos. Por fim, uma simples tentativa foi feita no sentido de formulação para a carga geotécnica total usando Rede Neural Artificial com as variáveis:  $N_{spt\_fuste}$ ,  $N_{spt\_base}$ , diâmetro, comprimento e das porcentagens de tipo de solo ao longo do fuste e da base da estaca (arenoso, argiloso ou siltoso). Os métodos sugeridos foram superiores estatisticamente quando comparados aos demais métodos usados na literatura geotécnica. Por fim, o artigo pode ser de grande valia para a comunidade geotécnica e servir para nortear os projetos de fundações, apesar de saber que a geotecnia é local e deve ser trabalhada com as peculiaridades próprias de cada região.

**PALAVRAS-CHAVE:** Estaca raiz, estatística, rede neural artificial, capacidade de carga total

**ABSTRACT:** The root piles belong to the class of excavated piles widely used throughout the Brazilian territory. Based on a set of 60 load tests that will be analyzed using statistical tools, the objective is to develop a total bearing capacity formulation with better performance compared to other formulations suggested in the geotechnical literature. Furthermore, the most commonly used methods in the literature can be combined to improve the prediction between calculated and measured values. Finally, a simple attempt was made to formulate the total geotechnical load using Artificial Neural Network with variables such as  $N_{spt\_shaft}$ ,  $N_{spt\_base}$ , diameter, length, and the percentages of soil type along the shaft and base of the pile (sandy, clayey, or silty). The suggested methods were statistically superior when compared to other methods used in geotechnical literature. Ultimately, the article could be of great value to the geotechnical community and serve to guide foundation projects, although it is understood that geotechnics are local and should be addressed with the peculiarities of each region.

**KEYWORDS:** Root pile, statistics, artificial neural network, total load capacity

## 1 INTRODUÇÃO

Desde sua patente em 1952 na Itália pelo engenheiro Fernando Lizzi, a estaca raiz foi amplamente utilizada no reforço de fundações e controle de recalques, especialmente em estruturas históricas e outras construções contemporâneas. Atualmente, as estacas raiz desfrutam de uma ampla aplicabilidade no campo da Geotecnia de Fundações, com diâmetros típicos variando de 200 a 500 mm, sendo os diâmetros de 200, 250, 310 e 410 mm os mais comumente utilizados. Elas são empregadas tanto em solos como em maciços rochosos, ou em ambas as condições geotécnicas. Atualmente, a NBR 6122/2019 no seu item 3.23 mostra a definição de estaca raiz: “estaca armada e preenchida com argamassa de cimento e areia, moldada in loco executada por

perfuração rotativa ou rotopercussiva, revestida integralmente, no trecho em solo, por um conjunto de tubos metálicos recuperáveis”.

Atualmente, diversos métodos para avaliação da capacidade de carga total de fundações do tipo raiz foram desenvolvidos e apresentados à comunidade geotécnica. Entre esses métodos, destacam-se: Décourt & Quaresma (1978), Cabral (1986), Brasfond (1991), Aoki & Velloso (1975), Monteiro (1997) e Teixeira (1996). Os métodos de Décourt & Quaresma, Aoki & Velloso e Monteiro foram adaptados para estacas raiz, enquanto outros, como Cabral (1986), Brasfond (1991) e Teixeira (1996), foram concebidos especificamente para esse tipo de fundação. Com a perspectiva de que um determinado método pode ter melhor desempenho que outros em determinado local, faz-se esse estudo com 60 provas de carga para que seja apreciado e testado pela comunidade geotécnica (Anjos, 2006)

## 2 FERRAMENTAL ESTATÍSTICO E REDE NEURAL ARTIFICIAL (RNA)

O ferramental estatístico empregado neste trabalho consiste em 20 diferentes ferramentas, utilizadas para classificar os métodos, visando estabelecer um *ranking* entre eles. Adicionalmente, essas mesmas ferramentas são empregadas na busca por um coeficiente que possa melhorar o desempenho dos métodos em relação aos valores calculados e medidos. Tal escolha se deu em virtude de que o uso de diferentes ferramentas ( $r^2$ , MAE e RMSE) pode levar a conclusões distintas quando se compara valores calculados (previstos) e valores medidos de grandezas quaisquer.

