

### ASSOCIAÇÃO DE TIRANTES E ESTACAS COMO MÉTODO DE REFORÇO DE FUNDAÇÕES SUBMETIDAS A CARGAS DE TRAÇÃO

### ASSOCIATION OF TIE-BARS AND PILES AS A METHOD OF REINFORCING FOUNDATIONS SUBJECTED TO TENSILE LOADS

### JOHANNA PENHOLATO CARDOZO MACHADO

Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM), Uberaba / MG johannapenholato@gmail.com

### PAULO ROBERTO GARCIA

Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM), Uberaba / MG paulo.garcia@uftm.edu.br

### LUCIANO GOBO SARAIVA LEITE

Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM), Uberaba / MG luciano.leite@uftm.edu.br

### ALBERT WILLIAN FARIA

Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM), Uberaba / MG albert.faria@uftm.edu.br

Resumo: Por meio da modelagem numérica utilizando o Método dos Elementos Finitos, realizada através do software ANSYS, versão 9.0, este trabalho busca analisar a utilização de um tirante monobarra associado a uma estaca tracionada, visando aumentar sua capacidade de carga à tração. A estaca de concreto analisada possui 2 m de comprimento e diâmetro de 20 cm, sendo inserida em um solo do tipo areia argilosa. Dados experimentais, obtidos a partir do ensaio de prova de carga à tração dessa estaca, são disponibilizados na literatura. O ajuste manual desses dados com os numéricos, permite a obtenção dos coeficientes de reação vertical k(v), em função do deslocamento vertical v da estaca. Após o ajuste dos modelos, um tirante do tipo monobarra é associado a essa estaca, com o intuito de estudar a influência dos seus parâmetros geométricos (diâmetro e comprimento) sobre as respostas geotécnicas (carga de tração versus recalque) do sistema reforçado, em comparação ao não reforçado por tirante. Os resultados numéricos indicam que a associação do tirante à estaca resulta em uma melhoria significativa (168,34 %) na carga à tração última, considerando o mesmo nível de recalque vertical final observado no sistema sem reforço. Tirantes com diâmetros maiores que o diâmetro inicial demandam uma carga de tração superior à aplicada no sistema sem tirante. Por sua vez, o uso de tirantes com comprimento maior que o inicial aumenta a carga à tração última em comparação com a estaca sem tirante; no entanto, essa carga tende a diminuir à medida que o comprimento do tirante aumenta. Os resultados numéricos também indicaram que o aumento do diâmetro do tirante reduz a possibilidade de ruptura abrupta do sistema, enquanto o aumento do seu comprimento aumenta essa possibilidade.

Palavras-chave: Reforço. Tirantes. Modelagem estrutural. Cargas de tração.

**Abstract:** Through numerical modeling using the Finite Element Method, performed using the ANSYS software, version 9.0, this study aims to analyze the use of a single-bar tie associated with a tensioned pile to increase its tensile load capacity. The concrete pile evaluated has a length of 2 m, diameter of 20 cm and is inserted in clayey sand soil. Experimental data obtained from the tension load test of this pile are referenced from literature. Manual adjustment of these data with the numerical ones, allows the determination of the vertical reaction coefficients k(v), as a function of the vertical displacement v. Subsequently, a single-bar tie is associated with the pile to investigate the influence of its geometric parameters (diameter and length) on the geotechnical responses (tensile load x settlement) of this reinforced system compared to the unreinforced one. Numerical results demonstrate a



**Revista Mirante, Anápolis (GO), v. 17, n. 2, p. 01-18, dez. 2024 (edição extra). ISSN 1981-4089** significant improvement (168.34%) in the ultimate tensile load upon of the system incorporating the tie rod with the pile, maintaining the same level of ultimate vertical settlement observed in the unreinforced system. Ties rods with a diameter larger than the initial one require a greater tensile than that applied in the untied system. Conversely, employing a tie rod with a length greater that the initial length increases the ultimate tensile load compared to the pile without a tie rod, although decreasing as length increases. The numerical results also demonstrated that increasing the diameter of the tie rod reduces the possibility of abrupt system failure, while increasing its length increases this possibility.

Keywords: Reinforcement. Tie-bar. Structural modeling. Tensile loads.

### Introdução

Danziger e Lopes (2021) aponta a constituição das fundações como a etapa final do planejamento de uma estrutura e o ponto inicial de sua construção. As fundações são elementos estruturais primordiais para a garantia da solidez e estabilidade de qualquer obra de construção civil, transferindo os esforços da superestrutura e mesoestrutura para o solo, em respeito às premissas dos Estados Limites de Ruptura (ELR) e de Serviço (ELS) definidas pela NBR 6122 (2022). Segundo Milititsky *et al.* (2015), um desempenho inadequado das fundações, seja em termos geotécnicos ou estruturais, pode resultar em danos estéticos, funcionais e estruturais críticos e irreversíveis, comprometendo tanto a mesoestrutura quanto a superestrutura associada.

