

# ANCORAGENS REINJETÁVEIS E PROTENDIDAS EM SOLO: PREVISÃO DO COMPORTAMENTO E INTERPRETAÇÃO DO DESLOCAMENTO RESIDUAL

Rubenei Novais Souza<sup>1</sup>; Faiçal Massad<sup>2</sup>

## Resumo

Este trabalho analisa o comportamento de ancoragens reinjetáveis e protendidas em solo, as quais são largamente aplicadas em grandes contenções, principalmente em áreas urbanas. É apresentado um método de previsão da curva carga-deslocamento do topo da ancoragem, resultado da tese de doutorado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Souza [1], na qual foram analisadas 154 ancoragens, sendo 42 procedentes de 7 Ensaios Básicos realizados na Grande São Paulo, entre 1973 e 1990, relatados pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo, e 112 executadas em obras reais de contenção na Cidade de São Paulo. Tal método se baseia num modelo cujas funções de transferência de carga bulbo-solo são do tipo elasto-plástico, considera a deformabilidade do bulbo e inclui a análise do descarregamento da ancoragem. Esta análise permitiu mostrar que no final do descarregamento o bulbo pode apresentar um alongamento aprisionado, devido à inversão do atrito bulbo-solo na sua parte superior, resultando numa interpretação mais realista do deslocamento residual da ancoragem medido no ensaio de protensão.

## Abstract

This paper analyses the behaviour of the post-grouting anchors performed in soil, which have been oftenly used in large retaining walls, mainly at urban areas. It is presented a method of prediction of the load-displacement curve of the anchor, which is based on elastic-plastic model, that considers the elongation of grouted length and includes the analysis of the unloading of the anchor. Through this analysis it is showed that at the end of the unloading, the grouted length can present an imprisoned elongation as a result of inverted friction along its upper part. This method aroused from of a PhD thesis, presented to Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Souza [1], which analysed 154 anchors, being 42 from the 7 so called "Basic Tests", carried out in São Paulo city, between 1973 and 1990, reported by Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo, and 112 performed on actual retaining walls built in São Paulo City.

**Palavras-chave:** Contenções atirantadas, Ancoragens reinjetáveis, Curva carga-deslocamento

## INTRODUÇÃO

A necessidade de escavações urbanas cada vez mais profundas tem imposto aos projetistas de contenções o grande desafio de equilibrar elevados esforços horizontais com o mínimo de deslocamento da estrutura de contenção. Em muitos dos casos a utilização de cortinas ou paredes atirantadas se constitui na solução mais adequada, se não a única.

Atualmente, o atirantamento das paredes de contenção é feito na maioria das vezes por meio de ancoragens reinjetáveis e protendidas, as quais podem transferir ao terreno cargas elevadas e, devido à protensão, com deslocamentos mínimos das paredes. Essas ancoragens normalmente constituem-se em um furo no maciço preenchido com calda de cimento, contendo no seu interior um elemento resistente à tração (tirante) e um tubo com válvulas para posterior injeção de calda de cimento sob alta pressão, em fases sucessivas, para formação do bulbo de ancoragem. A Figura 1 apresenta esquematicamente uma ancoragem reinjetável executada em solo.

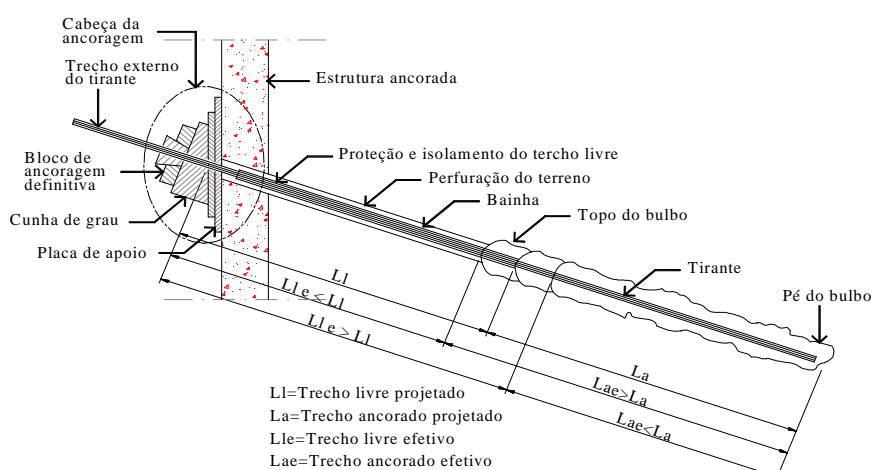


Figura 1: Representação esquemática de uma ancoragem injetada em solo.

<sup>1</sup> Eng<sup>o</sup> Civil, M.Sc., Dr em Eng. pela EPUSP. – Consultrix S/C Ltda.