Aqui, optou-se pela avaliação na forma de *ranking*, utilizando as seguintes ferramentas estatísticas: Índice de Referência (IR); Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (E); Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE); Índice de Performance; Índice de Legate & McCabe (LMI); Erro Absoluto Médio (MAE); Erro Percentual Absoluto Médio Ponderado (WMAPE); Incerteza Expandida (U95); Índice de Mielke Modificado; Índice de Concordância de Willmott (d); Probabilidade LogNormal (P<sub>ln</sub>) - tipicamente com acurácia de 20%; Erro Percentual Absoluto Médio (MAPE); Coeficiente de Determinação ( $r^2$ ); Probabilidade Normal (P) - tipicamente com acurácia de 20%; Ranking Index (RI); Raiz do Erro Percentual Quadrático Médio (RMSPE), Ranking Distance (RD); Variância Explicada (VAF); Erro Percentual Absoluto Mediano (MedAPE); e Raiz do Erro Quadrático Médio Sistemático (RMSEs). A definição de cada um dos métodos estatísticos é de fácil obtenção e, por limitação de espaço, serão somente citados (o primeiro autor disponibiliza aos requerentes).

O padrão de funcionamento do algoritmo de processamento de dados se assemelha ao da célula nervosa biológica (neurônio), motivo pelo qual recebeu a denominação de *Rede Neural Artificial* (RNA). Para Haykin (2001), a RNA pode ser definida como um sistema de processamento distribuído de forma paralela, constituído de unidades de processamento simples, denominados neurônios, destinados a armazenagem de conhecimentos, tornando-os disponíveis ao uso. Assim como nas células biológicas, as saídas dos processamentos da RNA podem ser transmitidas para unidades de processamento posteriores (modelos multicamadas) ou retornar de imediato, após uma camada, os valores numéricos descritivos dos elementos em análise. Nos problemas de RNA, detêm-se valores de entrada e saída, de tal modo que a problemática consiste na determinação de parâmetros que efetuem com eficiência a conexão entre esses elementos. Esse processo é realizado na unidade básica de processamento, o neurônio. A Figura 1 mostra um modelo matemático de um “neurônio artificial”.

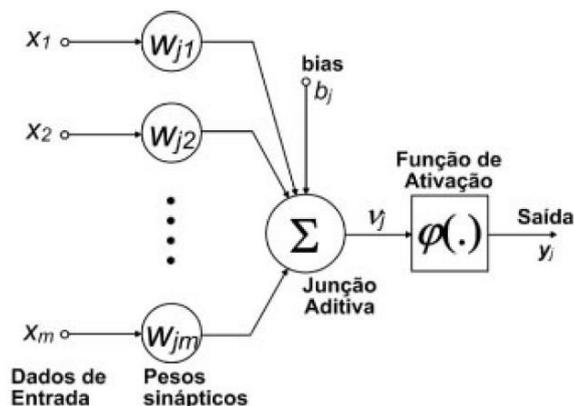


Figura 1. Modelo matemático de um neurônio artificial

De acordo com o modelo de neurônio apresentado na Figura 1, os elementos envolvidos no processamento de dados podem ser determinados da seguinte maneira: (a) Os dados de entrada dos neurônios ( $x_1, x_2, x_3, \dots, x_m$ ) representam as variáveis do fenômeno estudado e são utilizados para ajustar a rede durante o treinamento; (b) Os pesos sinápticos associados às entradas ( $w_{j1}, w_{j2}, w_{j3}, \dots, w_{jm}$ ), determinados durante o treinamento da RNA, são fatores de ponderação aplicados às entradas do modelo; (c) O viés da camada oculta, ou *bias* ( $b_j$ ), é um parâmetro de correção incorporado à camada para prever e adaptar o modelo a possíveis erros e incertezas do processo; (d)  $v_j$  representa o processo de combinação ponderada dos sinais de entrada com seus respectivos pesos sinápticos, somado ao *bias*; (e) A função de ativação  $\varphi(\cdot)$  é empregada para restringir a saída de dados a valores dentro do intervalo de amplitude do conjunto de dados em estudo, aumentando a precisão do modelo; (f) A saída do processamento ( $y_j$ ) pode ser encaminhada para neurônios de camadas subsequentes ou servir como resposta final, caso o modelo seja de apenas uma camada. No processo de treinamento da RNA, o parâmetro de saída é tão importante quanto os parâmetros de entrada.

### 3 APRESENTAÇÃO DOS DADOS

Os dados utilizados para validar as metodologias propostas estão disponíveis na Tabela 1, que inclui informações sobre a geometria da seção transversal (diâmetro variando de 0,17 m a 0,41 m) e comprimento (variando entre 8 a 34 m). Quanto aos valores de  $N_{spt\_fuste}$ , têm-se valores entre 2 e 41, e para o  $N_{spt\_base}$ , variam entre 5 e 60. A base de dados utilizada inclui casos disponíveis na literatura geotécnica, bem como casos de arquivo pessoal dos autores.