As fundações são divididas em dois grupos principais: as superficiais, também conhecidas como diretas ou rasas, e as fundações profundas, também conhecidas como indiretas. No contexto da NBR 6122 (2022), as fundações profundas são definidas como aquelas que transmitem carga, proveniente da mesoestrutura e superestrutura, ao solo pela base, pela superfície lateral ou pela combinação de ambas. Além disso, segundo essa mesma norma, elas devem ficar assentadas a uma profundidade superior a oito vezes sua menor dimensão em planta e no mínimo em três metros de profundidade.

Os tipos mais comuns de fundações profundas são as estacas e os tubulões. Segundo a NBR 6122 (2022), tubulões são fundações escavadas manual ou mecanicamente, nas quais, pelo menos em sua etapa final, ocorre a descida de pessoal para o alargamento da base ou para a limpeza do fundo, caso não haja uma base definida. A NR18 (2021), que regula as condições de segurança e de saúde do trabalhador da construção civil, proíbe o uso de tubulões a ar comprimido e impõe várias restrições de execução (proibição de escavação manual acima de 15 m de profundidade, ser encamisado em toda a sua extensão, diâmetro mínimo do fuste de



**Revista Mirante, Anápolis (GO), v. 17, n. 2, p. 01-18, dez. 2024 (edição extra). ISSN 1981-4089** 90 cm), comprometendo ou mesmo inviabilizando o seu uso em alguns tipos de empreendimentos. Assim, esse artigo limita-se ao emprego de estacas.

Nesse sentido, é necessário que as estacas de um projeto sejam dimensionadas de maneira a resistir aos esforços provenientes da mesoestrutura e superestrutura, geralmente de compressão. Contudo, em situações específicas, é importante que esses elementos estruturais resistam a esforços que provoquem o efeito contrário, ou seja, tração. De acordo com Paschoalin Filho e Carvalho (2010), essa característica é comum em estruturas leves, como silos, galpões, torres de transmissão e caixas d'água elevadas. Outro exemplo ocorre nas lajes de subpressão, que estão em contato direto com o solo e sujeitas à pressão hidrostática negativa, conforme mostra a Figura 1





Fonte: ABREU e RIBEIRO, 2020.

Além disso, a associação entre os elementos tirante e estaca pode contribuir para o ganho da capacidade de carga em fundações submetidas à tração. Segundo Alonso (2019), a utilização simultânea desses elementos é recomendada especialmente em estruturas que estão sujeitas a elevadas cargas de tração e compressão, como nos exemplos citados anteriormente. Nesse cenário, ele explica que os esforços de compressão são absorvidos pelas estacas, enquanto os de tração são suportados pelos tirantes, permitindo que cada elemento aproveite suas vantagens específicas.



## Revista Mirante, Anápolis (GO), v. 17, n. 2, p. 01-18, dez. 2024 (edição extra). ISSN 1981-4089 Sistemas que utilizam tirantes associados a estaca para seu reforço ainda são pouco abordados na literatura científica; por esse motivo, o presente trabalho propõe-se a explorar essa temática.

Este trabalho busca analisar, por meio de modelagens numéricas com o Método dos Elementos Finitos (MEF), a utilização de tirantes associados a estacas sujeitas a esforços de tração. Assim, busca-se avaliar a contribuição do elemento tirante na redução do deslocamento de uma estaca tracionada, bem como a influência de suas dimensões geométricas (diâmetro e comprimento livre) nesse processo.

### Metodologia

### Modelagem do sistema sem tirante e representação da interface solo-fundação

O sistema solo-fundação sem tirante, ou seja, o sistema sem reforço, é modelado numericamente no *software* ANSYS (versão 9.0, versão estudantil), que utiliza o MEF como base matemática para a obtenção da matriz de rigidez global do sistema ( $\mathbf{K}_{g}$ ) e dos vetores dos esforços globais ( $\mathbf{f}_{g}$ ), visando a determinação dos deslocamentos globais ( $\mathbf{u}_{g}$ ) sofridos pelo sistema. A geração dessas matrizes e vetores globais permite a solução estática do problema:  $\mathbf{u}_{g} = \mathbf{K}_{g}$ -1. $\mathbf{f}_{g}$ , em que  $\mathbf{K}_{g}$ -1 é a inversa da matriz de rigidez global.

Nesta etapa, os dados experimentais do ensaio de prova de carga de tração realizados por Acioli (2021), para uma estaca sem tirante, ou seja, sem reforço, são empregados para encontrar o coeficiente de reação vertical da mola k(v), usado na representação da interface solo-fundação, sendo v o deslocamento vertical sofrido pelo sistema conforme a carga aplicada. Para cada incremento de carga aplicado no ensaio conduzido por Acioli (2021), será obtido um valor correspondente de k(v), por meio de ajuste entre as curvas experimental e numérica. Vale destacar que, neste trabalho, a matriz  $\mathbf{K}_{g}$ , que contém todas as contribuições de rigidez da estaca e interface solo-estaca, é uma matriz de rigidez não linear, ou seja, dependente de v, conduzindo à solução estática de um sistema não linear do tipo:  $\mathbf{u}_{g} = \mathbf{K}_{g}(v)^{-1} \cdot \mathbf{f}_{g}(v)$ .

