

Influência da sucção na estimativa do comprimento de tirantes instalados em solos não saturados

Lucas Pereira Cavalcante

Engenheiro civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, lucaspenharia@gmail.com

Francisco Chagas da Silva Filho

Engenheiro civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, fchagas@ufc.br

RESUMO: Em Fortaleza, existem contenções ancoradas em condições do subsolo não saturado, mesmo com a oscilação sazonal do lençol freático, sendo dimensionadas para condições saturadas para maior segurança da obra. Esse artigo apresenta simulação numérica para avaliar a influência que a sucção pode oferecer na redução de comprimentos de ancoragem e de cargas aplicadas em tirantes. Para isso, foram selecionados três locais da cidade: Rua Carlos Vasconcelos, Avenida Rui Barbosa e Rua Bento Albuquerque. A partir de perfis de sondagem SPT, da posição do nível freático e da estimativa de perfis de sucção lineares, foram dimensionadas contenções atirantadas hipotéticas, com e sem consideração da sucção, para conferir a contribuição do efeito aparente coesivo na redução de comprimentos de ancoragem e cargas de trabalho. Os resultados demonstraram que a sucção foi capaz de reduzir em cerca de 50% os comprimentos ancorados e as cargas aplicadas em tirantes. Ademais, os casos estudados expressaram aumento de seu Fator de Segurança em valores médios de 135%, implicando maior segurança à obra. Conclui-se que a influência da sucção é capaz de atribuir maior segurança à obra, embora ainda sejam sugeridas as execuções de comprimentos ancorados de acordo com recomendações mínimas usuais de projetos de tirantes.

PALAVRAS-CHAVE: Tirantes, Sucção, Solo não-saturado, Estimativa.

ABSTRACT: In Fortaleza, there are anchored containments in conditions of unsaturated subsoil, even with seasonal fluctuations in groundwater, being designed in saturated conditions to guarantee the work safety. This article presents a numerical simulation to evaluate the influence that suction can offer in reducing anchorage lengths and work loads of bolts. For this, three locations in the city were selected: Carlos Vasconcelos Street, Rui Barbosa Avenue and Bento Albuquerque Street. Based on SPT test profiles, water table position and evaluation of linear suction profiles, hypothetical anchored retaining walls were designed, with and without considering suction, in order to check the contribution that the apparent cohesive effect in reducing bolts anchored lengths and work loads. The results showed that considering suction in the design was capable to reduce by around of 50% the anchored lengths and work loads in bolts. In addition, the studied cases showed an increase in their factor of safety by average values of 135%, implying more security in the construction. It's concluded that the influence of suction is capable to provide an increase the work safety, although the execution of anchored lengths in accordance with the usual minimum recommendations for bolt designs is still suggested.

KEYWORDS: Bolts, Suction, Unsaturated soil, Evaluation.

1 INTRODUÇÃO

Tendo em vista a valorização imobiliária em Fortaleza, principalmente no que diz respeito ao preço dos terrenos, a opção por construção dos estacionamentos dos carros dos edifícios residenciais tem sido optado por localização abaixo do nível do terreno. Assim sendo há a necessidade da construção de contenções com cortinas em estacas justapostas ou secantes e muitas vezes com o apoio de tirantes.

Conforme a ABNT (2006), em sua norma NBR 5629, tirantes são tratados como peças especialmente montadas, tendo como componente principal um ou mais elementos resistentes à tração, que são introduzidas no terreno em perfuração própria, nas quais, por meio de injeção de calda de cimento (ou outro aglutinante) em parte dos elementos, forma um bulbo de ancoragem que é ligado à estrutura através do elemento resistente à tração e da cabeça do tirante.

O projeto das ancoragens requer a definição do perfil do solo e da posição do nível da água, sendo que frequentemente a contenção ocorre em condições do subsolo não saturado, mesmo com a oscilação sazonal do nível da água, a zona vadosa permanece com variações desprezíveis no trecho do terreno onde ocorre a contenção.