Tabela 1. Dados – 60 Provas de carga em estaca raiz

DADOS DA PROVA DE CARGA					% SOLO NO FUSTE			% SOLO NA BASE		
Prova de carga	$D_f$ (m)	L (m)	$N_{spt\_fuste}$	$N_{spt\_base}$	% Arenoso	% Siltoso	% Argiloso	% Arenoso	% Siltoso	% Argiloso
USP-5	0,27	20,23	5	11,98	75	0	25	100	0	0
CEUnB-R2	0,18	10,17	3	10,48	0	20	80	0	100	0
CEUnB-R3	0,18	9,97	3	10,48	0	20	80	0	100	0
CEUnB-R5	0,18	10,02	3	10,48	0	20	80	0	100	0
Anjos-1	0,30	8	2	5,21	0	0	100	0	0	100
Anjos-2	0,30	8	2	6,32	0	0	100	0	0	100
UCDR	0,41	25,5	18	53,9	34,6	0	65,4	0	0	100
Unicamp-B-09	0,41	12	5	8,54	0	50	50	0	100	0
Unicamp-B-10	0,41	12	3	7,13	0	50	50	0	100	0
Unicamp-B-15	0,41	12	3	6,43	0	50	50	0	100	0
Unicamp-A-07	0,31	23	6,5	15,66	0	73,9	26,1	0	100	0
Unicamp-A-18	0,31	23	6	16,4	0	73,9	26,1	0	100	0
Unicamp-A-19	0,31	23	5	16,4	0	73,9	26,1	0	100	0
CADAM-E157-02	0,31	30	11	43,12	26,7	0	73,3	100	0	0
CADAM-E157-04	0,31	30	14	37,43	33,3	0	66,7	100	0	0
CADAM-E62-04	0,31	28,5	12,5	31,42	31,0	0	69,0	100	0	0
CADAM-E91-01	0,31	30	14	37,33	30	0	70	0	0	100
CADAM-E94-01	0,31	33	14	60	27,3	0	72,7	0	0	100
CADAM-E130-02	0,31	30	11	43,12	26,7	0	73,3	100	0	0
Anjos-E-22	0,41	18	11	31,59	94,4	5,6	0	100	0	0
Anjos-E-24	0,41	17,9	11	31,59	94,4	5,6	0	100	0	0
Anjos-E-48	0,41	14,9	4,5	16,11	40	53,3	6,7	100	0	0
Anjos-E-58	0,41	10,8	3,5	7,71	18,2	72,7	9,1	100	0	0
Anjos-E-29	0,41	16,7	30,5	60	76,5	0	23,5	100	0	0
Anjos-E-36	0,41	17,7	33	60	77,8	0	22,2	100	0	0
Anjos-E-40	0,41	17,7	33	60	77,8	0	22,2	100	0	0
Anjos-E-47	0,41	17,7	33	60	77,8	0	22,2	100	0	0
Anjos-E-54	0,41	18,9	41	60	79,0	0	21,1	100	0	0
Anjos-E-01	0,41	14	17	60	71,4	28,6	0	100	0	0
Anjos-E-04	0,41	15	38,5	60	73,3	26,7	0	100	0	0
Anjos-E-07	0,41	15	38,5	60	73,3	26,7	0	100	0	0
Anjos-E-12	0,41	15	38,5	60	73,3	26,7	0	100	0	0
Anjos-E-18	0,41	14	20	60	50	14,3	35,7	100	0	0

Tabela 1. Dados – 60 Provas de carga em estaca raiz (continuação)