R. Baronesa de Itu, 858 – Santa Cicília – São Paulo/SP – CEP 01231-000

<sup>2</sup> MSc Harvard University; Dr. em Engenharia e Prof. Titular pela EPUSP

Av. Prof. Luciano Gualberto, trav. 2 – Edif. Paula Souza (Prédio de Enga Civil) – São Paulo/SP – CEP 05508-900

Este trabalho apresenta um método de previsão da curva carga-deslocamento do topo da ancoragem, o qual se baseia num modelo cujas funções de transferência de carga bulbo-solo são do tipo elasto-plástico, considera a deformabilidade do bulbo e inclui a análise do descarregamento da ancoragem. Tal método resultou da tese de doutorado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Souza [1]. Na referida tese foram analisadas 154 ancoragens, sendo 42 procedentes de 7 Ensaio Básicos realizados na Grande São Paulo, entre 1973 e 1990, relatados pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo, e 112 executadas em obras reais de contenção na Cidade de São Paulo.

## PROTENSÃO DAS ANCORAGENS

A protensão tem a finalidade de tensionar a ancoragem, colocando-a em carga antes da atuação dos esforços solicitantes devidos ao empuxo de terra, de modo a minimizar os deslocamentos da estrutura de contenção. Esta necessidade de protensão de todas as ancoragens possibilita a realização de ensaios de protensão, praticamente sem custo adicional, através dos quais se obtém a curva carga-deslocamento do topo de cada ancoragem.

A NBR-5629 prescreve a realização do denominado Ensaio de Recebimento em todas as ancoragens e estabelece um procedimento para avaliação da ancoragem com base na curva carga-deslocamento obtida no referido ensaio. A avaliação inclui a verificação da estabilização do deslocamento total para a carga máxima de ensaio e a análise dos deslocamentos elástico e permanente da ancoragem. O deslocamento elástico é considerado proveniente exclusivamente do alongamento do trecho livre e o deslocamento permanente é atribuído ao deslocamento do bulbo, que por sua vez é considerado indeformável. Para a aprovação da ancoragem, deve ser observada a estabilização do deslocamento total do topo para a carga máxima de ensaio prevista e o deslocamento elástico deve estar contido dentro dos limites inferior e superior representados respectivamente pelas curvas “a” e “b”, indicadas na Figura 2.

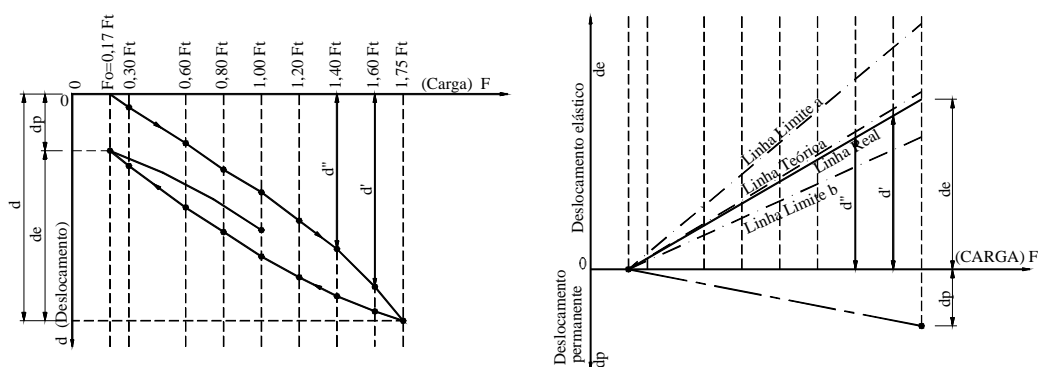


Figura 2: Gráficos típicos do Ensaio de Recebimento. NBR-5629.

O conceito da Norma nesta avaliação é que a ancoragem, por questões executivas, possa ter variação do comprimento previsto do bulbo. Observa-se que para o limite superior do deslocamento elástico, curva “a”, é admitido que o comprimento do bulbo tenha resultado 50% menor do que o projetado e, para o limite inferior, é admitido que 20% do trecho livre tenha sido adicionado ao bulbo.

A NBR-5629 prevê ainda a realização de pelo menos dois Ensaio de Qualificação e dois Ensaio de Fluência em cada obra. No primeiro ensaio, após cada estágio de carregamento, a ancoragem é descarregada até a carga inicial de protensão, cerca de 10% da carga máxima de ensaio prevista. Segundo a Norma, através deste ensaio é possível avaliar a perda de carga por atrito ao longo do trecho livre, ( $P_a$ ), denotada pela alta rigidez apresentada pela ancoragem no início do carregamento. Esta perda de carga é limitada pela Norma em 15% da carga máxima de ensaio, a partir da carga inicial de protensão. O procedimento para o Ensaio de Fluência é semelhante ao Ensaio de Qualificação, sendo que em cada estágio de carregamento são medidos deslocamentos do topo da ancoragem sob carga constante, durante intervalos de tempo definidos pela Norma, com o objetivo de se determinar o coeficiente de fluência ( $C_F$ ) da ancoragem e, conseqüentemente, indicação do seu comportamento ao longo do tempo, em termos de permanência da carga incorporada.

Como se observa, o comportamento carga-deslocamento do topo da ancoragem é determinante do seu desempenho estrutural, como elemento de reação aos esforços atuantes na contenção, e é o principal fator do controle de execução preconizado pela NBR-5629. Esta constatação justifica a importância de se aprimorar o conhecimento do comportamento carga-deslocamento da ancoragem, com o que se pretende contribuir com o método apresentado a seguir. Também fica patente a necessidade de se considerar as limitações do sistema de protensão na análise das ancoragens. Estas limitações são basicamente as perdas de carga inerentes ao sistema e a movimentação dos cravetes durante o carregamento e na incorporação da carga, conforme apresentado por Souza [1].