Usualmente, em Fortaleza e demais cidades com tendência a crescimento verticalizado, está se tornando bastante comum a aplicação de projetos de contenção de cortinas atirantadas. Ademais, a cidade em si apresenta condições climáticas e geológicas que asseguram maior caráter de condição não saturada ao solo, com constantes variações de umidade no subsolo metropolitano.

Juca (1990) ressalta que a influência da variação de umidade em solos não saturados deve ser realizada preferencialmente pelo controle de sucção, sendo justificada pelas razões de que a sucção pode variar conforme o estado de tensões do solo, assim como que a parcela de sucção também é influenciada pela compactação e sua energia.

Nesse contexto, há a necessidade de se compreender a influência da sucção para se estimar projetos mais adequados e econômico de comprimentos de tirantes instalados em regiões com solos que frequentemente se encontram em condições não saturadas. Afinal, estima-se que a parcela de sucção promove redução de cargas de trabalho e comprimentos de ancoragem, garantindo maior segurança à obra.

2 ESTUDO DE CASO

2.1 Geologia da Região Metropolitana de Fortaleza

No contexto geológico metropolitano de Fortaleza, Miranda (2005) informa que a região é composta por geologias de rochas do Complexo Nordestino, sedimentos terciários do grupo barreiras e dunas, apresentando em todas as feições cursos d'água fluviais, nos quais apresentam depósitos de sedimentos. A Figura 1 apresenta um desenho esquemático da formação da Região Metropolitana de Fortaleza.

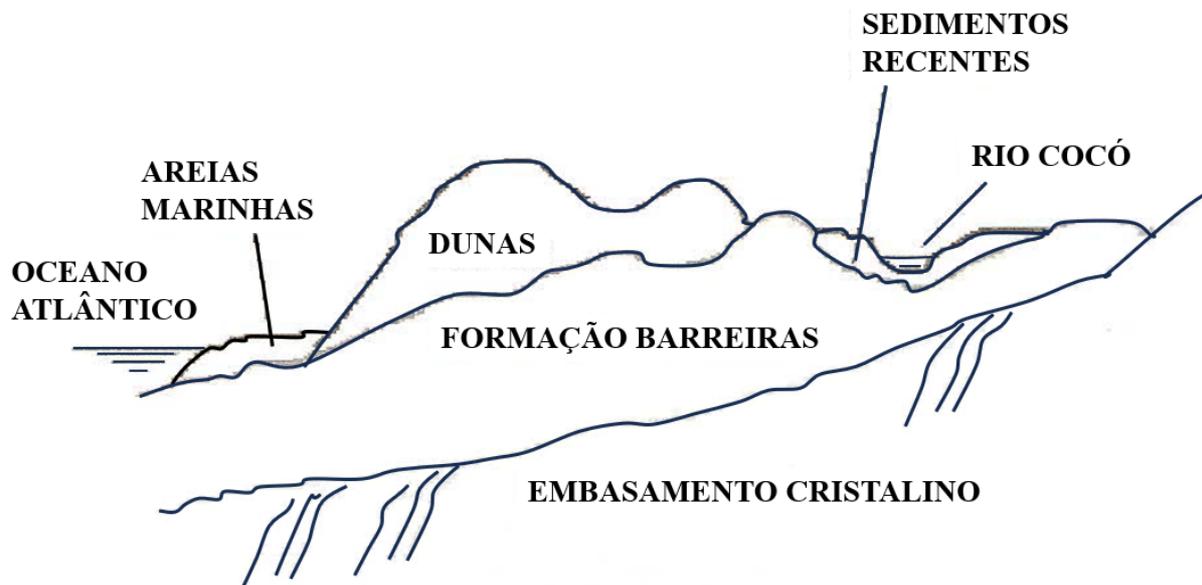


Figura 1. Subsolo de Fortaleza, corte na direção Norte-Sul (MIRANDA, 2005).

