

Proposta de uma formulação simplificada para o cálculo de capacidade de carga de ancoragens

Thiago Bomjardim Porto¹

Núcleo de Geotecnia - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, porto@pucminas.br

Romero Cesar Gomes²

Núcleo de Geotecnia - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, romero@em.ufop.br

RESUMO: Apesar do largo emprego da técnica de ancoragens em obras geotécnicas no Brasil, principalmente em obras subterrâneas e cortinas atirantadas, pouquíssima pesquisa nacional foi realizada sobre a determinação de capacidade de carga em ancoragens. Além disso, em função da escassa bibliografia brasileira sobre o mecanismo de transferência de carga solo-bulbo, percebe-se que as obras de contenções especiais no Brasil são dimensionadas muitas vezes por metodologias que não se adequam satisfatoriamente com a realidade do solo nacional, ocasionando projetos que não cumprem o paradigma básico da engenharia que é: “possibilitar a execução de obras econômicas e seguras”. Neste sentido, busca-se, com este trabalho, propor uma metodologia semiempírica simplificada para previsão de capacidade de carga de ancoragens em obras geotécnicas. Trata-se de uma adaptação da formulação inicialmente proposta por Bustamante e Doix (1985) onde foi incluído um coeficiente de ancoragem k , função das características do maciço geotécnico. Os dados técnicos necessários para o desenvolvimento deste trabalho foram obtidos a partir de ensaios básicos apresentados por Porto (2015) em conformidade com a NBR 5629. Trata-se de um conjunto de 42 ensaios realizados em São Paulo com características diferentes entre si. A pressão de injeção das ancoragens variaram de 1 MPa a 3,2 MPa de acordo com a resistência do solo e o número de injeções de nata de cimento no furo. Os tipos de solos predominantes neste banco de dados pesquisados foram: areia fina siltosa, argila siltosa, argila silto-arenosa, argila-arenosa, areia argilosa, silte areno-argiloso e silte argilo-arenoso. As ancoragens ensaiadas foram feitas de fios e/ou cordoalhas de aço. Uma análise estatística foi feita, descartando resultados que divergiam significativamente da média. Pretendeu-se, neste trabalho, iniciar uma discussão sobre as diversas metodologias existentes para avaliar a capacidade de carga geotécnica de tirantes, bem como sua aplicação prática no dia a dia do engenheiro, garantindo, assim, um melhor controle de qualidade das ancoragens projetadas e executadas no Brasil. Por fim, a proposta apresentada neste trabalho compõe uma abordagem inédita sobre o tema, que certamente deverá ser aperfeiçoada ao longo do tempo, com a inclusão de um novo banco de dados de ensaios.

PALAVRAS-CHAVE: capacidade de carga, tirantes, estabilização de encostas, estruturas de contenção.

1 INTRODUÇÃO

O emprego de alguma técnica de contenção para garantir a estabilização de taludes e escavações apresenta-se como uma alternativa técnico-econômica viável e em expansão em todo o

mundo, principalmente em grandes centros urbanos, onde a possibilidade de retaludamento torna-se quase impossível. Entre os tipos de contenções existentes, a solução em cortina de concreto armado acoplada com a utilização de ancoragens reinjetáveis e protendidas apresenta-

se como a solução mais adequada, se não a única (grandes alturas e áreas restritas).

O interesse de profissionais geotécnicos pela técnica de paredes atirantadas justifica-se pela sua praticidade, rapidez de execução, versatilidade e, acima de tudo, segurança (garante pequenas deformações), se comparada a outras técnicas utilizadas para estabilização de cortes em taludes naturais. Apesar do largo emprego desta técnica no Brasil (desde a década de 50), pouquíssima pesquisa foi realizada sobre o método de execução. Nem mesmo uma quantificação dos fatores que afetam o comportamento de ancoragens reinjetáveis, como por exemplo: tipo de solo, metodologia executiva da perfuração, diâmetro perfurado, procedimento de injeção, proteção e fluência foram realizados com substancial profundidade acadêmica/conceitual. Assim, um estudo científico desta técnica, que auxilie a sua compreensão e o seu desenvolvimento, é oportuno e necessário.

