

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Henrique Oliveira Wintgens da Silva

**TIRANTES EM ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO DE SOLO:
DIRETRIZES PARA PROJETO E EXECUÇÃO**

Porto Alegre
dezembro 2015

HENRIQUE OLIVEIRA WINTGENS DA SILVA

**TIRANTES EM ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO DE SOLO:
DIRETRIZES PARA PROJETO E EXECUÇÃO**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Luiz Antônio Bressani

Porto Alegre
dezembro 2015

HENRIQUE OLIVEIRA WINTGENS DA SILVA

**TIRANTES EM ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO DE SOLO:
DIRETRIZES PARA PROJETO E EXECUÇÃO**

Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, dezembro de 2015

Prof. Luiz Antônio Bressani
PhD. Pelo Imperial College,
University of London
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Prof. Luiz Antônio Bressani (UFRGS)
PhD. Pelo Imperial College, University of London

Prof. Lucas Festugato (UFRGS)
Dr. Pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Marcos Strauss (Azambuja Engenharia e Geotecnia)
M. Sc. Pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho a meus pais, Álvaro e Carla, que sempre me apoiaram e especialmente durante o período do meu Curso de Graduação estiveram ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor Luiz Antônio Bressani, orientador deste trabalho, pelo grande apoio, incentivo e pelos valiosos conhecimentos transmitidos especialmente nesse último ano de trabalho.

Agradeço à Professora Carin, pelo esforço e dedicação com os quais ela tornou possível a realização deste e de muitos outros trabalhos de conclusão.

Agradeço ao engenheiro Marcos Strauss pela ajuda na fase inicial do trabalho, esclarecendo minhas dúvidas e instigando a pesquisa sobre o tema.

Agradeço aos meus professores ao longo desses seis anos de graduação, especialmente aos da área da geotecnia, que me influenciaram a seguir nessa fascinante área da Engenharia Civil.

Agradeço aos colegas da Estaq pela amizade e pela experiência profissional e pessoal proporcionada.

Agradeço aos amigos e colegas da Engenharia que tornaram muito mais agradável essa difícil caminhada até a formatura.

Agradeço aos meus pais e meus irmãos por serem a principal fonte de motivação para alcançar meus objetivos.

Agradeço às minhas avós (e meus avôs, que deixam saudade nesse momento de alegria), meus tios e aos demais familiares que colaboraram para a minha educação e depositaram em mim sua confiança durante o curso.

Agradeço à minha namorada, Mariana, pelo incondicional apoio e companheirismo dedicados nesses últimos três anos.

Agradeço também aos amigos e todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

A mente que se abre a uma nova ideia
jamais voltará ao seu tamanho original.

Albert Einstein

RESUMO

O crescimento das cidades no sentido de um melhor aproveitamento dos espaços disponíveis encontra nas escavações de subsolos, nas construções de viadutos e pontes, ou na criação de estradas, entre outros, alternativas de desenvolvimento. Este tipo de obra, onde estão envolvidas grandes movimentações de solo, muitas vezes utilizam métodos de contenção que envolvem a aplicação de ancoragens. O tipo de ancoragem mais comum é com o uso de tirantes. Este trabalho versa sobre práticas de projeto e execução de tirantes em estruturas de contenção de solo, discutidas após revisão bibliográfica de material disponível no Brasil e no exterior. O objetivo do trabalho é revisar práticas de projeto e execução de tirantes em estruturas de contenção de solo e propor diretrizes para obras no Brasil. Os tirantes, que são elementos que transferem cargas temporárias ou permanentes para o interior do maciço de solo contido, tem a função de diminuir os deslocamentos da estrutura. Após perfuração no terreno, seguida da montagem do tirante, instalação e processo de injeção de nata de cimento, o tirante é protendido e ancorado na estrutura, garantindo a aplicação de carga. No Brasil, as recomendações são feitas pela NBR 5629/2006 – execução de tirantes ancorados no terreno. No exterior, muitas indicações feitas nos EUA e Europa foram revisadas neste trabalho e foram consideradas como importantes referências. A análise das práticas encontradas é feita buscando identificar os pontos onde as recomendações apontadas são semelhantes, direcionando para procedimentos que podem ser considerados consolidados. Ao mesmo tempo, é feita a indicação de pontos onde certas práticas podem ser consideradas insuficientes, apontando-se para as recomendações de outra região que possam complementá-las. A pesquisa constatou a grande importância na proteção contra corrosão dos elementos de tração. A região crítica, nas proximidades da cabeça do tirante, merece destaque com a indicação de proteção extra conforme indicado na bibliografia internacional através de um arranjo construtivo conhecido como *trumpet*. Como resultado do trabalho, são indicadas diretrizes para as etapas de projeto e de execução de tirantes em estruturas de contenção de solo. As recomendações identificadas se mostraram suficientes para a elaboração das diretrizes. Boa parte dos procedimentos de projeto e execução apresentados leva a recomendações já bem estabelecidas, enquanto o restante encontra suporte em práticas estrangeiras.

Palavras-chave: NBR 5629. Tirantes. Ancoragem. Estrutura de Contenção.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama das etapas da pesquisa	21
Figura 2 – Contenções gravitacionais e semi gravitacionais	22
Figura 3 – Contenções flexíveis	23
Figura 4 – Cortina ancorada de estacas escavadas justapostas	24
Figura 5 – Cortina de concreto atirantada	28
Figura 6 – Componentes de um tirante	31
Figura 7 – Fases de injeção de um tirante com múltiplas injeções	37
Figura 8 – Cabeça do tirante em processo de corrosão	40
Figura 9 – Distribuição de cargas no método da área tributada	51
Figura 10 – Superfície de ruptura após atirantamento, segundo NBR 5629:2006	53
Figura 11 – Ábaco para estimativa da aderência lateral limite em solos de areia e cascalho	57
Figura 12 – Ábaco para estimativa da aderência lateral limite em solos de argila e silte	57
Figura 13 – Ábaco para estimativa da aderência lateral limite em solos de margas e calcário com margas	58
Figura 14 – Ábaco para estimativa da aderência lateral limite em rocha alterada ou fragmentada	58
Figura 15 – Diagrama de decisão da proteção anticorrosiva	64
Figura 16 – Exemplo de proteção para tirantes de cordoalhas	65
Figura 17 – Exemplo de proteção para tirantes de barra	66
Figura 18 – Equipamento de perfuração	71
Figura 19 – Esquema de injeção	76
Figura 20 – Cargas x deslocamentos totais no ensaio de qualificação	80
Figura 21 – Repartição em deslocamentos elástico e permanente no ensaio de qualificação	81
Figura 22 – Cargas e deslocamentos totais no ensaio de recebimento tipo A	85
Figura 23 – Repartição em deslocamentos elástico e permanente no ensaio de recebimento tipo A	86
Figura 24 – Cargas e deslocamentos totais no ensaio de recebimento tipo B	86
Figura 25 – Repartição em deslocamentos elástico e permanente no ensaio de recebimento tipo B	87
Figura 26 – Cargas e deslocamentos totais no ensaio de recebimento tipo C	87
Figura 27 – Repartição em deslocamentos elástico e permanente no ensaio de recebimento tipo C	88
Figura 28 – Cargas e deslocamentos totais no ensaio de recebimento tipo D.....	88

Figura 29 – Repartição em deslocamentos elástico e permanente no ensaio de recebimento tipo D	89
Figura 30 – Tempo x deslocamento no ensaio de fluência	91
Figura 31 – Log(tempo) x deslocamento no ensaio de fluência	91
Figura 32 – Carga (F) x coeficiente de fluência (CF) no ensaio de fluência	92
Figura 33 – Resultado do teste de desempenho	93
Figura 34 – Deformações elásticas e residuais no teste de desempenho	95
Figura 35 – Resultado do teste de prova	97
Figura 36 – Exemplo de resultado do teste de prova	98
Figura 37 – Diagrama de decisão após ensaios de protensão	100
Figura 38 – Equipamento de protensão	101
Figura 39 – Ancoragem de tirante monobarra	105
Figura 40 – Detalhe do bloco de ancoragem com clavetes	106
Figura 41 – Detalhe do bloco de ancoragem com botões	106
Figura 42 – Esquema de proteção contra corrosão com <i>trumpet</i>	115
Figura 43 – Exemplo de tirante montado	117

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Aplicabilidade e uso de ensaios de campo	45
Quadro 2 – Coeficientes de majoração do diâmetro e quantidade mínima de argamassa	56
Quadro 3 – Agressividade do meio pela NBR 5629:2006	62
Quadro 4 – Trecho livre de tirantes permanentes segundo BS EN 1537:2000	67
Quadro 5 – Cargas a serem aplicadas no ensaio de recebimento	84
Quadro 6 – Etapas do ensaio de desempenho	94
Quadro 7 – Cargas e períodos de observação no ensaio de fluência estendido	98
Quadro 8 – Resumo das diretrizes de projeto	123
Quadro 9 – Resumo das diretrizes de execução	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coeficientes de ancoragem	54
Tabela 2 – Estimativa de carga para ancoragem em solo segundo Sabatini et. al	59
Tabela 3 – Estimativa de carga para ancoragem em rocha segundo Sabatini et. al	59

LISTA DE SÍMBOLOS

α – coeficiente redutor ao cisalhamento

γ – peso específico do solo (kN/m³)

Δd_e – variação de deslocamento em dois pontos quaisquer do trecho reto (m)

ΔF – variação de força correspondente a Δd_e (kN)

σ_{adm} – tensão admissível (kPa)

σ_z' – tensão efetiva no ponto médio da ancoragem (kPa)

θ – ângulo de inclinação do tirante (°)

AL – carga de alinhamento (kN)

C_F – coeficiente de fluência

d_e – deformação elástica na carga de ensaio (kN)

d_{ea} – deslocamento na linha “a” (m)

d_{eb} – deslocamento na linha “b” (m)

d_{ec} – deslocamento na linha “c” (m)

d' – coordenada do deslocamento do ponto R (m)

d'' – coordenada do deslocamento do ponto S (m)

D_d – diâmetro da perfuração (m)

D_s – diâmetro médio do bulbo de ancoragem (m)

E – módulo de elasticidade do material resistente à tração (kPa)

F' – coordenada do ponto R no eixo das cargas aplicadas (kN)

F'' – coordenada do ponto S no eixo das cargas aplicadas (kN)

F – carga aplicada (kN)

F_0 – carga inicial (kN)

F_t – carga de trabalho do tirante (kN)

FS – fator de segurança

F_p – resistência passiva do solo (kN)

f_{yk} – resistência característica do aço à tração (kPa)

H_1 – distância da superfície até o tirante superior (m)

k_f – coeficiente de ancoragem

K_p – coeficiente de empuxo passivo do solo

L_L – comprimento livre (m)

L_{Le} – comprimento livre efetivo (m)

L_b – comprimento do trecho ancorado (m)

L_e – distância entre o fim da ancoragem e o ponto de fixação do equipamento de protensão (m)

P – diferença entre a carga de ensaio e a carga de alinhamento (kN)

P_a – perda de carga por atrito no trecho livre

q_s – aderência lateral limite, (MPa)

s – espaçamento entre tirantes (m)

s_u – resistência ao cisalhamento não drenado do solo argiloso (kPa)

S – menor seção do elemento resistente à tração (m²)

T – resistência do tirante à tração (kN)

T_h – carga horizontal do tirante (kN)

T_{hi} – carga horizontal do tirante por unidade de comprimento de contenção (kN/m)

U – perímetro médio da seção transversal da ancoragem (m)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	20
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	20
2.2 OBJETIVO PRINCIPAL DA PESQUISA	20
2.3 DELINEAMENTO	20
3 ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO	22
3.1 CORTINAS DE ESTACAS JUSTAPOSTAS	24
3.1.1 Cortinas de estacões	25
3.1.2 Cortinas de microestacas e estacas raiz	25
3.1.3 Cortinas de estacas hélice contínua	25
3.1.4 Cortinas de estacas prancha	26
3.2 PAREDES DIAFRAGMA.....	26
3.3 CORTINAS DE CONCRETO ATIRANTADAS	26
4 TIRANTES	29
4.1 HISTÓRICO	29
4.2 FUNCIONAMENTO E PARTES PRINCIPAIS	30
4.3 CLASSIFICAÇÃO	32
4.3.1 Classificação quanto à vida útil	32
4.3.2 Classificação quanto à sua constituição	32
4.3.3 Classificação quanto ao sistema de injeção	33
4.4 ETAPAS DE EXECUÇÃO	33
4.4.1 Preparo do tirante	34
4.4.2 Perfuração	34
4.4.3 Instalação do tirante	35
4.4.4 Injeção	35
4.4.5 Protensão	37
4.4.6 Incorporação	39
4.4.7 Proteção da cabeça	40
4.5 VANTAGENS E LIMITAÇÕES	40
5 PRÁTICAS DE PROJETO DE TIRANTES EM ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO DE SOLO	44
5.1 INVESTIGAÇÃO DO TERRENO	44
5.2 ESTABILIDADE DA ESTRUTURA ATIRANTADA	48

5.2.1 Estabilidade global e projeto de escavação	48
5.2.2 Geometria do problema	49
5.2.2.1 Carga de trabalho	49
5.2.2.2 Posicionamento do tirante	51
5.2.2.2.1 <i>Espaçamento entre tirantes</i>	51
5.2.2.2.2 <i>Inclinação</i>	52
5.3 DIMENSIONAMENTO DOS TIRANTES	52
5.3.1 Dimensionamento do comprimento do trecho livre	53
5.3.2 Dimensionamento do trecho ancorado	53
5.3.2.1 Indicação da NBR 5629:2006 para dimensionamento do comprimento ancorado	54
5.3.2.2 Método de Bustamante e Doix para cálculo do comprimento ancorado	55
5.3.2.3 Estimativa segundo Sabatini et. al da resistência no trecho ancorado	59
5.3.2.4 Indicação do Eurocode 7 para determinação do comprimento ancorado	60
5.3.3 Escolha do elemento resistente à tração e determinação da seção	60
5.3.4 Proteção contra corrosão	61
5.3.4.1 Proteção segundo a NBR 5629:2006	61
5.3.4.2 Proteção nos Estados Unidos	63
5.3.4.3 Proteção segundo a norma europeia	67
5.3.5 Diâmetro da perfuração	68
6 PRÁTICAS DE EXECUÇÃO DE TIRANTES EM ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO	69
6.1 INDICAÇÕES DE PREPARO DO TIRANTE	69
6.1.1 Preparo do tirante segundo prática brasileira	69
6.1.2 Preparo do tirante segundo prática nos Estados Unidos	70
6.1.3 Preparo do tirante segundo a BS EN 1537:2000	70
6.2 INDICAÇÕES DE PERFURAÇÃO DO TERRENO	71
6.2.1 Perfuração do terreno segundo prática brasileira	71
6.2.2 Perfuração do terreno segundo prática nos Estados Unidos	73
6.2.3 Perfuração do terreno segundo BS EN 1537:2000	73
6.3 INDICAÇÕES DE INSTALAÇÃO	74
6.4 INDICAÇÕES DE INJEÇÃO	74
6.4.1 Injeção segundo prática brasileira	74
6.4.2 Injeção segundo prática nos Estados Unidos	76
6.4.3 Injeção segundo BS EN 1537:2000	78

6.5 INDICAÇÕES PARA PROTENSÃO	79
6.5.1 Ensaios de protensão segundo prática brasileira	79
6.5.1.1 Ensaio de qualificação	79
6.5.1.2 Ensaio básico	84
6.5.1.3 Ensaio de recebimento	84
6.5.1.4 Ensaio de Fluência	89
6.5.2 Ensaios de protensão segundo prática nos Estados Unidos	92
6.5.2.1 Ensaio de desempenho	92
6.5.2.2 Ensaio de prova	96
6.5.2.3 Ensaio de fluência estendido	97
6.5.2.4 Aceitação dos tirantes	99
6.5.3 Ensaios de protensão segundo BS EN 1537:2000	101
6.5.3.1 Ensaio de investigação	102
6.5.3.2 Ensaio de adequação	102
6.5.3.3 Ensaio de aceitação	103
6.5.3.4 Estimativa do comprimento livre efetivo	103
6.6 INDICAÇÕES DE INCORPORAÇÃO E PREPARO DA CABEÇA DA ANCORAGEM	104
6.6.1 Incorporação e ancoragem segundo prática Brasileira	104
6.6.2 Incorporação e ancoragem segundo prática nos Estados Unidos	107
6.6.3 Incorporação e ancoragem segundo BS EN 1537:2000	108
6.7 INDICAÇÕES DE PROTEÇÃO DA CABEÇA DO TIRANTE	108
6.7.1 Proteção da cabeça segundo prática brasileira	108
6.7.2 Proteção da cabeça segundo prática nos Estados Unidos	109
6.7.3 Proteção da cabeça segundo BS EN 1537:2000	110
7 DIRETRIZES PARA PROJETO E EXECUÇÃO DE TIRANTES EM ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO DE SOLO	111
7.1 DIRETRIZES PARA PROJETO DE TIRANTES	111
7.1.1 Diretrizes para investigação do terreno	111
7.1.2 Diretrizes para cálculo da estabilidade global	112
7.1.3 Diretrizes para projeto dos componentes do tirante	113
7.1.3.1 Trecho livre	113
7.1.3.2 Trecho ancorado	113
7.1.3.3 Elemento resistente à tração	114

7.1.3.4 Corrosão	114
7.1.3.5 Diâmetro	116
7.2 DIRETRIZES PARA EXECUÇÃO DE TIRANTES EM ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO DE SOLO	116
7.2.1 Diretrizes para preparo do tirante	116
7.2.2 Diretrizes para perfuração do terreno	117
7.2.3 Diretrizes para instalação do tirante	118
7.2.4 Diretrizes para injeção	118
7.2.5 Diretrizes para Protensão	119
7.2.6 Diretrizes para incorporação e preparo da cabeça.....	121
7.2.7 Diretrizes para proteção da cabeça do tirante	122
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	127
REFERÊNCIAS	129

1 INTRODUÇÃO

No cenário atual de expansão das grandes cidades, quando se procura o melhor aproveitamento dos espaços disponíveis, a utilização dos subsolos das construções aparece como importante alternativa. Também a execução de obras de metrô, viadutos, pontes e estradas são exemplos desse contexto. Esses tipos de obra, que envolvem consideráveis movimentações de solo na forma de cortes ou aterros, frequentemente necessitam do uso de estruturas de contenção, que têm como objetivo suportar os empuxos provocados pela massa de solo e por eventuais sobrecargas.

Nos centros urbanos, a prática mais usual de estrutura de contenção é a construção de cortinas. Cortinas são estruturas planas, geralmente verticais, que tem parte de seu comprimento embutido no solo. Este trecho é denominado ficha e o empuxo passivo mobilizado nele é responsável pela estabilidade da estrutura. Nesse contexto de aproveitamento do espaço, as cortinas se destacam por uma menor ocupação da área do terreno em comparação a outros tipos de contenção. Uma das principais dificuldades para a execução de uma cortina é a possibilidade de não se conseguir atingir a ficha necessária. Frente a isso, uma alternativa para a diminuição do tamanho da ficha é a colocação de elementos que introduzem esforços no sentido contrário do deslocamento do solo como, por exemplo, tirantes.

Tirantes são estruturas que funcionam à tração e que tem por objetivo transmitir cargas entre suas extremidades. Os tirantes são ancorados no interior do solo em um trecho chamado de trecho ancorado e no contato com a estrutura de contenção (cabeça). Através da protensão do elemento, a tensão de cisalhamento mobilizada na interface do solo e do comprimento ancorado introduz uma carga de tração que aumenta significativamente a segurança da estrutura. Em alguns casos o uso de tirantes também pode proporcionar vantagens econômicas, uma vez que, para grandes escavações, em que seriam necessários grandes comprimentos de ficha e seções transversais maiores, o emprego de tirantes pode reduzir consideravelmente os tamanhos das mesmas, podendo diminuir, portanto, custo de mão de obra e material. Em contrapartida, alguns aspectos devem ser observados para a aplicação de tirantes. Por exemplo, nas situações nas quais estes transpõem os limites com o terreno

vizinho (maioria dos casos nos centros urbanos), questões como recalque da estrutura ou esforços horizontais nas fundações devem ser analisadas com cuidado. A instalação de tirantes que são ancorados no terreno vizinho só é possível com a autorização do proprietário, condição que pode inviabilizar o uso deste tipo de solução.

Devido à crescente utilização e evolução da técnica no Brasil, o foco deste trabalho está nas questões de projeto e execução de tirantes em estruturas de contenção de solo. Através da análise da bibliografia disponível, principalmente normas e manuais elaborados no Brasil e no exterior, a proposta deste trabalho é a elaboração de diretrizes para projeto e execução destes tirantes.

A introdução do tema é feita nos capítulos 3 e 4, apresentando estruturas de contenção e conceitos básicos de tirantes, respectivamente. No capítulo 5 é feita a apresentação de recomendações para a etapa de projeto de tirantes em estrutura de contenção, considerando aspectos de investigação, estabilidade e dimensionamento de tirantes. No capítulo 6 são apresentadas recomendações a serem seguidas nas etapas da execução dos tirantes. Os resultados da pesquisa são apresentados no capítulo 7, sendo indicadas as diretrizes para projeto e execução de tirantes com base nas recomendações pesquisadas. Por fim, o capítulo 8 apresenta as considerações finais a respeito das diretrizes elaboradas.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: quais diretrizes para projeto e execução são recomendáveis para tirantes em estruturas de contenção de solo?

2.2 OBJETIVO PRINCIPAL DA PESQUISA

O objetivo principal do trabalho é a elaboração de diretrizes para projeto e execução de tirantes em estruturas de contenção de solo tomando-se por referência a bibliografia existente.

2.3 DELINEAMENTO

O trabalho será realizado através das etapas apresentadas a seguir, que estão representadas na figura 1, e são descritas nos parágrafos seguintes:

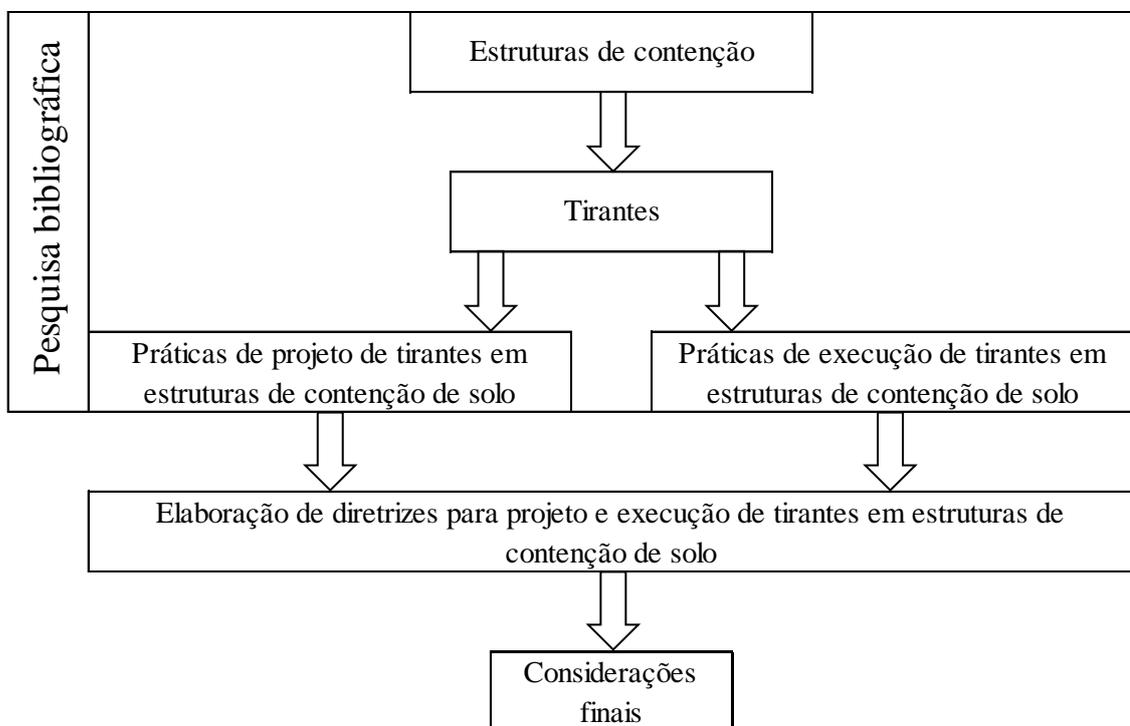
- a) pesquisa bibliográfica;
- b) elaboração de diretrizes para projetos e execução de tirantes em estruturas de contenção de solo;
- c) considerações finais.

A pesquisa bibliográfica, que será realizada durante todo o trabalho, estará dividida em estruturas de contenção, tirantes, práticas de projeto de tirantes e práticas de execução de tirantes. O capítulo de estruturas de contenção consiste em descrever alguns dos principais tipos de estruturas existentes, com enfoque nas estruturas atirantadas, servindo de introdução ao tema principal do trabalho. A parte sobre tirantes tem a finalidade de apresentar os conceitos básicos da técnica, como partes principais, princípios de funcionamento da estrutura, vantagens, desvantagens e processos de execução, que serão detalhados conforme a prática nos capítulos posteriores. Nos capítulos que abordam projeto e execução, será feita pesquisa na bibliografia nacional e internacional buscando identificar práticas usuais na elaboração de projetos de tirantes e na execução dos mesmos. A pesquisa será feita principalmente em normas e manuais elaborados no Brasil e no exterior.

A elaboração das diretrizes para projetos e execução de tirantes em estruturas de contenção de solo será feita a partir da análise das práticas brasileira e internacional pesquisadas anteriormente. Estas práticas serão avaliadas conjuntamente, buscando encontrar uma maneira na qual elas se complementem.

As considerações finais serão feitas com base na análise das diretrizes elaboradas. Espera-se que elas se mostrem suficientes para a elaboração adequada de um projeto de tirantes e para a correta execução dos mesmos.

Figura 1 – Diagrama das etapas da pesquisa



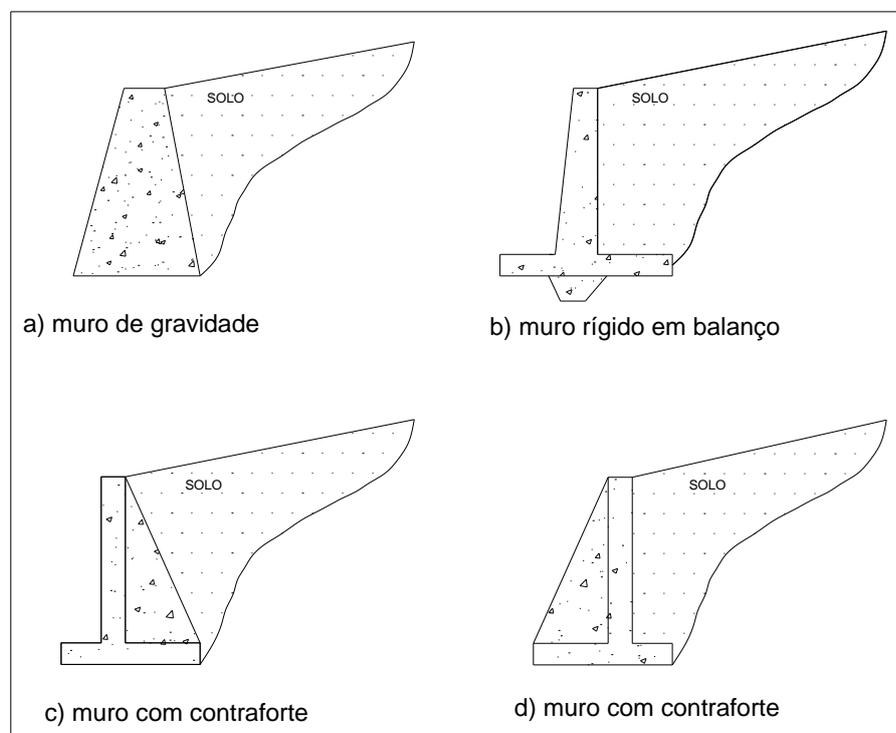
(fonte: elaborado pelo autor)

3 ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO

Estruturas de contenção, segundo Ranzini e Negro Júnior (1998, p. 497), consistem na “[...] introdução de uma estrutura ou de elementos estruturais compostos, que apresentam rigidez distinta daquela do terreno que conterà.”. Os autores completam, afirmando que obras de contenção estão presentes nas obras de engenharia em diversos locais, como em obras de subsolos, estradas, pontes estabilização de encostas, entre outros.

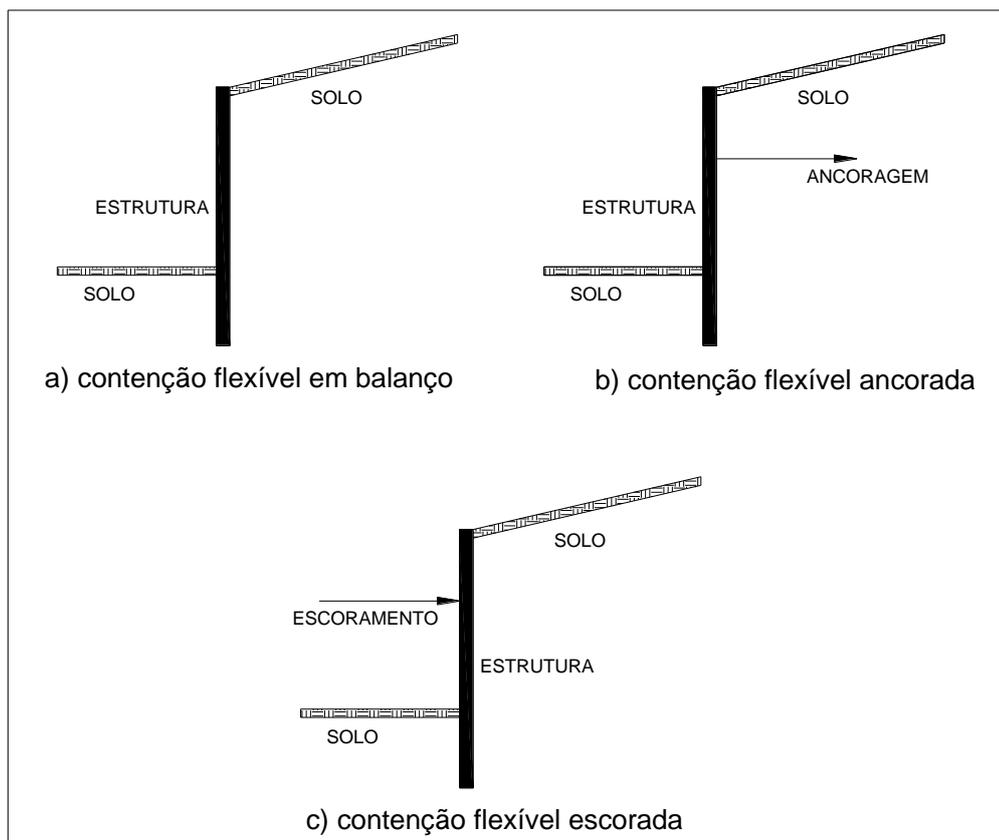
Budhu (c2008) divide as estruturas de contenção em dois tipos. O primeiro tipo engloba as estruturas gravitacionais e semi gravitacionais moldadas no local, cuja estabilidade é garantida pelo seu peso próprio. No segundo tipo estão as estruturas flexíveis que, segundo o autor, são estruturas delgadas de aço, concreto ou madeira, e que tem sua estabilidade dependente da resistência passiva do solo e de ancoragens. Alguns exemplos dessas estruturas são representados nas figuras 2 e 3.