## PREVISÃO DA CURVA CARGA-DESLOCAMENTO DA ANCORAGEM

A mobilização de resistência em ancoragens pode ser considerada devida exclusivamente ao atrito bulbo-solo, visto que a resistência frontal do bulbo é desprezível para a maioria dos casos práticos. Como se sabe, a resistência por atrito é mobilizada com pequenos deslocamentos relativos solo-elemento de transferência, mostrando a experiência com

estacas que este deslocamento em geral é de poucos milímetros, como este autor teve a oportunidade de confirmar, Souza [2]. Por outro lado, nos ensaios de recebimento de ancoragens, executadas em várias obras, observa-se que, mesmo quando a resistência máxima da ancoragem não é totalmente mobilizada, é comum o registro de deslocamentos residuais do topo da ancoragem da ordem de 20mm, os quais têm sido atribuídos à translação do bulbo de ancoragem, considerado indeformável pela maioria dos projetistas e executores. Ora, é fácil compreender que, mesmo sem entrar no mérito da função de transferência de carga bulbo-solo, se tal transferência se dá por atrito e o bulbo se desloca monoliticamente 20mm, a capacidade de carga limite da ancoragem deveria ter sido mobilizada e esta condição deveria estar explícita na curva carga-deslocamento do topo, medida durante o carregamento.

O fato de que a carga aplicada no topo da ancoragem é distribuída ao solo por atrito bulbo-solo, ao longo do trecho ancorado, implica num diagrama de esforço normal, de tração, ao longo do bulbo e, conseqüentemente, num alongamento do mesmo, o qual é inversamente proporcional ao módulo de elasticidade do tirante, quase sempre aço de protensão. Este alongamento do bulbo tende a provocar fissuras na calda de cimento injetada, as quais não influem significativamente no mecanismo de transferência de carga.

Após o alongamento do bulbo provocado pelo carregamento da ancoragem, tendo havido o esgotamento do atrito unitário limite pelo menos num trecho superior do bulbo, o descarregamento da ancoragem impõe ao tirante uma tendência de retorno ao comprimento original, antes do carregamento, devido ao comportamento praticamente elástico-linear do aço nos limites comuns de sollicitação de ancoragens. Como o solo tem um comportamento que se aproxima mais de um modelo elasto-plástico, existe uma tendência de que o retorno do alongamento do bulbo não se dê por completo devido à inversão do atrito, levando à ocorrência de tensões residuais no contato bulbo-solo após o descarregamento no topo da ancoragem. Estas tensões residuais resultam num diagrama de esforço normal aprisionado no bulbo, que é responsável por parte do deslocamento dito permanente das ancoragens ensaiadas. A Figura 3 apresenta esquematicamente este comportamento.

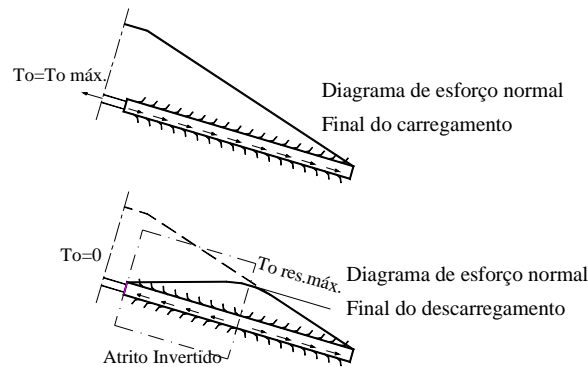


Figura 3: Bulbo de ancoragem: mobilização do atrito normal durante o carregamento e parcialmente invertido no descarregamento.

Pode-se inferir da Figura 3 que o conhecimento do comportamento da ancoragem no descarregamento é importante para a interpretação dos ensaios de ancoragens, uma vez que possibilita considerar a existência de carga residual devida à reversão do atrito em parte do bulbo, responsável por um alongamento aprisionado do mesmo no final do descarregamento. Além disso, conforme apresentado por Souza [1], a análise da curva carga-deslocamento do topo da ancoragem, incluindo o trecho correspondente ao descarregamento, permite estimar razoavelmente a perda de carga por atrito no trecho livre ou perda devida ao próprio sistema de protensão.

A utilização em fundações profundas de função de transferência de carga do tipo elasto-plástico e a consideração da deformabilidade do elemento de transferência de carga, conforme proposto inicialmente por Cambefort [3], desenvolvido por Baguelin e Venon [4] e Massad [5] e apresentado mais detalhadamente por Mecsi [6], para o caso de ancoragens, sem dúvida se constitui numa ferramenta de grande potencial para projetistas, uma vez que permite representar o fenômeno físico com precisão satisfatória e implica em tratamento matemático simples, com parâmetros de entrada que são relativamente fáceis de serem obtidos e controlados. Uma hipótese implícita nestas formulações é que o solo ao redor do bulbo é indeformável.