Ao analisar a literatura Luso-Brasileira, como publicações de Ferrari (1980), Souza (2001), E Carvalho (2009), percebe-se que o conhecimento e o aprimoramento da técnica de cortinas atirantadas em solo com a utilização de ancoragens reinjetáveis e protendidas advêm principalmente da execução e do acompanhamento das obras realizadas, ou seja, da experiência das empreiteiras. Neste contexto, alguns conceitos e metodologias de execução estão sendo aprimorados, porém sem uma consistência teórica que permita avanços técnicos de uma forma racional. Em função do grande número de variáveis existentes neste tipo de solução geotécnica para estabilização de taludes, projetistas, executores e pesquisadores divergem quanto à melhor forma de execução e previsão do comportamento de obras realizadas com esta técnica.

A estabilidade de uma contenção atirantada é estudada em seu estado limite último (ELU). Sendo assim, um parâmetro muito importante e responsável pelo mecanismo de transferência de carga e restrição do movimento do maciço de solo, durante e após a sua escavação, é, segundo Souza (2001), a capacidade de carga específica (t_u) que é dada em termos de força por unidade de comprimento. Dividindo-se t_u pelo

perímetro médio do bulbo tem-se a resistência ao cisalhamento (q_s) desenvolvida na interface entre o trecho ancorado do tirante e o solo adjacente. Em termos práticos, quanto maior for este parâmetro, melhor será o desempenho da ancoragem no auxílio da estabilização do maciço de solo.

A quantificação dos parâmetros t_u e q_s pode ser obtida, de forma aproximada, a partir de formulações teóricas e empíricas, ou, ainda, de forma real, a partir de ensaios de recebimento, qualificação e/ou básico estabelecidos pela NBR 5629:2006 (ABNT, 2006), devidamente extrapolados. Conforme comentado de maneira simplificada anteriormente, os fatores que podem influenciar no desempenho da ancoragem e, portanto, na interação solo-tirante são: tipo de solo, diâmetro do furo, fluido de perfuração, características da calda de cimento, uso de aditivos na calda de cimento, fator água/cimento, tempo de execução, metodologia de injeção e volume injetado.

Esta pesquisa abrange um amplo programa experimental que foi desenvolvido em campo desde o final da década de 70 em São Paulo, na construção do Metrô. Estes ensaios foram feitos na tentativa de contribuir para o estabelecimento da melhor forma de execução dos tirantes, associadas às condições geotécnicas locais. O banco de dados disponibilizado nesta pesquisa é proveniente da realização de ensaios básicos em várias obras localizadas no estado de São Paulo, com diferentes metodologias executivas.

Por estas razões, esta pesquisa constitui uma excelente oportunidade para se catalogar a experiência disponível e aumentar o nível de conhecimento sobre a técnica de paredes atirantadas com ancoragens reinjetáveis e protendidas, permitindo, assim, divulgá-la de forma mais robusta no âmbito da engenharia geotécnica nacional. Os resultados desta pesquisa encontrarão aplicação prática imediata, pois a mesma tem relação direta com o desempenho e o custo da técnica de atirantamento de paredes de concreto no Brasil.

2 CAPACIDADE DE CARGA

Para a definição da capacidade de carga geotécnica das ancoragens pode-se utilizar duas metodologias:

- Formulações Semi-Empíricas, como por exemplo, Costa Nunes (1987), Bustamante e Doix (1985), NBR 5629/2006 (ABNT, 2006), Falconi (2005) e Joppert Jr. et al. (2004).
- Formulações matemáticas, como por exemplo, Massad (1987) e Van der Veen (1953).

Para a definição da carga última dos tirantes ensaiados utilizou-se nesta pesquisa a proposta de Van der Veen (1953). Este autor associa a curva carga x deslocamento por meio da Equação 1:

$$F = F_R (1 - e^{-ad}) \quad (1)$$

Onde:

F = carga aplicada no topo da ancoragem (kN);
 F_R = carga última correspondente à assíntota vertical da curva (kN);
 e = base dos logaritmos naturais;
 a = coeficiente que define a forma da curva (mm^{-1});
 d = deslocamento correspondente à carga F (mm).