Figura 2 – Contenções gravitacionais e semi gravitacionais



(fonte: adaptado de BUDHU, c2008, p. 374, tradução nossa)

Figura 3 – Contenções flexíveis



(fonte: adaptado de BUDHU, c2008, p. 375, tradução nossa)

Sobre as estruturas flexíveis, Budhu (c2008) afirma que estas tem larga aplicação, sendo utilizadas desde suporte para escavações temporárias até estruturas definitivas para contenção de solo e/ou água. Dentro das contenções flexíveis, ainda é feita outra divisão, separando-as em contenções em balanço e contenções ancoradas ou escoradas. O autor afirma que as contenções em balanço, que dependem apenas do empuxo passivo do solo, são utilizadas para conter camadas de solo de até três metros. Marzionna et al. (1998) descrevem a condição básica para a estabilidade da contenção em balanço explicando o conceito de ficha mínima. Afirmam que, como o trecho da estrutura embutido no solo abaixo da escavação (conhecido como ficha) é responsável pela estabilidade da contenção, existe um comprimento mínimo deste embutimento para que a estrutura tenha seu equilíbrio garantido. Este comprimento é denominado ficha mínima. O cálculo para sua determinação é feito buscando o equilíbrio dos momentos gerados pelas cargas atuantes em determinado ponto. Dessa maneira, os esforços introduzidos pelas ancoragens ou escoramentos contribuem para a estabilidade da estrutura, reduzindo o tamanho da ficha mínima. Budhu (c2008) sugere que as estruturas ancoradas e escoradas sejam utilizadas para escavações profundas.

Nesse trabalho, as estruturas em foco serão as contenções flexíveis com uso de ancoragens. Alguns exemplos de estruturas de contenção que funcionam com a atuação do empuxo passivo e ancoragens são as cortinas de estacas justapostas, paredes diafragma e cortinas de concreto atirantadas.

3.1 CORTINAS DE ESTACAS JUSTAPOSTAS

De acordo com Ranzini e Negro Júnior (1998), as cortinas de estacas justapostas podem ser escavadas (secantes ou tangentes) e cravadas. Segundo os autores, a solidarização das estacas é feita através de vigas de amarração em suas cabeças e, nos casos em que são utilizadas ancoragens, é necessário o uso de elementos chamados de longarinas. As longarinas são vigas de madeira, aço ou concreto dispostas geralmente de maneira horizontal no sentido longitudinal da contenção, servindo de apoio para esta. Um exemplo de cortina de estacas ancoradas com auxílio de longarinas nas linhas de ancoragem pode ser observado na figura 4.

Figura 4 – Cortina ancorada de estacas escavadas justapostas



(fonte: FUNDAÇÃO INSTITUTO DE GEOTÉCNICA DO MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO, 2014a, p. 312)

As cortinas de estacas escavadas são divididas por Saes et al. (1998) como cortinas de estacões, cortinas com microestacas ou estacas raiz e cortinas com estacas tipo hélice contínua. As cortinas de estacas cravadas são, principalmente, as cortinas de estaca prancha.

3.1.1 Cortinas de estacões

São cortinas de estacas escavadas de grande diâmetro, muito adotadas como solução para contenção de solos formados por argilas médias a rijas ou solos acima do nível de água. Este tipo de contenção não produz vibrações no terreno durante a execução, e nas situações onde o solo apresenta certa coesão, o elevado consumo de concreto e aço por m² de contenção pode ser diminuído com o aumento do espaçamento entre as estacas (SAES et al., 1998).

3.1.2 Cortinas de microestacas e estacas raiz

São cortinas formadas por estacas com pequeno diâmetro, não sendo, portanto, os elementos ideais para uma contenção. A pouca capacidade de resistência aos momentos fletores demanda um maior número de pontos de ancoragem, aumentando os problemas de justaposição e juntas por m². Seu emprego se dá basicamente em ocasiões onde as outras soluções não são viáveis, seja por condições de acesso dos equipamentos, ou por condições do subsolo, por presença de matacões, por exemplo (SAES et al., 1998).

3.1.3 Cortinas de estacas hélice contínua

Técnica semelhante a das cortinas de estacões, com a vantagem de o processo executivo dispensar a utilização de lama bentonítica e camisas metálicas para conter o solo no fuste da estaca, conferindo mais velocidade à execução da contenção. Como as armaduras das estacas hélice contínua são colocadas após a concretagem, pode não ser possível conseguir que a estaca seja completamente armada caso seja muito profunda. Nesse caso, o comprimento da contenção, incluindo a ficha, é limitado pelo tamanho que for possível armar a estaca (SAES et al., 1998).

3.1.4 Cortinas de estacas prancha

Podem ser formadas por perfis laminados de aço com seção em forma de “Z” ou “U” ou de concreto armado. As peças são encaixadas e cravadas em sequencia, formando paredes que podem ser estanques, dependendo da permeabilidade de suas juntas (RANZINI; NEGRO JÚNIOR, 1998). Segundo Saes et al. (1998), as mais utilizadas são as metálicas, sendo cravadas no solo por percussão ou vibração. Os autores colocam que, quando suas juntas formam paramentos estanques e dependendo do tamanho de suas fichas, podem ser utilizadas como contenção de solo com presença de água sem haver necessidade de rebaixamento do lençol freático. Ainda, afirmam que há a possibilidade de reaproveitamento das estacas prancha. Nos casos em que são utilizadas como estruturas temporárias e quando estão longe das estruturas definitivas é possível retirar as estacas. Se estiverem próximas das estruturas definitivas, o desconfinamento do terreno pelos vazios deixados com a remoção das estacas podem provocar recalques nestas estruturas. Marzionna et al. (1998) apontam que, principalmente quando não puderem ser reaproveitadas, a solução em cortinas de estacas prancha tem alto custo. Seu uso é mais comum em obras marítimas onde há necessidade de execução de uma ensecadeira.

3.2 PAREDES DIAFRAGMA

Quando surgiram, as paredes diafragma eram utilizadas para a construção dos diafragmas das barragens de terra. Seu uso foi ampliado, chegando a galerias de metrô e hoje sendo utilizadas tanto para contenção de terra como para fundação. São executadas pela escavação de paredes de 0,40 a 0,90 m com equipamento chamado *clam-shell* e com utilização de fluido estabilizante para escorar o solo durante a escavação até a concretagem (MOLITERNO, 1980). Ranzini e Negro Júnior (1998, p. 507, grifo do autor) complementam a definição da estrutura:

Paredes diafragma são caracterizadas pela concretagem submersa feita com tremonha em trincheiras escavadas, relativamente estreitas, cuja estabilidade, durante a escavação, é obtida pela introdução de uma suspensão de ‘bentonita’ em água. A suspensão estabilizante, denominada ‘lama bentonítica’, permite a introdução da armadura e o enchimento da escavação com concreto. As paredes diafragma são construídas em trechos contíguos de comprimentos da ordem de 2 a 3 m, os quais são escavados sucessivamente ou alternadamente, conforme as características da obra e do solo [...]

O processo de execução não provoca vibrações nem desconfinamento do terreno em praticamente todo tipo de solo, podendo ser realizado acima ou abaixo do nível de água, já que sua formação resulta em um paramento estanque. Quando forem utilizados tirantes para ancoragem da parede diafragma, não é necessário o uso de longarinas para a distribuição das cargas dos tirantes (SAES et al., 1998).

Marzionna et al. (1998, p. 573-574) apresentam a sequência executiva de uma parede diafragma:

- a) execução da mureta-guia, que servirá para definir o perímetro da obra e guia para a ferramenta de escavação (*clam-shell*);
- b) escavação com simultâneo preenchimento com lama bentonítica até a profundidade do projeto;
- c) troca ou tratamento da lama bentonítica para garantir as características definidas [...];
- d) colocação da chapa-junta. As juntas entre painéis são ‘juntas secas’ do tipo ‘macho/fêmea’, que são colocadas na extremidade dos painéis antes da concretagem;
- e) colocação da armadura;
- f) concretagem submersa. O concreto é lançado no fundo da escavação através dos tubos de concretagem (tubo tremonha); à medida que o concreto sobe, o tubo tremonha, que deve ter sua extremidade sempre imersa no concreto, vai também sendo levantado;
- g) o concreto usado em parede diafragma deve ter um consumo de cimento de 400 kg por metro cúbico, ser confeccionado com brita 1 e *slump* variando entre 18 e 22, conforme especificado na NBR-6122¹;
- h) retirada da chapa-junta, que deverá acontecer assim que o concreto iniciar o seu processo de pega.

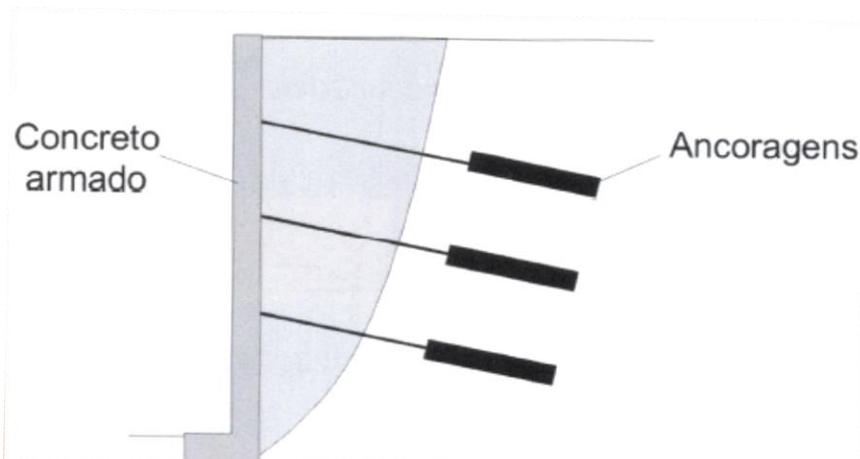
3.3 CORTINAS DE CONCRETO ATIRANTADAS

A Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro (2014a, p. 298) define cortinas ancoradas como “[...] estruturas de contenção formadas por paredes verticais (ou quase verticais) de concreto armado que empregam tirantes ancorados no terreno.”. Conforme Saes et al. (1998), consistem em paramentos de concreto armado utilizados para conter solos em escavações acima do nível de água e que se mantêm estáveis até a execução da contenção. Afirmam que é um processo geralmente lento e que demanda muita mão de obra, sendo muito

¹ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6122: projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 2010.

utilizado na contenção de encostas. Na figura 5 é apresentado um detalhe típico de uma cortina de concreto atirantada.

Figura 5 – Cortina de concreto atirantada



(fonte: FUNDAÇÃO INSTITUTO DE GEOTÉCNICA DO MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO, 2014a, p. 299)

Segundo a Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro (2014a, p. 299), nos trechos de corte, as cortinas são executadas pelo método descendente, e nos trechos de aterro, pelo método ascendente, compreendendo as seguintes etapas:

- a) execução das ancoragens;
- b) escavação ou reaterro, conforme seja descendente ou ascendente;
- c) a execução da parede (forma, armadura e drenagem);
- d) protensão para ensaios e incorporação das cargas nas ancoragens.

Nos trechos de corte, deve-se tomar cuidado com a estabilidade provisória do talude durante a escavação. Para isso, sugere-se que a cortina seja executada em nichos alternados e que a protensão dos tirantes seja feita conforme avançam as escavações, de forma a reduzir as deformações no terreno, especialmente quando há construções vizinhas (FUNDAÇÃO INSTITUTO DE GEOTÉCNICA DO MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO, 2014a).

4 TIRANTES

Tirantes são, segundo a Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro (2014a) a técnica mais utilizada de ancoragens de estruturas de contenção. Tirantes injetados são definidos no item 3.1 da NBR 5629 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006, p. 1) 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.

4.1 HISTÓRICO

De acordo com Xanthakos (1991), o uso de sistemas de ancoragem teve origem no final do século XIX. O autor menciona o trabalho de Frazer, em 1874, onde este descreve testes de ancoragens com ferro forjado para suporte de um canal na ferrovia entre Londres e Birmingham. Uma das primeiras aplicações, segundo Xanthakos (1991), teria sido o reforço da barragem de Cheurfas, na Argélia. A estrutura de alvenaria foi parcialmente destruída em 1885 após uma enchente e reconstruída em 1892. Na década de 1930 surgiram sinais de instabilidade nas fundações. A integridade da estrutura foi recuperada com a utilização de tirantes verticais dispostos em intervalos de 3,5 m e protendidos com macacos hidráulicos.

O autor ainda afirma que o progresso da indústria com fios e cabos de aço de alta resistência e o avanço das técnicas de injeção e perfuração contribuiu para o desenvolvimento dos tirantes no período pós-guerra. Isto se deu principalmente na França, Alemanha, Suécia, Suíça e Inglaterra, sendo o seu uso para escavações profundas iniciado na década de 1950.

No Brasil, uma figura importante para o desenvolvimento da técnica de ancoragens em solo é o Professor Antônio José da Costa Nunes, sendo esse assunto foco de suas pesquisas durante praticamente toda sua vida (YASSUDA; DIAS, 1998). As primeiras aplicações em território brasileiro foram em obras de contenção no Rio de Janeiro, em Copacabana, na estrada Rio-

Teresópolis e na estrada Grajaú-Jacarepaguá (NUNES², 1987 apud YASSUDA; DIAS, 1998). Yassuda e Dias (1998) apontam, também, os anos de 1966 e 1967 como importantes para o desenvolvimento da técnica no Brasil. Neste período, fortes chuvas causaram estragos no Rio de Janeiro em encostas da cidade e de estradas próximas. Os taludes foram restaurados com a utilização de ancoragens em diversas obras de contenção. Os autores complementam ressaltando a importância das construções dos metrô de Rio de Janeiro e São Paulo na década de 1970. O maior nível de confiabilidade e segurança necessários nesse tipo de obra exigiu maior sofisticação nos projetos e na execução, aumentando o número de empresas brasileiras especializadas em tirantes, a partir da vinda de empresas e técnicas estrangeiras. Em 1975, a Associação Brasileira de Normas Técnicas, baseada na norma corrente alemã, criou a norma brasileira de ancoragens, que se tornou, em 1977, a NBR 5629 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1977)³, com última revisão em 2006.

4.2 FUNCIONAMENTO E PARTES PRINCIPAIS

Conforme descrito por Xanthakos (1991), um tirante consiste basicamente em um elemento de aço inserido no solo em praticamente em qualquer direção. Segundo o autor, a protensão deste elemento quando ancorado em uma parte adequada do solo mobiliza uma reação de resistência cuja carga é transmitida à estrutura de contenção pela parte conhecida como cabeça do tirante. A ancoragem é feita pelo trecho ancorado e a transmissão da carga até a cabeça ocorre pelo trecho livre. Essas são as três partes principais de um tirante, que são descritas pela Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro (2014a, p. 289) como:

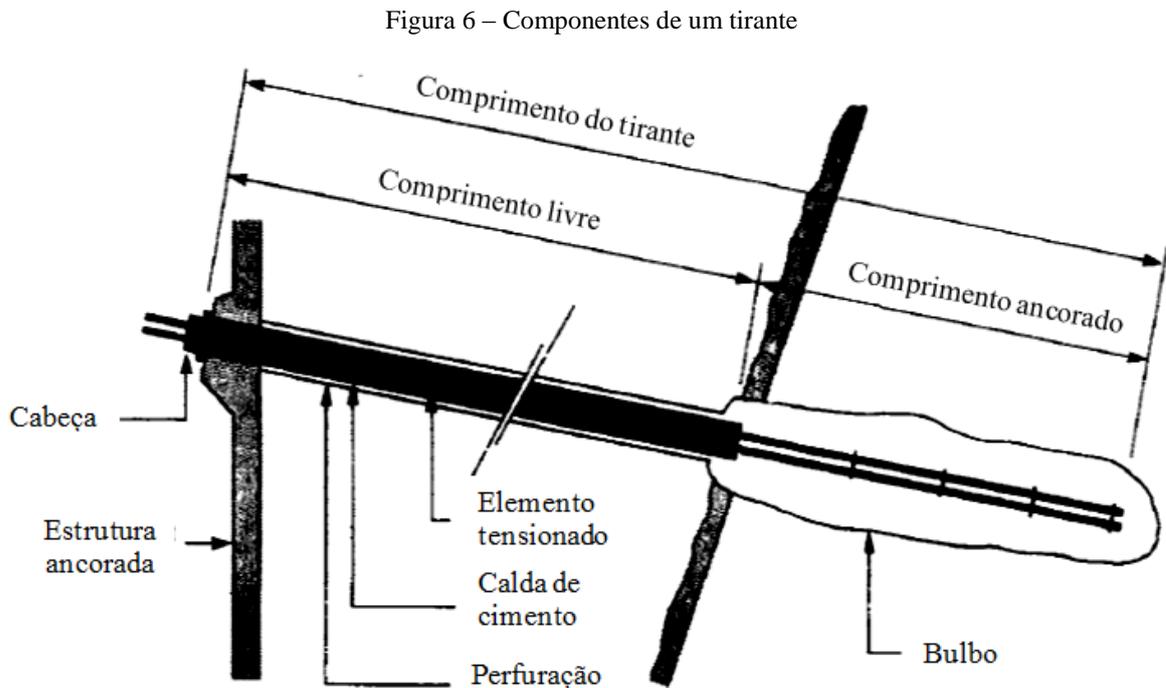
- a) cabeça: é a extremidade que fica fora do terreno, sendo a parte que suporta a estrutura que, por sua vez, contém a massa a ser estabilizada;
- b) trecho ancorado ou injetado é a outra extremidade da ancoragem que transmite ao terreno a carga de tração, sendo constituído pela barra envolvida por calda de cimento injetada;
- c) trecho livre é o trecho intermediário entre a cabeça e o trecho enterrado, que transmite as cargas de tração entre a cabeça e o trecho ancorado.

² NUNES, A. J. da. C. First Casagrande Lecture: ground prestressing. In: PANAMERICAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATIONS ENGINEERING, 8. 1987, Cartagena. As demais informações não foram disponibilizadas.

³ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5629**: estruturas ancoradas no terreno – ancoragens injetadas no terreno. Rio de Janeiro, 1977.

A cabeça é composta basicamente pela placa de apoio, pela cunha de grau e pelo bloco de ancoragem. A placa de apoio tem a função de distribuir a carga do tirante na contenção, de forma a evitar ruptura por puncionamento. A cunha de grau é empregada para alinhar o eixo do tirante com a cabeça, fazendo com que a carga seja aplicada com ângulo de 90 graus e não haja esforços de flexão no tirante, apenas de tração. O bloco de ancoragem serve para prender o elemento tracionado à cabeça do tirante (FUNDAÇÃO INSTITUTO DE GEOTÉCNICA DO MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO, 2014a; XANTHAKOS, 1991; YASSUDA; DIAS, 1998).

O trecho ancorado, também chamado de comprimento ancorado ou bulbo, pode ser protegido, por exemplo, com pintura anticorrosiva e coberto com tubo corrugado, sendo o espaço entre o elemento tracionado e tubo e entre o tubo e o solo preenchidos pela calda. No trecho livre (ou comprimento livre) também é feita a pintura anticorrosiva, sendo o elemento protegido por um tubo liso e o espaço entre o tubo e o elemento preenchido por algum material inerte e que forneça proteção contra corrosão (FUNDAÇÃO INSTITUTO DE GEOTÉCNICA DO MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO, 2014a; YASSUDA; DIAS, 1998). A transmissão da carga exclusivamente pelo trecho ancorado deve ser garantida pela não aderência com o tubo liso no trecho livre. As partes principais de um tirante são ilustradas na figura 6.



(fonte: XANTHAKOS, 1991, p. 2, tradução nossa)

Xanthakos (1991) ainda coloca que o elemento que compõe o tirante é instalado com a perfuração em diversos tipos de solos e rochas, envolvendo uma série de procedimentos complexos e que exigem especialidade. Algumas dessas atividades são a fabricação e a montagem dos tirantes, técnicas de perfuração, injeção do aglutinante, protensão, controles de qualidade e monitoramento.

O autor ressalta a importância da prevenção do tirante contra a corrosão, afirmando que a instalação de tirantes em determinados ambientes de agressividade deve ser observada, juntamente com a vida útil desejada, para estabelecer critérios de proteção contra corrosão. Os sistemas de proteção contam com tecnologias sofisticadas, mas que vem sendo continuamente reavaliadas.

4.3 CLASSIFICAÇÃO

Pela prática brasileira, segundo Yassuda e Dias (1998), os tirantes podem ser separados quanto à sua vida útil, constituição do elemento resistente à tração e quanto ao sistema de injeção. A seguir são apresentadas as classificações que podem ser atribuídas aos tirantes segundo esses itens.

4.3.1 Classificação quanto à vida útil

Podem ser classificados como provisórios ou permanentes. Os primeiros, segundo Xanthakos (1991), têm durabilidade limitada, tornando-se inoperantes na etapa da obra em que se tornem desnecessários. A NBR 5629 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006) define que os tirantes utilizados por tempo inferior a dois anos são classificados como provisórios. Xanthakos (1991) afirma que os tirantes permanentes tem longa durabilidade, trabalhando com a contenção durante toda sua vida útil. O autor aponta que corrosão é um fator importante nesse tipo de tirante, sendo necessária proteção adequada ao solo que está inserido e à vida útil esperada.

4.3.2 Classificação quanto à sua constituição

Os tipos de tirantes mais utilizados são os constituídos por barras (monobarra ou múltiplas barras), fios ou cordoalhas. Os tirantes monobarra têm como elemento resistente à tração

apenas uma barra. Eram utilizadas barras de aço com tensões de escoamento de 500 MPa e 600 MPa e diâmetros entre 3/4 polegadas e 1.1/4 polegadas até o início da década de 70 (YASSUDA; DIAS, 1998). Hoje em dia são empregadas barras com tensão de escoamento de 850 MPa e diâmetros de 75 mm (SOLOTRAT ENGENHARIA GEOTÉCNICA LTDA, 2015). Os tirantes com múltiplas barras são menos utilizados no Brasil, e sua execução se assemelha aos tirantes com fios e cordoalhas, com exceção do bloco de ancoragem. Os tirantes com fios são montados em feixes em torno do tubo de injeção, proporcionando facilidade no manuseio para a instalação. São utilizados fios de normalmente 8 mm e 9 mm. Por fim, há os tirantes constituídos por cordoalhas, que normalmente são utilizadas em estruturas de concreto protendido (YASSUDA; DIAS, 1998). Segundo Xanthakos (1991), as cordoalhas usadas nos tirantes consistem em conjuntos de 4 a 20 fios dispostos de maneira espiral ao redor de um fio reto.

4.3.3 Classificação quanto ao sistema de injeção

De acordo com Yassuda e Dias (1998) a injeção pode ser realizada em estágio único ou em estágios múltiplos. O primeiro tipo é mais utilizado quando o material onde será feita a ancoragem tem boa capacidade e não haverá alargamento do bulbo de ancoragem ou aumento da adesão com a aplicação da pressão da injeção, como no caso de rochas. A injeção em múltiplas etapas, segundo os mesmos autores, é executada em pelo menos dois estágios, sendo a primeira feita junto ao pé do tirante sem pressão até que a calda saia pela boca. Os estágios seguintes são feitos com válvulas que abrem sob pressão, conhecidas como válvulas manchete, permitindo o fluxo da calda em um único sentido para manter a pressão aplicada. Se a pressão desejada não for atingida, o processo de injeção pode se repetir até alcançar o valor necessário. A NBR 5629 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006) só considera como uma nova fase de injeção aquela que ocorre apenas após a pega do cimento da fase anterior.

4.4 ETAPAS DE EXECUÇÃO

O processo executivo de um tirante envolve basicamente sete etapas: preparo do tirante, perfuração, instalação do tirante, injeção, protensão, incorporação e proteção da cabeça. (YASSUDA; DIAS, 1998). A seguir são apresentados os procedimentos principais de cada

etapa. A abordagem mais detalhada será feita nos capítulos seguintes, destinados a apresentar práticas no Brasil e no exterior.

4.4.1 Preparo do tirante

Consiste no preparo do elemento resistente à tração, adequando-o aos requisitos de projeto e recomendações normativas. Tem dois estágios: recebimento da proteção anticorrosiva e montagem do tirante. No primeiro estágio devem ser definidas e aplicadas as proteções anticorrosivas exigidas pela regulamentação local, considerando o caráter da vida útil do tirante e a agressividade do meio no qual ele estará inserido. A proteção deve ser feita com o máximo de atenção para que não ocorram falhas. Apenas um ponto do tirante que não esteja devidamente protegido contra corrosão pode provocar a sua falha. Nesse sentido, um tirante com apenas um defeito na proteção é semelhante a um tirante completamente desprotegido (YASSUDA; DIAS, 1998). Quanto às características dos componentes de proteção contra corrosão, a NBR 5629 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006, p. 6) preconiza que atendam aos seguintes quesitos:

- a) ter vida efetiva maior ou igual que a requerida para o tirante;
- b) não reagir quimicamente com o meio;
- c) não restringir o movimento do trecho livre;
- d) ser composto de materiais com deformações compatíveis às do tirante;
- e) não sofrer envelhecimento ou trincar sobre tensão;
- f) ser resistentes às operações de montagem, transportem instalação e protensão do tirante.

Na etapa de montagem, deve-se manter o cuidado para não danificar a proteção anticorrosiva. A montagem deve ser feita de maneira a garantir a resistência do tirante durante o transporte até a sua instalação. Ainda, deve ser realizada sobre uma bancada que comporte o comprimento de todo tirante (YASSUDA; DIAS, 1998).

4.4.2 Perfuração

A etapa de perfuração do terreno para posterior instalação do tirante se inicia pela escolha do método de perfuração. A escolha depende especialmente do tipo de solo a ser perfurado. As

técnicas predominantes de perfuração são com equipamentos rotativos ou percussivos, existindo também equipamentos que utilizam vibração. A perfuração deve ser realizada atendendo os requisitos de projeto como dimensões, inclinação e não deixar obstruções ao longo do furo (XANTHAKOS, 1991). Yassuda e Dias (1998) complementam afirmando que a locação, a inclinação e a direção dos tirantes previstas em projeto sejam empregadas com precisão. Os autores ainda sugerem uso de fluidos estabilizantes para facilitar a perfuração, quando necessário. Estes fluidos devem ser inertes ao cimento e ao aço para preservar a integridade do tirante.

4.4.3 Instalação do tirante

A etapa de instalação do tirante consiste na colocação do tirante após a perfuração do terreno. Conforme Xanthakos (1991), o tirante deve ser instalado assim que possível para acelerar a injeção, a fim de evitar eventuais deteriorações do solo causadas pelo retardo do preenchimento do furo. O autor ainda acrescenta que a instalação deve ser feita de modo a não danificar a proteção anticorrosiva e os demais componentes do tirante. Segundo Joppert Júnior (2007), determinadas condições do terreno fazem com que a etapa de instalação tenha que ser feita após o preenchimento do furo com a nata de cimento.

4.4.4 Injeção

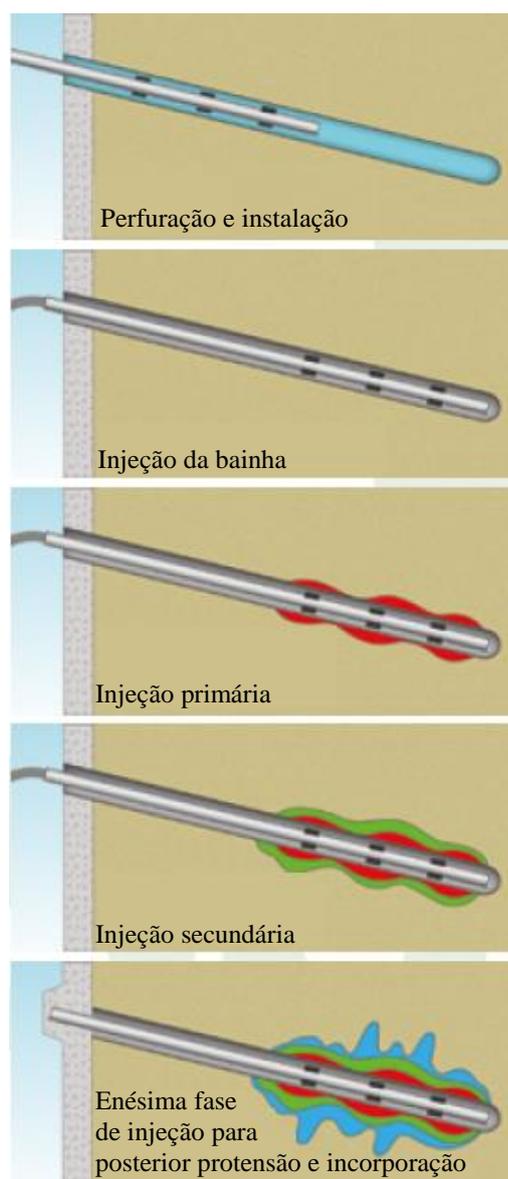
O processo de injeção do tirante consiste no preenchimento do furo no solo com material aglutinante, normalmente calda de cimento. Pode ser feito, conforme introduzido anteriormente, através de estágio único ou múltiplos estágios.

De acordo com Yassuda e Dias (1998), nos casos onde é realizada a injeção em estágio único é comum que o furo seja revestido durante o processo de perfuração, seguido de lavagem com água ou ar comprimido. Na sequência é feito o preenchimento com a calda de cimento a partir do fundo do furo até a boca, para então ser introduzido o tirante. Com o tirante instalado, é feita a retirada do revestimento enquanto é aplicada injeção sob pressão na boca do furo. Esta injeção, por ser feita pela boca do furo, não conta com a utilização de válvulas especiais de injeção, como no caso dos tirantes com mais injetados em mais estágios. Os autores complementam afirmando que é conhecida como injeção de bainha essa injeção realizada em apenas uma etapa.

A respeito dos tirantes com múltiplos estágios de injeção, Yassuda e Dias (1998) explicam que é necessário o uso de válvulas de reinjeção, que são instaladas em um tubo de injeção paralelo ao tirante no caso de tirante com barras, ou no eixo do tirante, no caso de tirante com fios ou cordoalhas. Por esse motivo é necessária a instalação dos tirantes na etapa anterior à injeção. Segundo os mesmos autores, com o tirante instalado, é executada a injeção de bainha através da válvula mais profunda até ocorrer o vazamento da calda pela boca do tirante. Em seguida é feita a lavagem do tubo de injeção para que o mesmo não fique obstruído pela calda seca, impedindo os próximos estágios de reinjeção. Após a pega do cimento da injeção de bainha, é procedido o primeiro estágio de injeção, conhecido como injeção primária. Com o auxílio de um obturador duplo, as válvulas vão sendo injetadas individualmente. A pressão aplicada na injeção faz com que a válvula se abra e a calda de cimento preencha os eventuais vazios que permaneceram na etapa anterior. Yassuda e Dias (1998) acrescentam afirmando que a continuidade da aplicação da pressão da calda, após o preenchimento dos vazios, comprime o terreno que circunda o tirante até que haja a ruptura hidráulica do solo, gerando fissuras pelas quais a calda de cimento se infiltrará. No momento que se inicia a infiltração da calda pelas fissuras, há uma queda na pressão devida ao afastamento da calda no solo, tornando desnecessário o prosseguimento do estágio de injeção. Cessada a injeção, a válvula é fechada automaticamente, já que não há mais a pressão e o fluxo que a mantinha aberta, garantindo que será preservada a pressão residual aplicada durante a injeção. Após esse estágio de injeção é feita a lavagem do tubo. Caso não tenha sido atingida a pressão esperada, o procedimento é recommençado quantas vezes forem necessárias para que esta pressão de injeção seja alcançada, desde que respeitado o tempo de pega do cimento do estágio anterior.

A conformação do bulbo de injeção no decorrer das injeções é exemplificada na figura 7.