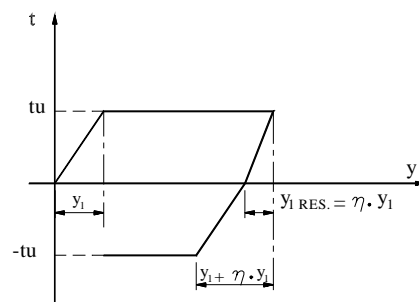


Figura 4: Modelo de transferência de carga bulbo-solo.

Observa-se na Figura 4 que o modelo de transferência de carga bulbo-solo proposto requer a determinação de três parâmetros do sistema bulbo-solo, a saber:

- $t_u$  = capacidade de carga específica da ancoragem, em termos de força por metro de bulbo, (kN/m);
- $y_1$  = deslocamento relativo bulbo-solo necessário para esgotar a resistência por atrito;
- $\eta$  = coeficiente de retorno do deslocamento relativo bulbo-solo.

A capacidade de carga específica,  $t_u$ , é o parâmetro determinante na previsão do comportamento da ancoragem. Ele depende do tipo de solo e do processo executivo, principalmente do procedimento de injeção do bulbo. Souza [1] apresenta algumas correlações para obtenção de  $t_u$  em alguns tipos de solos da cidade de São Paulo.

O deslocamento relativo bulbo-solo,  $y_1$ , necessário para esgotar a resistência por atrito, é o parâmetro que influencia a deformabilidade da ancoragem e depende do tipo de solo e do processo executivo. Souza [1] apresenta uma análise de diversas ancoragens, nas quais este valor variou entre 3 mm e 15 mm, na maioria dos casos.

O coeficiente de retorno do deslocamento relativo bulbo-solo,  $\eta$ , depende do tipo de solo e é tal que  $0 < \eta \leq 1$ . Ele foi introduzido para levar em conta o fato dos solos terem, em geral, comportamento tensão-deformação não linear.

Evidentemente, como em todo modelo matemático de um fenômeno físico, também neste caso um certo grau de simplificação da realidade está presente. Neste sentido, pode-se esperar alguma imprecisão das estimativas do comportamento das ancoragens feitas com base no método proposto a seguir, na medida em que a reologia do sistema bulbo-solo se afaste do modelo elasto-plástico adotado, a heterogeneidade do maciço ao longo do bulbo for significativa, a ação da injeção da calda de cimento não for uniforme ao longo do bulbo e, ainda, por falha executiva, ocorrer distribuição de carga para o maciço no trecho livre. Além, é claro, das limitações inerentes ao próprio modelo matemático adotado.

Tendo em vista o exposto acima, a seguir apresenta-se o método proposto de previsão do comportamento carga-deslocamento de ancoragens reinjetáveis executadas em solo, o qual complementa o trabalho de Mecsi [6] com a estimativa da curva carga-deslocamento no descarregamento.

### Carregamento

O comportamento carga-deslocamento das ancoragens no carregamento pode ser satisfatoriamente estimado pelo método de Mecsi [6]. Para efeito de melhor visualização da mobilização da capacidade de carga da ancoragem, a curva carga-deslocamento no carregamento pode ser dividida em duas fases, como se passa a descrever.

**FASE 1:** Inicia-se com o início do carregamento e vai até o momento em que o topo do bulbo desloca  $y_1$ , esgotando a resistência por atrito neste ponto, conforme esquematizado na Figura 5.

No final da Fase1 tem-se:

$$T_0 = t_u \frac{1}{k} \tanh(k \cdot L_a) \quad (1)$$

$$y_0 = y_1 + \frac{T_0 \cdot L_l}{E \cdot A} \quad (2)$$

onde:

$T_0$  = carga aplicada no topo da ancoragem

$y_0$  = deslocamento do topo da ancoragem

$$k = \sqrt{\frac{t_u}{E \cdot A \cdot y_1}} = \text{índice de rigidez da ancoragem}$$

$L_a$  = comprimento do trecho ancorado (bulbo)

$L_l$  = comprimento do trecho livre

$E$  = módulo de elasticidade do aço

$A$  = área da seção transversal do tirante (aço)

Como se pode observar na Figura 5 e na expressão (1), no final da Fase 1 a capacidade de carga específica começa a ser esgotada no topo do bulbo, ainda com  $l_0 = 0$ . Evidentemente, como se pode deduzir do modelo de transferência de carga, numa ancoragem que tenha sido carregada apenas até o final da Fase 1 não está sujeita à reversão do atrito durante o descarregamento.

**FASE 2:** Após atingir  $y_1$  e conseqüentemente  $t_u$  no topo do bulbo, o prosseguimento do carregamento se dá aumentando o deslocamento do bulbo e aumentando o trecho superior do mesmo, no qual se esgota a resistência por atrito bulbo-solo, isto é, atinge-se  $t_u$ , conforme esquematizado na Figura 5.