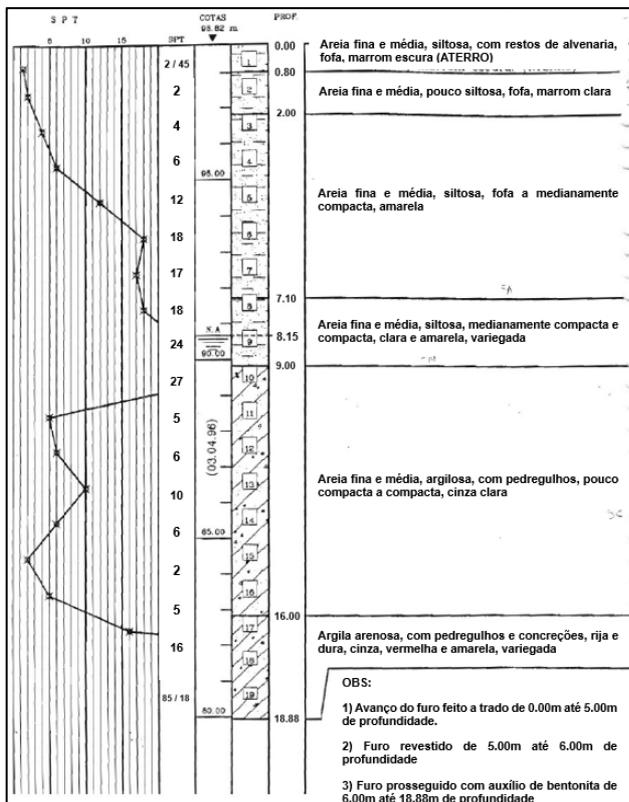
Miranda (2005) também cita que as rochas do embasamento cristalino são predominantemente cristalinas (metamórficas e ígneas) com predominância de gnaisses constituídos principalmente de quartzo, feldspato e mica. Quanto à formação barreiras, o mesmo autor ressalta que ela se estende em faixas variáveis pela capital, com extensões de até 30 metros, acompanhando a linha da costa, com predominância de argilas e arenitos. No tocante às dunas, se apresentam tanto edafizadas como móveis, com predominância de areia fina a média.

2.2 Locais Selecionados

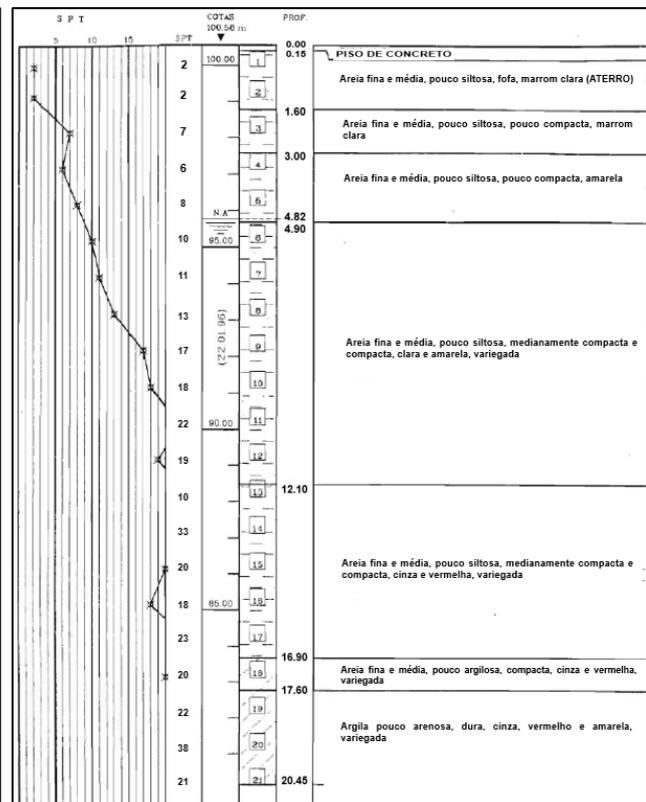
Para esse estudo, foram selecionados locais cujas sondagens realizadas apresentaram diferentes e profundos níveis de água subterrânea, a fim de garantir melhor compreensão da influência da sucção conforme a presença de nível d'água em profundidade. Contudo, como exceção a essa regra, um dos casos selecionados possui nível freático próximo a superfície.