Figura 7 – Fases de injeção de um tirante com múltiplas injeções



(fonte: adaptado de SOLOTRAT ENGENHARIA GEOTÉCNICA LTDA, 2015, p. 30)

4.4.5 Protensão

Depois de realizada a injeção do tirante e passado o período estipulado pela norma corrente para a cura do cimento, devem ser executados os ensaios de protensão. No Brasil, por exemplo, a NBR 5629 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006) indica que seja aguardado o período de sete dias após a injeção para a cura do cimento Portland comum e três dias para cimento de alta resistência inicial. Xanthakos (1991) afirma que os ensaios de protensão tem a finalidade de verificar a eficiência na execução do tirante e testar sua aptidão para receber a carga de trabalho prevista no projeto. Segundo o autor, são

importantes para a identificação de erros no projeto ou na construção do tirante e para evitar possíveis situações de risco.

A protensão é feita com equipamentos que devem ser aferidos, normalmente macaco hidráulico ou chave de torque, esta última para tirantes com cargas relativamente pequenas. O uso de chave de torque é restrito aos tirantes de barras, devendo-se tomar cuidado com a carga de torção introduzida na barra. Os macacos hidráulicos são mais precisos na leitura da carga aplicada e são compatíveis com a maior parte dos tipos de tirantes, porém tem custo mais elevado. Nos casos em que a reação à aplicação da carga no tirante é feita sobre a estrutura de contenção, a mesma deve estar preparada para recebê-la, por exemplo, com uso de uma placa de apoio (XANTHAKOS, 1991; YASSUDA; DIAS, 1998). Yassuda e Dias (1998) complementam afirmando que deve ser tomado cuidado com a carga aplicada nos ensaios para que não seja ultrapassada a tensão de escoamento do elemento resistente à tração. Os autores indicam a aplicação de no máximo de 90% da carga teórica de escoamento do material.

A NBR 5629 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006) define quatro ensaios que devem ser realizados no Brasil. São o ensaio de recebimento, ensaio de qualificação, ensaio básico e ensaio de fluência. A Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro (2014a, p. 296, grifo do autor) descreve as funções básicas de cada ensaio:

- a) **ensaio de recebimento** [...] serve para avaliar a capacidade de carga e comportamento de todos os tirantes. [...];
- b) **ensaio de qualificação** [...] é mais detalhado do que o ensaio de recebimento, tem a finalidade de verificar o comportamento dos elementos constituintes do tirante num determinado terreno. [...];
- c) **ensaio básico** [...] tem o objetivo de verificar a execução do tirante, observando a sua conformação através da sua escavação após ensaio de qualificação;
- d) **ensaio de fluência** [...] tem o objetivo de avaliar o desempenho sob cargas de longa duração.

O ensaio de recebimento é feito a partir da aplicação de um ciclo de cargas pré-definidas e das leituras dos deslocamentos da cabeça do tirante durante carregamentos e um descarregamento no último estágio do ciclo. A apresentação e a análise do ensaio são feitas após a plotagem de dois gráficos. O primeiro referente às cargas aplicadas e aos deslocamentos totais e o segundo aos deslocamentos divididos em elásticos e permanentes. Para a aceitação do tirante são

verificados principalmente os resultados referentes à carga máxima estabilizada e ao atrito mobilizado no trecho livre (YASSUDA; DIAS, 1998).

No ensaio de qualificação são feitos ciclos de carga e descarga com leitura dos deslocamentos no final de cada estágio de carga e de descarga. A avaliação também é feita pelos gráficos das cargas com os deslocamentos, que possibilitam o cálculo do trecho livre efetivo. A aceitação, de maneira semelhante ao ensaio de recebimento, é feita pela análise da carga máxima e do atrito no trecho livre (YASSUDA; DIAS, 1998).

O ensaio básico deve ser feito após o ensaio de qualificação. Consiste na análise geotécnica do solo na região ancorada e do bulbo formado após a injeção (YASSUDA; DIAS, 1998).

Por fim, o ensaio de fluência, que consiste na aplicação dos mesmos ciclos de cargas do ensaio de qualificação, mas com períodos mais longos e apenas em tirantes definitivos. Durante a leitura dos deslocamentos o carregamento tem que ser mantido constante para não influenciar os resultados, uma vez que os aparelhos de leitura são bastante sensíveis. A análise é feita inicialmente com um gráfico dos dados de deslocamento e tempo para cada estágio de carga, a fim de se encontrar os coeficientes de fluência. Os coeficientes de fluência utilizados para plotar um novo gráfico em função das cargas aplicadas de modo a encontrar uma carga máxima e um coeficiente de fluência relacionado a ela. A aceitação é feita com base na comparação deste coeficiente de fluência com os valores admissíveis. Caso não seja aceitável, a carga máxima é reduzida por um fator de segurança (YASSUDA; DIAS, 1998).

4.4.6 Incorporação

O estágio final de incorporação do tirante à estrutura definitiva deve ser executado apenas após ser atestada sua qualidade nos ensaios realizados. Com a estrutura pronta para receber a incorporação do tirante, deve-se tomar cuidado para que o processo não introduza esforços que esta estrutura não foi dimensionada para suportar. Por outro lado, podem ocorrer deslocamentos e deslizamentos no maciço de solo caso não seja feita a protensão do tirante. Quando o tirante é executado antes da estrutura definitiva estar pronta, pode ser feita incorporação provisória. Na maioria das situações é recomendado que este procedimento seja feito assim que possível (JOPPERT JÚNIOR, 2007; YASSUDA; DIAS, 1998). A Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro (2014a) recomenda que, no caso de tirantes permanentes, a protensão seja verificada a cada cinco anos.

4.4.7 Proteção da cabeça

Segundo Yassuda e Dias (1998), a parte do sistema de ancoragem que mais apresenta problemas é a região da cabeça do tirante, por estar mais próxima das ações das intempéries. Por este motivo, é recomendado o máximo de atenção nessa última etapa da execução do tirante. Solotrat Engenharia Geotécnica Ltda (2015) recomenda que seja feita uma nova injeção imediatamente atrás da cabeça de ancoragem. Esta injeção tem como objetivo preencher o espaço restante no trecho final do tirante para prevenir infiltrações. Yassuda e Dias (1998) também sugerem algumas medidas, como a limpeza das partes metálicas e aplicação de pintura anticorrosiva após a incorporação e a execução de uma capa de cimento para recobrimento das partes metálicas. A figura 8 apresenta uma situação do efeito da corrosão em cabeças de tirantes.

Figura 8 – Cabeça do tirante em processo de corrosão



(fonte: SOLOTRAT ENGENHARIA GEOTÉCNICA LTDA, 2015, p. 33)

4.5 VANTAGENS E LIMITAÇÕES

Como é o caso da grande maioria das técnicas de engenharia, os tirantes têm suas vantagens em relação a outros sistemas de ancoragem, mas também algumas limitações de uso. Saes et al. (1998) afirmam que, por permitir a escavação do terreno como um todo, o uso de tirantes facilita os serviços de terraplenagem e, em determinados casos, essa escavação pode aproximar as fundações a um solo mais competente, podendo gerar economia para a obra.

Marzionna et al. (1998) defendem que o uso de tirantes está vinculado a duas situações: conveniência ou necessidade. Para os autores, uma vantagem que torna a técnica conveniente é a possibilidade de deixar livre o terreno durante a escavação. Este fato permite que haja melhores condições de trabalho na obra, se comparado ao espaço ocupado pelo escoramento com estroncas. Outro motivo seria, nos tirantes ativos, a diminuição dos deslocamentos da estrutura de contenção devido à carga previamente incorporada. A necessidade do emprego de tirantes aparece nos casos onde as estruturas de contenção se encontram muito distantes para que se utilizem estroncas e nas situações onde a diferença entre os empuxos totais é muito grande.

Yassuda e Dias (1998) apontam que uma vantagem significativa dos tirantes é que, mesmo sendo elementos de pequeno porte, têm capacidade de promover cargas bastante altas. Cargas que, na década de 1960, giravam em torno de 200 kN, já podem ser vistas superando os 1000 kN. Os autores ressaltam que o aumento das cargas dos tirantes, para possibilitar um maior vão entre eles, aumentam os momentos fletores na estrutura. Desta maneira, a capacidade da estrutura de absorver esses momentos aparece como limitante do aumento das cargas aplicadas.

A simplicidade executiva é outro fator apresentado por Yassuda e Dias (1998). Os autores argumentam que, além do fato de as cargas serem incorporadas no interior do solo e proporcionarem mais espaço durante a escavação, a vantagem dos tirantes se dá pela simplicidade da maior parte dos elementos utilizados para sua composição. O elemento resistente à tração é geralmente composto por barras, fios ou cordoalhas, a cabeça é composta basicamente por placas de aço e parafusos ou clavetes, etc. Nos casos de estruturas estroncadas, por exemplo, os materiais envolvidos são geralmente de maior porte, o que dificulta o manuseio.

Os mesmos autores ressaltam o benefício de os tirantes serem estruturas autoportantes. Desse modo, a construção de tirantes é possível sem que sejam necessários grandes detalhes de fundação para a estrutura atirantada. De acordo com a Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro (2014a), as cargas atuantes consideradas para a determinação das fundações de uma cortina atirantada são as componentes verticais das cargas dos tirantes e dos empuxos, além do seu peso próprio, portanto quando se aumentam as cargas e as inclinações dos tirantes, aumentam as reações na fundação. Yassuda e Dias (1998) completam

afirmando que, para outras estruturas não atirantadas, por exemplo, muros de arrimo convencionais, são necessários estudos de fundações mais complexos.

Outra vantagem apontada por Yassuda e Dias (1998) é a capacidade dos tirantes operarem ativamente. Quando é necessário que se restrinja a movimentação do solo a ser contido, a incorporação de cargas no tirante aparece de forma importante. Em outros sistemas de contenção sem o emprego de cargas ativas, a resistência passiva só é mobilizada após ocorrerem movimentações no maciço de solo.

Por fim, Yassuda e Dias (1998) ressaltam a importância da existência do controle total da qualidade das cargas aplicadas. Como todos os tirantes são ensaiados antes da incorporação definitiva à estrutura, é possível garantir que eles estarão aptos a suportar a carga prevista no projeto.

A respeito das limitações ao uso de tirantes, diversos autores destacam a eventual necessidade de a ancoragem estar no terreno vizinho (FUNDAÇÃO INSTITUTO DE GEOTÉCNICA DO MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO, 2014a; SAES et al., 1998; MARZIONNA et al., 1998; YASSUDA; DIAS, 1998). Por ser uma situação bastante frequente, mesmo que a invasão no terreno vizinho ocorra em maior profundidade, devem ser tomados alguns cuidados. Primeiramente, a ancoragem em terreno vizinho só pode ocorrer depois de obtida a autorização por parte do proprietário. Saes et al. (1998) afirmam que a falta de autorização formal dos vizinhos já foi motivo de embargo de diversas obras, o que pode levar a enormes prejuízos. A Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro (2014a) salienta que deve ser observada a existência de estruturas por onde passarão os tirantes, como fundações e tubulações. Caso existam, deve-se atentar às interferências que possam existir com essas estruturas e às distâncias destas que os tirantes podem ser instalados. Saes et al. (1998) vão além, declarando que as fundações vizinhas podem sofrer recalques oriundos da perfuração do terreno, além de esforços horizontais gerados pela protensão. Os autores complementam afirmando que também podem ocorrer levantamentos no terreno provocados pelo processo de injeção do tirante. Yassuda e Dias (1998) colocam que esses levantamentos são mais propícios de ocorrerem onde o comprimento ancorado se encontra em terreno argiloso e são empregadas várias linhas de tirantes. Caso os tirantes das diferentes linhas estejam em um mesmo plano vertical, a deformação provocada pela pressão na injeção de um tirante se acumula com a dos outros tirantes do plano, podendo chegar ao topo do terreno.

Essas deformações podem ser evitadas com o aumento do comprimento ancorado e diminuindo a pressão de injeção, ou também evitando que os trechos ancorados estejam em um mesmo plano vertical.

Yassuda e Dias (1998) colocam como uma limitação o fato de, para tirantes muito longos, a interpretação do atrito admissível no trecho livre ser difícil pelos métodos gráficos. Outra limitação apontada pelos autores é a possibilidade de problemas com a corrosão das peças de aço. Conforme já mencionado anteriormente, uma falha na proteção contra corrosão em um ponto do tirante pode ser responsável pela ruína do tirante inteiro.

Por fim, Yassuda e Dias (1998) tratam da questão técnico-econômica que envolve o uso de tirantes. Este serviço, por ser uma atividade especializada, necessita que a execução seja feita com equipes, equipamentos e controle especializados. Por este motivo, o custo dos tirantes pode parecer muito alto se for feita uma análise individual, sendo necessária a análise da relação custo-benefício da solução na obra como um todo.

5 PRÁTICAS DE PROJETO DE TIRANTES EM ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO

Quando adotados como elemento de escoramento, os tirantes tornam-se peça fundamental no equilíbrio da estrutura de contenção. O sucesso da estrutura passa, primeiramente, pela decisão do projeto mais adequado, tanto na escolha do tipo de estrutura de contenção e seu dimensionamento, quanto no dimensionamento correto dos tirantes. Neste capítulo são apresentadas recomendações presentes na literatura e em normas técnicas a respeito de investigação do terreno, estabilidade global da estrutura atirantada após a inserção dos tirantes e dimensionamento dos tirantes. Principalmente para este último item, procura-se apresentar alguns dos diferentes métodos existentes que são utilizados nacional e internacionalmente.

5.1 INVESTIGAÇÃO DO TERRENO

Em projetos geotécnicos, o grande desafio do engenheiro projetista é saber lidar com as incertezas inerentes a esta área da engenharia. Para a concepção de um projeto adequado, se faz necessária a realização de investigações de campo e laboratório para a tomada de, por exemplo, parâmetros geotécnicos do solo, solicitações do solo na estrutura e comportamento do solo durante escavações.

Sabatini et. al (1999) destacam a importância da realização de investigação de campo sob dois aspectos: viabilidade técnica e econômica da obra de contenção com ancoragens. Afirmam que a amplitude da investigação deve ser proporcional a alguns itens, como: escopo do projeto, ou seja, sua localização, dimensão, natureza da estrutura e orçamento disponível; objetivos do projeto, se corresponde a uma estrutura temporária ou permanente; e restrições de projeto, como geometria, exequibilidade, desempenho ou impacto ambiental.

Schnaid (2000) afirma que, para elaboração de um programa de investigação geotécnica, o conhecimento por parte do engenheiro das potencialidades de cada ensaio para a obtenção de cada parâmetro do solo é fundamental. Lunne et al.⁴ (1997 apud SCHNAID, 2000)

⁴ LUNNE, T.; ROBERTSON, P. K.; POWELL, J. J. M. **Cone Penetration Testing**. Londres: Blackie Academic & Profesisonal, 1997.

apresentam em seu trabalho uma qualificação dos ensaios de campo quanto à identificação do solo e obtenção de parâmetros, de acordo com a prática internacional. Esta qualificação é feita atribuindo aos ensaios conceitos quanto à sua aplicabilidade para cada item avaliado. A aplicabilidade pode ser alta (A), moderada (B), baixa (C) ou inexistente (-). Os resultados podem ser vistos no quadro 1. Estas informações podem auxiliar o engenheiro projetista na determinação dos ensaios necessários durante as fases do projeto para cada determinado tipo de obra no campo da geotecnia.

Quadro 1 – Aplicabilidade e uso de ensaios de campo

Grupo	Equipamento	Identificação				Parâmetros									
		Tipo solo	Perfil	u	ϕ'	Su	Dr	mv	Cv	K	G0	σ_h	OCR	$\sigma-\epsilon$	
Penetrômetro	Dinâmico	C	B	-	C	C	C	-	-	-	C	-	C	-	
	Mecânico	B	A/B	-	C	C	B	C	-	-	C	C	C	-	
	Elétrico (CPT)	B	A	-	C	B	A/B	C	-	-	B	B/C	B	-	
	Piezocone (CPTU)	A	A	A	B	B	A/B	B	A/B	B	B	B/C	B	C	
	Sísmico (SCPT/SCPTU)	A	A	A	B	A/B	A/B	B	A/B	B	A	B	B	B	
	Dilatômetro (DMT)	B	A	C	B	B	C	B	-	-	B	B	B	C	
	SPT	A	B	-	C	C	B	-	-	-	C	-	C	-	
	Resistividade	B	B	-	B	C	A	C	-	-	-	-	-	-	
Pressiômetro	Pré-furo (PBP)	B	B	-	C	B	C	B	C	-	B	C	C	C	
	Auto-perfurante (SPB)	B	B	A	B	B	B	B	A	B	A	A/B	B	A/B	
	Cone-pressiômetro (FDP)	B	B	-	C	B	C	C	C	-	A	C	C	C	
Outros	Palheta	B	C	-	-	A	-	-	-	-	-	-	B/C	B	
	Ensaio de placa	C	-	-	C	B	B	B	C	C	A	C	B	B	
	Placa helicoidal	C	C	-	C	B	B	B	C	C	A	C	B	-	
	Permeabilidade	C	-	A	-	-	-	-	B	A	-	-	-	-	
	Ruptura Hidráulica	-	-	B	-	-	-	-	C	C	-	B	-	-	
	Sísmico	C	C	-	-	-	-	-	-	-	A	-	B	-	

Legenda dos parâmetros:
u = poro pressão *in situ*; ϕ' = ângulo de atrito efetivo; Su = resistência ao cisalhamento não-drenada;
mv = coeficiente de variação volumétrica; cv = coeficiente de consolidação; k = coeficiente de permeabilidade;
Dr = densidade relativa; G0 = módulo cisalhante a pequenas deformações; σ_h = tensão horizontal;
OCR = razão de sobre-adensamento; $\sigma-\epsilon$ = relação tensão-deformação.

(fonte: adaptado de LUNNE et al.⁵, 1997 apud SCHNAID, 2000, p. 3)

No caso de obras de contenção, algumas das informações básicas que devem ser conhecidas, além do tipo e perfil do solo, são o ângulo de atrito interno no caso de solos com

⁵ LUNNE, T.; ROBERTSON, P. K.; POWELL, J. J. M. **Cone Penetration Testing**. Londres: Blackie Academic & Profesional, 1997.

comportamento arenoso, a resistência ao cisalhamento não drenada para solos de comportamento coesivo, as condições de ação de águas subterrâneas.

No caso de projetos que envolvem tirantes, Xanthakos (1991) sugere que seja dada atenção principalmente à zona do trecho ancorado. O autor coloca que as características da ancoragem são função das condições do solo, sendo mais sensíveis a variações se comparadas a elementos de fundação mais simples. Xanthakos (1991) também sugere que se concentrem ensaios nas regiões de potencial deslizamento e que, nos casos de tirantes longos, se verifique as condições de perfuração acima do trecho ancorado.

Sabatini et. al (1999) sugerem que a investigação siga quatro etapas principais. São elas a verificação de campo, a investigação de subsolo, testes de laboratório e testes de campo.

A verificação de campo é basicamente uma inspeção visual. Segundo Sabatini et. al (1999), deve-se atentar à topografia do local, existência de construções próximas, drenagem, condições de acesso e tráfego para equipamentos, áreas de potencial instabilidade e a viabilidade legal de se construir os tirantes em terreno vizinho. Falconi et al. (2008) completam, a respeito da existência de edificações próximas, afirmando que devem ser feitas investigações sobre as fundações e condições gerais destas edificações.

A fase de investigação do subsolo consiste essencialmente na caracterização da estratigrafia do terreno e das condições de águas subterrâneas, por meio de sondagens, podendo envolver coleta de amostras deformadas e indeformadas para os ensaios de laboratório. A caracterização da estratigrafia envolve a descrição por completo das camadas do subsolo (espessuras, cotas, extensão lateral), visando identificar a presença de camadas que possam afetar tanto o projeto quanto a construção do tirante. Alguns exemplos citados por Sabatini et. al (1999) são a presença de solos sem coesão que podem desmoronar durante a escavação, camadas frágeis de solo ou rocha que possam ser instáveis quanto ao escorregamento, materiais compressíveis que sofrem deformações a longo prazo, ou eventuais obstruções que possam atrapalhar alguma das etapas executivas. Os autores indicam que as sondagens sejam feitas sobre o alinhamento onde será feita a estrutura de contenção, na frente e atrás da mesma. Sobre o alinhamento da contenção é recomendada a execução nas extremidades e em intervalos de até 30 m para ser feita a interpolação dos dados e definição do perfil estratigráfico. Atrás da contenção é recomendada a realização de sondagens nas zonas onde deverão se encontrar os trechos ancorados dos tirantes. As amostras de solo podem ser

coletadas com o ensaio SPT (*Standard Penetration Test*) ou, no caso de solos argilosos, com tubos de parede fina. A descrição contínua da estratigrafia do solo também pode ser feita através de ensaio CPT (*Cone Penetration Test*). As condições de águas subterrâneas também são apontadas como fator importante. A estabilidade do sistema, as cargas atuantes na contenção, a proteção contra corrosão nos tirantes, os procedimentos de execução, entre outros, são afetados por estas condições. A verificação do nível do lençol freático pode ser feita com a simples observação dos furos de sondagem realizados anteriormente. Passado o tempo necessário para a estabilização do nível da água no furo, pode-se realizar a medição manualmente. Para medições mais precisas, podem-se utilizar piezômetros. É destacada a relevância de se observar o comportamento dos materiais na presença da água, como potencial de corrosão, instabilidades no solo resultantes de infiltração, necessidade de rebaixamento do lençol freático para escavação, procedimentos diferenciados de perfuração e injeção ou uma potencial liquefação de solos não coesivos.

Na etapa de testes de laboratório, Sabatini et. al (1999) afirmam que normalmente são utilizadas as amostras coletadas na etapa de investigação do subsolo para análises principalmente de peso específico, granulometria, teor de umidade, limites de Atterberg, resistência ao cisalhamento, parâmetros de compressibilidade e agressividade do meio quanto ao potencial de corrosão. O peso específico é utilizado para o cálculo dos esforços atuantes na contenção e na avaliação da estabilidade externa da estrutura ancorada. Os autores sugerem que o teor de umidade e os limites de Atterberg podem ser utilizados na estimativa de compressibilidade e resistência ao cisalhamento de solos coesivos, tendo relação com a aplicabilidade dos tirantes nestes solos. A granulometria pode ser utilizada para a definição dos métodos de perfuração e injeção. A resistência ao cisalhamento pode ser obtida através de ensaios de compressão simples, cisalhamento direto ou ensaio triaxial, sendo a escolha do ensaio dependente do comportamento do solo (granular ou coesivo).

Em território Europeu, segundo Bond e Harris (2008), as normas locais não abordam especificamente os ensaios necessários para projetos de tirantes. Por fazerem parte de outra estrutura de contenção principal, a investigação acaba sendo realizada em função desta outra estrutura.

5.2 ESTABILIDADE DA ESTRUTURA ATIRANTADA

O dimensionamento das estruturas de contenção, por não ser o foco deste trabalho, não será detalhado. Serão abordados aqui os tópicos pertinentes à estabilidade global da estrutura com a inserção dos tirantes.

5.2.1 Estabilidade global e projeto de escavação

No Brasil, a NBR 5629 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006) recomenda que o cálculo da estabilidade global da estrutura atirantada seja feito a partir de métodos consagrados da mecânica dos solos. A Norma preconiza que nenhuma superfície de ruptura apresente fator de segurança inferior a 1,5 após a colocação dos tirantes. Sabatini et. al (1999) sugerem que se proceda da mesma maneira, porém com fatores de segurança maiores do que 1,3 para as superfícies de ruptura que passam sobre as ancoragens ou atrás das mesmas. Ainda segundo a prática americana, é recomendada a avaliação da estabilidade considerando efeitos de curto prazo (situação não drenada) para tirantes temporários e de curto e longo prazo (situação não drenada e drenada) para tirantes permanentes.

A respeito da consideração, na etapa de projeto, da estabilidade da estrutura durante a escavação, Xanthakos (1991) afirma que a estrutura deve ser dimensionada de modo a absorver os esforços provenientes dos empuxos do solo adjacente à escavação e eventuais sobrecargas, durante e após a sua construção, reduzindo as deformações do solo a valores aceitáveis. Falconi et al. (2008, p.218) completam afirmando que “Um bom projeto deve atender às condições de segurança contra a ruptura da estrutura de contenção e provocar mínimos danos aos vizinhos e áreas lindeiras.”. Ainda colocam que, além da definição do carregamento atuante na contenção, a estabilidade da estrutura, bem como os efeitos nas edificações vizinhas durante todas as etapas da construção, faz parte do escopo do projeto de uma escavação. Em uma contenção atirantada este é fator é bastante importante. As deformações nas sucessivas fases de níveis escavação e protensão de tirantes (nos casos onde há mais de um nível de atirantamento) devem ser consideradas pelo projetista, tanto no terreno adjacente e construções que possam existir, quanto na própria estrutura de contenção e instalações de infraestrutura próximas.

5.2.2 Geometria do problema

Para a análise da estabilidade global da estrutura é necessário que seja feita uma modelagem do problema considerando as características do terreno, dimensões da parede de contenção, cargas aplicadas pelos tirantes e a posição das mesmas na estrutura.

A carga de trabalho e o posicionamento de cada tirante variam de acordo com cada situação (altura de escavação, tipo de material para ancoragem, etc.) ou com a preferência do projetista (tirantes monobarra, por exemplo são de execução mais fácil, mas suportam menos carga). A tendência, segundo Yassuda e Dias (1998), é que cada vez mais haja aumento nas cargas dos tirantes e aumento do espaçamento entre eles. Isso é possível devido ao avanço na tecnologia dos tirantes, como no desenvolvimento de aços mais resistentes e diferentes técnicas de injeção.

5.2.2.1 Carga de trabalho

A determinação da carga de trabalho dos tirantes tem como limitantes a resistência do elemento tracionado, a capacidade do solo em absorver as tensões transmitidas pelo trecho ancorado e a resistência estrutura de contenção em si, que deve ser capaz de suportar a carga na interface de contato sem haver ruptura por puncionamento. No Brasil, as cargas usualmente adotadas são de até 1500 kN (trabalho não publicado)⁶. Estas cargas são atingidas com o uso de tirantes formados por feixes de fios ou cordoalhas. Para tirantes do tipo monobarra as cargas são menores. A fabricante de tirantes Incotep Sistemas de Ancoragem (2015), por exemplo, comercializa no Brasil tirantes monobarra com carga de trabalho de até 1000 kN para aplicação permanente. A Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro (2014a), por exemplo, opta por trabalhar apenas com tirantes monobarra e com cargas de trabalho usualmente até 510 kN.

Sabatini et. al (1999) sugerem alguns métodos para a definição da carga de trabalho dos tirantes, assumindo que a parede da contenção esteja inserida em um material competente, que ofereça suporte à estrutura na escavação. Um dos métodos mais simples, e que apresenta bons resultados é o “Método da área tributada”. O método se baseia no fato de que cada tirante é responsável por absorver as cargas em determinada área da estrutura de contenção.

⁶ Informação obtida na apostila da disciplina Estruturas de Contenção, ministrada pelo prof. Luiz Antônio Bressani, no curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio grande do Sul, semestre 2014/2.

A reação horizontal necessária do tirante é calculada a partir do diagrama de empuxo de Terzaghi e Peck estrutura. A figura 9 exemplifica a geometria do método para um nível de ancoragem ou múltiplos níveis. No caso da contenção com um nível de tirantes, a carga horizontal T_1 deve ser a mesma carga atuante no comprimento $H_1 + H_2/2$. A reação R no final da parede deve ser a carga atuante no comprimento $H_2/2$. Com n níveis de ancoragem, a carga T_1 no tirante superior é dada da mesma maneira do caso anterior, ou seja, a carga que atua no comprimento $H_1 + H_2/2$. No segundo tirante, a carga deverá ser a mesma que solicita a estrutura entre $H_2/2$ e $H_n/2$. O procedimento é repetido até o enésimo tirante, no qual a carga deverá ser a mesma que solicita a estrutura entre $H_n/2$ e $H_{n+1}/2$. A reação R será dada pela carga atuante no segmento final, de comprimento $H_{n+1}/2$. Caso o solo não ofereça suporte para a carga de reação R , a mesma deve ser adicionada na carga do tirante inferior. Os valores das cargas nos tirantes por esse método serão dados em função de unidade de comprimento da estrutura de contenção (T_{hi}). A carga horizontal do tirante (T_h) pode ser obtida multiplicando-se este valor pelo espaçamento entre tirantes (s) conforme fórmula 1. Por fim, para a determinação da carga de trabalho do tirante (F_t), divide-se o valor da carga horizontal pelo cosseno do ângulo de inclinação do tirante (θ), conforme fórmula 2.

$$T_h = T_{hi} * s \quad (\text{fórmula 1})$$

$$F_t = T_h * \cos \theta \quad (\text{fórmula 2})$$

Sendo:

F_t = carga de trabalho do tirante

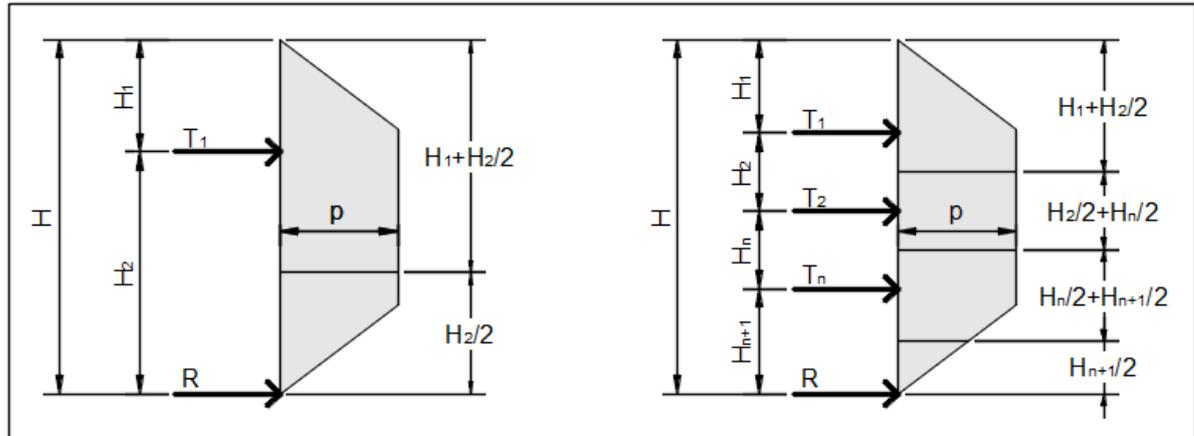
T_h = carga horizontal do tirante, em kN;

T_{hi} = carga horizontal do tirante por unidade de comprimento de contenção, em kN/m

s = espaçamento entre tirantes, em m;

θ = ângulo de inclinação do tirante, em graus.

Figura 9 – Distribuição de cargas no método da área tributada



(fonte: adaptado de SABATINI et. al, 1999, p. 66-67)

5.2.2.2 Posicionamento do tirante

A posição dos tirantes também dependerá do quão solicitada for a estrutura de contenção. Quanto mais solicitada, mais tirantes podem ser necessários em uma linha de tirantes e um número maior de linhas pode ser incorporado. Para tirantes inclinados, quanto maior for sua inclinação, maior deverá ser a carga aplicada para atingir a carga horizontal necessária.

5.2.2.2.1 Espaçamento entre tirantes

A NBR 5629 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006) não faz indicação de valores máximos ou mínimos de espaçamento. Apenas indica que o projetista é responsável por adotar distâncias mínimas entre as interferências no terreno vizinho (tubulações, fundações, etc.) para a perfuração dos tirantes.

Na Europa, o Eurocode 7 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2004) indica que a distância mínima entre tirantes seja de 1,5 metros. Esta distância seria suficiente para evitar a sobreposição de esforços gerados nos trechos ancorados.