Prova de carga	DADOS DA PROVA DE CARGA				% SOLO NO FUSTE			% SOLO NA BASE		
	D <sub>i</sub> (m)	L (m)	N <sub>spt,fuste</sub>	N <sub>spt,base</sub>	% Arenoso	% Siltoso	% Argiloso	% Arenoso	% Siltoso	% Argiloso
AMANN-G101	0,20	21	6,5	9,67	28,6	0	71,4	0	0	100
AMANN-G102	0,20	20	6	9,01	30	0	70	100	0	0
AMANN-G201	0,25	32	4	8,42	56,3	9,4	34,4	0	100	0
AMANN-G202	0,25	20,92	3	9,97	71,4	4,8	23,8	0	100	0
AMANN-G203	0,25	18	3	6,31	44,4	11,1	44,4	0	100	0
AMANN-G204	0,25	25,96	4	5,04	61,5	0	38,5	0	0	100
AMANN-G301	0,25	21	4	16,74	100	0	0	100	0	0
AMANN-G302	0,25	23	4	20,66	100	0	0	100	0	0
AMANN-G401	0,25	34	6	15,48	58,8	0	41,2	100	0	0
AMANN-G402	0,31	23,2	12	9,16	73,9	0	26,1	100	0	0
AMANN-G403	0,31	34	6	22,74	61,8	2,9	35,3	100	0	0
AMANN-G404	0,31	34	9	24,31	64,7	0	35,3	100	0	0
AMANN-G501	0,20	23	13,5	24,8	17,4	0	82,6	0	0	100
AMANN-G502	0,20	23	13,5	24,8	17,4	0	82,6	0	0	100
AMANN-G503	0,25	23	13,5	24,8	17,4	0	82,6	0	0	100
AMANN-G504	0,25	23	13,5	24,8	17,4	0	82,6	0	0	100
AMANN-G601	0,25	16	5	11,71	100	0	0	100	0	0
AMANN-G602	0,17	20	6	50	45	0	55	100	0	0
AMANN-G603	0,25	20,23	5	12,14	75	0	25	100	0	0
AMANN-G701	0,25	15	8,5	28,69	0	93,3	6,7	0	100	0
AMANN-G702	0,25	14	8	46,5	57,1	0	42,9	100	0	0
AMANN-G703	0,25	20,5	7	11,85	42,9	0	57,1	100	0	0
AMANN-G704	0,25	27,5	4	19,96	46,4	0	53,6	100	0	0
AMANN-G706	0,40	21	14	47,33	14,3	0	85,7	0	0	100
AMANN-G707	0,25	20,1	17	60	80	20	0	100	0	0
AMANN-G708	0,25	27,4	13	16,54	22,2	0	77,8	100	0	0
AMANN-G709	0,25	24,4	14	16,16	45,8	0	54,2	0	0	100

Na Tabela 1, N<sub>spt,base</sub> é a média geométrica dos valores de N<sub>spt</sub> no intervalo compreendido entre a base e 4 m acima dela; N<sub>spt,fuste</sub> é a mediana dos valores de N<sub>spt</sub> ao longo do fuste (sem considerar os valores utilizados na base). Além disso, q<sub>b</sub> ≤ 3,2 MPa e 55 ≤ q<sub>l</sub> ≤ 101 kPa. O N<sub>spt</sub> deve estar entre 1 e 60.

É essencial que as metodologias sejam utilizadas respeitando os limites dos valores de N<sub>spt</sub> (fuste e base). As análises dos solos ao longo do fuste das estacas ensaiadas revelam a predominância de solo argiloso, seguido por solo arenoso e, em menor proporção, solo siltoso e areia. Essa informação proporciona maior segurança ao usuário quanto ao tipo de estratigrafia dominante ao empregar os métodos. O termo "Argiloso" abrange a soma das porcentagens dos solos que possuem fração argilosa predominante, tal como: Argila Siltosa, Argila Arenosa, Argila Silto-Arenosa e Argila Areno-Siltosa. Analogamente, o mesmo raciocínio se aplica aos termos "Arenoso" e "Siltoso". Observa-se, por fim, que as frações de argila e silte (apenas) possuem uma porcentagem muito baixa ou nula, sugerindo que as metodologias não devem ser aplicadas quando esses tipos de solos dominam ao longo do fuste da estaca.