A estaca é modelada no *software* ANSYS, versão 9.0, utilizando o elemento *BEAM3*, que possui três graus de liberdade por nó: dois de translação e um de rotação. Esse elemento fornece uma representação matemática adequada para o comportamento físico da estaca sob diferentes condições de carregamento, incluindo flexão (embora esta não seja analisada neste



**Revista Mirante, Anápolis (GO), v. 17, n. 2, p. 01-18, dez. 2024 (edição extra). ISSN 1981-4089** trabalho). Vale ressaltar que o elemento de barra *LINK1*, com dois graus de liberdade de translação por nó, poderia ser utilizado em substituição ao *BEAM3*, visto que se trata de um problema de tração pura. No entanto, visando uma aplicação mais geral, como no caso de uma estaca flexo-tracionada, optou-se pelo uso do *BEAM3*.

As propriedades do concreto utilizado como material constitutivo da estaca estão apresentadas na Tabela 1, juntamente com suas propriedades geométricas, conforme obtidas do trabalho de Acioli (2021). Na Tabela 1, estão definidos os valores do diâmetro ( $\phi_e$ ) e do comprimento ( $L_e$ ) da estaca, assim como do coeficiente de Poisson ( $\mu_e$ ) e do módulo de elasticidade ( $E_e$ ) do concreto utilizado.

Tabela 1 - Da	dos geométricos	e mecânicos	da estaca.
---------------	-----------------	-------------	------------

Dados	Valor
φ <sub>e</sub>	0,20 m
Le	2,00 m
$\mu_{e}$	0,20
Ee	2,50 x 10 <sup>10</sup> Pa

Fonte: adaptado de ACIOLI (2021).

Como ilustrado na Figura 2, a estaca de concreto foi discretizada em 4 elementos, cada um com o mesmo comprimento de 0,5 m.

Figura 2 - Modelo numérico da estaca sem tirante.



Fonte: dos Autores, 2024.



Para a modelagem da interação solo-estrutura, foi utilizado o *Método de Winkler*. No *software* ANSYS, versão 9.0, esse método pode ser aplicado por meio de elementos de mola (*COMBIN14*), que são elementos lineares com rigidez conhecida, permitindo simular a resposta da fundação ao considerar a interação com o solo de maneira simplificada.

Como ilustrado na Figura 2, o sistema sem reforço utiliza duas molas para representar a interface solo-estaca. Para a modelagem de cada uma dessas molas, são definidos dois nós: um externo, conectado ao solo, e outro interno, conectado à estaca. Apenas o movimento vertical do nó externo foi restringido (v = 0) nesse sistema.

As duas molas, ilustradas na Figura 2, possuem a mesma rigidez k(v). Essa simplificação deve-se ao fato de que os solos em contato com o fuste da estaca apresentam a mesma natureza granulométrica principal, ou seja, ambos são solos do tipo areia argilosa, conforme o perfil do solo apresentado por Acioli (2021).

Para determinar os valores dos coeficientes de reação verticais k(v), realiza-se um ajuste de curvas entre os resultados experimentais de carga de tração *versus* deslocamento vertical, obtidos por Acioli (2021), e os resultados numéricos do presente trabalho.

Assim, com o auxílio do *software* ANSYS (versão 9.0), foram determinados, por meio de cálculos manuais e utilizando o método da tentativa e erro, os valores dos coeficientes de reação vertical k(v). O objetivo foi alcançar os mesmos valores de deslocamento experimentais correspondentes a cada um dos incrementos de carga de tração aplicados no ensaio experimental, variando-se, para isso, o valor de k. Dessa forma, foram obtidos sete valores de k(v), verificados posteriormente, correspondentes a cada um dos sete incrementos de carga do ensaio. A Figura 2 indica a posição de aplicação dos incrementos de carga de tração.

### Modelagem do sistema com tirante

Um tirante do tipo monobarra é associado à estaca do sistema descrito anteriormente, conforme ilustrado na Figura 3, permitindo a verificação dos ganhos de carga de tração para cada deslocamento imposto ao sistema.

Figura 3 - Associação da estaca com o tirante.





Fonte: dos Autores, 2024.

Para a escolha do tirante, foi utilizado o catálogo da empresa Torcisão (2014), optandose pelo tirante denominado TOR-15B, que possui carga de trabalho de 15 tf, superior ao valor de carga última do ensaio de tração executado por Acioli (2021).

No *software* ANSYS (versão 9.0), o tirante é modelado empregando o elemento linear *LINK1*, que possui dois nós e um grau de liberdade de translação por nó. As propriedades geométricas e mecânicas do aço utilizado estão listadas na Tabela 2, onde  $\varphi_t$  e L<sub>t</sub> representam respectivamente o diâmetro e o comprimento adotados para o tirante, e  $\mu_t$  e E<sub>t</sub> correspondem, respectivamente, ao coeficiente de Poisson e ao módulo de elasticidade do aço do tirante.