Dessa forma, foram coletados 3 sondagens situados nos seguintes locais da capital cearense: Rua Carlos Vasconcelos, Avenida Rui Barbosa e Rua Bento Albuquerque. Todas as sondagens apresentam nível de água subterrânea acima de 4 metros de profundidade. Nos três casos, os locais apresentam perfil superficial predominantemente de dunas, com aparição de formação barreiras a longas profundidades nos 3 casos.

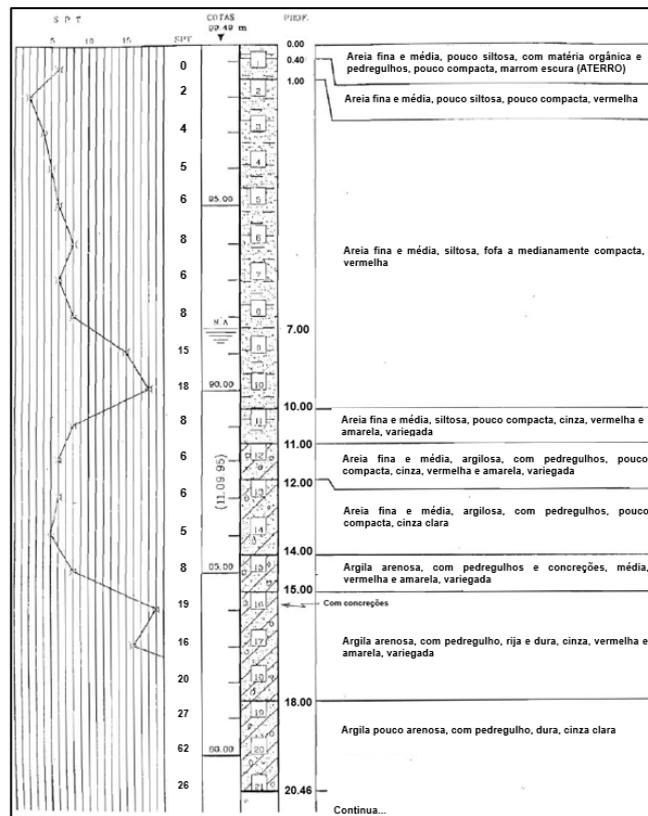
A seguir, serão apresentados cortes das sondagens dos 3 locais selecionados, para melhor compreensão do subsolo dos locais, por meio da Figura 2, com ênfase em cada local de acordo com os sub-itens 2.a, 2.b e 2.c, respectivamente sendo as sondagens realizadas nos locais Carlos Vasconcelos, Rui Barbosa e Bento Albuquerque.



2.a. Sondagem Carlos Vasconcelos



2.b. Sondagem Rui Barbosa



2.c. Sondagem Bento Albuquerque

Figura 2. Cortes de sondagens nos locais selecionados

O primeiro caso a ser apresentado é o da Rua Carlos Vasconcelos, rua situada no bairro Meireles, que se estende na direção Norte-Sul da cidade, bastante próxima à região litorânea. A sondagem constatou que em determinado trecho se apresenta camadas seguidas de areia fina e média, com presença siltilosa e com variação tênue de N_{SPT} ao longo da profundidade, totalizando perfil de duna até profundidade de 14 metros, posterior seguida de camadas de argila arenosa a profundidade maiores que 20 metros, típicas da Formação Barreiras. O nível de água foi encontrado na profundidade de 8,15 metros.

Quanto à Avenida Rui Barbosa, situada majoritariamente no bairro Joaquim Távora, também se estender na direção Norte-Sul, iniciando na costa litorânea da capital. O estudo realizado mostrou pontualmente a presença de camadas de areia fina e média, similar ao caso da rua anteriormente informada, totalizando dunas de profundidades até 17,80 metros, com pequena camada de argila da Formação Barreiras em profundidades superiores a 20,45 metros. O nível d'água foi observado a 4,82 metros.

A Rua Bento Albuquerque está localizada no bairro Cocó, em direção Leste-Oeste, próximo ao rio Cocó, e mais distante ao litoral quando comparado aos casos anteriores. O ensaio SPT constatou que no local executado há a predominância de areia fina e média em camadas que se prolongam até 14 metros, seguidas das argilas arenosas da Formação Barreiras até profundidades maiores que 20,46 metros. Foi encontrado nível freático 7 metros da superfície.