A prática norte-americana se mostra mais detalhista nas especificações de espaçamento. Sabatini et. al (1999) indicam que o espaçamento horizontal seja de no mínimo 1,2 metros para evitar sobreposição de esforços, e afirma que usualmente o espaçamento adotado varia entre 1,5 e 3 metros. Quanto ao espaçamento vertical, os autores recomendam cuidados com os tirantes do nível superior, visando evitar grandes deformações na estrutura de contenção. Caso a resistência passiva do solo seja superada durante a fase de protensão do tirante, a parede da contenção pode sofrer deformações excessivas na direção do solo contido. Os

autores sugerem que a resistência passiva do solo seja estimada pela fórmula 3. Também, recomendam que o centro do trecho ancorado esteja no mínimo 4,5 metros distante da superfície do terreno, de modo a evitar deformações na superfície durante o processo de injeção.

$$F_p = 1,125 * K_p * \gamma * H_1^2 * s \quad (\text{fórmula 3})$$

Sendo:

F_p = resistência passiva do solo, em kN

K_p = coeficiente de empuxo passivo do solo;

γ = peso específico do solo, em kN/m³;

H_1 = distância da superfície até o tirante superior, em m;

s = espaçamento horizontal dos tirantes, em m.

5.2.2.2 Inclinação

A inclinação do tirante, indicada por Xanthakos (1991), deve estar entre 15° e 30°, tendo a finalidade de facilitar os processos de perfuração e injeção. O ajuste na inclinação do tirante também é importante para desviar das interferências do terreno onde é feita a ancoragem. Quando necessário para atingir camadas mais resistentes de solo para o trecho ancorado, essa faixa de valores de inclinação pode ser superada, chegando normalmente até 45°. O aumento da inclinação reduz a componente horizontal da carga do tirante e aumenta a carga vertical, que deve ser absorvida pela base da contenção (XANTHAKOS, 1991). O aumento da solicitação na base da estrutura pode prejudicar a estabilidade na verificação quanto à capacidade de carga do solo da fundação.

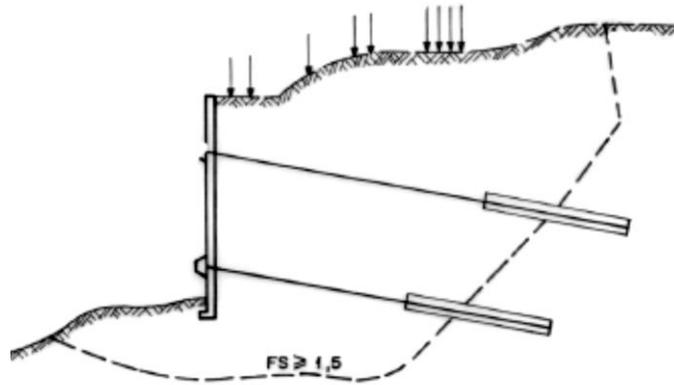
5.3 DIMENSIONAMENTO DOS TIRANTES

O dimensionamento dos tirantes envolve a determinação dos comprimentos dos trechos livre e ancorado, a definição do diâmetro da perfuração, a escolha dos elementos resistentes à tração e dos sistemas de proteção contra corrosão. Estes tópicos serão apresentados nos itens a seguir.

5.3.1 Dimensionamento do comprimento do trecho livre

O trecho livre deve ter comprimento suficiente para que as tensões mobilizadas no trecho ancorado atuem fora da zona de potencial ruptura e que se alcance solo competente para a ancoragem. A NBR 5629 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006) não especifica um valor fixo de comprimento mínimo, apenas que o tamanho seja suficiente para que o centro do trecho ancorado esteja sobre uma superfície de ruptura com fator de segurança de no mínimo 1,5 (calculado sem considerar a atuação dos tirantes), conforme representado na figura 10.

Figura 10 – Superfície de ruptura após atirantamento, segundo NBR 5629:2006



(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006, p. 21)

Sabatini et. al (1999) indicam um comprimento mínimo de 4,5 metros no trecho livre para tirantes compostos por cordoalhas e 3 metros para tirantes com barras, de modo a evitar perdas de carga transferida à estrutura após os ensaios de protensão. A prática americana ainda recomenda um comprimento mínimo de 1,5 metros distante da superfície de ruptura potencial ou a uma distância da parede da ordem de 20% da altura da mesma.

5.3.2 Dimensionamento do trecho ancorado

O trecho ancorado deve ser dimensionado para distribuir no solo a carga mais alta da fase de protensão. As proposições de cálculo giram em torno de determinar a tensão máxima que pode ser mobilizada na interface de contato entre o solo e a nata de cimento. Deste modo, a ruptura do tirante entre os elementos de tração e a nata de cimento não é considerada nesta etapa.

5.3.2.1 Indicação da NBR 5629:2006 para dimensionamento do comprimento ancorado

A NBR 5629 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006) recomenda que o comprimento e a seção transversal dos tirantes sejam definidos a partir dos resultados dos ensaios básicos e de qualificação. Para a fase preliminar de dimensionamento, a Norma sugere que a resistência do tirante à tração seja calculada de maneira diferente para ancoragens em solo arenoso, em solo argiloso e em rocha. Em tirantes permanentes, o fator de segurança adotado é de 1,75. Em tirantes provisórios, é igual a 1,5.

Para solos de comportamento arenoso, a Norma indica o cálculo através da fórmula 4.

$$T = \sigma'_z * U * L_b * k_f \quad (\text{fórmula 4})$$

Sendo:

T = resistência do tirante à tração, em kN;

σ'_z = tensão efetiva no ponto médio da ancoragem, em kPa;

U = perímetro médio da seção transversal da ancoragem, em m;

L_b = comprimento do trecho ancorado, em m;

k_f = coeficiente de ancoragem indicado na tabela 1.

Tabela 1 – Coeficientes de ancoragem

Solo	Compacidade		
	Fofa	Compacta	Muito compacta
Silte	0,1	0,4	1
Areia fina	0,2	0,6	1,5
Areia média	0,5	1,2	2
Areia grossa	1	2	3

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006, p. 4)

Para solos de comportamento argiloso, indica-se o cálculo através da fórmula 5.

$$T = \alpha * U * L_b * s_u \quad (\text{fórmula 5})$$

Sendo:

T = resistência do tirante à tração, em kN;

α = coeficiente redutor ao cisalhamento;

U = perímetro médio da seção transversal da ancoragem, em m;

L_b = comprimento do trecho ancorado, em m;

s_u = resistência ao cisalhamento não drenado do solo argiloso, em kPa.

Para valores de s_u inferiores a 40 kPa, o valor recomendado para α é de 0,75. Para valores de s_u superiores a 100 kPa, recomenda-se o valor de 0,35 para α . Para valores intermediários, a Norma recomenda que seja feita interpolação linear.

Nos casos onde a ancoragem for feita em rocha, a Norma recomenda que a tensão de aderência entre a rocha e argamassa seja estimada pelo menor valor entre 1/30 da resistência à compressão simples da rocha e 1/30 da resistência à compressão simples da argamassa utilizada na injeção.

A Norma ainda restringe alguns locais para a instalação do trecho ancorado. Não é recomendada a ancoragem em solos orgânicos moles, aterros ou solos coesivos com resistência inferior a quatro golpes no ensaio SPT ou em aterros sanitários.

5.3.2.2 Método de Bustamante e Doix para cálculo do comprimento ancorado

O método proposto por Bustamante e Doix (1985) para cálculo da capacidade de carga no trecho ancorado, diferente do método proposto pela Norma brasileira, considera o efeito da pressão de injeção no solo nas situações de injeção simples (IGU) e injeções múltiplas (IRS). A estimativa de carga é dada pela fórmula 6.

$$T = \pi * D_s * L_b * q_s \quad (\text{fórmula 6})$$

Sendo:

T = capacidade de carga no trecho ancorado, em MN;

D_s = diâmetro médio do bulbo de ancoragem, em m;

L_b = comprimento do trecho ancorado, em m;

q_s = aderência lateral limite, em MPa.

O cálculo do diâmetro médio do trecho ancorado é dado pela fórmula 7.

$$D_s = D_d * \alpha \quad (\text{fórmula 7})$$

Sendo:

D_d = diâmetro da perfuração, em m;

α = coeficiente de majoração do diâmetro, obtido no quadro 2.

Quadro 2 – Coeficientes de majoração do diâmetro e quantidade mínima de argamassa

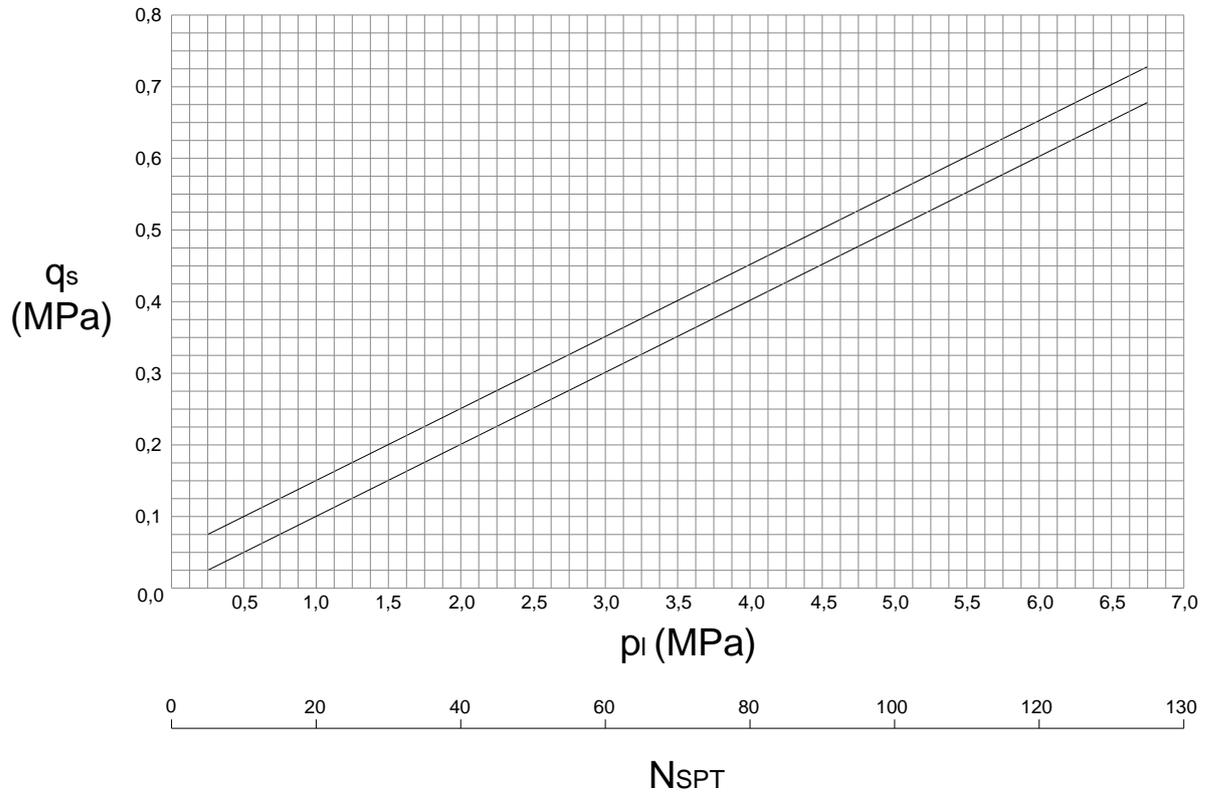
SOLO	Coeficiente α		Quantidade mínima de argamassa recomendada V_i
	IRS*	IGU**	
Pedregulho	1,8	1,3 - 1,4	1,5 V_s *
Pedregulho arenoso	1,6 - 1,8	1,2 - 1,4	1,5 V_s
Areia / Pedregulho	1,5 - 1,6	1,2 - 1,3	1,5 V_s
Areia grossa	1,4 - 1,5	1,1 - 1,2	1,5 V_s
Areia média	1,4 - 1,5	1,1 - 1,2	1,5 V_s
Areia fina	1,4 - 1,5	1,1 - 1,2	1,5 V_s
Areia siltosa	1,4 - 1,5	1,1 - 1,2	1,5 - 2 V_s (IRS) / 1,5 V_s (IGU)
Silte	1,4 - 1,6	1,1 - 1,2	2 V_s (IRS) / 1,5 V_s (IGU)
Argila	1,8 - 2	1,2	2,5 - 3 V_s (IRS) / 1,5 - 2 V_s (IGU)
Marga	1,8	1,1 - 1,2	1,5 - 2 V_s para camada pouco compacta 12 - 2 V_s ou mais para camadas fraturadas
Calcário com marga	1,8	1,1 - 1,2	
Calcário alterado ou fragmentado	1,8	1,1 - 1,2	
Rocha alterada ou fragmentada	1,2	1,1	1,1 - 1,5 V_s para camada finamente fraturada 2 ou mais para camadas fraturadas
Vs: volume do bulbo de ancoragem IRS: injeção em estágios múltiplos IGU: injeção em estágio único	*: pressão de injeção (p_i) > pressão limite no ensaio pressiométrico (p_l) ***: $0,5p_l < p_i < p_l$		

(fonte: BUSTAMANTE; DOIX, 1985, p. 84, tradução nossa)

Os valores de q_s são obtidos a partir dos ábacos propostos pelos autores apresentados nas figuras 11, 12, 13, e 14 para diferentes locais de ancoragem. Os valores tem correlação com a pressão limite (p_l) obtida no ensaio pressiométrico de Ménard e com o número de golpes do ensaio SPT (N_{SPT}). Em cada ábaco, a curva superior é referente à injeção em estágios múltiplos, e a curva inferior é referente à injeção em estágio único.

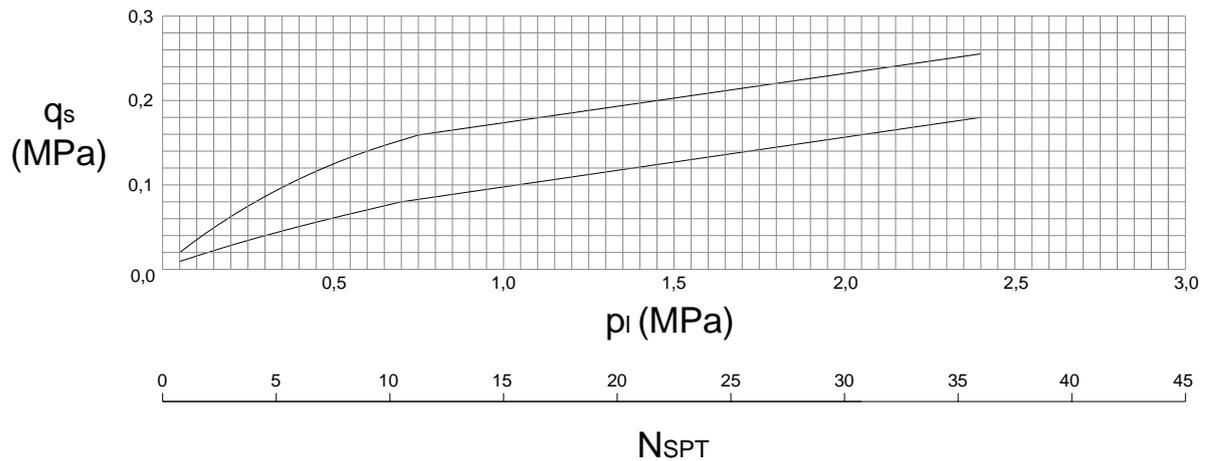
Por fim, os autores recomendam a adoção de fatores de segurança de 1,8 e 2,0 para tirantes provisórios e permanentes, respectivamente.

Figura 11 – Ábaco para estimativa da aderência lateral limite em solos de areia e cascalho



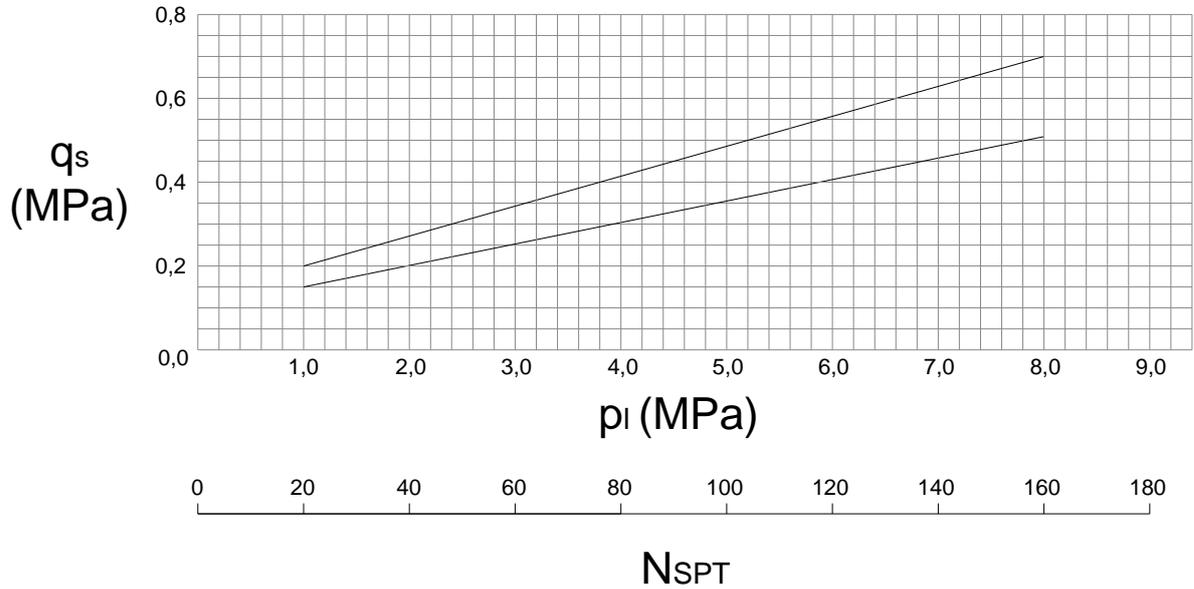
(fonte: BUSTAMANTE; DOIX, 1985, p. 84, tradução nossa)

Figura 12 – Ábaco para estimativa da aderência lateral limite em solos de argila e silte



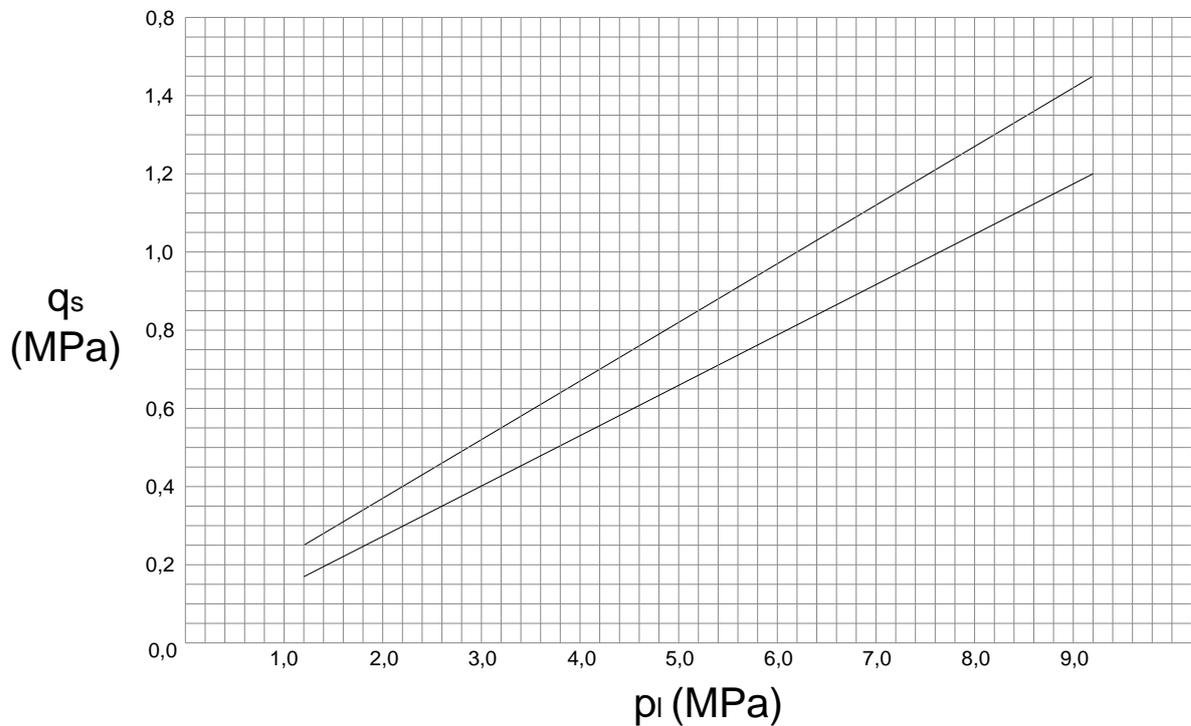
(fonte: BUSTAMANTE; DOIX, 1985, p. 85, tradução nossa)

Figura 13 – Ábaco para estimativa da aderência lateral limite em solos de marga e calcário com marga



(fonte: BUSTAMANTE; DOIX, 1985, p. 85, tradução nossa)

Figura 14 – Ábaco para estimativa da aderência lateral limite em rocha alterada ou fragmentada



(fonte: BUSTAMANTE; DOIX, 1985, p. 85, tradução nossa)

5.3.2.3 Estimativa segundo Sabatini et. al (1999) da resistência no trecho ancorado

Para estimativas preliminares de projeto, Sabatini et. al (1999) propõem valores de cargas limite para diferentes tipos de solo e rocha típicos da região, considerando perfurações de pequeno diâmetro, em função do ensaio SPT. Os valores para ancoragem em solo e rocha são apresentados nas tabelas 2 e 3, respectivamente. Segundo os autores, os valores usualmente adotados nos Estados Unidos estão entre 4,5 e 12 metros para ancoragem em solo e entre 3 e 10 metros para ancoragens em rocha. A capacidade de carga do tirante é obtida pela multiplicação do comprimento do trecho ancorado pela carga limite de ancoragem estimada nas tabelas, adotando fator de segurança igual a 2 para ancoragem em solo e 3 para ancoragem em rocha.

Tabela 2 – Estimativa de carga para ancoragem em solo segundo Sabatini et. al

Tipo de solo	N _{SPT} *	Carga de transferência última estimada (kN/m)
Areia e cascalho	4 - 10	145
	11 - 30	220
	31 - 50	290
Areia	4 - 10	100
	11 - 30	145
	31 - 50	190
Areia e Silte	4 - 10	70
	11 - 30	100
	31 - 50	130
Silte argiloso com pouca plasticidade, ou areia fina com mica, ou misturas siltosas	10 - 20	30
	21 - 40	60

* Valores corrigidos para nível de tensões

(fonte: SABATINI et. al, 1991, p. 71, tradução nossa)

Tabela 3 – Estimativa de carga para ancoragem em rocha segundo Sabatini et. al

Tipo de rocha	Carga de transferência última estimada (kN/m)
Granito ou basalto	730
Calcário dolomítico	580
Calcário brando	440
Arenito	440
Ardósia e Xisto	360
Folhelhos	150

(fonte: SABATINI et. al, 1991, p. 74, tradução nossa)

5.3.2.4 Indicação do Eurocode 7 para determinação do comprimento ancorado

Conforme colocado por Bond e Harris (2008), o Eurocode 7 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2004) não sugere nenhum método de cálculo para estimativa da carga admissível do tirante. Os autores afirmam que devem ser considerados todos os modos possíveis de falha e comparar estas análises com os estados limites último e de serviço da estrutura de contenção. Os autores recomendam que, na ausência de algum método, o projeto seja feito com base nos ensaios de arrancamento que serão apresentados no capítulo seguinte.

5.3.3 Escolha do elemento resistente à tração e determinação da seção

Por se tratar do material mais comumente empregado em tirantes, a escolha se dará neste trabalho em torno dos elementos constituídos por aço. As opções mais comuns, conforme mencionado anteriormente, são tirantes compostos por barras, fios ou cordoalhas. A definição ocorrerá principalmente em função da carga do tirante e da preferência do projetista ou do contratante.

Tirantes monobarra são utilizados em casos onde as cargas de trabalho não são muito elevadas, oferecendo maior eficiência na proteção contra corrosão e facilidade na ancoragem com a estrutura. Múltiplas barras podem ser utilizadas para cargas mais elevadas, mas são de difícil manuseio na instalação (XANTHAKOS, 1991). Segundo Yassuda e Dias (1998), os tirantes com múltiplas barras são pouco utilizados. Tirantes com fios e cordoalhas permitem alcançar cargas mais elevadas, sendo mais práticos do que os tirantes de múltiplas barras para a execução. No Brasil, de acordo com Yassuda e Dias (1998), os fios mais utilizados são os com seção de 8 mm com tensão de escoamento de 1500 MPa. As cordoalhas mais utilizadas, segundo os mesmos autores, são as de 12,7 cm de diâmetro, com carga de escoamento de 168,6 kN. Em contrapartida, os tirantes de fios e cordoalhas, por apresentarem maior área de aço com interface livre (são utilizados vários fios ou cordoalhas), podem sofrer a ação da corrosão com mais intensidade.

Segundo Yassuda e Dias (1998, p. 623), “O aço deve resistir, sem entrar em escoamento, aos esforços de tração máxima que ocorrem durante os ensaios de protensão.”. A NBR 5629 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006) indica que a escolha da seção dos elementos seja feita em função de sua tensão admissível (σ_{adm}). A Norma sugere valores diferentes para tirantes provisórios e permanentes conforme apresentado nas fórmulas

8 e 9. Ainda, a Norma indica que a seção de cada barra, fio ou cordoalha adotada como elemento resistente à tração do tirante deve ter ao menos 50 mm².

$$\sigma_{adm} = \frac{f_{yk}}{1,75} * 0,9 \quad (\text{fórmula 8})$$

$$\sigma_{adm} = \frac{f_{yk}}{1,50} * 0,9 \quad (\text{fórmula 9})$$

Sendo:

σ_{adm} = tensão admissível, em kPa;

f_{yk} = resistência característica do aço à tração, em kPa.

Na prática, o engenheiro projetista escolhe a seção do aço a partir dos produtos disponibilizados comercialmente. As empresas fabricantes fornecem, em seus catálogos, as cargas de trabalho e de ensaio recomendadas para cada elemento (já considerando as recomendações da Norma).

5.3.4 Proteção contra corrosão

A proteção contra corrosão, conforme comentado no capítulo anterior, aparece como fator de muita importância no funcionamento de um tirante. A escolha de um sistema adequado de proteção passa pela análise da agressividade do meio no qual o tirante está inserido e da vida útil esperada para o mesmo.

5.3.4.1 Proteção segundo a NBR 5629:2006

No Brasil, a NBR 5629 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006) determina a existência de três classes de proteção, considerando agressividade do meio e caráter da vida útil do tirante (provisório ou permanente). A agressividade do meio segundo a Norma pode ser definida a partir do Quadro 3, e as proteções recomendadas são apresentadas a seguir.

Quadro 3 – Agressividade do meio pela NBR 5629:2006

Tipos de águas freáticas	Grau de agressividade do meio		
	Não agressivo	Medianamente agressivo	Muito agressivo
Águas puras Resíduo filtrável ¹⁾	> 150	150 a 50	< 50
Águas ácidas	pH > 6	pH 5,5 a pH 6	pH < 5,5
Águas ácidas com CO ₂ dissolvido	< 30	30 a 45	> 45
Águas selenitosas Teor de SO ₄ ⁻	< 150	150 a 500	> 500
Águas magnesianas Teor de Mg ⁺⁺	< 100	100 a 200	> 200
Águas amoniacais Teor de NH ₄ ⁺	< 100	100 a 150	> 150
Águas com cloro Teor de Cl	< 200	200 a 500	> 500

¹⁾ São águas de montanhas, de fontes, com ação lixiviante, que dissolvem a cal livre e hidrosalisam os silicatos e alumiato do cimento.

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006, p. 29)

A proteção classe 1 é indicada para tirantes permanentes em meio muito agressivo ou medianamente agressivo e para tirantes provisórios em meio muito agressivo, e indica a aplicação de duas barreiras físicas contra corrosão ao longo de todo o tirante. No trecho ancorado, deve-se utilizar um tubo plástico corrugado ou um tubo metálico com no mínimo 4 mm de espessura como proteção ao elemento resistente à tração do tirante e o cimento. No trecho livre são indicadas duas soluções. Na primeira, cada elemento de tração deve ser envolvido por graxa anticorrosiva e duto plástico, e o conjunto de elementos deve ser envolvido por outro duto plástico e, após a protensão, injetado com calda de cimento. Na outra opção, todos os elementos de tração são envolvidos por um duto plástico e graxa anticorrosiva (específica para uso em cabos de aço. Este tubo é envolto por outro tubo plástico, e o espaço entre eles é preenchido com argamassa.

Para tirantes permanentes em meio não agressivo e provisórios em meio medianamente agressivo, a Norma indica a proteção classe 2. No trecho livre, a proteção deve ser feita da mesma maneira que na proteção de classe 1. No trecho ancorado, a é feita a proteção somente com cimento ou argamassa injetada, utilizando-se centralizadores para garantir um cobrimento mínimo de 2 cm.

Nos casos de tirantes provisórios em meios não agressivos, a Norma recomenda o uso de proteção classe 3. No trecho livre, os elementos de tração devem ser protegidos por um único

duto plástico ou por dutos individuais. O trecho ancorado é protegido da mesma maneira que na proteção classe 2.

5.3.4.2 Proteção nos Estados Unidos

Sabatini et. al (1999) afirmam que, na prática americana, também existem três classes de proteção contra corrosão, classe I, classe II e sem proteção. A escolha da proteção será função da agressividade do meio (agressivo ou não agressivo), da vida útil do tirante (provisório ou permanente), da gravidade da consequência da falha do tirante (séria ou não séria) e da representatividade do custo da proteção no custo da obra (pequena ou significativa). A figura 15 indica a classe a ser escolhida para cada situação.