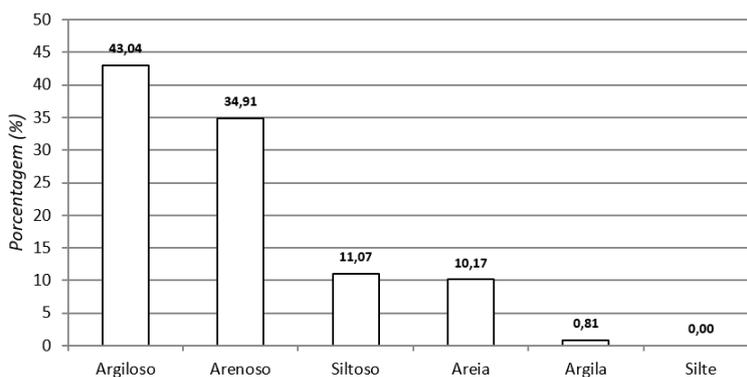


Figura 2. Estratigrafia dominante ao longo do fuste das estacas do estudo

#### 4 ANÁLISE DE RESULTADOS - METODOLOGIA 1 (FERRAMENTAS ESTATÍSTICAS)

Dentre as 20 ferramentas estatísticas mencionadas anteriormente, foi constatado por inspeção que as seguintes ferramentas têm potencial para alcançar o melhor desempenho: Índice de Performance; Índice de Performance Modificado; MAE; Mielke Modificado; RD; RMSE; e VAF. Cada uma delas possui variantes que consideram o diâmetro e os pontos de  $N_{spt}$  (acima ou abaixo da base da fundação). Após diversas tentativas e análises para determinar qual ferramenta apresentaria o melhor desempenho, chegou-se à formulação final para determinação da resistência lateral unitária ( $q_l$ ) e da resistência unitária da base ( $q_b$ ), conforme mostrado nas Equações 1 e 2.

$$q_l = 1,26 \cdot N_{spt, fuste} + 54,54 \text{ (kPa)} \quad (1)$$

$$q_b = 56,82 \cdot N_{spt, base} \text{ (kPa)} \quad (2)$$

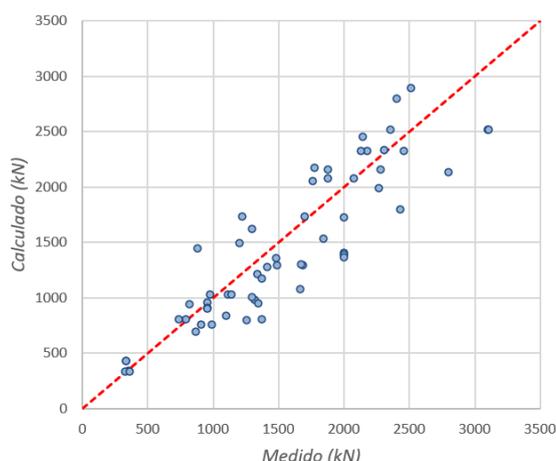


Figura 3. Método sugerido: valores calculados e medidos

Novamente,  $N_{spt, base}$  é a média geométrica dos valores de  $N_{spt}$  no intervalo compreendido entre a base e 4 m acima dela;  $N_{spt, fuste}$  é a mediana dos valores de  $N_{spt}$  ao longo do fuste (sem considerar os valores utilizados na base). É importante ressaltar que o método deve ser sempre empregado para a avaliação da carga total, utilizando os parâmetros  $q_l$  e  $q_b$  conforme mencionado anteriormente. Além disso, na Figura 4, é apresentado um ranking utilizando as ferramentas estatísticas, no qual o método sugerido descrito anteriormente – denominado Anjos ( $\alpha, \beta, \gamma$ ) (2024) – demonstra um desempenho significativamente superior aos demais. Quanto menor o valor mostrado na coluna “soma” na Figura 4, melhor o desempenho da metodologia. Os valores de  $\alpha$  apresentados na Figura 4 representam um coeficiente que, quando multiplicado pelos valores originais de cada metodologia, otimizam seu respectivo desempenho na classificação geral.

Ordem	Método	Alfa	Soma
1	Anjos ( $\alpha, \beta, \gamma$ ) (2024)	0,997	94
2	Anjos ( $\alpha, \beta, \gamma$ ) (2024)	1,0	95
3	Teixeira (1996)	0,535	577
4	Décourt & Quaresma (1978)	0,568	626
5	Monteiro (1997)	0,625	644
6	Brasfond (1991)	0,607	959
7	Cabral (1986)	0,759	1146
8	Cabral (1986)	1,0	1336
9	Brasfond (1991)	1,0	1660
10	Décourt & Quaresma (1978)	1,0	1710
11	Aoki & Velloso (1975)	0,469	1718
12	Monteiro (1997)	1,0	1734
13	Teixeira (1996)	1,0	1806
14	Aoki & Velloso (1975)	1,0	2010

Figura 4. Ranking do método sugerido em relação aos usados na literatura geotécnica para estaca raiz

Quando analisados apenas os métodos originais sugeridos na literatura geotécnica ( $\alpha = 1$ ), observa-se que o método de Cabral (1986) apresenta o melhor desempenho, enquanto o método de Aoki & Velloso (1975) mostra o pior desempenho, conforme mostrado na Figura 5a. Na Figura 5b, quando considerados os coeficientes de melhoria, o método de Teixeira (1996) passa a ter o melhor desempenho quando comparado às demais metodologias. Em contrapartida, o método de Aoki & Velloso (1975) apresenta o pior desempenho entre os métodos, em ambos os cenários (com e sem melhoria)