Dados	Valor	
$\phi_t$	27 mm	
L <sub>t</sub>	1,00 m	
μ <sub>t</sub>	0,30	
Et	21,00 x 10 <sup>10</sup> Pa	

Tabela 2 - Dados geométricos e mecânicos do tirante empregado na modelagem do sistema reforçado.

Fonte: dos Autores, 2024.

Empregando os valores de k(v) em função do deslocamento vertical e aplicando as cargas até atingir o deslocamento correspondente ao k utilizado, são obtidas as cargas de tração do sistema tirante-estaca. Os resultados da carga de tração *versus* deslocamento vertical dos



Revista Mirante, Anápolis (GO), v. 17, n. 2, p. 01-18, dez. 2024 (edição extra). ISSN 1981-4089 dois sistemas, com tirante e sem tirante, são comparados para analisar a influência do uso do tirante na capacidade de carga de tração do sistema.

# Influência do diâmetro e do comprimento do tirante nas cargas de tração do sistema reforçado

Duas simulações distintas são realizadas para avaliar a influência do diâmetro e do comprimento do tirante no valor da carga de tração do sistema reforçado, em comparação com o sistema não reforçado (ou seja, estaca sem tirante). Em ambas as simulações, os coeficientes de reações verticais k(v), obtidos na condição do sistema sem reforço, e as dimensões geométricas da estaca foram mantidos constantes.

Na primeira simulação, conforme indicado na Tabela 3, o diâmetro do tirante foi variado para 27, 31 e 34 mm, mantendo-se o comprimento fixo em 1 m. Na segunda simulação, destinada a verificar a influência do comprimento do tirante, o diâmetro foi fixado em 27 mm, enquanto os comprimentos foram alterados para 1 m, 2 m e 3 m, conforme também informado na Tabela 3.

Influência no valor da	Tirante		
carga de tração	$\varphi_{t}$ (mm)	$L_{t}(m)$	
Diâmetro	27	1	
Diâmetro	31	1	
Diâmetro	34	1	
Comprimento	27	1	
Comprimento	27	2	
Comprimento	27	3	

Tabela 3 - Dimensões geométricas dos tirantes avaliados como reforço.

Fonte: dos Autores, 2024.

Os resultados obtidos, em termos da carga de tração *versus* deslocamento vertical, serão comparados graficamente com o modelo de estaca sem reforço.

### Resultados e discussões

Ajuste entre os dados experimentais e numéricos para obtenção do k(v) do sistema estacatirante



Revista Mirante, Anápolis (GO), v. 17, n. 2, p. 01-18, dez. 2024 (edição extra). ISSN 1981-4089 Após a modelagem da estaca, utilizando os dados experimentais do ensaio de prova de

carga da estaca sem tirante (carga de tração *versus* deslocamento vertical) realizado por Acioli (2021), foi possível determinar, por meio de ajuste de curva, os valores de k(v) correspondentes a cada deslocamento vertical (v) da estaca. Esses valores estão apresentados na Tabela 4, e as curvas experimental e numérica obtidas para a carga de tração *versus* deslocamento vertical são ilustradas na Figura 4.

Carga de tração	Carga de tração	Deslocamento	k( <i>v</i> )
experimental	numerica	experimental e numerico	
(I)	( <b>II</b> )	<b>(I</b> )	( <b>II</b> )
$10^{3}x(N)$	$10^{3}$ x(N)	$10^{-3}x(m)$	$10^{3}$ x(N/m)
0	0	0	0
20,000	19,620	0,455	21.980,000
40,000	39,240	0,788	25.700,000
60,000	58,860	1,530	19.530,000
80,000	78,480	2,598	15.400,000
100,000	98,100	3,630	13.770,000
133,000	130,470	8,000	8.300,000
143,800	141,060	18,000	3.980,000

Tabela 4 - Valores de k(v) obtidos após ajuste de dados experimentais com os resultados numéricos.

Fonte: (I) ACIOLI (2021), (II) dos Autores.



Figura 4 - Carga de tração versus deslocamento vertical sofrido pela estaca sem tirante.

Fonte: dos Autores, 2024.

Assim, conforme os dados apresentados na Tabela 4 e no gráfico da Figura 4 (da carga de tração *versus* o deslocamento vertical sofrido pelo sistema não reforçado por tirante), foi possível observar a similaridade entre os valores do ensaio e os numéricos, obtidos após o ajuste entre os modelos. Nota-se, dos dados inseridos na tabela, que para a carga de tração



**Revista Mirante, Anápolis (GO), v. 17, n. 2, p. 01-18, dez. 2024 (edição extra). ISSN 1981-4089** última aplicada de 141.068 N, tem-se um deslocamento vertical igual a 18 mm e k igual a 3,98 x 10<sup>6</sup> N/m.