3 METODOLOGIA

Para a aferição da influência da sucção, foram dimensionadas contenções de cortinas atirantadas, padronizadas em todos os perfis com escavação em 4 metros e com sobrecarga atuante de 50 kPa no entorno da escavação. A contenção foi arbitrada contendo linhas únicas de tirantes, com espaçamento entre eles de 1,5 metros, executados em inclinação padrão de 18° e ancorados a 1,5 metros a partir do nível da escavação. A Figura 3 apresenta um desenho esquemático do desenvolvimento do modelo adotado para os 3 locais analisados.

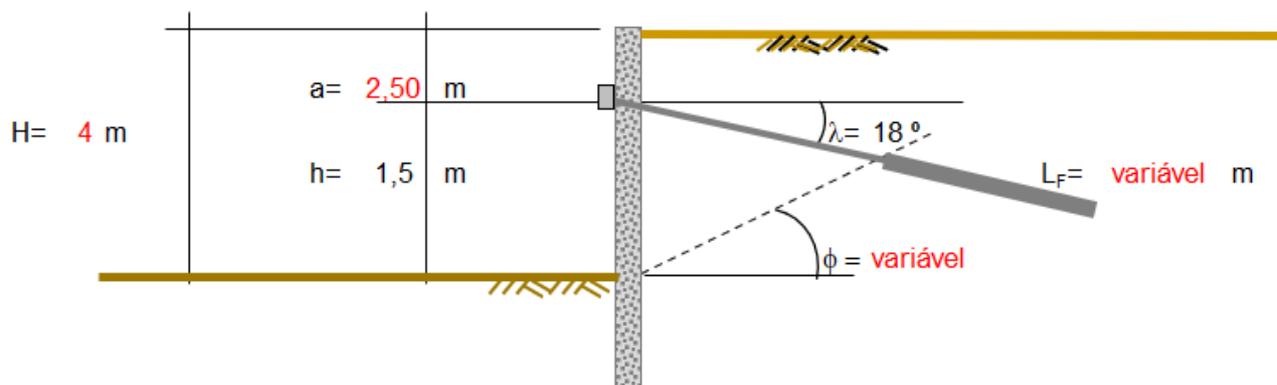


Figura 3. Esquemático das contenções padronizadas

Inicialmente, foram realizados os dimensionamentos das seguintes informações: ficha, ficha com tirantes e comprimento de ancoragem; com o primeiro caso de contenções atirantadas sem consideração do efeito da sucção e posteriormente considerando o incremento de resistência da sucção, para os 3 locais. Por fim, foram analisada a redução de comprimento de ancoragem e cargas aplicadas devido a consideração da parcela coesiva proveniente da sucção.

Com os dados coletados de cada local, foram estimados os parâmetros geotécnicos adotados para os cálculos de cada caso particularmente. Para cada perfil, foram adotados valores médios de N_{SPT} , conforme as camadas superficiais de cada sondagem, em seus 5 primeiros metros. O valores médios determinados foram de 4 para o perfil superficial da rua Carlos Vasconcelos, 7 para o da avenida Rui barbosa e 5 para o da rua Bento Albuquerque.

Em seguida, foram considerados os valores de sucção com a consideração do parâmetro ϕ^b que, segundo Fredlund et. al. (1978), é o principal parâmetro que indica a razão do aumento da resistência em função da sucção. Este parâmetro (ϕ^b) foi estipulado nesse trabalho como sendo a metade do ângulo de atrito obtido, conforme recomendado, em viés prático, por GeoStudio (2021). O efeito da sucção foi estimado conforme a variação de sucção matricial ao longo da profundidade, predeterminado apresentando variação linear conforme profundidade.

Acerca da obtenção dos parâmetros geotécnicos, primeiramente quanto ao peso específico, Godoy (1972, apud CINTRA et. al., 2011) sugere valores de peso específico para solos arenosos de 18 kN/m^3 para solos arenosos úmidos (natural) com N_{SPT} menores que 8.