Ordem	Método	Alfa	Soma
1	<b>Cabral (1986)</b>	<b>1,0</b>	<b>1056</b>
2	Brasfond (1991)	1,0	1380
3	Décourt & Quaresma (1978)	1,0	1430
4	Monteiro (1997)	1,0	1454
5	Teixeira (1996)	1,0	1526
6	Aoki & Velloso (1975)	1,0	1730

(a)

Ordem	Método	Alfa	Soma
1	<b>Teixeira (1996)</b>	<b>0,535</b>	<b>297</b>
2	Décourt & Quaresma (1978)	0,568	347
3	Monteiro (1997)	0,625	365
4	Brasfond (1991)	0,607	679
5	Cabral (1986)	0,759	866
6	Aoki & Velloso (1975)	0,469	1438

(b)

Figura 5. Ranqueamento entre os métodos: a) sem melhoria ( $\alpha = 1,0$ ); b) com melhoria ( $\alpha \neq 1,0$ )

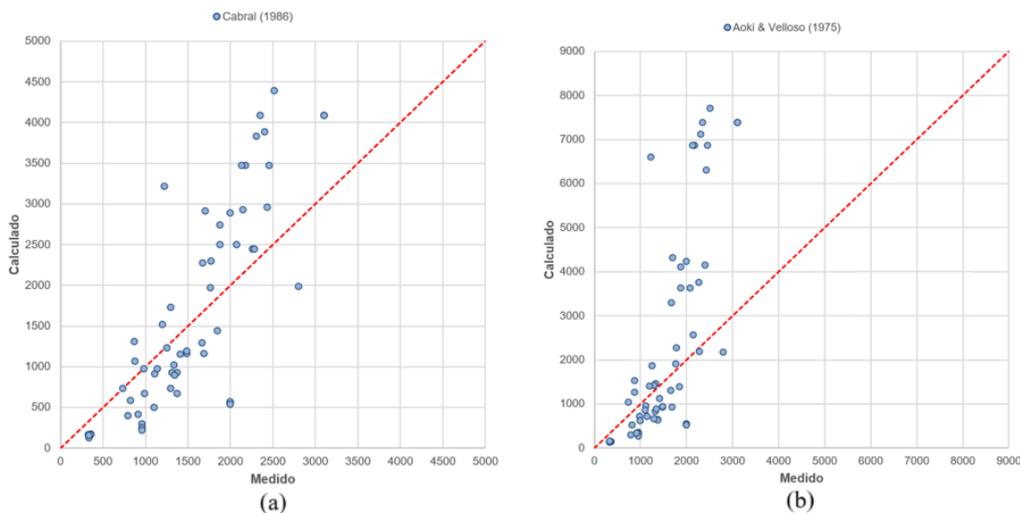


Figura 6. Método com melhor e pior desempenho (valores calculados e medidos **sem** melhoria)

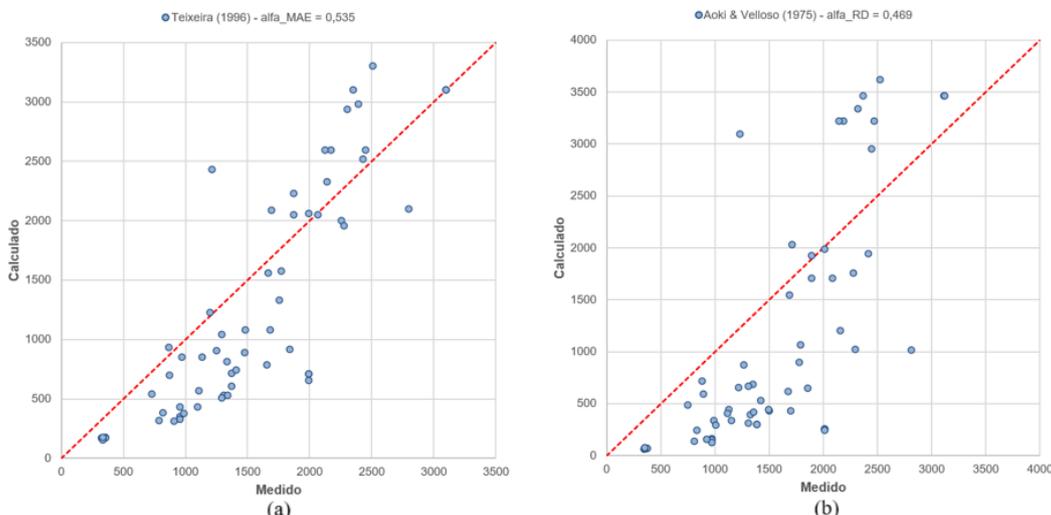


Figura 7. Método com melhor e pior desempenho (valores calculados e medidos **com** melhoria)