Da tabela 4, pode-se concluir que o valor da constante k é função do deslocamento vertical (v) aplicado, ou seja, k(v). Quanto maior o deslocamento vertical do sistema, menor é o valor atribuído à constante k(v). Além disso, como pode ser visto nos resultados tabelados (Tab. 4) e nas curvas ilustradas (Fig. 4), k(v), no presente trabalho, não é uma grandeza linear.

## Comparação entre os valores das cargas de tração obtidos nos sistemas com e sem reforço por tirante

Fixando-se os valores dos coeficientes de reação vertical k(v) informados na Tabela 4, conforme o deslocamento sofrido pela estaca, foram obtidas, como resposta do sistema estacatirante, as novas cargas correspondentes aos deslocamentos aplicados.

A Tabela 5 apresenta os valores numéricos obtidos de carga de tração, bem como seus ganhos percentuais em comparação com os dados experimentais. As cargas de tração, apresentados na segunda coluna da tabela, são obtidas ao se variar, para cada um dos deslocamentos v e seus correspondentes k(v), os valores de carga aplicados na cabeça da estaca até a estabilização do deslocamento vertical, conforme os valores informados na terceira coluna da Tabela 4

Carga de tração	Carga de tração	Deslocamento	<b>k</b> ( <i>v</i> )	Percentagem
<b>(I</b> )	<b>(II</b> )	vertical	(adotado)	
Sem reforço	Com reforço	(III)	( <b>IV</b> )	100(II-I) /I
$10^{3}x(N)$	$10^{3}$ x(N)	$10^{-3}x(m)$	$10^{3}$ x(N/m)	%
0	0	0	0	0
20,000	24,837	0,455	21.980,000	24,190
40,000	47,596	0,788	25.700,000	18,990
60,000	76,806	1,530	19.530,000	28,010
80,000	110,978	2,598	15.400,000	38,720
100,000	144,230	3,630	13.770,000	44,230
133,000	236,726	8,000	8.300,000	77,990
143,800	385,873	18,000	3.980,000	168,340

Tabela 5 – Comparação entre cargas de tração correspondentes à associação da estaca com tirante e sem tirante.

Fonte: (I) e (III) ACIOLI, 2021; (II) e (IV) dos Autores, 2024.

Para melhor visualização dos dados apresentados na Tabela 5 e sua comparação, a Figura 5 apresenta as curvas de carga de tração *versus* deslocamento vertical dos dois sistemas, com e sem tirante.

Figura 5 - Carga de tração versus deslocamento vertical dos sistemas com e sem tirante.



Fonte: dos Autores, 2024.

Ao analisar os resultados fornecidos na Tabela 5 e ilustrados na Figura 5, constata-se que a carga de tração última obtida na análise numérica do sistema sem tirante é igual a 143.800 N, enquanto no sistema com reforço ela passa a valer 385.873 N. Esse aumento de 168,34 % indica uma capacidade de carga à tração significativamente maior para o sistema reforçado em comparação ao sistema não reforçado.

Na Figura 5, observa-se que o sistema sem tirante apresenta uma tendência de ruptura abrupta (ou ruptura local) em comparação aos mesmos níveis de carga do sistema com tirante. A ruptura local caracteriza-se pelo aumento expressivo dos deslocamentos verticais para um pequeno incremento de carga, conforme observado nos deslocamentos entre 8 e 18 mm no sistema sem tirante. Essa ruptura é abrupta e ocorre sem aviso prévio. Já no sistema reforçado pelo tirante, para o nível de cargas ilustrado, há tendência de ruptura geral, ou seja, sem patamar de carga com o deslocamento vertical claramente definido ao final do ensaio, indicando um ganho de resistência à tração do sistema fundação-tirante em comparação ao sistema sem tirante.

### Estudo da influência do diâmetro do tirante nos valores das cargas de tração

Empregando um tirante de comprimento fixo de 1 m e diâmetro de 27 mm como de referência (ref.), foram calculadas as variações percentuais da carga de tração necessária para



**Revista Mirante, Anápolis (GO), v. 17, n. 2, p. 01-18, dez. 2024 (edição extra). ISSN 1981-4089** gerar os mesmos deslocamentos verticais do sistema sem reforço e com reforço, considerando os diâmetros de 31 mm e 34 mm.

Os resultados das cargas de tração em função do deslocamento vertical da estaca reforçada com tirantes de diâmetros variados estão apresentados na Tabela 6.

Os dados I e II, apresentados na Tabela 6 e utilizados para os cálculos percentuais nas quinta e sexta colunas, correspondem, respectivamente, aos dados experimentais de Acioli (2021) para a estaca sem tirante (Tabela 5, primeira coluna) e aos dados numéricos da estaca reforçada com tirante de 1 m de comprimento e 27 mm de diâmetro (Tabela 5, segunda coluna), conforme a simulação anterior.