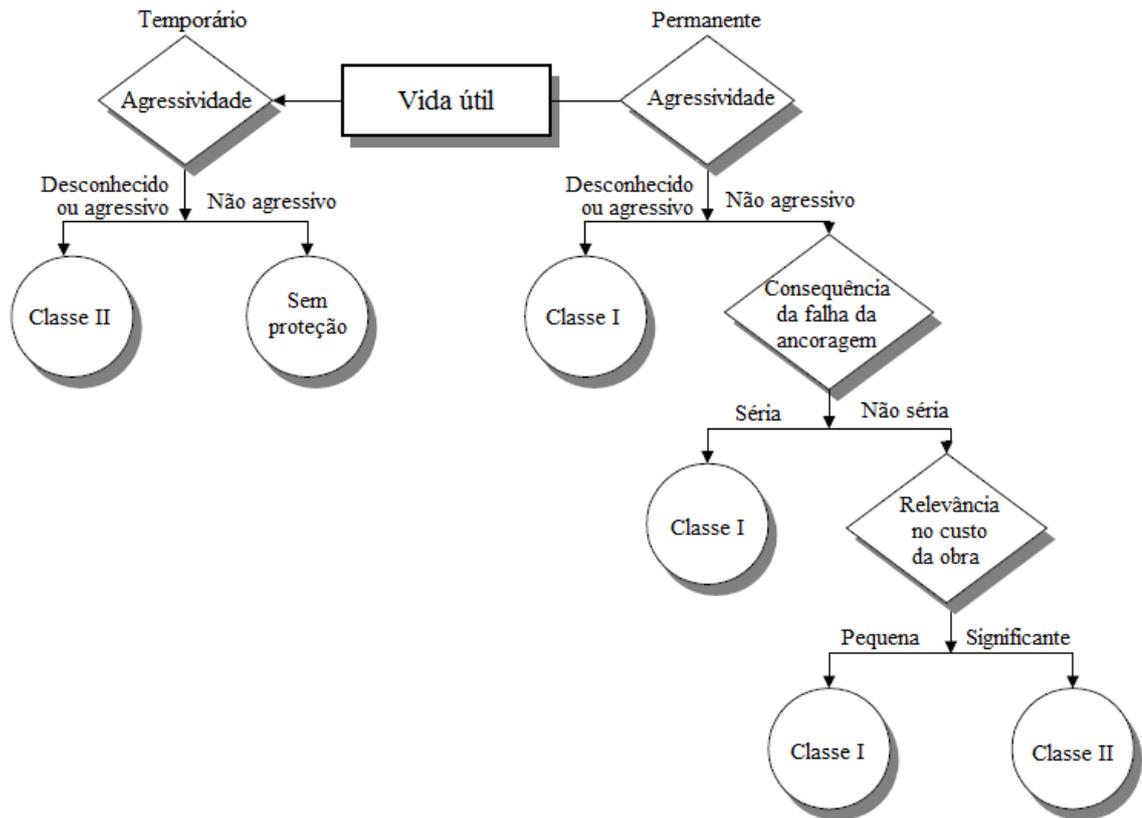
Para a classe de proteção I, a proteção do trecho livre para tirantes de barra deve ser feita com um tubo liso sobre a barra envolvida por nata de cimento, coberto por outro tubo liso para garantir a condição de não aderência no trecho. Também é destacada a importância de proteger as conexões das barras com algum componente anticorrosivo. Para cordoalhas, o trecho livre deve ser protegido por bainha coletiva, ao redor de bainhas individuais em cada cordoalha. As bainhas individuais são preenchidas com graxa e a coletiva com graxa ou nata de cimento. No trecho ancorado, os tirantes de barra são protegidos com bainha formada por tubo corrugado preenchido com nata de cimento. Nos tirantes de cordoalha, a recomendação é a mesma, com uso de espaçadores internos para as cordoalhas e centralizador externo para garantir o cobrimento (SABATINI et. al, 1999).

A proteção de classe II no trecho livre de tirantes de barra é feita com tubo liso ao redor da barra preenchido por graxa anticorrosiva e coberto por nata de cimento. Para tirantes de cordoalhas são recomendadas bainhas individuais de tubo liso preenchidas com graxa e cobertas por nata de cimento. No trecho ancorado, tanto barras quanto cordoalhas são envoltas apenas por nata de cimento. Exemplos de proteção para proteção de tirantes de cordoalhas e de barra são apresentados nas figuras 16 e 17 (SABATINI et. al, 1999).

A prática americana recomenda outra ação preventiva que não é contemplada na norma brasileira, a proteção da “ancoragem”, tanto na proteção classe I como classe II. A ancoragem é descrita como a região do trecho livre próxima à cabeça do tirante, onde são relatados os maiores problemas de corrosão. É indicado o uso de um tubo externo, de maior diâmetro, envolvendo o tirante na transição da placa de apoio até cobrir a proteção do trecho livre em

pelo menos 10 cm, chamado de *trumpet*. Deve ser completamente preenchido por nata de cimento após a protensão do tirante (OHIO DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, 2012; SABATINI et. al, 1999).

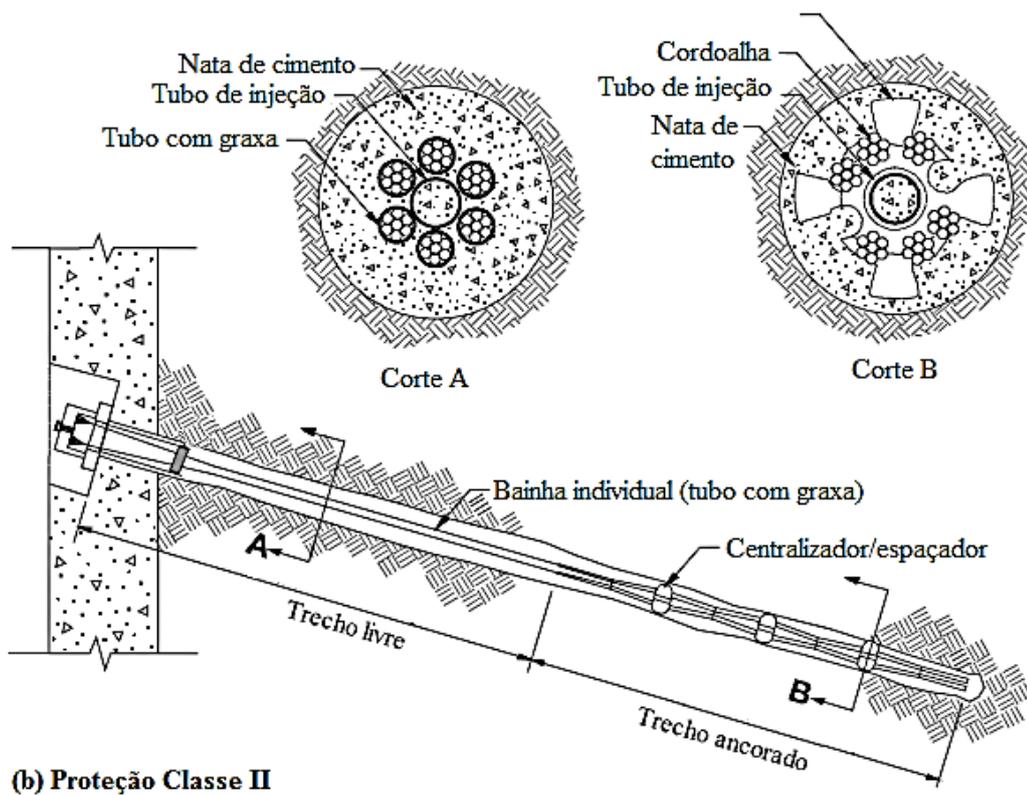
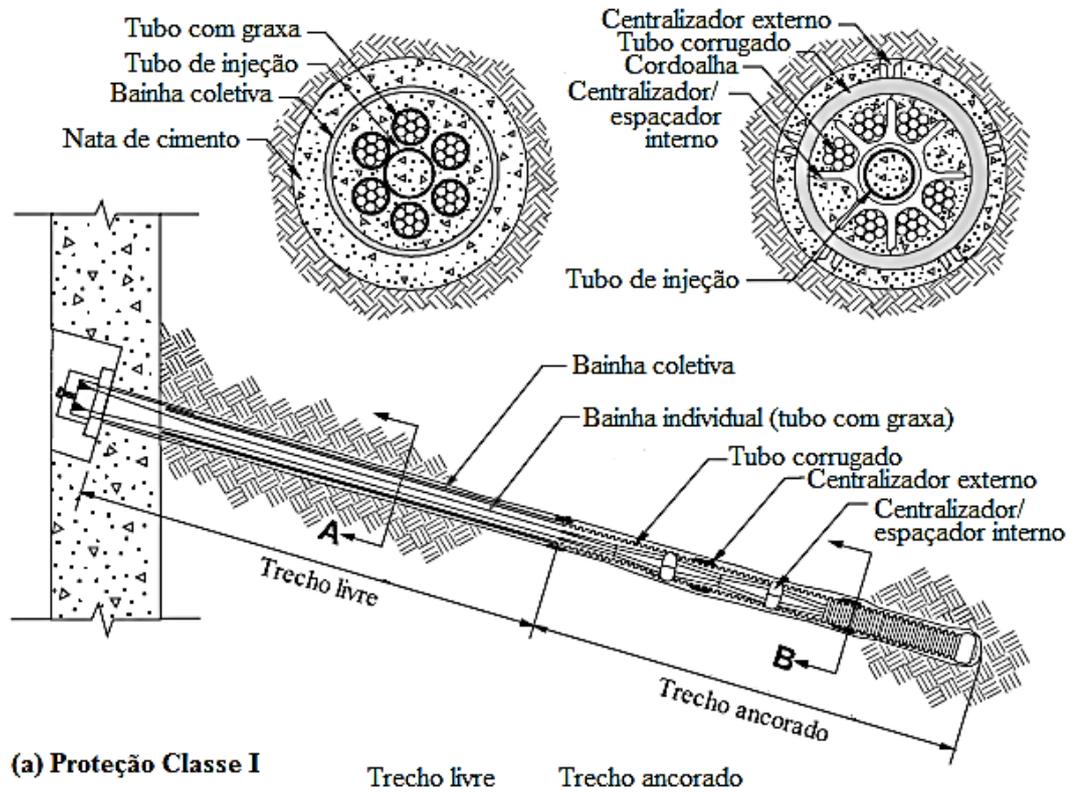
Figura 15 – Diagrama de decisão da proteção anticorrosiva



(fonte: adaptado de POST-TENSIONING INSTITUTE⁷, 1996 apud SABATINI et. al, 1999, p.134, tradução nossa)

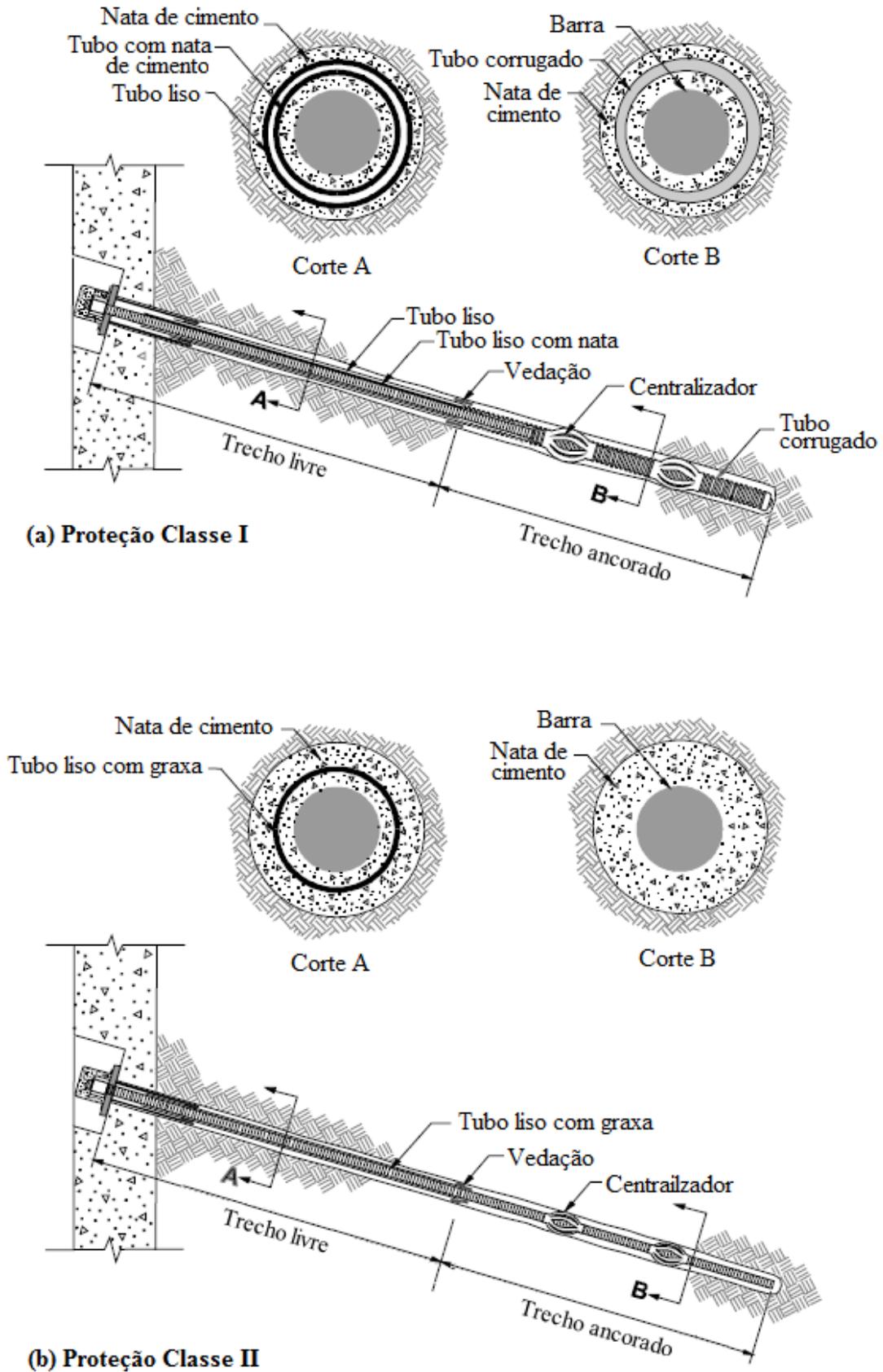
⁷ POST-TENSIONING INSTITUTE. **Recommendations for Prestressed Rock and Soil Anchors**. 3. ed. Phoenix, Arizona, 1996.

Figura 16 – Exemplo de proteção para tirantes de cordoalhas



(fonte: SABATINI et. al, 1999, p. 129, tradução nossa)

Figura 17 – Exemplo de proteção para tirantes de barra



(fonte: SABATINI et. al, 1999, p. 130, tradução nossa)

5.3.4.3 Proteção segundo a norma europeia

As especificações de proteção contra corrosão no continente europeu são feitas pela norma BS EN 1537 (BRITISH STANDARDS, 2000). Os requisitos mínimos de proteção são dados em função da vida útil do tirante. Alguns exemplos de proteção indicados pela Norma são apresentados na sequência.

Tirantes provisórios devem ter seu trecho livre protegido por bainha de tubo liso, podendo ser individual ou coletiva. O tubo pode ser plástico ou metálico (apenas para bainha coletiva), podendo ser preenchido por algum material que ofereça proteção contra corrosão. Caso seja garantida a vedação da bainha contra entrada de água, não é necessário o preenchimento. Entretanto, se o tirante tiver seu uso previsto para estender o prazo de dois anos ou estiver instalado em meio agressivo, é recomendado que se faça o preenchimento. No trecho ancorado, a proteção mínima deve ser feita pela cobertura dos elementos de aço com 10 mm de nata de cimento. Onde forem constatadas condições agressivas, é indicado o uso de um tubo corrugado ao redor dos elementos.

Para tirantes permanentes, a proteção do trecho livre deve ser feita com o uso de duas proteções. A BS EN 1537 (BRITISH STANDARDS, 2000) indica diversas opções, que são resumidas no quadro 4.

Quadro 4 – Trecho livre de tirantes permanentes segundo BS EN 1537:2000

1ª proteção	2ª proteção
Bainhas individuais de tubo liso preenchido por algum material flexível que ofereça resistência à corrosão	Bainha coletiva de tubo liso plástico preenchido por algum material flexível que ofereça resistência à corrosão
	Bainha coletiva de tubo liso plástico com vedação contra entrada de água e sem preenchimento
	Bainha coletiva de tubo liso plástico preenchido com nata de cimento
	Bainha coletiva de tubo liso metálico preenchido com nata de cimento
Bainhas individuais de tubo liso preenchido por nata de cimento	Bainha coletiva de tubo liso plástico preenchido por algum material flexível que ofereça resistência à corrosão
	Bainha coletiva de tubo liso plástico com vedação contra entrada de água e sem preenchimento
Bainha coletiva de tubo liso preenchido com nata de cimento (interna)	Bainha coletiva de tubo liso plástico com vedação contra entrada de água e sem preenchimento (externa)

(fonte: adaptado de BRITISH STANDARDS, 2000, p. 18)

Para o trecho ancorado são sugeridas menos alternativas, sendo algumas delas as seguintes:

- a) a proteção pode ser feita por um único tubo plástico corrugado, com injeção após a instalação do tirante, ou;
- b) por dois tubos plásticos corrugados concêntricos onde os espaços entre os dois tubos e entre o tubo interno e o elemento de aço devem ser preenchidos por nata de cimento antes da instalação do tirante no furo, ou;
- c) por um único tubo plástico corrugado envolvendo uma ou mais barras, com preenchimento de nata de cimento antes da instalação do tirante na perfuração e garantindo uma espessura de nata de cimento de no mínimo 5 mm entre a(s) barra(s) e o tubo.

5.3.5 Diâmetro da perfuração

A escolha do diâmetro de perfuração passa principalmente por questões executivas. Deve ser tal que possibilite a inserção dos elementos que compõem o tirante com seus componentes de proteção contra corrosão e permita a colocação do sistema de injeção (XANTHAKOS, 1991; YASSUDA E DIAS, 2008). Yassuda e Dias (1998) acrescentam afirmando que o diâmetro do furo não pode restringir a aplicação de múltiplos estágios de injeção. Caso o diâmetro seja muito grande, as válvulas de injeção podem não conseguir se abrir devido à espessa coroa de cimento que se forma. De acordo com Xanthakos (1991), a faixa usual de diâmetros de perfuração é de 75 a 150 mm. O autor ainda afirma que diâmetros maiores, para o caso de tirantes com um elevado número de barras ou cordoalhas, são menos comuns, pois a estrutura se torna muito pesada e perde a praticidade na operação. Ainda, o diâmetro deve ser tal que garanta o cobrimento mínimo dos elementos de tração por nata de cimento. No Brasil, a NBR 5629 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006) estipula um cobrimento mínimo de 2 cm. Nos Estados Unidos, Ohio Department of Transportation (2012) recomenda um mínimo de 1,3 cm, e na Europa, a BS EN 1537 (BRITISH STANDARDS, 2000) indica o valor de 1 cm. Estes cobrimentos devem ser garantidos com o auxílio de centralizadores e espaçadores.

6 PRÁTICAS DE EXECUÇÃO DE TIRANTES EM ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO

Definido o projeto dos tirantes com as devidas especificações técnicas, o bom funcionamento da ancoragem da estrutura de contenção deve ser assegurado com a correta execução desses tirantes. Nesse capítulo são abordados os tópicos de execução introduzidos no capítulo 4 com apresentação de algumas práticas correntes indicadas segundo a literatura, em manuais práticos de executores e normas técnicas. Os tópicos a serem apresentados são referentes aos procedimentos de preparo do tirante, perfuração, instalação, injeção, protensão, incorporação e proteção da cabeça.

6.1 INDICAÇÕES DE PREPARO DO TIRANTE

A etapa de preparo é a primeira etapa de execução de um tirante, e consiste na aplicação da proteção anticorrosiva definida anteriormente e na montagem do tirante.

6.1.1 Preparo do tirante segundo prática brasileira

No Brasil, a NBR 5629 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006, p. 8) indica, para a etapa de montagem do tirante, que:

- a) se utilize bancada especial, coberta e devidamente protegida contra as intempéries;
- b) o seu comprimento seja tal que garanta a dimensão total indicada no projeto, incluindo-se o tamanho necessário para a operação da protensão;
- c) as emendas (luvas, soldas, etc.) sejam toleradas, desde que se garanta, por ensaios, que a resistência destas atenda às cargas de projeto;
- d) sejam providos de dispositivos que garantam o cobrimento mínimo especificado;
- e) sejam providos de toda proteção anticorrosiva prevista para o tipo de tirante a ser executado, em seu trecho livre e ancorado [...].

Joppert Júnior (2007) acrescenta que, além dos comprimentos de projeto e da proteção contra corrosão, o executor deve respeitar a estrutura prevista no projeto no que tange à quantidade

de barras, fios ou cordoalhas. Sobre os acessórios para as emendas das barras, o autor ainda coloca que estes são fornecidos pelo próprio fabricante das barras. Na fase de montagem, a Associação Brasileira de Empresas de Fundações e Geotecnia (2012) acrescenta que devem ser montadas as válvulas de injeção do tirante no final desta etapa, e que na sequência os tirantes devem ser armazenados em local coberto e sem contato com o solo, de maneira que fiquem protegidos contra quaisquer tipos de danos.

6.1.2 Preparo do tirante segundo prática nos Estados Unidos

Sabatini et. al (1999) fazem recomendações desde a armazenagem e manuseio dos materiais. Indicam que os materiais sejam armazenados de acordo com as especificações dos fabricantes de modo a evitar danos mecânicos ou exposição às intempéries. No manuseio dos elementos, estes devem ser erguidos com um número de apoios suficiente para evitar o dobramento excessivo. A montagem deve ser feita com o cuidado necessário para preservar a integridade da proteção contra corrosão. No trecho ancorado, os elementos de tração devem estar livres de quaisquer sujeiras, lubrificantes, coberturas anticorrosivas ou outras substâncias que possam prejudicar a aderência com a nata de cimento ou a vida útil dos próprios elementos.

Xanthakos (1991) acrescenta, na questão do transporte dos materiais, que os elementos de tração não devem ser arrastados sobre superfícies abrasivas ou que possam conter materiais contaminantes. Quanto ao armazenamento, o autor adiciona que, para fios e cordoalhas, este seja feito em bobinas cujo diâmetro seja de no mínimo duzentas vezes o diâmetro do elemento.

6.1.3 Preparo do tirante segundo a BS EN 1537:2000

No continente europeu, as diretrizes executivas são colocadas pelo Eurocode 7 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2004) para a EN 1537. Neste trabalho é utilizada como referência a versão inglesa da norma, a BS EN 1537 (BRITISH STANDARDS, 2000)

As exigências da BS EN 1537 (BRITISH STANDARDS, 2000) são semelhantes às indicações já citadas no que diz respeito ao armazenamento dos materiais, ao cuidado no manuseio e no transporte para não comprometer a proteção anticorrosiva, e quanto à presença

de materiais que possam afetar a o contato entre a nata de cimento e o elemento de tração ou afetar sua vida útil.

6.2 INDICAÇÕES DE PERFURAÇÃO DO TERRENO

A perfuração do terreno para a instalação do tirante deve obedecer à locação do projeto, mas a escolha do método de perfuração acaba ficando por conta do executor. Os sistemas de perfuração mais comumente utilizados, conforme mencionado no capítulo 4, são através de rotação ou percussão. Um exemplo de equipamento é apresentado na figura 18.

Figura 18 – Equipamento de perfuração



(fonte: GRUPO BRASFOND, c[2015?])

6.2.1 Perfuração do terreno segundo prática brasileira

Quanto à escolha do sistema de perfuração, no Brasil, a recomendação feita pela NBR 5629 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006) é que qualquer método pode ser utilizado, desde que se mantenha o furo retilíneo e o diâmetro, a inclinação e o comprimento previstos no projeto. Ainda, devem ser garantidas: as condições de alinhamento

da perfuração; a estabilidade, garantindo a abertura do furo até a injeção, com a possibilidade de uso de fluidos estabilizantes que não sejam agressivos aos elementos do tirante nem interfiram na cura e/ou pega da nata de cimento; a resistência do terreno no trecho de ancoragem, potencial problema especialmente por encharcamento em solos coesivos; e o comportamento das estruturas vizinhas, quando houver.

Quanto à locação, a Norma não indica valores de tolerância a serem seguidos pelo executor, apenas que este siga as orientações previstas em projeto. Para evitar a interferência com estruturas no terreno vizinho, assim como o projetista, o executor deve solicitar ao proprietário da obra a ser executada que obtenha as informações necessárias para prever os eventuais desvios. Deve ser verificado, também, o cobrimento de terra mínimo de 5 m de solo sobre os tirantes para garantir a mobilização das tensões previstas em projeto. Como tolerâncias para locação e inclinação, a Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro (2014b) trabalha com valores de 50 mm e 3 graus, respectivamente.

Como uma tradicional empresa na execução de tirantes em território brasileiro, Solotrat Engenharia Geotécnica Ltda (2015) ainda indica a utilização de fluidos de perfuração, como água limpa, ar comprimido, fluido estabilizante, entre outros, para remover o material escavado de dentro do furo. A Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro (2014b) recomenda que esta lavagem seja feita com água da mesma qualidade utilizada na nata de cimento.

O diâmetro de perfuração segue a recomendação de projeto. Segundo a NBR 5629 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006), deve ser suficiente para comportar o tirante e seus sistemas de proteção, garantindo o cobrimento mínimo previsto.

Por fim, a NBR 5629 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006, p. 9) indica o preenchimento de boletins de perfuração, englobando ao menos as informações a seguir:

- a) tipo de equipamento e sistema de perfuração;
- b) identificação, diâmetro e inclinação do furo;
- c) diâmetro e comprimento do revestimento (quando usado);
- d) tipo de fluido de estabilização (quando usado);
- e) espessura e tipo de solo das camadas atravessadas;

f) datas de início e término do furo;

g) outras observações (perda de água e/ou ar, obstáculos encontrados, etc.).

6.2.2 Perfuração do terreno segundo prática nos Estados Unidos

Nos Estados Unidos, Sabatini et. al (1991) fazem as mesmas indicações a respeito da escolha do sistema de perfuração. Deixam a cargo do executor, desde que satisfeitas as condições de alinhamento, interferência com construções vizinhas, etc. Também não especifica tolerâncias para diferenças na execução, apenas sugere que siga as indicadas no projeto. Ainda, recomenda que a perfuração seja feita um pouco além do limite previsto para facilitar a operação de limpeza.

Ohio Department of Transportation (2012) indica a tolerância de 150 mm e 3 graus para a locação e a inclinação do tirante no momento da execução. Também sugere que seja aumentado o comprimento de perfuração para a acomodação de material escavado. O aumento sugerido é de 1 m.

A respeito da utilização de fluidos de estabilização para a escavação, Sabatini et. al (1991) fazem duas ressalvas. A utilização dos fluidos, que deve não deve afetar o tirante e que deve ser aprovada pelo projetista, não pode ser feita com lama bentonítica, pois esta pode enfraquecer a ligação da nata de cimento com o aço no trecho ancorado. Ainda, a coleta e o descarte dos fluidos são de responsabilidade do executor. Ohio Department of Transportation (2012) não menciona o uso de fluidos estabilizantes, apenas que se utilize revestimento no furo quando este for instável.

6.2.3 Perfuração do terreno segundo BS EN 1537:2000

Na Europa, a norma BS EN 1537 (BRITISH STANDARDS, 2000) corrobora com as indicações apresentadas até então. Recomenda a escolha do sistema de perfuração que melhor se adeque ao terreno e indica uma tolerância de 75 mm na locação do eixo do furo, 2 graus para a inclinação e um desvio total de 1/30 do comprimento total do tirante. Para garantir a direção da perfuração, recomenda que seja verificada após a escavação avançar 2 m. Podem ser utilizados revestimentos e fluidos estabilizantes, desde que não prejudiquem o tirante conforme já mencionado. Durante a execução do furo deve ser identificado o material

escavado, observando as variações de material e de comportamento do solo, e nos casos mais severos comunicar imediatamente ao projetista.

6.3 INDICAÇÕES DE INSTALAÇÃO

Com o tirante montado e o terreno devidamente perfurado, procede-se à instalação do tirante. Nesta etapa é feita a verificação dos serviços prévios e, após atestada a qualidade dos mesmos, é feita a inserção do tirante no terreno.

Nesse tópico as recomendações gerais e práticas são unânimes. É indicada a inspeção de todos os elementos do tirante (trecho livre e ancorado, proteções, espaçadores, centralizadores) imediatamente antes da sua inserção no terreno. Caso algum item esteja fora das conformidades deve ser reparado antes da instalação. A perfuração deve ser verificada quanto à locação e profundidade previstas em projeto. Também deve ser efetuada a limpeza no interior do furo para assegurar a correta inserção do tirante, sem interferir na sua integridade (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006; BRITISH STANDARDS, 2000; JOPPERT JÚNIOR, 2007; SABATINI et. al, 1999; XANTHAKOS, 1991).

6.4 INDICAÇÕES DE INJEÇÃO

O procedimento de injeção deve ser realizado com atenção para garantir as condições previstas em projeto. A correta execução deve proporcionar a proteção contra corrosão esperada e garantir a resistência às cargas de projeto.

6.4.1 Injeção segundo prática brasileira

A NBR 5629 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006) coloca a critério do executor a escolha do tipo de injeção a ser empregado. As condições são que o a perfuração seja completamente preenchida e a capacidade de carga do tirante seja garantida. Ainda, permite que o preenchimento do furo seja feito antes da instalação do tirante.

No caso de injeção em fase única, a Norma indica o simples preenchimento da perfuração, podendo ser aplicada pressão apenas na boca do furo. A injeção deve ocorrer pelo método ascendente, ou seja, no sentido do fundo para a boca. De acordo com Yassuda e Dias (1998),

esta prática é comum nos casos de tirantes com cargas baixas (tirantes de barra) onde o trecho ancorado se encontra em algum material competente, como rochas, onde o acréscimo de pressão na injeção não causará aumento considerável do bulbo ou aumento da interação bulbo/cimento.

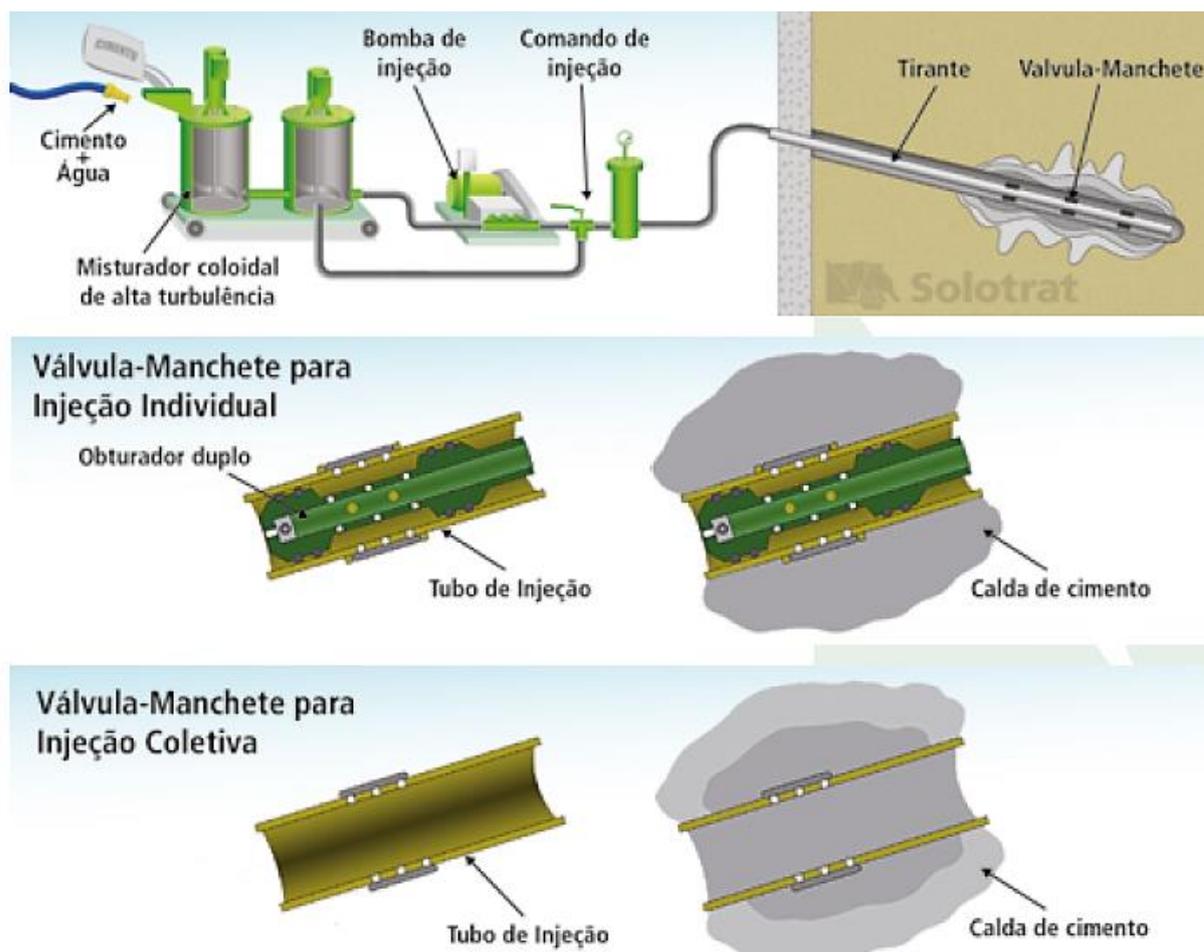
A injeção em fases múltiplas, com o auxílio das válvulas manchetes, pode ser executada em quantas etapas forem necessárias, desde que aguardado o período de pega do cimento da etapa anterior (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006). Joppert Júnior (2007) recomenda que a aplicação seja feita com bomba de injeção com capacidade mínima de 50 kg/cm^2 . Segundo o autor, na prática brasileira são utilizadas pressões mínimas de 20 kg/cm^2 , com limite máximo de 60 kg/cm^2 para a abertura das válvulas. A Associação Brasileira de Empresas de Engenharia de Fundações e Geotecnia (2012) complementa recomendando a lavagem o tubo e da composição de injeção após cada etapa, permitindo que seja feita a próxima fase de injeção.