## 5 ANÁLISE DE RESULTADOS - METODOLOGIA 2 (REDE NEURAL ARTIFICIAL)

Com o uso de uma Rede Neural Artificial (apesar da pouca quantidade de casos), sugere-se um método que deve ser utilizado com cautela. Neste método, os dados de entrada (*layers*) são compostos por 10 parâmetros, com uma camada intermediária (oculta) formada por três neurônios de processamento, resultando na saída que representa o valor da carga total, conforme definido na Figura 8. A equação obtida pela análise via Rede Neural é representada pelas Equações 3 a 5 para "Hi", que são os neurônios da camada oculta de processamento, e finalmente, na Equação 6, obtemos a saída, com o valor da carga total em kN.

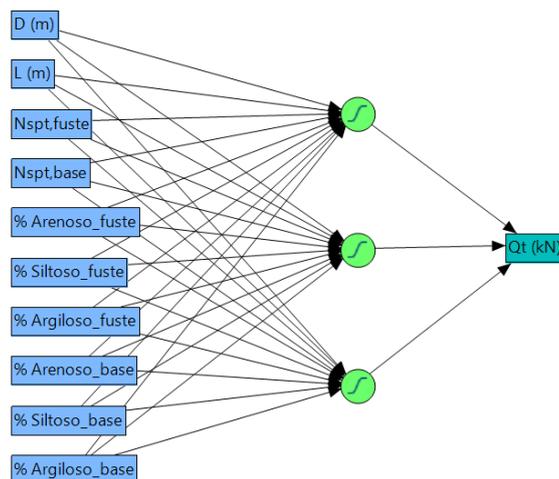


Figura 8. Modelo de arquitetura da Rede Neural Artificial

$$H1 = \tanh(0,5 * (-10,86071 * D + 0,06011 * L - 0,05427 * Nspt\_fuste - 0,03237 * Nspt\_base - 0,00413 * \%\_Arenoso\_fuste - 0,04424 * \%\_Siltoso\_fuste + 0,04387 * \%\_Argiloso\_fuste + 0,00218 * \%\_Arenoso\_base + 0,01961 * \%\_Siltoso\_base - 0,00702 * \%\_Argiloso\_base + 1,28008)) \quad (3)$$

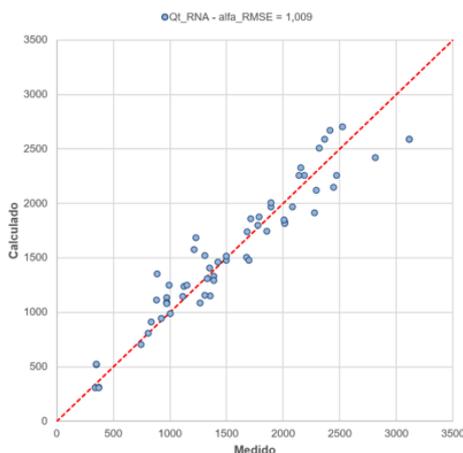
$$H2 = \tanh(0,5 * (-13,43100 * D - 0,02707 * L - 0,07504 * Nspt\_fuste - 0,01995 * Nspt\_base - 0,00277 * \%\_Arenoso\_fuste + 0,04593 * \%\_Siltoso\_fuste - 0,02437 * \%\_Argiloso\_fuste + 0,00022 * \%\_Arenoso\_base + 0,00379 * \%\_Siltoso\_base + 0,001388 * \%\_Argiloso\_base + 8,13307)) \quad (4)$$

$$H3 = \tanh(0,5 * (6,49712 * D + 0,33142 * L + 0,02736 * Nspt\_fuste + 0,01304 * Nspt\_base - 0,00904 * \%\_Arenoso\_fuste + 0,00175 * \%\_Siltoso\_fuste + 0,00774 * \%\_Argiloso\_fuste + 0,00605 * \%\_Arenoso\_base + 0,00561 * \%\_Siltoso\_base - 0,00445 * \%\_Argiloso\_base - 8,79484)) \quad (5)$$

$$Qt = -373,993716 * H1 - 405,12420 * H2 + 532,70147 * H3 + 1533,52198 \quad (6)$$

Novamente, é realizada uma comparação de desempenho entre os dois métodos sugeridos – utilizando ferramentas estatísticas (Metodologia 1) e a Rede Neural Artificial (Metodologia 2) – e os métodos tradicionais da literatura geotécnica. Os resultados são apresentados na Figura 9, onde, ao inspecionar os valores calculados e medidos, observa-se que o método via RNA supera os demais por uma ampla margem. O coeficiente  $\alpha = 1,009$  (praticamente igual a 1) indica que nenhuma melhoria adicional seria necessária para o método via RNA. Da mesma forma, o método utilizando ferramentas estatísticas (Metodologia 1) não requer nenhum ajuste significativo, com um  $\alpha = 1,007$ , que, para fins práticos de Engenharia, pode ser considerado igual a 1. Na última coluna da Figura 9b (soma), menores valores indicam um melhor desempenho para o método correspondente.