Ao longo desta Fase 2, que se estende até o final do carregamento, tem-se:

$$T_0 = t_u \left[ l_0 + \frac{1}{k} \cdot \tanh[ k \cdot (L_a - l_0) ] \right] \quad (3)$$

$$y_0 = \frac{T_0 \cdot L_l}{E \cdot A} + \frac{T_0 \cdot l_0}{E \cdot A} - \frac{t_u}{2} \cdot \frac{l_0^2}{E \cdot A} + y_1 \quad (4)$$

Para obter uma estimativa da curva carga-deslocamento do topo da ancoragem, com vários pontos calculados, basta variar  $l_0$  desde valores baixos até  $L_a$ , quando então é atingida a capacidade de carga limite da ancoragem,  $T_{0\text{máx}}$ . Nesta etapa, com a extremidade inferior do bulbo tendo deslocado  $y_1$ , ou seja, além de alongar o bulbo transladou permanentemente  $y_1$  na direção da carga aplicada, o prosseguimento no ensaio de carregamento da ancoragem implica no aumento do deslocamento permanente da ancoragem sem acréscimo de capacidade de carga, indicando que a ancoragem “correu”.

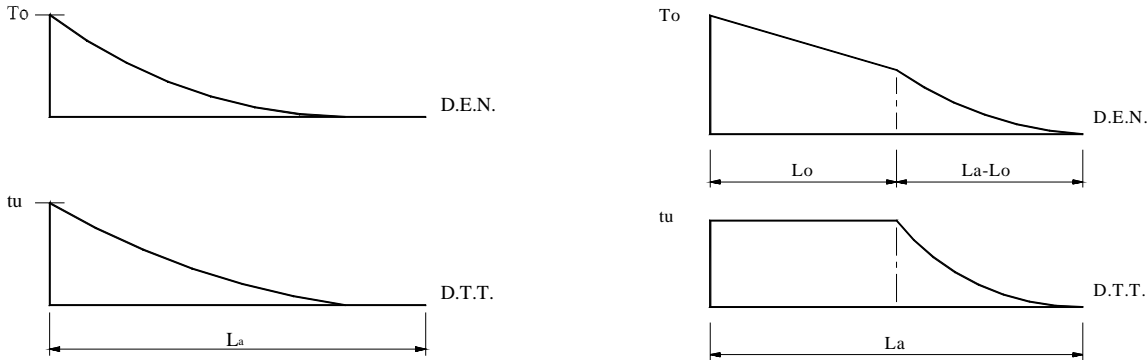


Figura 5: Diagramas de esforço normal e tangencial do bulbo no carregamento, Fase 1 e Fase 2.

### Descarregamento

Tomando o final do carregamento como uma nova origem do processo de resposta do sistema bulbo-solo à solicitação externa, conforme indicado no modelo de transferência de carga bulbo-solo, representado na Figura 4, é possível equacionar o descarregamento como uma seqüência do carregamento, sendo:

$$t_{u(\text{descarregamento})} = -2t_{u(\text{carregamento})} \quad (5)$$

$$y_{1(\text{descarregamento})} = -(\eta \cdot y_{1(\text{carregamento})} + y_{1(\text{carregamento})}) \quad (6)$$

Como já mencionado, o coeficiente  $\eta$  depende essencialmente do tipo de solo, podendo variar entre 0 e 1. O descarregamento pode ser analisado em três fases principais, como segue.

**FASE 1:** Inicia-se no final do carregamento e vai até o momento em que o topo do bulbo retorna ( $\eta \cdot y_1$ ), anulando todo o atrito mobilizado neste ponto, conforme esquematizado na .

No final da Fase1 tem-se:

$$T_0 = T_{0\text{max}} - t_u \frac{1}{k} \tanh(k \cdot L_a) \quad (7)$$

$$y_0 = y_{0\text{max}} - \eta \cdot y_1 - \frac{(T_{0\text{max}} - T_0) \cdot L_l}{E \cdot A} \quad (8)$$

onde:

$T_{0\text{max}}$  = capacidade de carga total da ancoragem

$y_{0\text{max}}$  = deslocamento do topo da ancoragem correspondente a  $T_{0\text{max}}$

**FASE 2:** Inicia-se no final da Fase 1 e vai até o momento em que o topo do bulbo retorna ( $\eta \cdot y_1 + y_1$ ), esgotando a reversão do atrito neste ponto, conforme esquematizado na Figura 6.

No final da Fase 2 tem-se:

$$T_0 = T_{0\text{max}} - 2 \cdot t_u \frac{1}{k} \tanh(k \cdot L_a) \quad (9)$$

$$y_0 = y_{0\text{max}} - (\eta \cdot y_1 + y_1) - \frac{(T_{0\text{max}} - T_0) \cdot L_l}{E \cdot A} \quad (10)$$