Em ambos os casos, Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro (2014b) e Associação Brasileira de Empresas de Engenharia de Fundações e Geotecnia (2012) destacam a importância de equipamentos que possuam dispositivos de medição de volume e pressão, dados estes que devem ser registrados em boletins de campo em cada estágio. A NBR 5629 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006) aconselha que a pressão e o volume de injeção sejam controlados de modo a não causar interferências no terreno vizinho.

Quanto ao aglutinante a ser utilizado, a NBR 5629 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006) permite o uso de calda de cimento, argamassa, ou algum outro produto que tenha eficiência comprovada. Para a calda de cimento, a Norma recomenda algumas especificações. Na execução da bainha, a resistência deve superar 25 MPa aos 28 dias, sendo sugerida a adoção de fator água/cimento igual a 0,5. Para as etapas de reinjeção, este valor pode variar entre 0,5 e 0,7. O uso de aditivos não é recomendado, mas é tolerado caso comprovado que não afetem o tirante ao longo de sua vida útil. A quantidade de sacos de cimento a ser utilizada na primeira fase de reinjeção, segundo Solotrat Engenharia Geotécnica Ltda (2015), é limitada em um saco por válvula manchete. Nas demais fases, Solotrat Engenharia Geotécnica Ltda (2015) e Joppert Júnior (2007) afirmam ser usual a adoção de 0,5 saco de cimento por manchete. A injeção individual em cada manchete é

possível de ser realizada com a utilização de um obturador duplo. De acordo com Solotrat Engenharia Geotécnica Ltda (2015), obturador duplo é um acessório instalado na extremidade da coluna de injeção que permite que o fluxo da calda de cimento ocorra somente ortogonalmente ao seu eixo e entre dois sistemas de vedação. Um esquema de injeção, mostrando os sistemas de injeção individual e coletiva, é apresentado na figura 19.

Figura 19 – Esquema de injeção



(fonte: SOLOTRAT ENGENHARIA GEOTÉCNICA LTDA, 2015, p. 26)

6.4.2 Injeção segundo prática nos Estados Unidos

Na prática americana, o preenchimento da perfuração também pode ocorrer antes ou depois da instalação do tirante. Caso tenha ficado aberto por mais de oito a doze horas antes da injeção ou instalação, o furo deve ser limpo novamente. Quando a instalação de tirantes de cordoalhas for feita após o preenchimento do furo, a nata de cimento deve permitir a

colocação sem a perda de alinhamento das cordoalhas (POST-TENSIONING INSTITUTE⁸, 1996 apud SABATINI et. al, 1999).

Xanthakos (1991) afirma que o preenchimento pode ser feito de duas maneiras, em um, ou dois estágios. Quando feito em único estágio, os trechos livre e ancorado são preenchidos em uma única vez, sendo necessária a correta execução da bainha com graxa no trecho livre para que não haja mobilização de atrito com o solo nessa região. Em dois estágios, é feito o preenchimento do trecho ancorado, depois é feita a protensão, e a seguir é preenchido o trecho livre. Nesse caso, a criação de uma junta na interface dos trechos livre e ancorado aparece como desvantajosa, pois fica mais vulnerável à corrosão. Dessa maneira, Sabatini et. al (1999) e Ohio Department of Transportation (2012) recomendam o preenchimento com nata de cimento em uma única etapa. Deve ser feito de maneira ascendente, com aplicação de pressão apenas no trecho ancorado. No trecho livre, a nata de cimento deve ser injetada com baixa pressão ou pressão gravitacional. O preenchimento deve ser feito até aproximadamente 300 a 600 mm antes do tubo de proteção da ancoragem (*trumpet*). Se a nata chegar até o *trumpet*, Ohio Department of Transportation (2012) afirma que esta nata deve ser removida antes que endureça.

O equipamento de injeção deve ser provido de medidor de pressão. O volume de nata deve ser medido e registrado. A razão entre este volume e o volume teórico da perfuração deve ser observada no sentido de monitorar perdas. Quando o valor da razão for muito elevado, pode haver perda de nata por ruptura hidráulica do solo, por preenchimento de vazios no solo gerados na etapa de perfuração ou por preenchimento de vazios pré-existentes (SABATINI et. al, 1999).

Os tubos de injeção utilizados, quando não forem retirados, devem permanecer preenchidos pela nata de cimento. Quando forem executados estágios posteriores de injeção, é reiterada a necessidade da instalação dos mecanismos de reinjeção na etapa de montagem do tirante e que esta injeção sob altas pressões só deve ocorrer no trecho ancorado (OHIO DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, 2012; SABATINI et. al, 1999).

⁸ POST-TENSIONING INSTITUTE. **Recommendations for Prestressed Rock and Soil Anchors**. 3. ed. Phoenix, Arizona, 1996.

6.4.3 Injeção segundo BS EN 1537:2000

No continente europeu, a regulamentação da BS EN 1537 (BRITISH STANDARDS, 2000) é mais detalhada. A Norma recomenda a consideração de três operações distintas para a correta injeção sem perda excessiva de nata de cimento: testes da perfuração, pré-injeção e injeção do tirante.

Os testes da perfuração tem a intenção de garantir que todo o comprimento ancorado estará devidamente preenchido após a injeção, sem perdas significativas de aglutinante. Estes testes podem ser feitos com água ou com a própria nata de cimento. Quando feito com água, o furo deve ser preenchido por água e medida a taxa de absorção do solo. Quando a taxa for inferior a 5 l/min, com uma pressão de 0,1 MPa e medida por um período de dez minutos, a etapa de pré-injeção é desnecessária. Quando o teste for feito com a nata de cimento, deve-se preencher o furo com a nata e observada a variação de nível até que fique estável. Caso continue diminuindo, deve-se tampar o furo e aguardar que a nata enrijeça. Na sequência a perfuração do terreno é feita novamente e o teste é repetido. Nos casos de tirantes onde o trecho ancorado será injetado sob pressão, o teste pode ser feito monitorando a resposta do solo a injeções com pressão.

Caso os testes da perfuração não apresentem resultados satisfatórios, a Norma indica a realização de pré-injeção. Nessa etapa, o furo é preenchido e, após a pega do aglutinante, é feita nova perfuração e seus respectivos testes. É importante nos casos de ancoragem em rocha onde o teste com água indique que pode haver interação com outro tirante adjacente. Também, em ancoragens em solo de alta permeabilidade ou que, quando for feita injeção sob pressão, não são capazes de manter pressão residual. Para solos muito permeáveis, ao invés da nata apenas com cimento, pode ser utilizada mistura solo/cimento na fase de pré-injeção.

A injeção propriamente dita do tirante é executada da mesma maneira indicada nos outros locais. A injeção pode ser em estágio único ou estágios múltiplos, sendo feita no sentido do fundo para a boca do furo para evitar presença de ar ou água. A nata de cimento deve ser injetada com a mangueira de injeção dentro do trecho ancorado até que a nata transborde com a mesma consistência da nata injetada.

6.5 INDICAÇÕES PARA PROTENSÃO

A fase de protensão é executada seguindo as regulamentações locais. Antes da aplicação da carga definitiva de incorporação, são realizados os testes necessários para garantir a qualidade da execução das fases anteriores e verificar o dimensionamento feito na fase de projeto.

6.5.1 Ensaios de protensão segundo prática brasileira

Conforme introduzido anteriormente, no Brasil a NBR 5629 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006) exige a realização de quatro ensaios: ensaio de recebimento, ensaio de qualificação, ensaio básico e ensaio de fluência. A aplicação de cargas nos ensaios deve ser feita na direção do eixo do tirante, respeitando o período de cura do cimento utilizado no trecho ancorado, e utilizando conjunto manômetro-macaco-bomba hidráulico com aferição em intervalos máximos de um ano.

6.5.1.1 Ensaio de qualificação

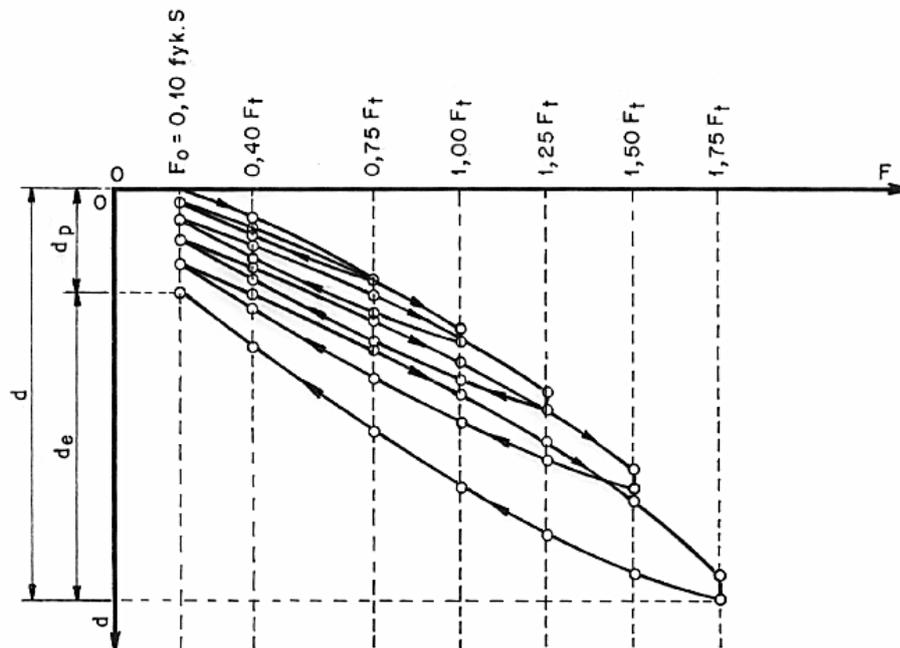
Este ensaio deve ser realizado em ao menos 1% dos tirantes da obra, por tipo de terreno e de tirante, sendo necessários no mínimo dois ensaios por obra. São procedidos ciclos de carga e descarga, a partir de uma carga inicial (F_0), passando pelos estágios de carregamento de 40%, 75%, 100%, 125% e 150% da carga de trabalho para tirantes provisórios e até 175% da carga de trabalho para tirantes permanentes. As cargas devem ser aplicadas e medidas através de correlação com a pressão indicada no manômetro do conjunto manômetro-macaco-bomba utilizado, sem ultrapassar o valor de 90% da carga de tração característica do aço.

Primeiramente é aplicada a carga F_0 , dada pelo valor de 10% do produto da seção do aço utilizado e da sua resistência característica à tração. Na sequência, após a estabilização da pressão do manômetro do conjunto de protensão, é aplicado o primeiro estágio de carga (40% da carga de trabalho). Quando a pressão estiver estabilizada, é feita a medida do deslocamento da cabeça do tirante com régua graduada, na direção da tração aplicada, a partir de um ponto fixo na cabeça do tirante até um referencial fixo em local sem influência dos movimentos do solo ou da estrutura. A seguir, o procedimento de carregamento e leitura de deslocamento é repetido com o segundo estágio de carga (75%⁹ da carga de trabalho). A partir desse estágio,

⁹ Valor corrigido pelo autor após análise do gráfico da figura 20. A NBR 5629:2006 indica o valor de 175%.

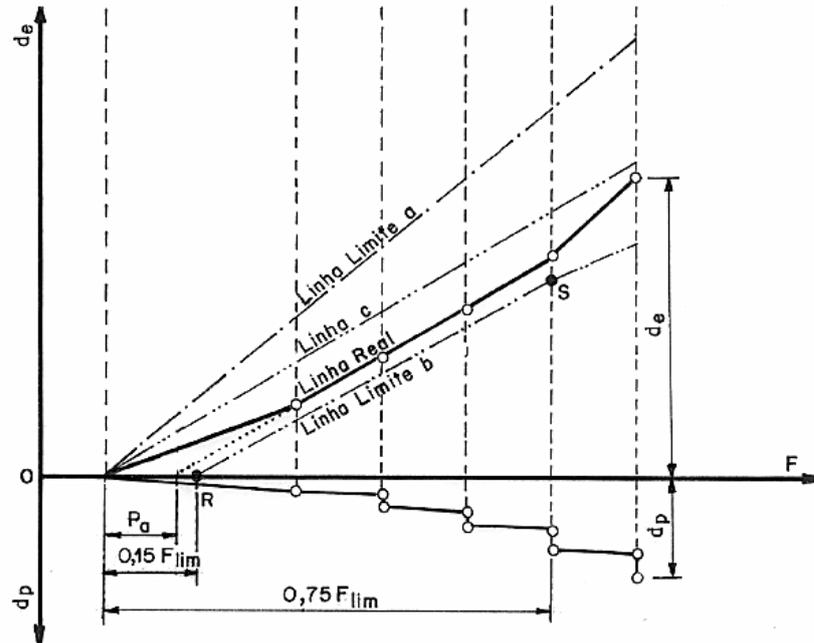
ao fim de cada carregamento e posterior leitura de deslocamentos é feita a descarga do tirante até a carga F_0 , sendo medidos os deslocamentos novamente. Antes de cada alívio de carga devem ser medidos os deslocamentos até a estabilização. Para cargas menores ou iguais a 75% da carga de trabalho, deslocamentos menores do que 0,1 mm medidos em intervalos de 5 minutos são considerados estabilizados. Da mesma maneira, para cargas entre 75% e 100% da carga de trabalho com medições em intervalos de quinze minutos para solos arenosos e trinta minutos para solos não arenosos. Para cargas superiores a 100% da carga de trabalho até o limite do ensaio, os deslocamentos são considerados estabilizados quando forem menores do que 0,1 mm para intervalos de sessenta minutos. Com estes dados, é possível se construir o gráfico de cargas *versus* deslocamentos conforme apresentado na figura 20 e obter os valores de deformação permanente (d_p) e elástica (d_e). Os dados permitem, também, a construção dos gráficos de cargas *versus* deslocamentos elásticos e permanentes, conforme figura 21, utilizado para a avaliação do tirante no ensaio.

Figura 20 – Cargas x deslocamentos totais no ensaio de qualificação



(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS, 2006, p. 22)

Figura 21 – Repartição em deslocamentos elástico e permanente no ensaio de qualificação



(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS, 2006, p. 22)

No gráfico da figura 20, a linha limite superior (linha “a”) representa o deslocamento elástico da cabeça de um tirante com o comprimento livre (L_L) mais metade do comprimento ancorado (L_b). Este deslocamento é representado pela fórmula 10¹⁰.

$$d_{ea} = \frac{(F - F_0)(L_L + L_b/2)}{E * S} \quad (\text{fórmula 10})$$

Sendo:

d_{ea} = deslocamento na linha “a”, em m;

F = carga aplicada, em kN;

F_0 = carga inicial, em kN;

L_L = comprimento livre, em m;

L_b = comprimento ancorado, em m;

E = módulo de elasticidade do material resistente à tração, em kPa;

S = menor seção do elemento resistente à tração, em m².

¹⁰ Fórmula corrigida pelo autor após análise dimensional e comparação com a versão anterior da Norma (NBR 5629:1996). A fórmula apresentada pela NBR 5629:2006 é: $(F-F_0)(FL_L+L_b/2)/ES$

A linha limite inferior (linha “b”) representa o deslocamento da cabeça de um tirante com o comprimento livre diminuído de 20%. Este deslocamento é representado pela fórmula 11.

$$d_{eb} = 0,8 * \frac{(F - F_0)L_L}{E * S} \quad (\text{fórmula 11})$$

Sendo:

d_{eb} = deslocamento na linha “b”, em m;

Segundo a Norma, a existência de maiores perdas relativas por atrito nos primeiros carregamentos causa diminuição no alongamento. Deste modo, a consideração deste efeito é feita a partir da deflexão da linha inferior entre os pontos “R” e “S”. As coordenadas dos pontos, em função do deslocamento (d) e da carga aplicada (F), são dadas pelas fórmulas 12, 13 e 14.

Para o ponto R, onde a coordenada do deslocamento é nula ($d' = 0$):

$$F' = F_0 + 0,15 * FS * F_t \quad (\text{fórmula 12})$$

Sendo:

F' = coordenada do ponto R no eixo das cargas aplicadas

FS = fator de segurança (1,5 para tirantes provisórios e 1,75 para permanentes);

F_t = carga de trabalho, em kN.

Para o ponto S:

$$d'' = \frac{0,6 * FS * F_t * L_L}{E * S} \quad (\text{fórmula 13})$$

Sendo:

d'' = coordenada do ponto S no eixo dos deslocamentos;

$$F'' = F_0 + 0,75 * FS * F_t \quad (\text{fórmula 14})$$

Sendo:

F'' = coordenada do ponto S no eixo das cargas aplicadas.

A linha média (linha “c”) representa o alongamento teórico do trecho livre. A fórmula 15 direciona o traçado da linha.

$$d_{ec} = \frac{(F - F_0)L_L}{E * S} \quad (\text{fórmula 15})$$

Sendo:

d_{ec} = deslocamento na linha “c”, em m.

Ainda, é possível se obter o valor do comprimento livre efetivo do tirante, definido como sendo o trecho efetivo de alongamento do tirante quando são aplicadas cargas. Pode ser obtido a partir da inclinação do trecho aproximadamente reto da curva de deslocamentos elásticos. A fórmula 16 representa o cálculo desse comprimento.

$$L_{Le} = \frac{\Delta d_e}{\Delta F} * E * S \quad (\text{fórmula 16})$$

Sendo:

L_{Le} = comprimento livre efetivo, em m;

Δd_e = variação de deslocamento em dois pontos quaisquer do trecho reto, em m;

ΔF = variação de força correspondente a Δd_e , em kN;

O prolongamento desta reta até o eixo das forças resulta em uma aproximação da perda de carga por atrito no trecho livre na protensão, dada no gráfico no ponto P_a .

O tirante será considerado aprovado após duas análises. Primeiro, os pontos referentes aos deslocamentos elásticos devem estar entre as linhas limite superior e inferior. Por fim, a perda de carga no trecho livre dada pelo segmento P_a deve ser menor ou igual ao segmento que vai de F_0 até R.

6.5.1.2 Ensaio básico

O ensaio básico é feito com a finalidade de se observar a conformação do bulbo de ancoragem, a centralização do tirante no trecho ancorado, a qualidade de injeção e a definição do comprimento livre do tirante. Após o ensaio de qualificação, é feita a escavação do tirante. Assim, o comportamento do tirante sob a ação de carga por meio dos deslocamentos elástico e permanente e da capacidade de carga pode ser verificado por inspeção visual.

6.5.1.3 Ensaio de recebimento

No ensaio de recebimento, todos os tirantes da obra são ensaiados. Os carregamentos aplicados variam em função da sua vida útil, conforme apresentado na quadro 5. Para tirantes definitivos, em pelo menos 10% deles deve ser feito ensaio tipo A e, nos restantes, ensaio tipo B. Em tirantes provisórios devem ser executados ensaios tipo C em 10% dos tirantes e tipo D nos restantes. As cargas do ensaio são função da carga de trabalho do **tirante (f_t) e partem** da carga inicial F_0 .

Quadro 5 – Cargas a serem aplicadas no ensaio de recebimento

Tirante	Ensaio	Estágios de carga e descarga
Permanente	Tipo A	F_0 e 0,3 F_t ; 0,6 F_t ; 0,8 F_t ; 1,0 F_t ; 1,2 F_t ; 1,4 F_t ; 1,6 F_t ; 1,75 F_t
Permanente	Tipo B	F_0 e 0,3 F_t ; 0,6 F_t ; 0,8 F_t ; 1,0 F_t ; 1,2 F_t ; 1,4 F_t
Provisório	Tipo C	F_0 e 0,3 F_t ; 0,6 F_t ; 0,8 F_t ; 1,0 F_t ; 1,2 F_t ; 1,5 F_t
Provisório	Tipo D	F_0 e 0,3 F_t ; 0,6 F_t ; 0,8 F_t ; 1,0 F_t ; 1,2 F_t

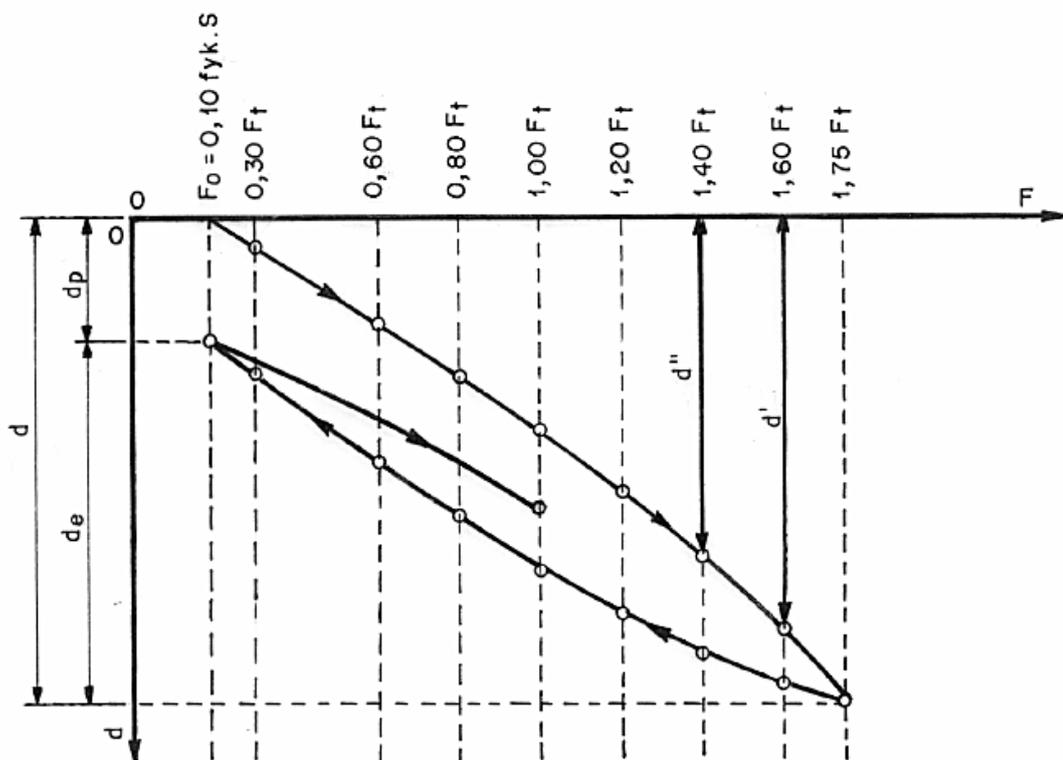
(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS, 2006, p. 16)

Primeiramente é feita a aplicação da carga F_0 ao tirante, sem medida de deslocamentos. Na sequência, após a estabilização da pressão do manômetro do conjunto de protensão, é aplicado o primeiro estágio de carga. Quando a pressão estiver estabilizada, é feita a medida do deslocamento da cabeça do tirante com régua graduada, na direção da tração aplicada, a partir de um ponto fixo na cabeça do tirante até um referencial fixo em local sem influência dos movimentos do solo ou da estrutura. O procedimento de aplicação de cargas e leitura dos

deslocamentos é repetido até o último estágio previsto. Após a leitura do deslocamento no último estágio, é feita a descarga até F_0 , sendo feita nova leitura de deslocamentos. Por fim, é feito um novo carregamento até a carga de trabalho e leitura do deslocamento. Com estes dados é possível a construção dos gráficos de cargas x deslocamentos de maneira análoga ao ensaio de qualificação e conforme apresentado pelas figuras 22 a 29. Estes boletins gráficos são a forma de apresentação dos resultados dos ensaios.

Para que o ensaio seja aceito, os deslocamentos da cabeça devem ser menores do que 1mm em intervalos de 5 minutos para solos arenosos e de 10 minutos para solos não arenosos, quando aplicada a carga máxima. Ainda, o deslocamento máximo da cabeça deve estar situado entre as linhas superior e inferior (linhas “a” e “b”) dos gráficos construídos anteriormente¹¹.

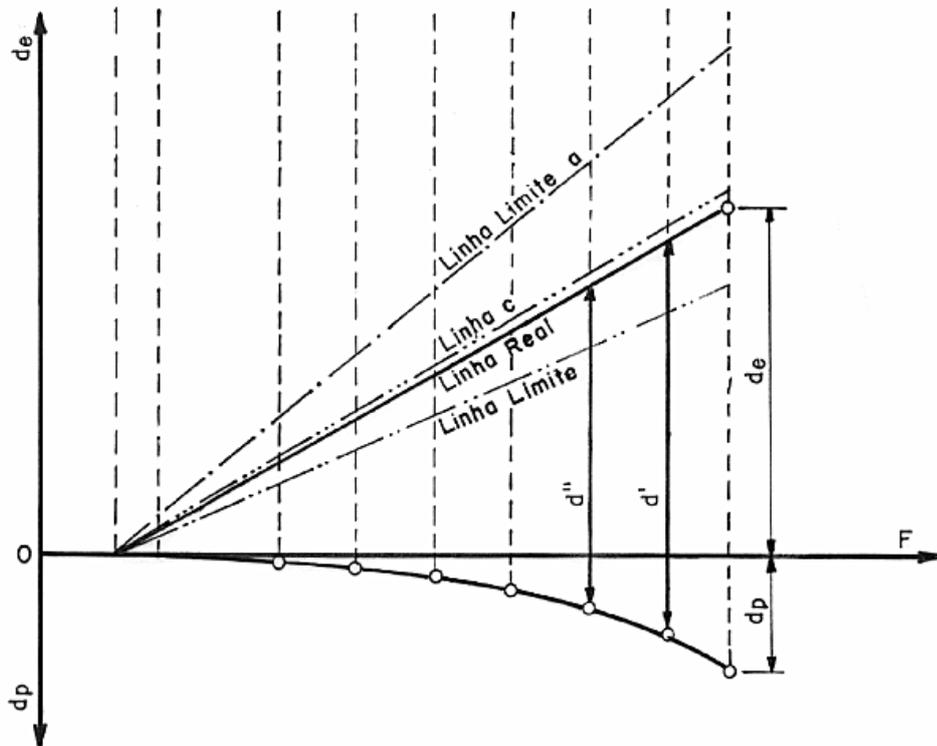
Figura 22 – Cargas e deslocamentos totais no ensaio de recebimento tipo A



(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS, 2006, p. 23)

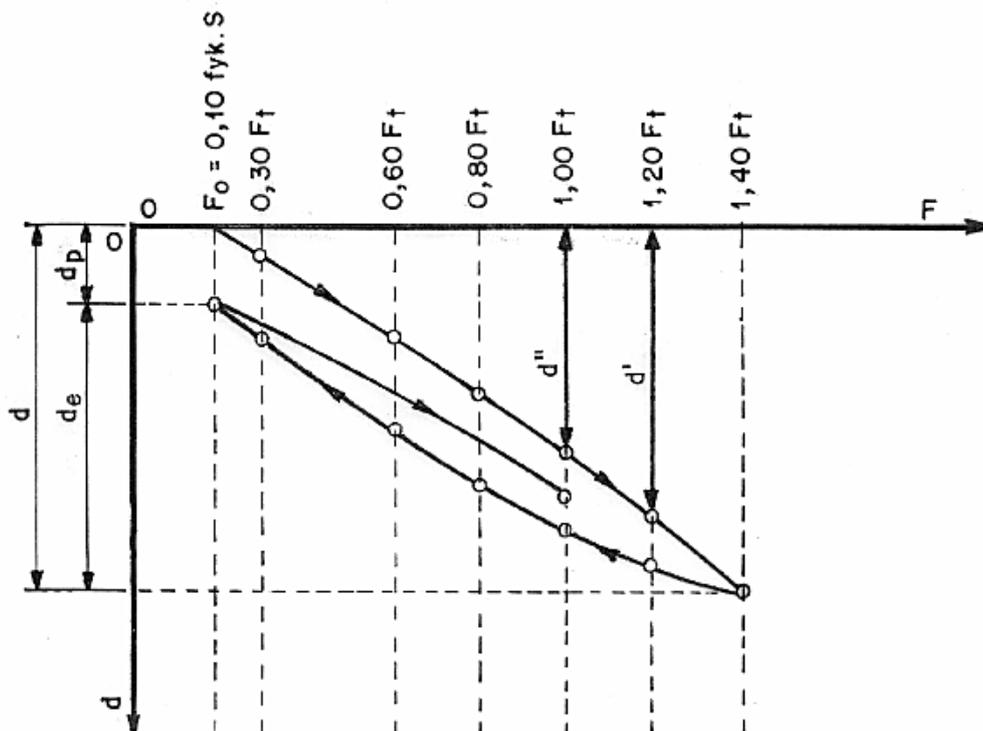
¹¹ Informação corrigida após análise dos gráficos e comparação com a versão anterior da Norma (NBR 5629:1996). A NBR 5629:2006, em seu item 5.7.2.3.7-b), indica que o deslocamento deve estar fora das linhas superior e inferior.