Devido a suas características granulométricas de areias siltosas, foi estipulado que os solos seriam não coesivos, com parcela aparente coesiva sendo expressa apenas no caso de influência da sucção, conforme estimativa de comportamento linear, sendo esta compreendida segundo a Equação 1.

$$c_s = (u_a - u_w)_{\text{médio}} \cdot \tan \phi^b \quad (1)$$

Quanto a equação anterior, vale frisar novamente que o parâmetro (ϕ^b) foi estipulado nesse trabalho como sendo a metade do ângulo de atrito obtido. Para o ângulo de atrito, foi adotada a formulação de Godoy (1983, apud CINTRA et. al., 2011), apresentada na Equação 2.

$$\phi' = 28 + 0,4 \cdot N_{SPT} \quad (2)$$

Os coeficientes de empuxo ativo e passivo foram determinados conforme a metodologia clássica de Rankine (1857). Os coeficientes são obtidos conforme as Equações 3 e 4 abaixo, que apresentam as formulações de empuxos ativos e passivos.

$$K_A = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi'}{2} \right) \quad (3)$$

$$K_P = \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi'}{2} \right) \quad (4)$$

Com todos os parâmetros, foram realizados os cálculos de dimensionamento para continuação da análise deste trabalho. O resumo dos parâmetros adotados e coletados podem ser visualizados na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1. Parâmetros geotécnicos adotados

Local Estudado	N _{SPT}	γ (kN/m ³)	φ' (°)	φ ^b (°)	K _A	K _P	[u _a - u _w] médio (kPa)
Carlos Vasconcelos	4	18	29,6	14,8	0,34	2,95	54,5
Rui Barbosa	7	18	30,8	15,4	0,32	3,10	24,1
Bento Albuquerque	5	18	30,0	15,0	0,33	3,00	44,0

Os dados da tabela acima, conjuntamente com as sondagens, demonstram que o solo da Região Metropolitana de Fortaleza apresenta certa constância tanto em índice de penetração do solo, como de parâmetros geotécnicos. Vale lembrar que os locais selecionados não são tão próximos entre si, com direções variáveis e próximos tanto ao litoral quanto a corpos hídricos com sedimentos recentes.

Após a conferência dos comprimentos ancorados, foram observados as variações dos fatores de segurança de cada contenção estimada, adotando a metodologia de Ostermayer (1974) adaptada por Costa Nunes (1987), para compreender a incremento na segurança da obra relacionando as cargas de trabalho dos tirantes executados em condição saturada e não saturada, mantendo-se o comprimento de ancoragem saturado, este sendo o comumente executado). A Equação 5 demonstra a obtenção dos fatores de segurança obtidos, definida como sendo a proporção entre os esforços mobilizados e o esforço de resistência.

$$FS = \frac{\pi \cdot d \cdot \lambda_d \cdot L_F \cdot \lambda_{LF} \cdot (C + \gamma \cdot P \cdot \lambda_p \cdot \lambda_p \cdot \tan \phi')}{C_a} \quad (5)$$

A equação acima mostra que o fator de segurança é função de diversas variáveis, inclusive da própria carga de trabalho e do comprimento ancorado. A seguir, são informados as definições e os valores adotados em todos os casos estudados, vistos na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros para obtenção do Fator de Segurança

Variável	Definição	Unidade	Valor
π	Pi	-	3,14
d	Diâmetro do furo	cm	10
λ _d	Fator de aumento do diâmetro do furo	-	1,2
L _F	Comprimento de ancoragem	cm	Variável
λ _{LF}	Fator de redução do comprimento de ancoragem	-	1
C	Aderência entre a calda e o solo	ton/m ²	0
γ	Massa específica do solo	ton/m ³	Variável
P	Profundidade do centro da ancoragem	m	6
λ _p	Fator de redução da profundidade	-	1
λ _p	Fator de aumento da pressão normal solo/calda (5 a 10)	-	5
φ'	Ângulo de atrito do solo	°	Variável
C _a	Carga de trabalho do tirante	ton	Variável

4 RESULTADOS

Em primeiro momento, foram dimensionados os comprimentos de fichas das contenções hipotéticas nos 3 locais de estudo sem influência de sucção, para posterior comparação da possível redução de carga e comprimento dos tirantes, mantendo a ficha atirantada estimada. Em todos os casos, as fichas dimensionadas apresentaram comprimento maior do que as próprias contenções, justificando a necessidade de execução de tirantes. A Tabela 3 informa os resultados do dimensionamento executado, com resultados para ambos os casos.