Os valores da carga de tração *versus* deslocamento vertical, apresentados nas Tabelas 5 e 6, foram utilizados para gerar os gráficos ilustrados na Figura 6. Cada curva nesta figura representa um tirante de diâmetro distinto, além da curva referente ao sistema de estaca sem reforço, com base nos dados experimentais de Acioli (2021).

Diâmetro do	Carga	Deslocamento	$\mathbf{k}(\mathbf{v})$	Sistemas	Sistemas
tirante	de tração	vertical	(v)A (abetabe)	com v sem	com
inanic	ut tração	vertical	(autorauto)	reforco	reforco
Φt	<b>(V</b> )	(VI)	(VII)	100(V-I) /I	100(V-II) /II
(mm)	$10^{3}x(N)$	$10^{-3}x(m)$	$10^{3}$ x(N/m)	%	%
	0	0	0	-	-
	26,552	0,455	21.980,000	32,760	6,910
	50,477	0,788	25.700,000	26,190	6,050
21	82,639	1,530	19.530,000	37,730	7,590
51	121,082	2,598	15.400,000	51,350	9,100
	158,459	3,630	13.770,000	58,460	9,870
	268,930	8,000	8.300,000	102,200	13,600
	469,887	18,000	3.980,000	226,760	21,770
	0	0	0	-	-
	27,965	0,455	21.980,000	39,830	12,590
	52,850	0,788	25.700,000	32,130	11,040
24	87,446	1,530	19.530,000	45,740	13,850
34	129,406	2,598	15.400,000	61,760	16,610
	170,182	3,630	13.770,000	70,180	17,990
	295,459	8,000	8.300,000	122,150	24,810
	520,848	18,000	3.980,000	262,200	34,980

Tabela 6 - Influência do diâmetro do tirante sobre a carga vertical dos sistemas com e sem reforço.

 $\overline{\mathbf{I}}$  – Dados fornecidos na Tabela 5, 1<sup>a</sup> coluna, para estaca sem tirante.  $\overline{\mathbf{II}}$  – Dados fornecidos na Tabela 5, 2<sup>a</sup> coluna, para estaca com tirante de diâmetro 27 mm e comprimento 1 m. Fonte: dos Autores, 2024.



**Revista Mirante, Anápolis (GO), v. 17, n. 2, p. 01-18, dez. 2024 (edição extra). ISSN 1981-4089** Figura 6 - Carga de tração *versus* deslocamento vertical das estacas com tirantes de diferentes diâmetros e sem tirante.



Fonte: dos Autores, 2024.

Analisando os valores da quinta coluna da Tabela 6, observa-se que, ao aumentar o diâmetro do tirante de 27 mm para 31 mm e 34 mm, mantendo o comprimento fixo em 1 m, as cargas de tração necessárias para causar os mesmos deslocamentos verticais do sistema sem tirante também aumentam. Comparando as cargas de tração entre os sistemas reforçados por tirante (sexta coluna da Tabela 6), utilizando o tirante de diâmetro 27 mm como referência, nota-se que, embora com menor percentual, as cargas também aumentam com o acréscimo no diâmetro do tirante. Esse comportamento é ilustrado na Figura 6.

Analisando a Tabela 6, observa-se que o aumento do diâmetro do tirante em 4 mm (equivalente a 14,81 % maior em relação ao diâmetro de referência de 27 mm) resultou em um aumento de 226,76 % na carga de tração última (para um deslocamento vertical final de 18 mm) em comparação ao sistema sem tirante. Já, ao aumentar o diâmetro do tirante em 7 mm (ou 25,93 % em relação ao de referência de 27 mm), a carga de tração última aumentou em 262,20 % em relação ao sistema sem tirante.

Comparando os dados entre os sistemas reforçados com tirantes, utilizando o tirante de 27 mm como referência, conforme a sexta coluna da Tabela 6, nota-se que o aumento de 14,81 % no diâmetro inicial resultou em um incremento de 21,77 % na carga de tração última (obtida para o deslocamento vertical final do ensaio de 18 mm). Além disso, com um aumento de 25,93 % no diâmetro inicial, observa-se um crescimento de 34,98 % na carga de tração última em relação ao sistema reforçado com o tirante de 27 mm.

#### Verificação da influência do comprimento do tirante nos valores das cargas de tração



### Revista Mirante, Anápolis (GO), v. 17, n. 2, p. 01-18, dez. 2024 (edição extra). ISSN 1981-4089 Nesta última aplicação numérica, o comprimento livre do tirante foi variado entre 1 m,

2 m e 3 m, mantendo-se fixo o diâmetro em 27 mm e as propriedades mecânicas do material. Os resultados obtidos para as cargas de tração, em função do comprimento do tirante, são comparados com os dados do sistema sem tirante e com o tirante.

Os resultados da carga de tração *versus* deslocamento vertical, obtidos para os três comprimentos de tirantes estudados, estão apresentados na Tabela 7 e ilustrados na Figura 7, que também mostra a curva representante do sistema sem reforço conforme Acioli (2021).