Figura 23 – Repartição em deslocamentos elástico e permanente no ensaio de recebimento tipo A



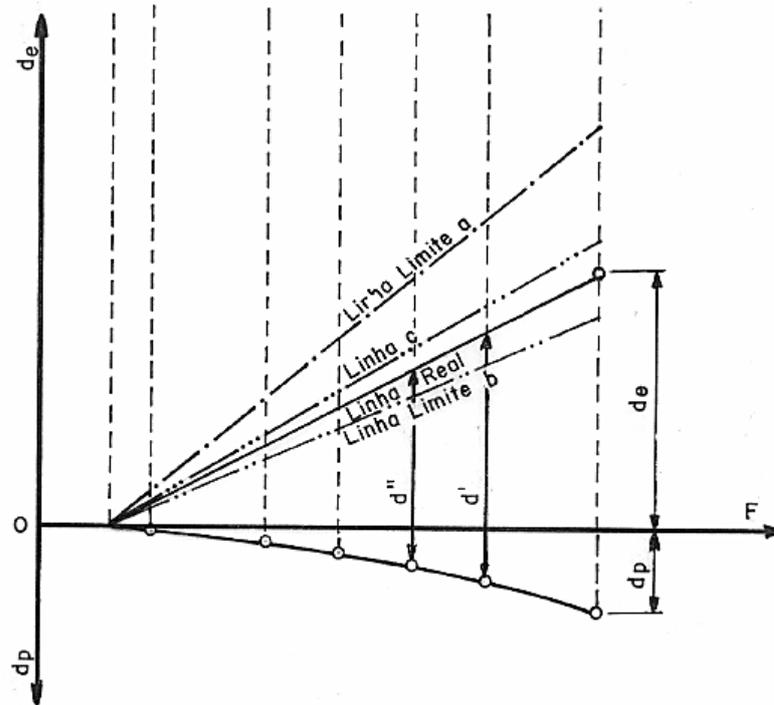
(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS, 2006, p. 23)

Figura 24 – Cargas e deslocamentos totais no ensaio de recebimento tipo B



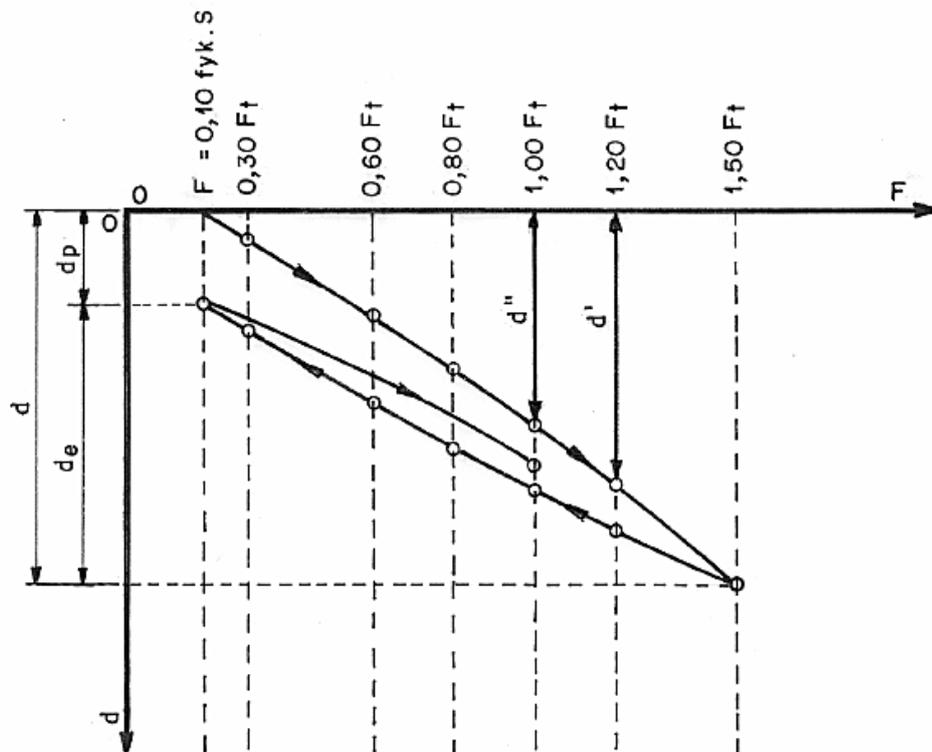
(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS, 2006, p. 24)

Figura 25 – Repartição em deslocamentos elástico e permanente no ensaio de recebimento tipo B



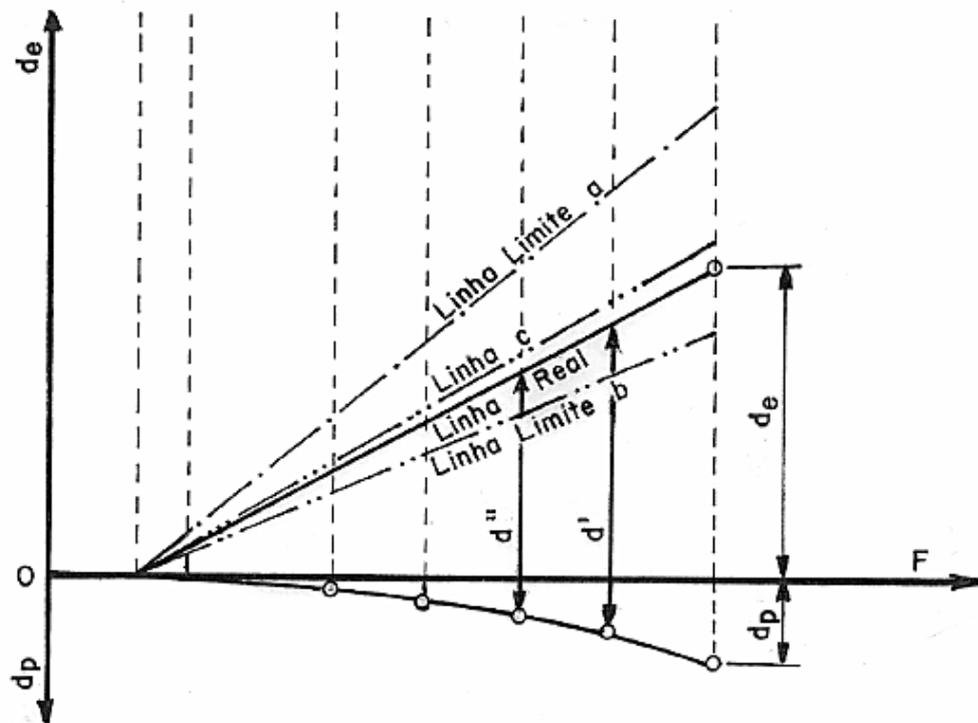
(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS, 2006, p. 24)

Figura 26 – Cargas e deslocamentos totais no ensaio de recebimento tipo C



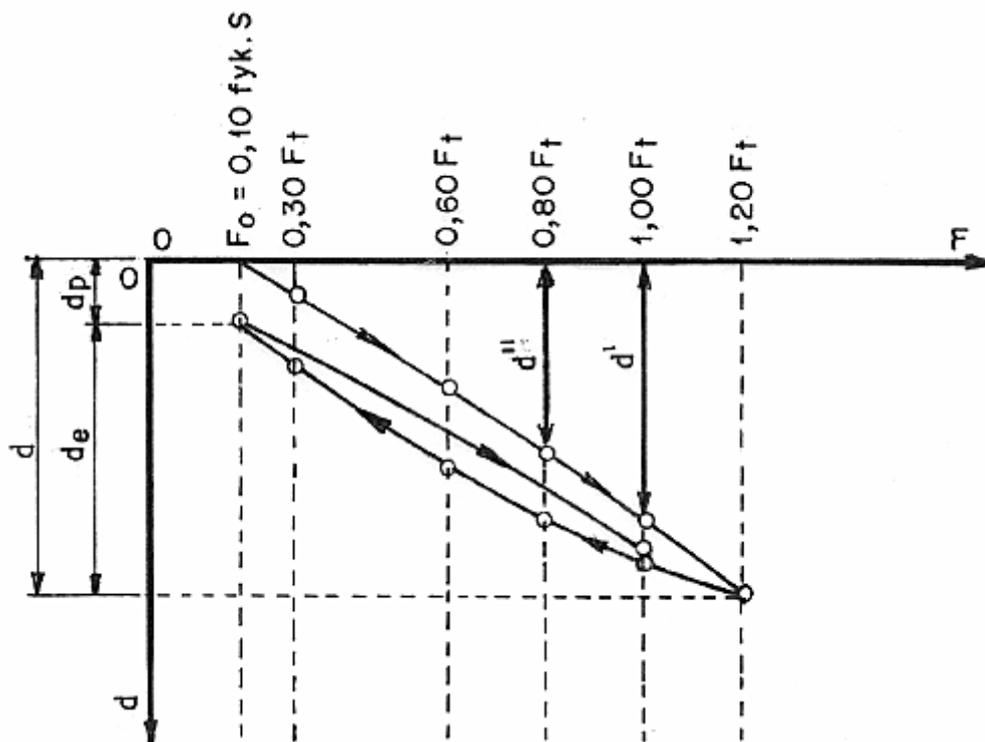
(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS, 2006, p. 25)

Figura 27 – Repartição em deslocamentos elástico e permanente no ensaio de recebimento tipo C



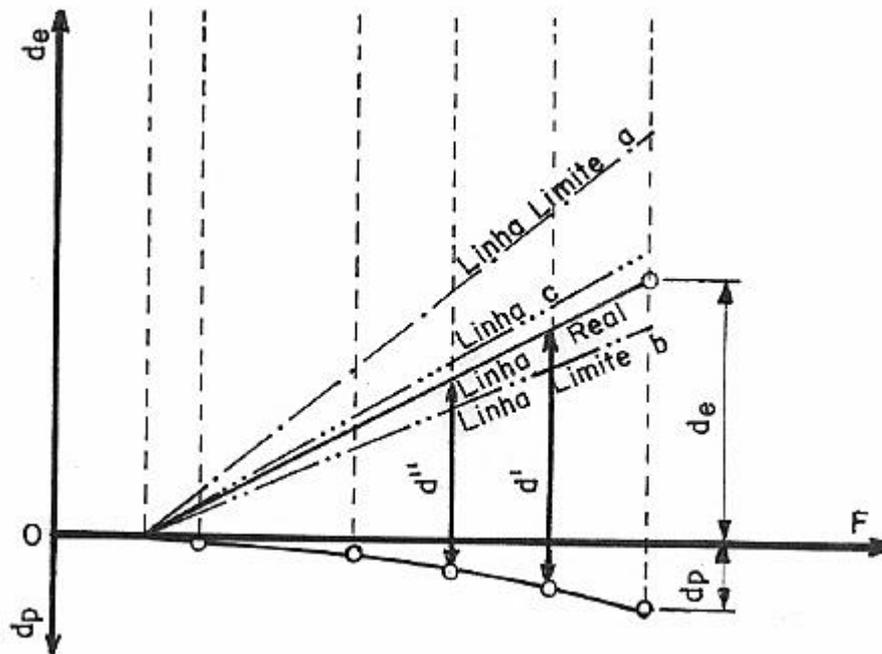
(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS, 2006, p. 25)

Figura 28 – Cargas e deslocamentos totais no ensaio de recebimento tipo D



(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS, 2006, p. 26)

Figura 29 – Repartição em deslocamentos elástico e permanente no ensaio de recebimento tipo D



(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS, 2006, p. 26)

Se o tirante não resistir à carga máxima prevista para o ensaio, o método executivo e o comprimento do trecho ancorado devem ser revistos, e, ainda, o ensaio tipo A deve ser realizado nos próximos cinco tirantes executados. Ainda, o tirante pode ser aceito com carga igual à maior carga estabilizada no ensaio dividida pelo fator de segurança adotado, desde que seja feita a verificação do projeto e execução de ensaio de fluência neste tirante. Também pode ser feito outro tirante no mesmo local ou em local próximo, desde que verificado o projeto, ou, se o tirante for reinjetável, pode ser feita nova injeção e repetição do ensaio.

Caso o deslocamento da cabeça do tirante não satisfaça a condição de estar entre as linhas superior e inferior, a Norma recomenda quatro processos: repetição do ciclo de carga para soltar o trecho livre; reavaliação do projeto para verificar a possibilidade de aprovação do tirante; redução, no trecho ancorado, do acréscimo de atrito observado no trecho livre, caso aceito o tirante; e realização do ensaio de qualificação.

6.5.1.4 Ensaio de Fluência

O ensaio de fluência pode ser realizado de maneira conjunta com o ensaio de qualificação, uma vez que possui as mesmas especificações de número mínimo de ensaios por obra e os

mesmos ciclos de cargas (até 175% da carga de trabalho). Neste ensaio, devem ser feitas as medições dos deslocamentos da cabeça do tirante, após a protensão com carga constante, no mínimo em intervalos de 10, 20, 30, 40,50 e 60 minutos, para cada estágio de carregamento. Se os deslocamentos nos últimos 30 minutos forem inferiores a 5% do deslocamento total do ensaio, as medições até 60 minutos são suficientes. Se esta condição não for satisfeita, devem ser feitas mais medições a cada 30 minutos até que seja satisfeita.

Para efetuar as medições de cargas, estas devem ser mantidas com o máximo de estabilidade possível. É tolerada uma variação máxima de 3% do valor base do ensaio, para mais ou para menos. Os deslocamentos da cabeça, medidos a partir da carga inicial F_0 , devem ser medidos com dois extensômetros com resolução de 0,01 mm instalados diametralmente opostos em relação ao eixo do tirante. Assim como nos outros ensaios, deve ser feita a medição no sentido da tração aplicada e com referencial seguramente fora da influência de deformações provocadas pela protensão ou por outra fonte de perturbação. Ainda, com a finalidade de manter a precisão dos resultados, é recomendado restringir o tráfego nas proximidades do local do ensaio e o proteger da incidência direta do sol.

Os dados das medições permitem proceder a construção dos gráficos apresentados pelas figuras 30 e 31. De posse dos gráficos, deseja-se obter os valores de coeficientes de fluência para cada estágio de carregamento. Estes coeficientes são dados pelas inclinações das retas que melhor ajustam os pontos do gráfico do deslocamento x log (tempo) da figura 31. Para facilitar a execução, a Norma sugere que o cálculo seja feito a partir da fórmula 17.

$$C_F = \frac{d_2 - d_1}{\log t_2 - \log t_1} \quad (\text{fórmula 17})$$

Sendo:

C_F = coeficiente de fluência;

d_1 = deslocamento em um ponto qualquer da reta;

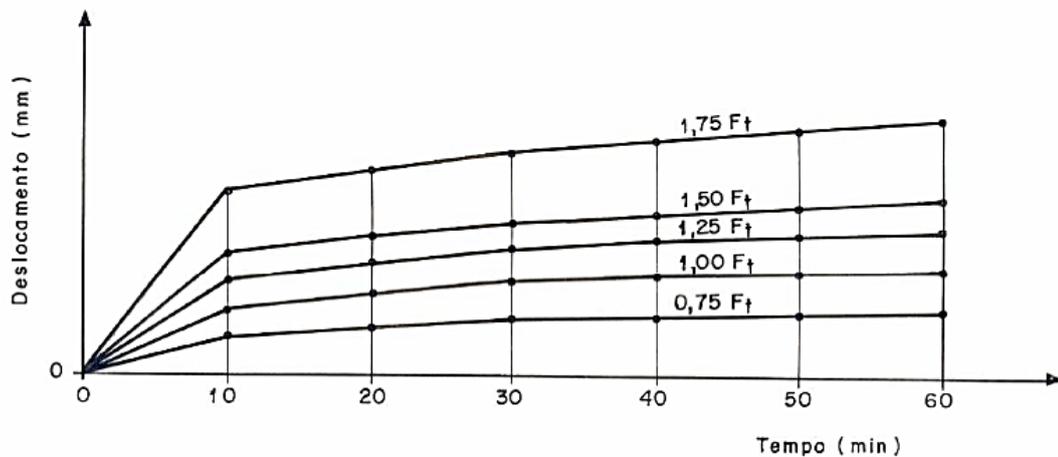
d_2 = deslocamento em qualquer outro ponto da reta;

t_1 = tempo correspondente a d_1 ;

t_2 = tempo correspondente a d_2 .

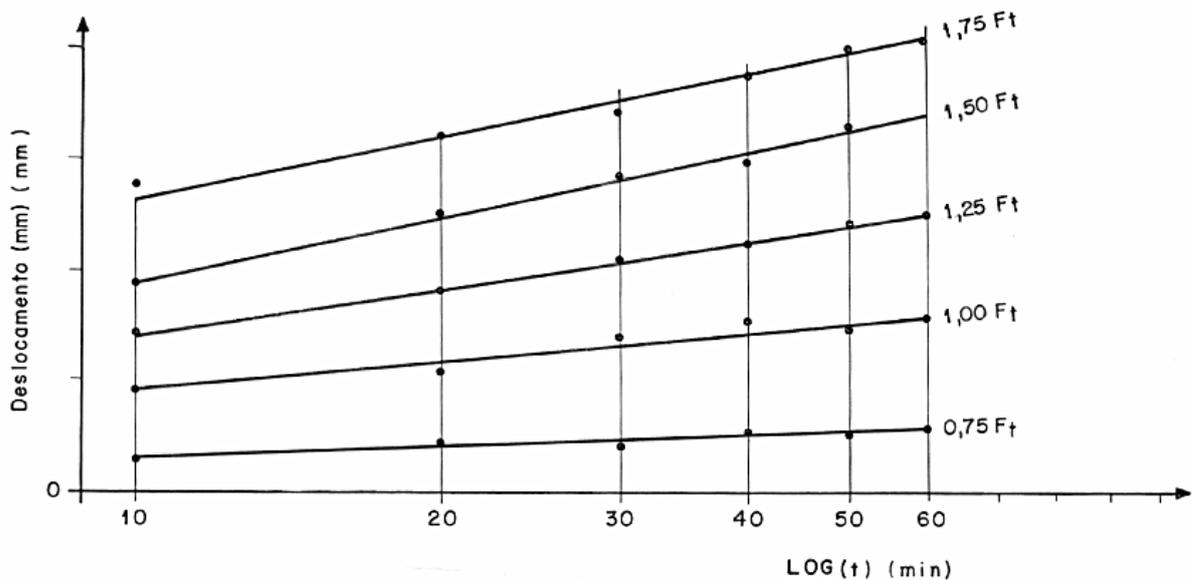
Estes coeficientes devem ser plotados em outro gráfico, em função da carga aplicada, conforme apresentado na figura 32. Os três gráficos devem ser apresentados em relatório final do ensaio. Para a carga de 175% da carga de trabalho, o tirante será considerado aprovado no ensaio caso o coeficiente de fluência seja menor ou igual a 1 mm para ancoragem em terrenos arenosos e 2 mm para ancoragem em terrenos argilosos ou duvidosos.

Figura 30 – Tempo x deslocamento no ensaio de fluência



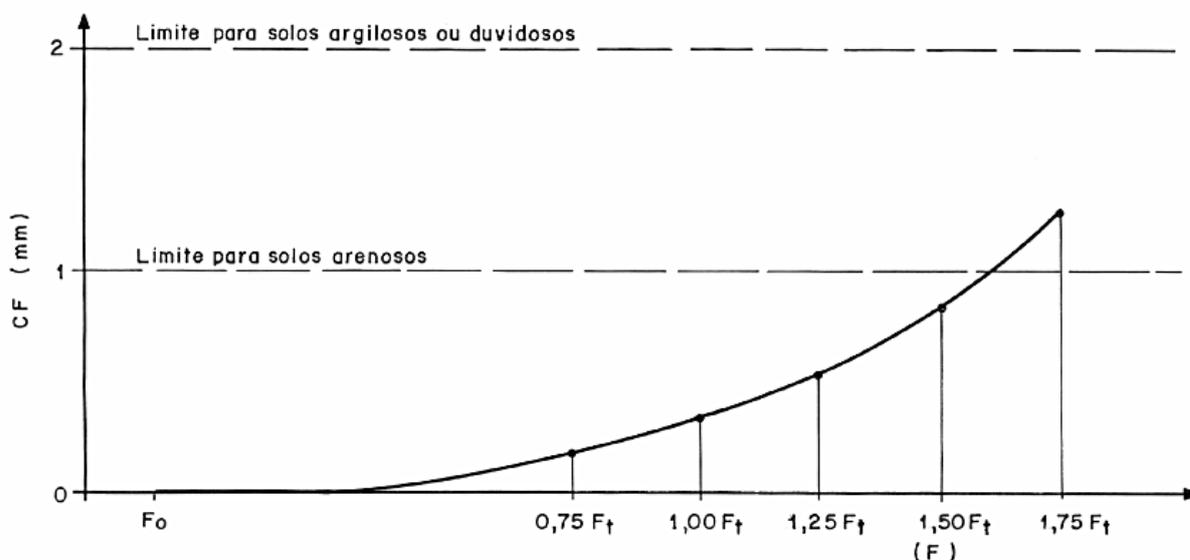
(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS, 2006, p. 27)

Figura 31 – Log(tempo) x deslocamento no ensaio de fluência



(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS, 2006, p. 27)

Figura 32 – Carga (F) x coeficiente de fluência (CF) no ensaio de fluência



(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS, 2006, p. 27)

6.5.2 Ensaios de protensão segundo prática nos Estados Unidos

Nos Estados Unidos, Sabatini et. al (1999) afirmam que a avaliação dos tirantes é feita com base em três ensaios: ensaio de desempenho, ensaio de prova e ensaio de fluência estendida. Assim como na prática brasileira, os resultados dos ensaios são comparados com valores de referência para definir a aceitação do tirante. As descrições dos ensaios serão feitas a seguir de acordo com as indicações de Sabatini et. al (1999).

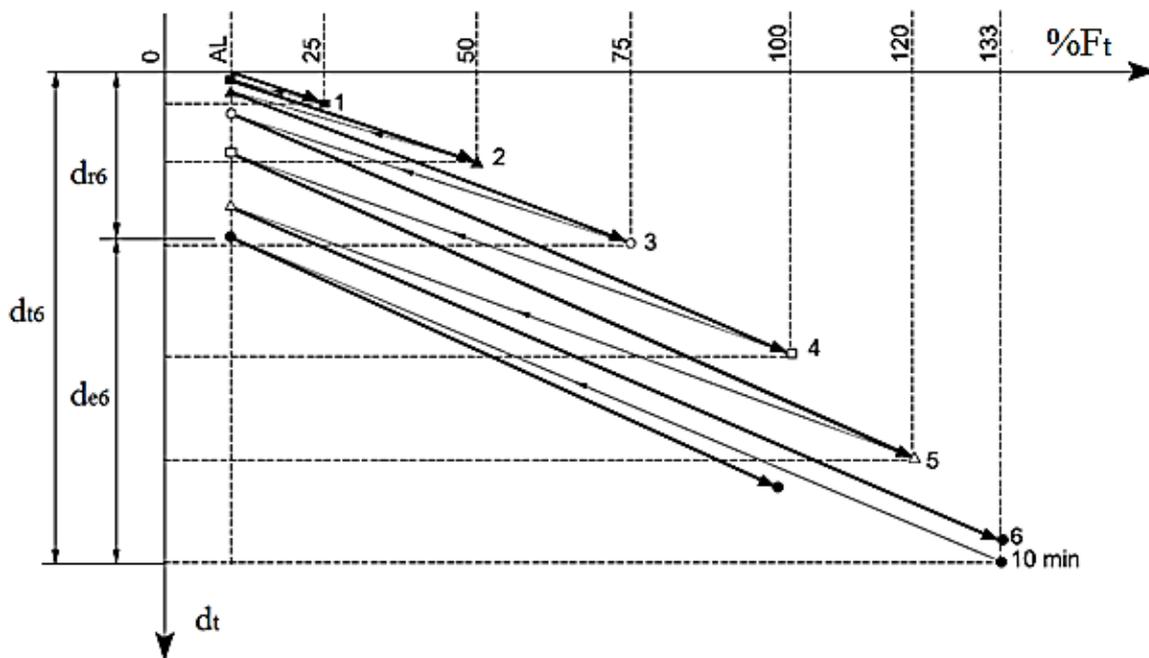
6.5.2.1 Ensaio de desempenho

Consiste em incrementos de carga e descarga de um tirante, com a finalidade de verificar a capacidade de carga, estudar o comportamento carga-deformação e verificar o comprimento livre efetivo. Os ensaios de desempenho são realizados geralmente nos dois ou três primeiros tirantes instalados e no mínimo 2% dos tirantes restantes, sendo recomendada a execução de mais ensaios onde houver suspeita de solos suscetíveis à fluência ou variação de condições de solo.

Assim como nos ensaios realizados no Brasil, o ensaio de desempenho começa com a aplicação de uma carga inicial denominada carga de alinhamento (AL). Esta carga geralmente tem valor de até 5% da carga de trabalho e tem a função de garantir que o tirante e o equipamento de protensão estejam adequadamente alinhados. As deformações geradas por

esta carga não são medidas. São aplicados ciclos de carga e descarga até a carga de alinhamento conforme o roteiro apresentado no quadro 6, sendo feitas leituras em cada estágio de carga e nas descargas. O ensaio é procedido até a carga de ensaio, usualmente com valor de 133% da carga de trabalho. A carga de ensaio pode variar de 120%, para tirantes provisórios, até 150%, em caso de tirantes permanentes em solos onde há maior possibilidade de fluência. Quando atingida a carga de ensaio, o carregamento é mantido por mais dez minutos, sendo feitas medições dos deslocamentos nos tempos 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 10 minutos, para medir os efeitos de fluência no tirante. Caso as deformações excedam 1 mm, o carregamento deve ser mantido por mais 50 minutos, sendo feitas medições nos tempos 20, 30, 40, 50 e 60 minutos, quando o deslocamento total entre os tempos 6 e 60 minutos não pode ser superior a 2 mm para ser considerado aprovado. Nesta fase de medição das deformações por fluência, o carregamento deve ser monitorado com célula de carga para garantir sua estabilidade. As medições de carregamento e deformação são plotadas nos gráficos de registro do ensaio de desempenho e de deformações residuais e elásticas em função das cargas, representados respectivamente nas figuras 33 e 34.

Figura 33 – Resultado do teste de desempenho



(fonte: POST-TENSIONING INSTITUTE¹², 1996 apud SABATINI et. al, 1999, p.145, tradução nossa)

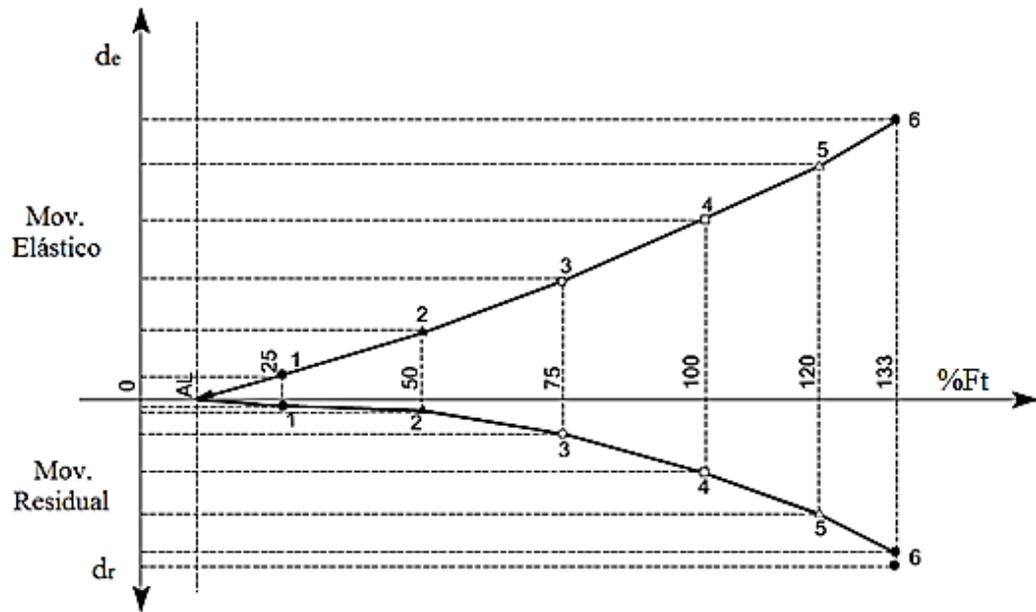
¹² POST-TENSIONING INSTITUTE. **Recommendations for Prestressed Rock and Soil Anchors**. 3. ed. Phoenix, Arizona, 1996.

Quadro 6 – Etapas do ensaio de desempenho

Etapa	Carregamento	Carga aplicada	Leitura de deformação total (dti)	Leitura de deformação residual (dri)	Cálculo da deformação elástica
1	Aplicação da carga de alinhamento (AL)				
2	Ciclo 1	0,25 Ft	dt1	-	dt1 - dr1 = de1
		AL	-	dr1	
3	Ciclo 2	0,25 Ft	d2	-	dt2 - dr2 = de2
		0,50 Ft	dt2	-	
		AL	-	dr2	
4	Ciclo 3	0,25 Ft	d3	-	dt3 - dr3 = de3
		0,50 Ft	d3	-	
		0,75 Ft	dt3	-	
		AL	-	dr3	
5	Ciclo 4	0,25 Ft	d4	-	dt4 - dr4 = de4
		0,50 Ft	d4	-	
		0,75 Ft	d4	-	
		1,00 Ft	dt4	-	
		AL	-	dr4	
6	Ciclo 5	0,25 Ft	d5	-	dt5 - dr5 = de5
		0,50 Ft	d5	-	
		0,75 Ft	d5	-	
		1,00 Ft	d5	-	
		1,2 Ft	dt5	-	
		AL	-	dr5	
7	Ciclo 6	0,25 Ft	d6	-	
		0,50 Ft	d6	-	
		0,75 Ft	d6	-	
		1,00 Ft	d6	-	
		1,2 Ft	d6	-	
		1,33 Ft	dt6, sem leitura de fluência	-	
8	Manter a carga por 10 minutos enquanto faz as leituras nos tempos especificados. Se o deslocamento total superar o valor máximo a carga deve ser mantida por um total de 60 minutos				
9	Cont. do ciclo 6	AL	-	dr6	dt6 - dr6 = de6
10	Aplicação da carga de incorporação caso os critérios de avaliação sejam satisfeitos				
Notas:	AL = carga de alinhamento, DL = Carga de projeto, di = deformação total em uma carga que não seja a carga máxima do ciclo, i = identificação do ciclo				

(fonte: SABATINI e. al, 1999, p.144, tradução nossa)

Figura 34 – Deformações elásticas e residuais no teste de desempenho



(fonte: POST-TENSIONING INSTITUTE¹³, 1996 apud SABATINI et. al, 1999, p.146, tradução nossa)

A aceitação do tirante no ensaio é feita a partir da avaliação das deformações elásticas. Esta avaliação consiste na comparação do valor do comprimento livre efetivo com valores de referência. O comprimento livre efetivo, de forma análoga à recomendação da norma brasileira, pode ser calculado através da fórmula 18.

$$L_{Le} = \frac{S * E * d_e}{P} \quad (\text{fórmula 18})$$

Sendo:

L_{Le} = comprimento efetivo do trecho livre, em metros;

S = menor seção do elemento resistente à tração, em m^2 ;

E = módulo de elasticidade do material resistente à tração, em kPa

d_e = deformação elástica na carga de ensaio, em kN;

P = diferença entre a carga de ensaio e a carga de alinhamento, em kN.

¹³ POST-TENSIONING INSTITUTE. **Recommendations for Prestressed Rock and Soil Anchors**. 3. ed. Phoenix, Arizona, 1996.

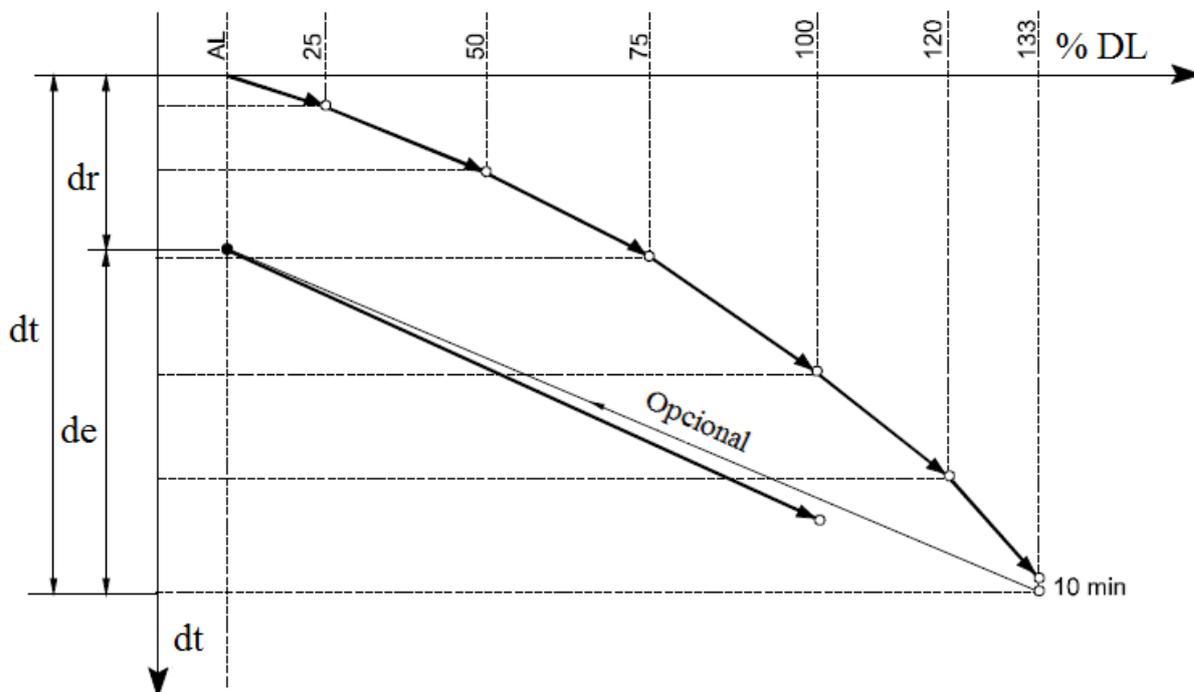
O valor do comprimento livre efetivo deve estar entre um valor mínimo e um valor máximo. O comprimento livre efetivo mínimo é dado por 80% do valor de projeto, mais a distância entre o fim da ancoragem e o ponto de fixação do macaco (L_e). O comprimento livre efetivo máximo é dado por 100% do valor de projeto, mais 50% do comprimento ancorado de projeto e mais a distância L_e . Caso esteja abaixo do valor mínimo, devem-se executar mais dois ciclos de carga para tentar diminuir o atrito no trecho livre e realizar novo ensaio. Caso esteja acima do valor máximo, deve ser feito o teste de fluência antes de se reprovar o tirante.