Tabela 3. Dimensionamento sem influência da sucção

Local Estudado	Ficha (m)	Ficha c/ tirante (m)	Sem sucção		Com sucção	
			Carga (ton)	Comp. Ancoragem (m)	Carga (ton)	Comp. Ancoragem (m)
Carlos Vasconcelos	5,00	1,40	20,3	3,50	6,0	1,10
Rui Barbosa	5,70	1,30	20,2	3,30	14,0	2,40
Bento Albuquerque	4,80	1,30	20,1	3,40	9,0	1,60

Apesar dos parâmetros bastante similares, o fator que provocou tamanha mudança nas fichas entre os casos estudados é a presença de nível de água mais próxima a superfície, em especial no caso da Rui Barbosa. Vale ressaltar que neste caso, pela presença de nível d'água tão próxima a superfície, pequena parte da contenção se encontra abaixo do nível freático.

Constata-se também que não há variação tão drástica entre os comprimentos de fichas atirantadas, sendo todos próximos entre si em valor médio de 1,30 metros de comprimento, com reduções de tamanho de ficha analisados em 72% na Carlos Vasconcelos, 77% na Rui Barbosa e 73% na Bento Albuquerque. Novamente, a maior redução observada (Rui Barbosa) pode ser explicada devido a presença de lençol freático próximo.

Quando analisado os comportamentos de resistência dos tirantes, foi observada expressiva redução dos resultados de dimensionamento após aplicar a parcela coesiva aparente devido à sucção matricial. A Tabela 4 permite conferir os resultados com suas diferenças e reduções percentuais.

Tabela 4. Variações e impactos nos dimensionamentos de tirantes

Local Estudado	Carga de Trabalho (ton)				Comprimento de Ancoragem (m)			
	S/ sucção	C/ sucção	Δq	%	S/ sucção	C/ sucção	ΔL	%
Rui Barbosa	20,2	14,0	6,2	30,7%	3,3	2,4	0,9	27,3%
Bento Albuquerque	20,1	9,0	11,1	55,2%	3,4	1,6	1,8	52,9%

A maior expressividade foram observadas no caso da rua Carlos Vasconcelos, com reduções de ancoragem e carga aplicadas em percentuais próximos de 70%. Apesar da avenida Rui Barbosa não conter parcela tão expressiva de sucção, ainda foi possível observar redução considerável do dimensionamento, maior ainda do que no caso da rua Bento Albuquerque, que possui nível d'água mais profundo.

Em média, as reduções de carga de trabalho foram constatadas em 52,1% enquanto que para os casos de comprimento de ancoragem, a média das reduções foi avaliada em 49,6%. Tal proximidade entre os resultados já era estimada, haja vista que a carga é parâmetro para a obtenção do comprimento ancorado, com variações ocorrendo devido a possíveis questões de arredondamentos.

Vale salientar que, mesmo com reduções tão significativas, não se recomenda a execução de comprimentos de ancoragem tão reduzidos, sendo sugerida ainda a execução de acordo com os comprimentos mínimos frequentemente adotados em projetos de ancoragem com uso de tirantes.

Quanto ao fator de segurança, foram calculados e determinados segundo a aplicação dos parâmetros citados anteriormente na Tabela 2, mantendo-se o comprimento de ancoragem sem sucção, com seus resultados informados abaixo pela Tabela 5.