Os valores percentuais apresentados na Tabela 7 (quinta coluna) utilizam como referência os mesmos dados **I** e **II** da simulação precedente, ou seja, os dados experimentais de Acioli (2021) para a condição de estaca sem tirante e os dados numéricos obtidos neste trabalho para a estaca reforçada com tirante de 27 mm de diâmetro e 1 m de comprimento.

Comprimento do tirante	Carga de tração	Deslocamento vertical	k(v) (adotado)	Sistemas com x sem reforço	Sistemas com reforço
$\mathbf{L}_{\mathbf{t}}$	(VIII)	( <b>IX</b> )	(X)	100(VIII-I) /I	100 (VIII-II) /II
(m)	$10^{3}x(N)$	$10^{-3}$ x(m)	$10^{3}$ x(N/m)	%	%
	0	0	0	-	-
	22,067	0,455	21.980,000	10,340	-11,150
	42,944	0,788	25.700,000	7,360	-9,770
2	67,380	1,530	19.530,000	12,300	-12,270
2	94,649	2,598	15.400,000	18,310	-14,710
	121,233	3,630	13.770,000	21,230	-15,940
	184,665	8,000	8.300,000	38,850	-21,990
	266,204	18,000	3.980,000	85,120	-31,010
	0	0	0	-	-
	21,122	0,455	21.980,000	5,610	-14,960
	41,357	0,788	25.700,000	3,390	-13,110
2	64,165	1,530	19.530,000	6,940	-16,460
3	89,079	2,598	15.400,000	11,350	-19,730
	113,387	3,630	13.770,000	13,390	-21,380
	166,900	8,000	8.300,000	25,490	-29,500
	225,362	18,000	3.980.000	56,720	-41,600

Tabela 7 - Influência do comprimento livre do tirante na carga de tração dos sistemas com e sem tirante.

I – Dados fornecidos na Tabela 5, 1ª coluna, para estaca sem tirante. II – Dados fornecidos na Tabela 5, 2ª coluna, para estaca com tirante de diâmetro 27 mm e comprimento 1 m. Fonte: dos Autores, 2024



Diferentemente da aplicação numérica anterior, observa-se, conforme a Tabela 7 (sexta coluna) e a Figura 7, que o aumento do comprimento do tirante reduz as cargas de tração necessárias para atingir os mesmos níveis de deslocamento do sistema de referência (estaca com tirante de 1 m e diâmetro de 27 mm). Portanto, a capacidade do sistema estaca-tirante de resistir à carga de tração diminui à medida que o comprimento do tirante aumenta. Além disso, a Figura 7 mostra que a diminuição na inclinação das curvas entre os deslocamentos de 8 e de 18 mm, com o aumento do comprimento dos tirantes, sugere uma maior propensão à ruptura abrupta.

Os dados numéricos da Tabela 7 e os resultados ilustrados na Figura 7 indicam que, com o aumento do comprimento livre do tirante de 1 m para 2 m, a carga de tração última reduz em 31,01 % em relação ao sistema de referência (com tirante de 1 m e diâmetro de 27 mm). Com o aumento para 3 m, essa redução atinge 41,60 % em comparação com o mesmo sistema de referência.



Figura 7 - Carga de tração *versus* deslocamento vertical nas fundações reforçadas com tirantes de comprimentos distintos e sem tirante.

Fonte: dos Autores, 2024.

Além disso, como pode ser observado na Tabela 7, na quinta coluna, à medida que o comprimento do tirante aumenta, há um ganho de carga de tração do sistema reforçado em comparação com o sistema sem reforço. No entanto, esse ganho diminui com o aumento do



**Revista Mirante, Anápolis (GO), v. 17, n. 2, p. 01-18, dez. 2024 (edição extra). ISSN 1981-4089** comprimento do tirante. Para um deslocamento vertical final de 18 mm, o tirante de 2 m apresentou um ganho de carga de 85,12 % em relação ao sistema não reforçado de referência, enquanto o tirante de 3 m teve um ganho menor de carga, de 56,72 %. Não há, portanto, uma relação de proporcionalidade direta entre o aumento do comprimento do tirante com a diminuição do valor da carga de tração aplicada, ao contrário do que ocorre com uma barra de tirante isolada submetida a uma carga de tração, segundo os preceitos da lei de Hooke ( $\sigma = E.\epsilon$ ).

Quando a carga de tração é aplicada na cabeça da estaca, uma parte dela é resistida pela estaca e pela interface solo-estaca (representada pela constante k), enquanto a parcela residual é transferida para o tirante, que, por sua vez, sofre deformação. Com base na lei de Hooke e utilizando os conceitos da tensão normal média ( $\sigma = N/A$ ) e da deformação específica ( $\epsilon = \delta/L$ ), a deformação ( $\delta = N.L/(E.A)$  sofrida pelo tirante isolado é diretamente proporcional ao esforço interno N e ao comprimento original (L), explicando, em parte, o comportamento dos sistemas em estudo.