Como a função anterior possui duas incógnitas (F_R e a), a solução da mesma é obtida por tentativas. Dessa forma, a expressão de Van der Veen pode ser reescrita pela Equação 2.

$$1 - \frac{F}{F_R} = e^{-ad} \quad (2)$$

ou ainda,

$$ad = -\ln \left(1 - \frac{F}{F_R} \right) \quad (3)$$

O gráfico que mais se aproximar de uma reta indicará o valor de F_R (incógnita do problema). O coeficiente angular desta reta é o próprio a (incógnita do problema).

A equação foi reescrita por Aoki (1976), resultando na Equação 4:

$$F = F_R (1 - e^{-ad+b}) \quad (4)$$

Onde:

b = ponto de interseção com o eixo das ordenadas da reta obtida na escala semi-logarítmica.

Com esse artifício, Aoki (1976) pretendeu obter um valor de r^2 mais próximo de 1, possibilitando, dessa forma, um melhor ajuste da curva carga x deslocamento, com os pontos intermediários e finais do carregamento.

Segundo Aoki et al. (2013), o método de Van der Veen era empregado originalmente de forma manual. Com o avanço dos programas computacionais pôde-se utilizar o método dos mínimos quadrados para a regressão linear em cada tentativa de valor de F_R .

Embora o método seja bastante prático, o mesmo deve ser utilizado com cautela. A interrupção prematura do ensaio pode resultar em curvas carga x deslocamento limitadas para interpretação. Magalhães (2005) apresenta três alternativas de curva carga x deslocamento, em que:

- Figura 1 (a): Ensaio interrompido no trecho elástico: muito difícil de determinar a carga última;
- Figura 1 (b): Ensaio interrompido no início da plastificação do sistema solo-bulbo: é possível prever a carga última através de extrapolação matemática;
- Figura 1 (c): Ensaio com grandes deformações para pequenos incrementos de carga: a carga última é evidente, não necessitando de métodos de extrapolação.

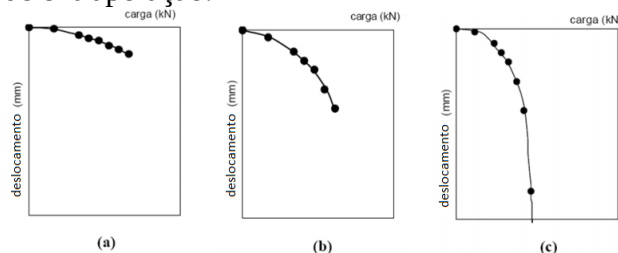


Figura 1. Alternativas de curvas carga x deslocamento (Adaptado de Magalhães, 2005).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Programa Experimental

Para o desenvolvimento da formulação semiempírica desta pesquisa, utilizou-se um vasto banco de dados de ancoragens, sendo parte deste catalogado por Souza (2001). Trata-se de uma série de ensaios básicos fiscalizados pelo IPT realizados em São Paulo nas décadas de 70, 80 e 90.

Esse conjunto de ensaios, composto por 42 testes, compõe um banco de dados ímpar, uma vez que a maioria deles foram exumados e houve um rígido controle de execução.

Foram analisados sete conjuntos de ensaios de qualificação com exumação do bulbo realizados por seis diferentes empresas executoras, conforme pode ser visto na Tabela 1.

Tabela 1. Resumo dos ensaios básicos realizados.

Local, data	Número da ancoragem	Solo	SPT
Praça Clovis Bevilacqua, 1973	1/A	Areia fina siltosa	5
	2/A		
	3/A		
	4/A		
Praça Clovis Bevilacqua, 1973	4-R/A	Argila siltosa	11
	1/B		
	2/B		
	2-R/B		
Praça Clovis Bevilacqua, 1973	3/B	Argila silto-arenosa	23
	4/B		
	1/C		
	2/C		
Praça Clovis Bevilacqua, 1973	3/C	Argila arenosa	38
	4/C		
	4-R/C		
Praça Clovis Bevilacqua, 1973	4-R/C	Areia argilosa	10

(continua)

Local, data	Número da ancoragem	Solo	SPT
Parque Continenta, 1978	5/B	Areia argilosa	7
	5-R/B		
	6/B		
	7/B		
	8/B		
	8-R/B		
	A/B		
	B/B		
	C/B		
	D/B		
	D-R/B		
	1/B		
Estação Patriarca, 1987	3/B	Areia argilosa	13
	4/B		
	1/D		
	2/D		
Taboão da Serra – SP, 1990	3/D	Silte areno-argiloso	24
	4/D		
	4-R/D		
	1/E		
Jandira – SP, 1990	2/E	Silte argilo-arenoso	11
	3/E		
	4/E		
	1/F		
Jandira – SP, 1990	2/F	Silte argilo-arenoso	11
	4/F		
	6/F		