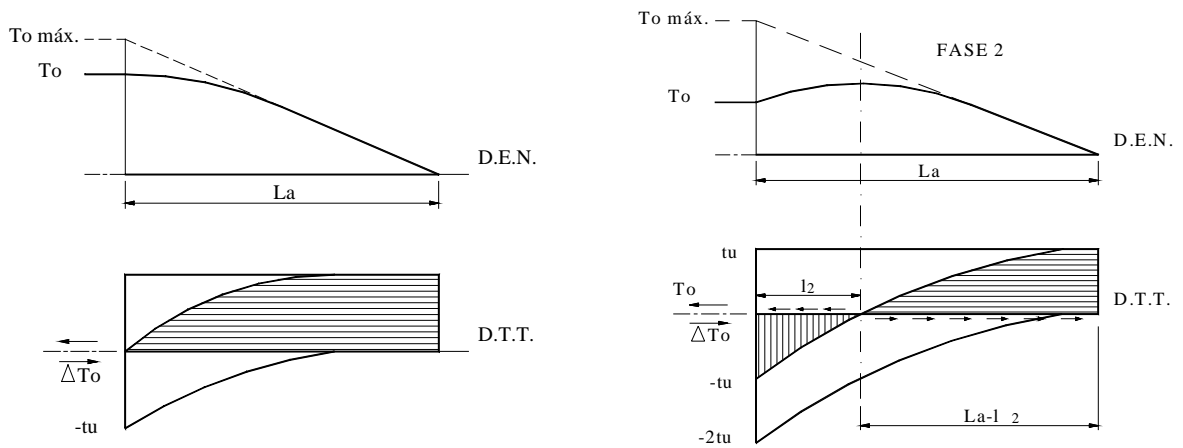


Figura 6: Diagramas de esforço normal e tangencial do bulbo no descarregamento, Fase 1 e Fase 2.

Como se pode observar na Figura 6, no final da Fase 2 do descarregamento a força normal máxima na ancoragem não ocorre no topo do bulbo e sim no final do trecho de atrito invertido. Este trecho tem alongamento  $y_1$  e o seu comprimento pode ser estimado, por baixo, em:

$$l_2 \approx \frac{E.A.y_1}{T_0} \quad (11)$$

**FASE 3:** Inicia-se no final da Fase 2, prossegue aumentando o trecho na parte superior do bulbo onde o atrito invertido é esgotado e vai até o final do descarregamento, quando ocorre o equilíbrio das forças correspondentes ao atrito positivo mobilizado e atrito invertido, conforme esquematizado na Figura 7.

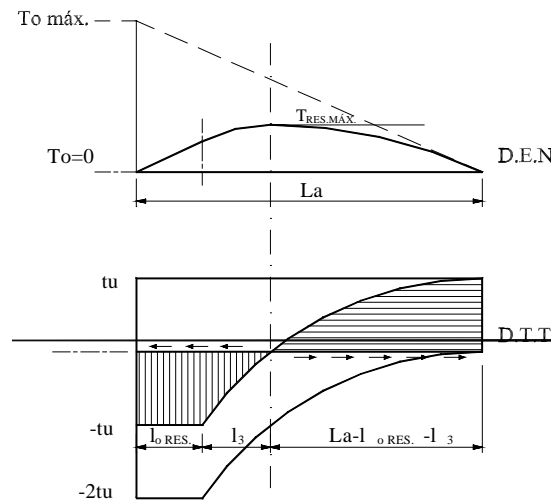


Figura 7: Diagramas de esforço normal e tangencial do bulbo no descarregamento, Fase 3.

Como se pode observar na Figura 7, no final do descarregamento a carga aplicada é nula e o deslocamento “permanente” da cabeça da ancoragem é a soma de  $y_1$  e o alongamento aprisionado do bulbo devido ao diagrama de esforço normal residual. Este diagrama corresponde ao equilíbrio das forças devidas ao atrito positivo mobilizado e ao atrito invertido. Para se poder calcular o alongamento aprisionado do bulbo é preciso estimar a força normal média atuante no mesmo. Analisando a Figura 7 constata-se que  $(l_{0\text{res}} + l_3) < 0,5L_a$  e a experiência analisando diversas ancoragens ensaiadas mostra que para os casos usuais se pode adotar:

$$l_{0\text{res}} + l_3 = 0,4.L_a \quad (12)$$

resultando numa relação direta entre  $T_{0\text{max}}$  e  $T_{\text{resmax}}$ :

$$T_{\text{res}}^{\text{max}} = 0,6.T_{0\text{max}} - \frac{t_u}{k} \cdot \tanh(k \cdot 0,6.L_a) \quad (13)$$

Conhecendo a força residual máxima ( $T_{\text{res}}^{\text{max}}$ ), pode-se estimar a força média atuante, como mínimo, conforme a expressão:

$$T_{res}^{m\u00e9dia} \approx \frac{T_{res}^{max}}{2} \quad (14)$$

o que possibilita obter uma estimativa do alongamento aprisionado do bulbo,

$$y_{res}^{max} = \frac{T_{res}^{m\u00e9dia} \cdot L_a}{E \cdot A} \quad (15)$$

e finalmente o deslocamento “permanente” total da cabe\u00e7a da ancoragem:

$$y_{0res} = y_{res}^{max} + y_1 \quad (16)$$

O modelo de transfer\u00eancia de carga bulbo-solo apresentado na Figura 4 e o desenvolvimento contendo as express\u00f5es (7) a (16) s\u00e3o suficientes para esclarecer que o deslocamento da cabe\u00e7a da ancoragem medido no ensaio de recebimento, denominado “permanente” pela NBR-5629 e considerado como uma transla\u00e7\u00e3o do bulbo pela maioria dos projetistas e executores, na verdade \u00e9 algo diferente. Trata-se de uma soma de duas parcelas de deslocamentos distintos. Uma delas, ( $y_{res}$ ), deve-se ao alongamento aprisionado do bulbo e, a outra, a uma transla\u00e7\u00e3o do bulbo. Esta \u00faltima \u00e9, em geral, menor do que  $y_1$ , porque as ancoragens normalmente n\u00e3o s\u00e3o ensaiadas at\u00e9 o limite da sua capacidade de carga. Enquanto a primeira parcela \u00e9 revers\u00edvel, caso se elimine o atrito invertido, a segunda \u00e9 realmente irrevers\u00edvel, correspondendo a uma transla\u00e7\u00e3o do bulbo. Neste sentido, apesar da denomina\u00e7\u00e3o ser menos importante que a melhor compreens\u00e3o do fen\u00f4meno f\u00edsico, o ideal seria nomear o deslocamento da cabe\u00e7a da ancoragem, medido ao final do descarregamento dos ensaios de recebimento, de deslocamento residual, composto por uma parcela de deslocamento permanente e outra de alongamento aprisionado do bulbo.

Como se pode observar, as express\u00f5es (7) a (16) descrevem o comportamento no descarregamento de uma ancoragem que tenha sido carregada at\u00e9 o limite da sua capacidade de carga e, atingido este limite, o descarregamento tenha sido iniciado. No caso de uma ancoragem ser submetida a um deslocamento maior que o m\u00ednimo necess\u00e1rio para mobilizar a sua capacidade de carga limite, a parcela excedente obviamente aumentar\u00e1 o seu deslocamento permanente. Na situa\u00e7\u00e3o oposta, de uma ancoragem ser ensaiada com um carregamento aqu\u00e9m do seu limite de capacidade de carga, como ocorre na maioria dos ensaios de recebimento, haver\u00e1 um menor deslocamento permanente e um menor alongamento aprisionado do bulbo, como se pode observar no esquema apresentado na Figura 8.

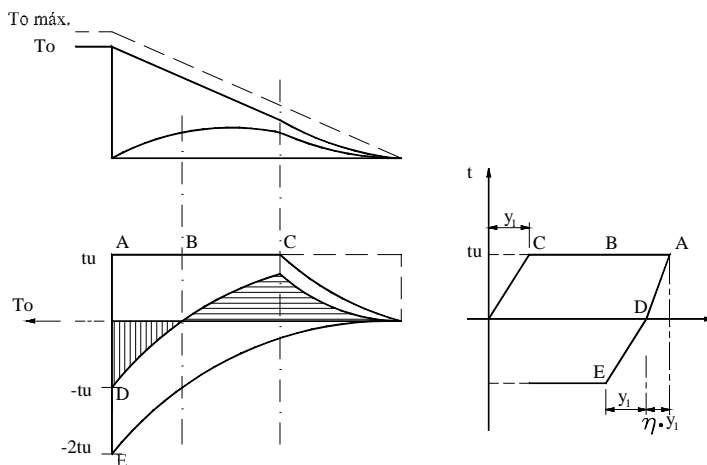


Figura 8: Diagramas de esfor\u00e7o normal e tangencial do bulbo de uma ancoragem ensaiada at\u00e9 aqu\u00e9m do seu limite de capacidade de carga.

As express\u00f5es (1) a (16) e Figuras 3 a 10 explicitam o procedimento proposto para a estimativa da curva carga-deslocamento do topo de uma ancoragem. Observa-se que a principal inc\u00f3gnita do conjunto de par\u00e2metros de entrada \u00e9 a capacidade de carga espec\u00edfica,  $t_u$ , uma vez que para os par\u00e2metros  $y_1$  e  $\eta$ , que a rigor tamb\u00e9m dependem de certas caracter\u00edsticas do sistema bulbo-solo, pode-se a princ\u00edpio admitir os seguintes valores:

$$y_1 = 5 \text{ mm a } 10 \text{ mm}$$

$$\eta = 0 \text{ a } 1$$

Souza [1] apresenta correla\u00e7\u00f5es orientativas para a estimativa de  $t_u$  para alguns tipos de solos da Cidade de S\u00e3o Paulo.

## APLICA\u00c7\u00c3O DO M\u00c9TODO DE PREVIS\u00c3O DA CURVA CARGA-DESLOCAMENTO

O m\u00e9todo apresentado foi utilizado por Souza [1] num processo iterativo para interpreta\u00e7\u00e3o da curva carga-deslocamento de 154 ancoragens ensaiadas, com o objetivo de verificar a influ\u00eancia dos fatores executivos no desempenho da ancoragem e estabelecer correla\u00e7\u00f5es entre os par\u00e2metros do sistema bulbo-solo, principalmente a capacidade de carga espec\u00edfica, com estes fatores executivos e com o tipo e resist\u00eancia inicial do solo. A Figura 9 apresenta, como exemplo, resultado da interpreta\u00e7\u00e3o de uma ancoragem.