Tabela 5. Fatores de Segurança obtidos

Local Estudado	$L_{\text{ancoragem}}$ (m)	Sem Sucção		Com Sucção		ΔFS	ΔFS (%)
		Carga (ton)	FS	Carga (ton)	FS		
Carlos Vasconcelos	3,5	20,3	2,00	6,0	6,75	4,75	238%
Rui Barbosa	3,3	20,2	1,98	14,0	2,86	0,88	44%
Bento Albuquerque	3,4	20,1	1,99	9,0	4,45	2,46	124%

Conferindo a tabela, para os casos estudados, a maior variação do fator de segurança foi encontrada para o caso da Rua Carlos Vasconcelos, com aumento de 238%. Ainda para o exemplo de menor expressão, sendo

esse o da Rua Bento Albuquerque, houve um aumento de 44%. Em suma, foi constatada uma média de incremento de 135%. Os resultados vistos acima mostram que uma obra de contenção projetada em condição saturada para uma região de atuação não saturada é capaz de quase triplicar o fator de segurança da mesma. Em todos os casos, a influência da sucção propiciou um incremento notável na resistência e segurança da obra.

5 CONCLUSÕES

A sucção matricial de um solo é capaz de promover expressiva resistência a uma estrutura de contenção, sem a possível necessidade de estruturas de reforço caso seja bem estimada e controlada. Para o caso analisado, conferiu-se que a estimativa de sucção, ainda que de grosso modo, pode acarretar em reduções de 50% ou mais em seus comprimentos de ancoragem, propiciando maior economia em obras de contenção de solo.

No caso estudado, a sucção foi capaz de promover reduções de comprimentos de ancoragem em média de 49,6% enquanto que para a carga de trabalho, foi visto redução média de 52,1%. Dessa forma, as reduções foram constatadas em aproximadamente 50% podendo ser maior caso fosse feita uma adequada estimativa de variação de sucção ao longo da profundidade, já que neste trabalho foi considerada linear.

É importante frisar que apesar da obtenção de tamanhos bastante reduzidos, ainda se é recomendada a execução de comprimentos de ancoragem mínimos de acordo com os comprimentos mínimos frequentemente adotados em projetos de ancoragem com uso de tirantes

No tocante ao Fator de Segurança, foi observado maior acréscimo de 238% para o caso da Rua Carlos Vasconcelos – aumentando de 2,00 para 4,75 – seguidos dos acréscimos de 124% para a Bento Albuquerque e 44% para a Rui Barbosa. Considerando uma média entre esses resultados, o trabalho realizado conferiu que houve acréscimo médio estimado de 135% no Fator de Segurança.

Vale ressaltar que esse estudo e resultados foram desenvolvidos para os casos em questão, havendo necessidade de aprofundamento para outros locais e obras. Ademais, vale frisar que para os estudos adequados para viabilidade em obras reais, há a necessidade de elaboração de ensaios específicos para a compreensão da contribuição da sucção, assim como de investigação das condições de fluxo.

Todavia, é confirmado que para os casos relatados, a sucção é capaz de influenciar positivamente para a segurança da obra, conferindo redução das cargas de trabalho, resultando em fatores de segurança mais favoráveis para a execução, assim como é capaz de reduzir drasticamente (em teoria) o comprimento de ancoragem de tirantes.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará (DEHA – UFC), e à empresa Geonorte Geotecnia e Fundações LTDA pelo fornecimento das sondagens utilizadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2006). NBR 5629: *Execução de tirantes ancorados no terreno*. Rio de Janeiro.
- Cintra, J. C. A.; Aoki, N.; Albiero, J. H. (2011). *Fundações diretas: projeto geotécnico*. São Paulo: Oficina de Textos. 139 p.
- Fredlund, D. G.; Morgenstern, N. R.; Widger, R. S. (1978). *The shear strength of unsaturated soil*. Canadian Geotechnical Journal. Vol. 15. p. 313-321.
- GeoStudio (2021). *Stability Modeling with GeoStudio*. Geo-Slope International Ltd. 254 p.
- Juca, J. F. T. (1990). *Comportamento de los suelos parcialmente saturados bajo succión controlada*. Tese de Doutorado, Universidad Politecnica de Madrid de España, Madrid, 346p.
- Miranda, A. N. de. (2005). *Geotecnia no Nordeste*. 2. ed. Recife: Editora Universitária UFPE. v. 1. 543p.
- Nunes, A. J. C. (1987). *Ground Pré-Stressing, First Casagrande Lecture*. 8th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Cartagena, Colômbia.