2 RESULTADOS E ANÁLISES

Segundo Schnaid e Odebrecht (2012), a dispersão observada nas estimativas das cargas de ruptura pode ser atribuída a erros de medida nas provas de carga, representatividade das sondagens, problemas de interpretação das informações de sondagens, limitação de informações geotécnicas, imprecisão na extrapolação das cargas de ruptura, ausência de controle de energia de cravação, entre outros.

O grupo de ensaios realizados possuem uma boa representatividade principalmente para tirantes de cordoalhas com controle de injeção com válvulas manchetes espaçadas a cada 50 cm e injeção com obturador duplo (do fundo do furo para a boca).

A aferição do modelo matemático para extrapolação da carga de ruptura geotécnica foi realizada utilizando-se os tirantes que “correram” na ocasião do ensaio. Apresenta-se, na Figura 2, a relação entre força de ruptura

extrapolada por Van der Veen e força de ruptura real. Conclui-se que o modelo proposto se ajusta muito bem ao modelo real, podendo, dessa forma, ser generalizado para outros ensaios.

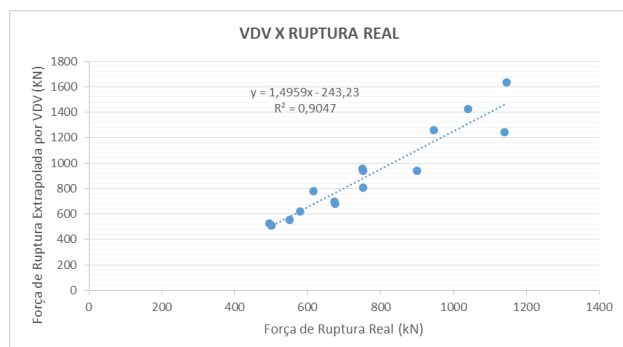


Figura 2. Relação entre força de ruptura extrapolada por Van der Veen e força de ruptura real

Apresenta-se, nas equações 5, 6 e 7 o resumo dos resultados encontrados.

$$T_L = \pi D_s L_b q_s \quad (5)$$

$$D_s = \beta D_p \quad (6)$$

$$q_s = 10k \left(\frac{SPT}{3} + 1 \right) \quad (7)$$

Onde:

T_L = capacidade de carga do bulbo (kN);

D_s = diâmetro médio do bulbo (m);

L_b = comprimento do trecho ancorado do tirante (bulbo) (m);

q_s = resistência ao cisalhamento (kN/m²);

D_p = diâmetro perfurado do furo (m);

β = coeficiente de majoração do diâmetro do bulbo devido à injeção;

k = coeficiente de ancoragem (kN/m²), conforme Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros de dimensionamento.

Solo predominante	β	Valores de K (kN/m ²)	
		Valores com 80% de confiança	Valor mais provável
Argila siltosa	2,1	1,2 a 1,29	1,25
Argila arenosa	2,1	0,9 a 1,01	0,95
Silte argiloso	1,97	2,37 a 2,77	2,57
Silte	2,11	2,04 a 2,28	2,16
Silte arenoso	2,25	1,7 a 1,78	1,74
Areia argilosa	2,2	2,57 a 2,77	2,67
Areia siltosa	2,2	2,10 a 2,37	2,24

De maneira geral, tendo em vista que o solo é um material não fabricado pelo ser humano, e que o mesmo, em função disso, possui características de resistência e deformabilidade bem distintas de região para região, todos os métodos estudados fornecem capacidade de carga geotécnica na mesma ordem de grandeza, portanto, resultados satisfatórios. Percebe-se, no entanto, que a sugestão de Costa Nunes (1987) de considerar uma pressão residual na ordem de 50% da pressão de injeção no cálculo de T_L garante valores de capacidade de carga geotécnica significativamente maiores do que nos outros métodos estudados: Bustamante (1985), NBR 5629/2006 (ABNT, 2006), Falconi (2005) e Joppert Jr. et al.(2004). Dessa forma, considerar uma pressão residual na ordem de 10% a 15% da pressão de injeção no cálculo de T_L , garante valores mais próximos dos demais métodos. Uma segunda constatação é que o método de Joppert Jr. et al. não se ajusta muito bem para ancoragens reinjetáveis com SPT maior que 22. Esse fato já era esperado, uma vez que essa formulação foi idealizada inicialmente para tirantes auto-injetáveis, portanto, sem possibilidade de reinjeção.