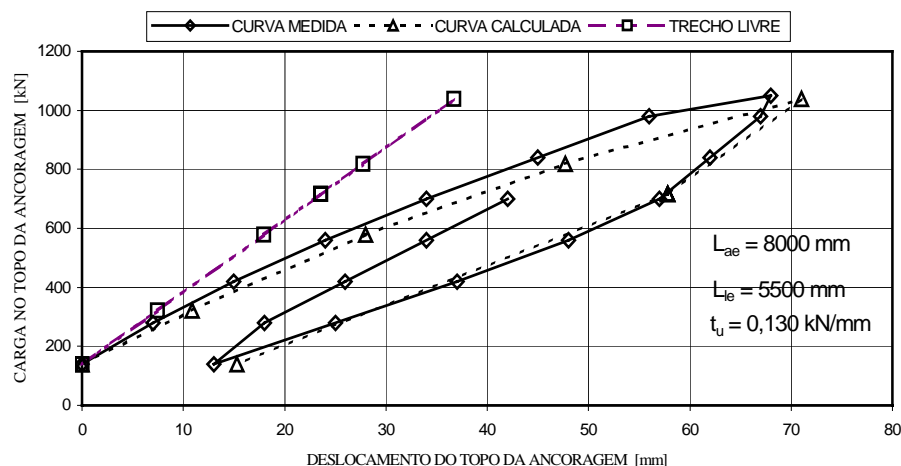


Figura 9: Exemplo de aplicação do método proposto.

No conjunto de casos analisados na referida pesquisa, os parâmetros da ancoragem variaram, de maneira geral, conforme o seguinte:

$$t_u = 0,05 \text{ a } 0,20 \text{ kN/mm}$$

$$y_1 = 3 \text{ a } 15 \text{ mm}$$

$$E = 195 \text{ a } 210 \text{ kN/mm}^2$$

$$A = 500 \text{ a } 900 \text{ mm}^2$$

$$L_a = 6000 \text{ a } 10000 \text{ mm}$$

$$k = 0,00020 \text{ a } 0,00080 \text{ mm}^{-1}$$

Foi possível inferir (Souza, [1]) que a carga residual nas ancoragens analisadas variou de 6% a 36% da máxima carga de ensaio, ou 20 kN a 430 kN, tendo sido calculado um valor aproximado do deslocamento residual das ancoragens submetidas ao Ensaio de Recebimento, o qual variou de 5 mm a 25 mm, concordando razoavelmente com a faixa de valores medidos.

Considerando as cargas de trabalho projetadas para as ancoragens, foi possível também inferir que, para os 112 casos de ancoragens de obras reais de contenção analisados, o coeficiente de segurança da ancoragem, no que se refere à capacidade de carga do sistema bulbo-solo, variou de 1,2 a 3,0, apresentando um valor médio de 1,8. Este valor médio está de acordo com os valores projetados, 1,50 (ancoragens provisórias) e 1,75 (ancoragens definitivas), mas verificou-se que em certos casos a reserva de segurança é insatisfatória e em outros o dimensionamento é muito conservador.

## CONCLUSÕES

O método de previsão da curva carga-deslocamento proposto, considerando a deformabilidade do bulbo e a inversão do atrito bulbo-solo, no descarregamento, possibilita uma análise mais realista do comportamento da ancoragem, requerendo parâmetros do sistema bulbo-solo de fácil obtenção e controle. A sua utilização em obras comuns permite aprimorar o controle de execução, na verificação dos trechos livre e ancorado efetivos e na interpretação do deslocamento residual da ancoragem. Espera-se que esta melhoria no conhecimento do comportamento da ancoragem contribua com novos subsídios para dimensionamentos mais apropriados, técnica e economicamente, e obras mais bem controladas, evitando deslocamentos indesejáveis, algumas vezes observados em cortinas atirantadas, bem como bulbos desnecessariamente longos ou muito injetados.

O método proposto também pode ser aplicado num processo iterativo, como se ilustrou com um exemplo, possibilitando interpretar curvas carga-deslocamento de ancoragens ensaiadas e obter a capacidade de carga específica da ancoragem. Esta, por sua vez, pode ser correlacionada com o tipo e resistência inicial do solo e com as características executivas, em todas as obras, criando um banco de dados de grande valia para projetistas e executores.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Souza, R. N. (2001). Ancoragens reinjetáveis e protendidas em solo: previsão do comportamento e controle de execução. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- [2] Souza, R. N. (1996). Estudo do comportamento de estacas escavadas de grandes dimensões: estações e barretes. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- [3] Cambefort, H. (1964). "Essai sur le comportement en terrain homogène des pieux isolés et des groupes de pieux". Annales de l'Institut Technique du Batiment et des Travaux Public, Décembre, n.204, pp.1417-1518.
- [4] Baguelin, F. e Venon, J. P. (1971). "Influence de la compressibilité des pieux sur la mobilisation des efforts résistants. Le comportement des sols avant la rupture". **Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées**, n. especial, pp.308-320.
- [5] Massad, F. (1991). Comportamento de estacas escavadas de elevadas compressibilidades. II Seminário de Engenharia de Fundações Especiais (SEFE II), São Paulo, v.I, pp.245-254.
- [6] Mesci, J. (1997). "The load bearing capacity and the load-elongation diagram of soil anchors". XIV ICSMFE, Hamburg, pp.1327-1330.