Para os métodos empregados na literatura geotécnica, o método de Teixeira se destaca com um coeficiente  $\alpha = 0,535$ , conforme ilustrado na Figura 9b. Além disso, ao considerar a influência do coeficiente  $\alpha$ , podemos inferir que o método de Teixeira (1996) fornece uma estimativa mais aproximada da carga medida para o conjunto de dados apresentado neste artigo.



Ordem	Método	Alfa	Soma
1	Qt_RNA	1,009	113
2	Qt_RNA	1	120
3	Anjos (α, β, γ) (2024)	1,007	340
4	Anjos (α, β, γ) (2024)	1	342
5	Teixeira (1996)	0,535	837
6	Décourt & Quaresma (1978)	0,568	886
7	Monteiro (1997)	0,625	904
8	Brasfond (1991)	0,607	1219
9	Cabral (1986)	0,759	1406
10	Cabral (1986)	1	1596
11	Brasfond (1991)	1	1920
12	Décourt & Quaresma (1978)	1	1970
13	Aoki & Velloso (1975)	0,469	1978
14	Monteiro (1997)	1	1994
15	Teixeira (1996)	1	2066
16	Aoki & Velloso (1975)	1	2270

(a)

(b)

Figura 9. a) Valor calculado e medido via RNA; b) Classificação usando ferramentas estatísticas

## 6 CONCLUSÃO

As metodologias propostas neste trabalho, para a base de dados utilizada, demonstraram desempenho significativamente superior aos métodos tradicionais frequentemente encontrados na literatura geotécnica. No entanto, é importante usar essas metodologias com cautela, dado o número limitado de casos analisados, especialmente para o método baseado em *Rede Neural Artificial* (Metodologia 2). Ainda assim, observa-se um grande potencial para aprimorá-las com a expansão da base de dados. A Metodologia 1, embora suas equações incluam as contribuições de resistência lateral e de base, deve ser empregada apenas para verificar a capacidade de carga total.

Além disso, verificou-se que o método de Cabral (1986) apresentou o melhor desempenho dentre os métodos originais. Após aplicação dos coeficientes de melhoria  $\alpha$ , o método de Teixeira (1996) mostrou-se mais eficaz, com um coeficiente  $\alpha$  de 0,535 aplicado ao método original. Por outro lado, o método de Aoki & Velloso (1975) teve o pior desempenho entre todos os analisados para a base de dados disponível.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anjos, G.J.M. (2006) *Estudo do Comportamento de Fundações Escavadas em Solos Tropicais*. Tese de Doutorado. Publicação G.TD/033/06, UnB, DF, 341p.
- Antunes, W.R., Cabral, D.A. (1996) *Capacidade de Carga de Estacas Hélice Contínua*, III SEFE, 2: 105-110.
- Aoki, N., Velloso, D.A. (1975) *An Approximate Method to Estimate the Bearing Capacity of Piles*. V PACSMFE, Bueno Aires.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2019) NBR 6122. Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro
- Brasfond (1991). *Catálogo Técnico sobre Estacas Raiz*.
- Cabral, D.A. (1986). *O uso da estaca raiz como fundação de obras normais*. in: Congresso Brasileiro de mecânica dos solos e engenharia de fundações, 8., 1986, Porto Alegre. Anais. Porto Alegre: ABMS, 1986. v. 6, p. 71-82.
- Décourt, L., Quaresma Filho, A.R. (1978) *Capacidade de carga de estacas a partir de valores de SPT*. VI COBRAMSEG, vol. 1, p. 45-53.
- Haykin, S. (2001). *Redes Neurais: Princípios e prática*. Porto Alegre: Ed Bookman.
- Monteiro, P.F., (1997) *Capacidade de carga de estacas – Método Aoki-Velloso*, Relat. Estacas Franki Ltda.
- Teixeira, A.H. (1996). *Projeto e execução de fundações*. SEFE III. III Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia. v.1 São Paulo. pp.33-50.