Acontece que, quando a carga de tração (f) é aplicada na cabeça da estaca reforçada por tirante, considerando o regime elástico, parte dessa carga é transferida e resistida pelo material da estaca ( $N_c$ ), outra parcela pela interface solo-estaca  $N_k$ , que depende da constante k(v), e apenas uma fração da carga inicialmente aplicada ( $N_r$ ) é transferida para o tirante, que se deforma segundo a lei de Hooke. Assim, justifica-se a relação de não proporcionalidade entre o aumento do comprimento do tirante e a diminuição do valor da carga de tração (f) aplicada no topo da estaca, visto que k(v) é uma função do deslocamento v e depende da contribuição dos demais elementos.

### Conclusões

O sistema de estaca reforçada com tirantes de diferentes diâmetros (27, 31, 34 mm) e comprimentos (1, 2 e 3 m) apresentou um aumento na carga de tração última em comparação à estaca sem tirante, mantendo-se os níveis de deslocamento. As melhorias observadas no ganho de carga de tração última, em relação aos valores do sistema sem reforço, atingiram um máximo de 262,20 % ao utilizar tirantes com 34 mm de diâmetro e 1 m de comprimento livre.



## Revista Mirante, Anápolis (GO), v. 17, n. 2, p. 01-18, dez. 2024 (edição extra). ISSN 1981-4089 A análise da influência da variação do diâmetro e do comprimento do tirante sobre os

valores da carga de tração demonstrou que a carga de tração aumentou com o aumento do diâmetro, enquanto, inversamente, diminuiu com o aumento do comprimento do tirante.

Mantendo o comprimento do tirante fixo em 1 m e variando o seu diâmetro, observou--se um ganho máximo de carga de tração última de 262,20 % entre os diâmetros avaliados. Por outro lado, ao manter o diâmetro do tirante fixo em 27 mm e variando o seu comprimento, o ganho máximo de carga de tração última observado foi de 168,34 %, com o uso do tirante de 1 m de comprimento.

As simulações numéricas demonstraram que a estaca em estudo, sem tirante, apresenta uma tendência de ruptura abrupta (ruptura local), para o mesmo nível de carga aplicado em comparação com o sistema reforçado com um tirante de 1 m e 27 mm de diâmetro, que, por sua vez, demonstrou uma tendência de ruptura geral. Ao aumentar o comprimento do tirante, o sistema reforçado novamente apresentou uma tendência à ruptura abrupta, enquanto o aumento do diâmetro resultou em um sistema com ruptura geotécnica menos abrupta.

O uso simultâneo de tirantes e estacas pode ser uma alternativa interessante para reforçar sistemas de fundação sujeitos a esforços de tração e compressão, considerando a capacidade e os ganhos que esses elementos proporcionam quando combinados. Nesse contexto, as estacas devem suportar as cargas de compressão e tração, enquanto os tirantes os esforços de tração. Contudo, devem ser cuidadosamente avaliadas as limitações de trabalho, como a carga de segurança à ruptura e o máximo deslocamento permitido de cada elemento estrutural, para garantir sua utilização de maneira adequada.

### Referências

ABREU, P. C. L. G.; RIBEIRO, D. M. Estanqueidade da interface pilar/laje em laje de subpressão sujeita à ação de águas de lençol freático. **Revista Boletim do Gerenciamento**, Rio de Janeiro, v. 17, n. 17, 2020.

ACIOLI, I. S. D. ESTUDO DE ESTACAS ESCAVADAS DE PEQUENO DIÂMETRO TRACIONADAS EM JOÃO PESSOA - PB. Trabalho de Conclusão de Curso (bacharelado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Paraíba, João Pessoa, 2021.

ALONSO, U. R. **Dimensionamento de fundações profundas**. 3ª edição. São Paulo: Blucher, 2019.



Revista Mirante, Anápolis (GO), v. 17, n. 2, p. 01-18, dez. 2024 (edição extra). ISSN 1981-4089 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6122:2022 Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 108 p., 2022.

BRASIL, Ministério do Trabalho e Emprego. NR 18: Condições e Meio Ambiente de Trabalho na Indústria da Construção. Brasília: MTE, 2021.

DANZIGER, B. R; LOPES, F. R. Fundações em Estacas. Rio de Janeiro: GEN LTC, 2021.

MILITITSKY, J., CONSOLI, N. C., SCHNAID, F. **Patologias das fundações.** 2<sup>a</sup> edição. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

PASCHOALIN FILHO, J. A. P.; CARVALHO, D. Fundações de construções submetidas a esforços de tração em solo de alta porosidade da região de campinas - SP. **Construções Rurais e Ambiência.** v. 30, n. 2, 2010.

TORCISÃO. Sistemas de Protensão: Tabela Técnica de Sistemas de Protensão Monobarras e Microestacas. Catálogo técnico, Ribeirão Pires, SP, 2014.