Terzaghi, considerado o “pai da Mecânica dos Solos” dizia que: “Em mecânica dos solos a precisão dos resultados calculados nunca excede a de uma estimativa aproximada, e a função principal da teoria é que ela nos ensina o que e como observar em campo”. Neste sentido, conclui-se que o objetivo inicial proposto foi alcançado satisfatoriamente e a formulação apresentada neste artigo pode ser utilizada para estimativas preliminares para o cálculo da capacidade de carga de ancoragens em solos, desde que os mesmos possuam características similares aos solos “idealizadores” da formulação.

AGRADECIMENTOS

Ao metrô de São Paulo, em especial ao Eng. Argimiro A. Ferreira, por ter possibilitado livre acesso à biblioteca interna do metrô e ter disponibilizado uma série de ensaios básicos realizados para o metrô de São Paulo ao longo dos últimos 40 anos. Ao professor Rubenei Novais Souza (Universidade Petrobrás), pela colaboração para este trabalho, manifestada na cessão de material técnico sobre ancoragens reinjetáveis, bem como orientações instrutivas sobre o tema.

REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5629 – Execução de Tirantes Ancorados no Terreno. Rio de Janeiro. 2006.
- AOKI N.; CINTRA C. A.; TSUHA C. H. C.; GIACHETI H. L. Fundações, ensaios estáticos e dinâmicos. Ed. Oficina de Textos. 2013.
- AOKI, N. Considerações sobre a capacidade de carga de estacas isoladas. Curso de Extensão Universitária em Engenharia de Fundações, Universidade Gama Filho, Rio de Janeiro. 1976.
- BUSTAMANTE, M.; DOIX, B.; “Une méthode pour le calcul des tirants et des micropieux injectés”. Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, n. 140, p. 75-92, 1985.
- CARVALHO, M. A. R. Ancoragens pré-esforçadas em obras geotécnicas. Construção, ensaios e análise comportamental. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia da universidade do Porto, Portugal. 495p, 2009.
- COSTA NUNES, A. J. “Ground Prestressing – First Casagrande Lecture”. VIII CPAMSEF, Cartagena, Colombia. 1987.
- FALCONI, F. Concurso: “Capacidade Geotécnica de Ancoragens reinjetáveis”; IV COBRAE - Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas - Salvador-BA. 2005.
- FERRARI, A. O. Um estudo sobre os resultados dos testes fundamentais para o atirantamento provisório no solo de São Paulo. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 101p, 1980.
- JOPPERT JR, I. O.; MALLMANN, W.; IORIO, W. R. Método de Cálculo para Estimativa da Carga de Ruptura de Tirantes Auto-Perfurantes Tipo Tubular. Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia – SEFE V. São Paulo. 2004.
- MAGALHÃES, P. H. L. Avaliação dos Métodos de Capacidade de Carga e Recalque de Estacas Hélice Contínua via Provas de Carga. Dissertação (Mestrado - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil), UNB, Brasília. 2005.
- Massad, F. D. (1986). Notes on the interpretation of failure load from routine pile load tests. Solos e rochas. Vol. 9, São Paulo, abril 1986. p.33-36.
- Porto, T. B. (2015). Proposal web via methodology for predicting and control anchors in soils. Doctoral Thesis. Núcleo de Geotecnia. Universidade de Federal de Ouro Preto. Vol. 1. 224 p.
- SCHNAID, F.; ODEBRECHT, E. Ensaios de Campo e suas Aplicações à Engenharia de Fundações – 2ª edição. Ed. Oficina de Textos. São Paulo. 2012.
- SOUZA, R. N. Ancoragens reinjetáveis e protendidas em solo: previsão de comportamento e controle de execução. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 331p, 2001.
- VAN DER VEEN. The Bearing Capacity of a Pile. Proceedings of the Third Int. Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Zurich, vol. 2, pp. 84-90. 1953.