6.5.2.2 Ensaio de prova

O ensaio de prova é realizado a partir da aplicação de um ciclo de cargas, com aplicação prolongada do último estágio para medida de fluência. É utilizado para a avaliação dos tirantes que não foram submetidos aos ensaios de desempenho. Caso seu resultado não apresente conclusões semelhantes ao ensaio de desempenho, um novo teste de desempenho é recomendado no próximo tirante adjacente. A medição das cargas é feita com o manômetro do macaco, sendo necessárias células de carga apenas em ensaios de fluência onde os deslocamentos excedem 1 mm em um ciclo de registro tempo.

O procedimento se inicia da mesma maneira que no ensaio de desempenho. É aplicada a carga de alinhamento, cujas deformações são consideradas nulas. Os carregamentos são feitos nos mesmos estágios do ciclo 6 do ensaio de desempenho, até a carga de ensaio e medindo os deslocamentos em cada estágio. Quando atingida a carga de ensaio, a carga é estabilizada por 10 minutos, sendo feita a medição do deslocamento por fluência e analisada da mesma maneira do outro ensaio. Caso não seja aprovado no teste de fluência, são feitas as medições até o tempo 60 minutos conforme já indicado. Ao fim das medições dos deslocamentos por fluência, o carregamento pode ser aliviado diretamente para a carga de incorporação à estrutura, apenas com medição de deslocamentos totais, ou aliviada até a carga de alinhamento e carregada novamente, permitindo a medição dos deslocamentos permanentes e elásticos. Caso seja feita apenas a medição dos deslocamentos totais, os deslocamentos permanentes podem ser estimados a partir dos resultados de outros ensaios de desempenho executados em tirantes semelhantes. Os resultados são plotados graficamente conforme apresentado na figura 35. A avaliação dos resultados é feita pela análise do comprimento livre efetivo, da mesma maneira que no ensaio de desempenho.

Figura 35 – Resultado do teste de prova



(fonte: POST-TENSIONING INSTITUTE¹⁴, 1996 apud SABATINI et. al, 1999, p.148, tradução nossa)

6.5.2.3 Ensaio de fluência estendido

Este ensaio, que dura aproximadamente oito horas, tem a finalidade de avaliar as deformações por fluência em tirantes permanentes ancorados em solos coesivos que tenham índices de plasticidade maiores do que 20 ou limites de liquidez maiores do que 50. São exigidos no mínimo dois ensaios onde os solos apresentarem tais condições, sendo requerido um número maior caso outros tirantes submetidos a ensaios de desempenho ou de prova necessitem de medições mais duradouras do que 10 minutos no teste de fluência.

São aplicados os mesmos carregamentos do ensaio de desempenho, porém por períodos prolongados. As cargas máximas de cada ciclo e os períodos totais e parciais de observação são indicados na quadro 7. É importante que os carregamentos sejam mantidos constantes durante o ensaio. A tolerância no desvio da pressão medida é de 0,35 MPa. As medições em cada incremento de carga e em cada intervalo de tempo devem ser apresentadas graficamente conforme exemplificado na figura 36, gerando uma curva deslocamento *versus* tempo para cada carregamento. O eixo do tempo é dividido em escala logarítmica.

¹⁴ POST-TENSIONING INSTITUTE. **Recommendations for Prestressed Rock and Soil Anchors**. 3. ed. Phoenix, Arizona, 1996.

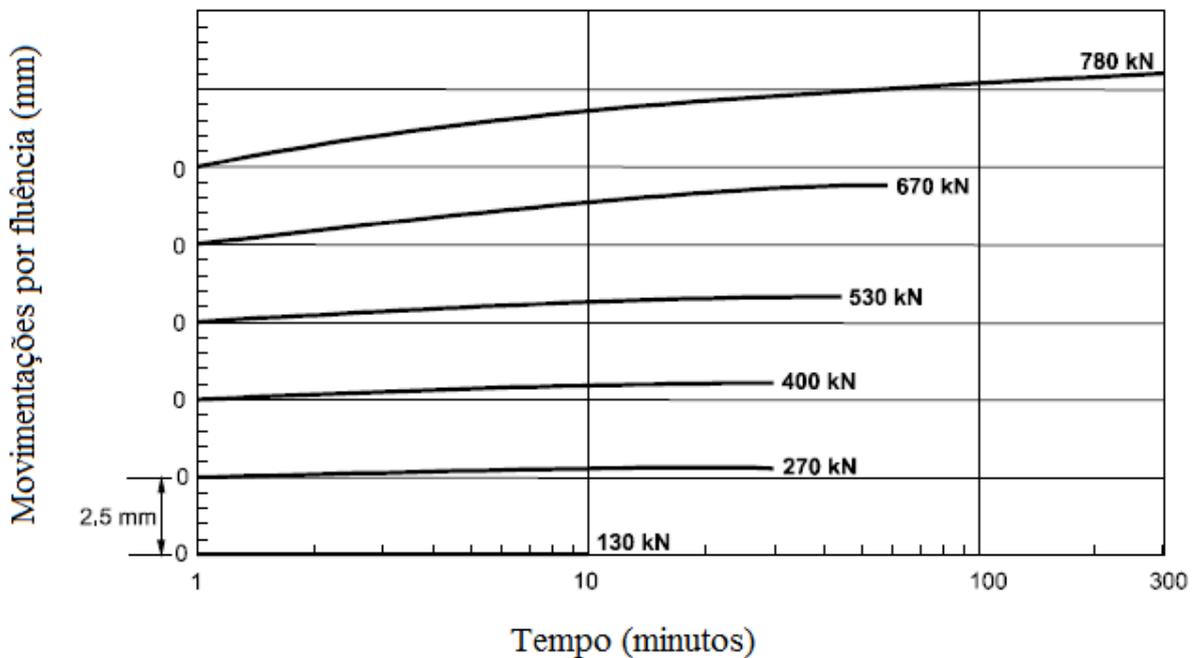
A partir do gráfico, devem ser analisadas as deformações em cada intervalo logarítmico de tempo para cada carga. Caso a deformação não exceda 2 mm em todos os intervalos de todas as cargas o tirante pode ser aceito. Caso contrário, é indicado que se utilize como carga admissível do tirante o valor de 50% da maior carga onde, ao final do ciclo de tempo, o critério dos deslocamentos foi satisfeito.

Quadro 7 – Cargas e períodos de observação no ensaio de fluência estendido

Ciclo de carregamento	Carga máxima no ciclo	Período total de observação (min)	Instantes de tempo quando são feitas leituras de deslocamento (min)
1	25% Ft	10	1, 2, 3, 4, 5, 6, 10
2	50% Ft	30	1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 15, 20, 25, 30
3	75% Ft	30	1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 15, 20, 25, 30
4	100% Ft	45	1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 15, 20, 25, 30, 45
5	120% Ft	60	1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 15, 20, 25, 30, 45, 60
6	133% Ft	300	1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 15, 20, 25, 30, 45, 60, 300

(fonte: SABATINI et. al, 1999, p. 149)

Figura 36 – Exemplo de resultado do teste de prova



(fonte: POST-TENSIONING INSTITUTE¹⁵, 1996 apud SABATINI et. al, 1999, p.149, tradução nossa)

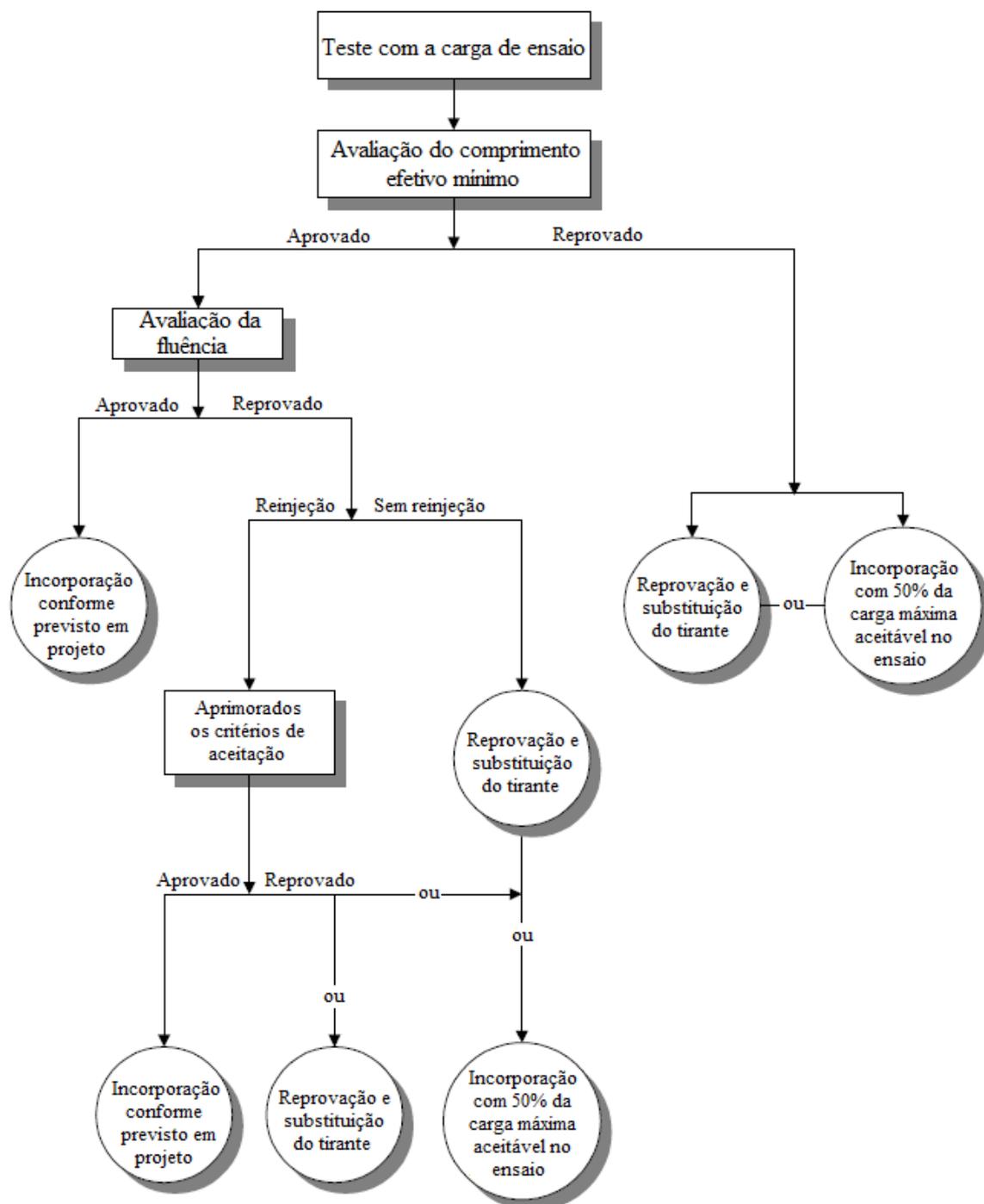
¹⁵ POST-TENSIONING INSTITUTE. **Recommendations for Prestressed Rock and Soil Anchors**. 3. ed. Phoenix, Arizona, 1996.

6.5.2.4 Aceitação dos tirantes

Para auxiliar o executor na tomada de decisão quanto à aceitação de um tirante após os ensaios, Post-Tensioning Institute (1996¹⁶ apud SABATINI et. al, 1999) resume os procedimentos indicados em um diagrama de tomada de decisão. São apresentadas as ações a serem tomadas levando em conta a análise do comprimento livre efetivo e dos critérios de fluência. Nesta análise, as opções são aceitar o tirante com sua carga de projeto, rejeitar o tirante e executá-lo novamente, ou aceitar com carga admissível igual a 50% do máximo valor que satisfizes as condições exigidas nos ensaios. O diagrama é apresentado na figura 37.

¹⁶ POST-TENSIONING INSTITUTE. **Recommendations for Prestressed Rock and Soil Anchors**. 3. ed. Phoenix, Arizona, 1996.

Figura 37 – Diagrama de decisão após ensaios de protensão



(fonte: POST-TENSIONING INSTITUTE¹⁷, 1996 apud SABATINI et. al, 1999, p.153, tradução nossa)

¹⁷ POST-TENSIONING INSTITUTE. **Recommendations for Prestressed Rock and Soil Anchors**. 3. ed. Phoenix, Arizona, 1996.

6.5.3 Ensaio de protensão segundo BS EN 1537:2000

A norma BS EN 1537 (BRITISH STANDARDS, 2000) prevê a realização de três ensaios para a avaliação dos tirantes. São eles o ensaio de investigação, o ensaio de adequação e o ensaio de aceitação, sendo os dois primeiros classificados também como ensaios de avaliação. A aplicação de cargas deve ser feita com equipamento provido de células de carga (diferente das outras recomendações que exigiam somente manômetro para a maioria dos ensaios), aferido semestralmente e capaz de protender todos os elementos de tração do tirante simultaneamente, conforme ilustrado na figura 38.

Figura 38 – Equipamento de protensão



(fonte: PREPRON SISTEMA DE PROTENSÃO, c2011)

A Norma afirma que a aplicação de cargas e observação dos resultados pode ser feita por métodos diferentes. São exemplificados três métodos, sendo eles os métodos de ensaio 1, 2 e 3. No método de ensaio 1, são aplicados ciclos de carga partindo de uma carga inicial até uma carga máxima, quando são medidos deslocamentos da cabeça do tirante após certo tempo. No método de ensaio 2, são aplicados ciclos de carga partindo de uma carga inicial até uma carga máxima ou até a ruptura, fazendo medições de perda de carga aplicada na cabeça do tirante após determinado tempo. São feitas leituras de perda de carga na carga de incorporação e na carga máxima de cada ciclo. Já no método de ensaio 3, o tirante é submetido a um ciclo de carga, a partir de uma carga inicial até uma carga máxima. As cargas de cada estágio são mantidas constantes e são medidos os deslocamentos da cabeça do tirante. No anexo E da

Norma são apresentados os procedimentos para cada método em cada um dos ensaios, indicando os ciclos de carga, tempo de aplicação e verificação de resultados.

6.5.3.1 Ensaio de investigação

O ensaio de investigação deve ser realizado em tirantes instalados em locais onde ainda não foram feitos ensaios de investigação ou quando forem empregados materiais diferentes. Este ensaio tem a finalidade de comprovar a eficiência de um tipo de tirante em um determinado local, medindo principalmente a resistência entre nata de cimento e solo. O ensaio também deve ser realizado em tirantes que terão cargas de trabalho superiores às adotadas em ensaios anteriores nas mesmas condições.

Os tirantes devem ser ensaiados até a carga de ruptura ou até uma carga de prova do ensaio de investigação. Esta carga de prova é dada pelo menos valor entre 80% da carga admissível do elemento de tração ou 95% da carga que gera uma deformação permanente de 1%. Estes tirantes ensaiados não poderão ser utilizados como tirantes permanentes. Quando não for possível atingir a carga necessária, devem ser executados tirantes com comprimentos ancorados menores para a realização do ensaio.

6.5.3.2 Ensaio de adequação

O ensaio de adequação deve ser realizado em pelo menos três tirantes de cada tipo, ou seja, onde há diferentes locais de ancoragem, uso de materiais ou cargas. Pode ser realizado em tirantes que já passaram pelo ensaio de investigação, ou não.

Para tirantes que já foram submetidos ao ensaio de investigação, o ensaio de adequação tem a finalidade de estabelecer características aceitáveis de deformação por fluência ou perda de carga nas cargas de ensaio e de incorporação. Estes resultados serão utilizados como base para os ensaios de aceitação futuros. Ainda, o ensaio pode fornecer resultados a respeito da carga crítica de fluência. Se o tirante não foi submetido ao ensaio de investigação ou não existem resultados de tirantes do mesmo tipo na obra, o ensaio fornece as mesmas indicações anteriores, e ainda critérios de aprovação para fluência e perda de carga durante a carga de prova dos ensaios de aceitação. Ainda, o ensaio auxilia na determinação do comprimento livre efetivo.

6.5.3.3 Ensaio de aceitação

O ensaio de aceitação deve ser realizado em todos os tirantes. Tem a finalidade de demonstrar que o tirante é capaz de suportar uma carga de prova, determinar o comprimento livre efetivo, garantir que a carga de incorporação está compatível com valores de projeto e determinar as deformações por fluência e perdas de carga no estado limite de serviço.

6.5.3.4 Estimativa do comprimento livre efetivo

O comprimento livre efetivo é estimado a partir de relação com a extensão de um ponto de referência no tirante, sendo recomendado que seja o ponto onde é fixado o macaco hidráulico. O cálculo pode ser feito conforme indicado pela prática nos Estados Unidos pela fórmula 18. O limite superior é dado pelo maior valor entre os resultados das fórmulas 19 e 20, e o limite inferior pelo resultado da fórmula 21. Se estiver fora dos limites, o tirante deve ser submetidos a ciclos de carga até a carga de prova. Se ainda assim os resultados permanecerem os mesmos, o projetista pode aprovar o tirante.

$$L_{Le} \leq L_L + L_e + 0,5L_b \quad (\text{fórmula 19})$$

$$L_{Le} \leq 1,10L_L + L_e \quad (\text{fórmula 20})$$

$$L_{Le} \geq 0,80L_L + L_e \quad (\text{fórmula 21})$$

Sendo:

L_{Le} = comprimento livre efetivo, em m;

L_L = comprimento livre, em m;

L_e = distância entre o fim da ancoragem e o ponto de fixação do equipamento de protensão, em m;

L_b = comprimento ancorado, em m.

6.6 INDICAÇÃO DE INCORPORAÇÃO E PREPARO DA CABEÇA DA ANCORAGEM

Após a aprovação do tirante nos ensaios de protensão deve ser feita a incorporação do mesmo à estrutura. De acordo com Joppert Júnior (2007), a incorporação deve ser feita de forma planejada para que não ocorram, na fase de execução, esforços para os quais a estrutura não foi dimensionada para suportar.

Conforme brevemente descrito anteriormente, a cabeça da ancoragem consiste na parte externa do tirante que não tem contato com o solo, e sim com a parede de contenção. Por ter a finalidade de transmitir a carga mobilizada no trecho ancorado e que passa pelo trecho livre à estrutura, a escolha dos componentes da cabeça será função do tipo de elemento resistente à tração e da carga do tirante. Na prática, estes componentes são fornecidos pelo fabricante juntamente com os elementos de tração, já dimensionados de acordo com as cargas admissíveis dos tirantes.

6.6.1 Incorporação e ancoragem segundo prática Brasileira

A incorporação do tirante, segundo recomendação da NBR 5629 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006), deve ser feita com um carregamento que esteja entre 80% e 100% da carga de trabalho projetada. A Norma ainda permite que seja feita incorporação de forma provisória (antes dos ensaios), respeitando a cura do cimento do trecho ancorado e a magnitude do carregamento seja coerente. Este tipo de procedimento pode ser necessário quando a contenção durante a escavação não tem sua estabilidade assegurada sem a carga externa.

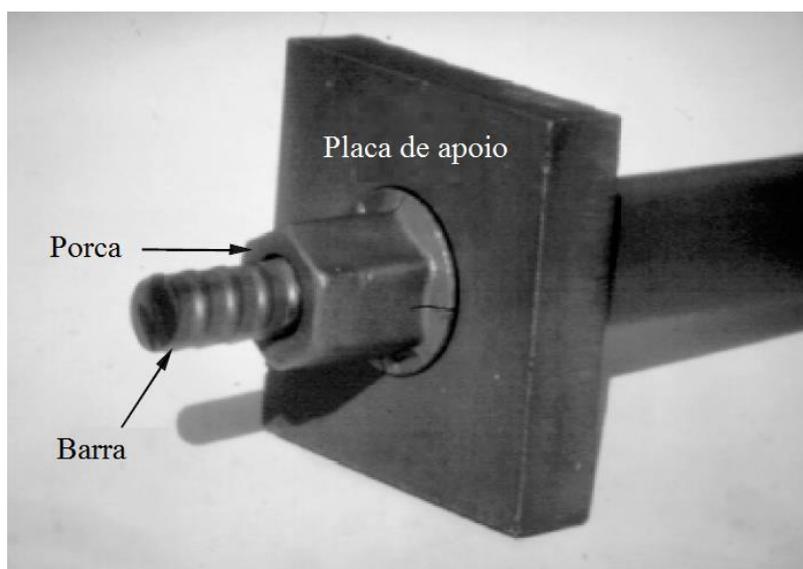
Na cabeça, a placa de apoio deve ser dimensionada para distribuir os esforços sem causar o puncionamento da parede na situação onde é aplicada a maior carga, ou seja, durante os ensaios. Yassuda e Dias (1998) indicam que, para cargas de até 520 kN, uma placa de apoio de 20 x 20 cm com 2 cm de espessura é suficiente. Para cargas até 780 kN, os autores recomendam uma placa de 30 x 30 cm com espessura de 2,5 a 3 cm. Para cargas mais elevadas, os autores sugerem que se utilizem placas duplas.

A cunha de grau, que tem a função de transmitir os esforços de maneira ortogonal ao eixo do tirante, é geralmente composta por um cilindro de aço. O alinhamento é garantido a partir do

cutte de uma das suas bases com o mesmo ângulo de inclinação do tirante. Este cilindro deve ter diâmetro suficiente para acomodar os elementos de tração devidamente alinhados (YASSUDA; DIAS, 1998).

Para tirantes monobarra, Yassuda e Dias (1998) afirmam que o bloco de ancoragem é constituído por porca, podendo ser empregada uma cela para a porca, conforme apresentado na figura 39. Os autores destacam que deve ser tomado grande cuidado com o posicionamento da porca com o alinhamento da barra. Caso não seja ortogonal, os esforços de flexão gerados na barra combinado com a tração da protensão podem quebrar a barra. Os aços de alta resistência utilizados nos tirantes em geral são menos dúcteis, quebrando com maior facilidade.

Figura 39 – Ancoragem de tirante monobarra

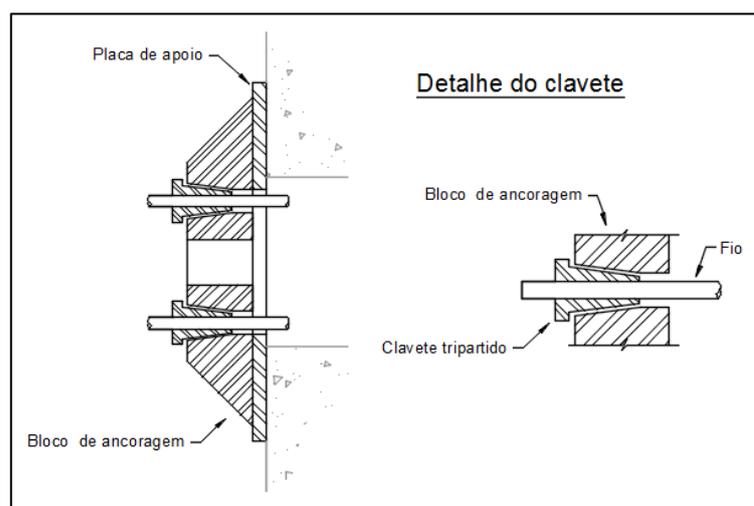


(fonte: SABATINI et. al, 1999, p. 5, tradução nossa)

Nos casos de tirantes de fios, o bloco de ancoragem é usualmente composto por sistema de encunhamento, com clavete ou cunha. Um clavete é um elemento composto por três partes que, unidas, formam um tronco cônico com um furo no centro, por onde passa o elemento de tração. No bloco de ancoragem deve existir uma cela, também cônica, em um bloco de aço. No momento da incorporação, o tronco cônico é montado no entorno do fio junto à cela, não permitindo o alívio de carga quando cessada a protensão. Um detalhe de clavete pode ser visto na figura 40. O sistema com cunha é semelhante ao com clavete, mas pode prender vários fios ao mesmo tempo. A fixação dos fios também pode ser feita por botões. Neste

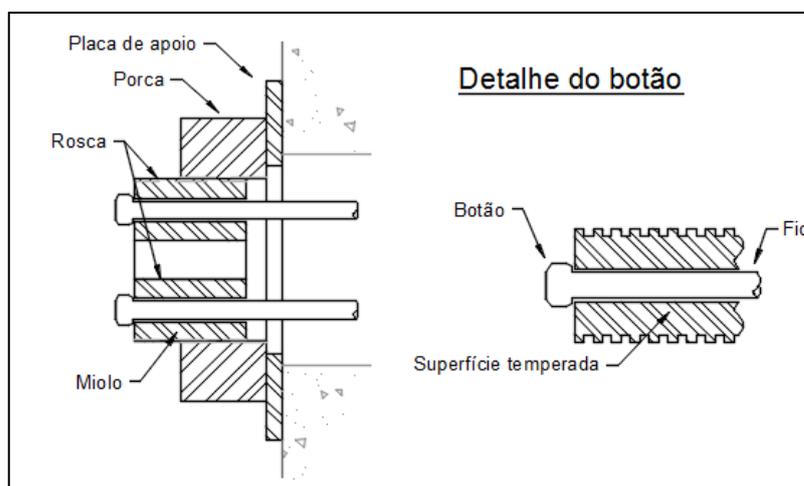
método, os fios passam por uma peça com múltiplos furos justos e suas pontas são prensadas de forma a ficar com um diâmetro maior e não conseguirem mais passar pela peça furada, travando os fios e mantendo a protensão do tirante. Um detalhe de um sistema de botões pode ser visto na figura 41 (YASSUDA; DIAS, 1998).

Figura 40 – Detalhe do bloco de ancoragem com clavetes



(fonte: YASSUDA;DIAS, 2008, p. 618)

Figura 41 – Detalhe do bloco de ancoragem com botões



(fonte: YASSUDA;DIAS, 2008, p. 618)

Tirantes de cordoalhas também são presos por sistemas de encunhamento. Por serem empregados em tirantes com cargas elevadas, suas peças são de dimensões maiores. Os clavetes utilizados são do tipo clavetes dentados. Estes clavetes possuem dentes no interior do tronco cônico, agarrando mais firmemente a cordoalha.

Por fim, a NBR 5629 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006) recomenda que os elementos de tração sejam cortados com uso de serra. Maçarico não deve ser utilizado pois pode enfraquecer a estrutura do aço. O corte, segundo Yassuda e Dias (1998), deve ser feito deixando uma sobra de 10 a 20 cm para permitir a reprotensão do tirante caso seja necessário. A NBR 11682 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009) recomenda que a carga de incorporação seja verificada a cada cinco anos.

6.6.2 Incorporação e ancoragem segundo prática nos Estados Unidos

Nos Estados Unidos, Sabatini et. al (1999) sugerem um valor mínimo de 75% da carga de trabalho para a carga de incorporação. Ohio Department of Transportation (2012), de maneira um pouco mais conservadora sugere 85%. Este valor mínimo pode ser empregado em estruturas temporárias onde são toleradas deformações relativamente grandes na estrutura. Caso haja muita restrição a deformações, pode ser empregada a carga máxima de 100% da carga de trabalho, sendo necessária a avaliação da resistência passiva do solo para que não haja deformações no sentido do lado não escavado (OHIO DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, 2012; SABATINI et. al, 1999).

A ancoragem também é feita com o uso de placa de apoio, cunha de grau e bloco de ancoragem com porcas (para tirantes monobarra) e cunhas (para tirantes de fios e cordoalhas). As perdas de carga envolvidas no processo de incorporação devem ser medidas. Desta maneira, é indicado a realização de um teste denominado teste *lift-off* (OHIO DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, 2012; SABATINI et. al, 1999).

O teste *lift-off* é feito com uma nova aplicação de carga após a incorporação do tirante à estrutura. Para tirantes de cordoalha, deve ser aplicada carga até que o bloco que recebe as cunhas perca o contato com a placa de apoio (para o caso de tirantes que possam ser reprotendidos) ou até que as cunhas percam o contato com o bloco (caso o macaco esteja sobre o bloco). Para tirantes de barra, as cargas são aplicadas gradualmente até que a porca perca o contato com a placa, sem que haja torção da porca. A carga necessária para que isso ocorra deve ter uma variação de no máximo 5% em relação à carga de incorporação. Se este critério não for satisfeito, deve-se fazer a ancoragem novamente com a carga de incorporação, e o teste *lift-off* refeito (OHIO DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, 2012; SABATINI et. al, 1999).

6.6.3 Incorporação e ancoragem segundo BS EN 1537:2000

O limite imposto pela BS EN 1537 (BRITISH STANDARDS, 2000) para a carga de incorporação é de 60% da carga admissível do elemento de tração. O valor de projeto pode ser mantido caso o tirante seja aprovado nos ensaios, mas deve ser diminuído conforme apresentado anteriormente caso o tirante seja aceito com carga inferior.

A cabeça de ancoragem deve ser feita com materiais que resistam a 100% da carga admissível do elemento de tração. Não são feitas especificações dos sistemas que compõem a cabeça, apenas sobre requisitos mínimos. Quanto ao alinhamento, ela deve tolerar um desvio de 3 graus quando aplicada 97% da carga admissível do elemento. As cargas devem ser distribuídas na estrutura ou no solo de acordo com o projeto através de componentes testados. Por fim, a cabeça deve ser capaz de se ajustar às deformações que podem ocorrer na estrutura durante sua vida útil.

6.7 INDICAÇÃO DE PROTEÇÃO DA CABEÇA DO TIRANTE

Por se tratar da parte do tirante mais vulnerável a ações externas, é exigido grande cuidado com a proteção cabeça do tirante. Conforme colocado anteriormente, esta região, junto dos primeiros metros do trecho livre, tem maior incidência de problemas de corrosão, reforçando a necessidade de proteção adequada.

6.7.1 Proteção da cabeça segundo prática brasileira

A recomendação da NBR 5629 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006) para a proteção da região do trecho livre e da cabeça é que seja feita uma última injeção, garantindo que sejam preenchidos todos os vazios e não haja problemas de infiltração. Solotrat Engenharia Geotécnica Ltda (2015) recomenda que seja feita a instalação de duas mangueiras para realizar esta nova injeção de calda de cimento, uma mangueira para a injeção propriamente dita e a outra servindo como respiro. A mesma prática é indicada pela Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro (2014b), que ainda recomenda que a injeção seja feita de forma lenta e gradual até que ocorra o completo preenchimento e seja expulsa toda a água acumulada.

Na cabeça, Joppert Júnior (2007) recomenda a proteção das partes metálicas através de sua limpeza e aplicação de tinta anticorrosiva. O autor ainda indica que esta tinta seja feita à base de resinas epóxicas.

Por fim, a NBR 5629 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006) exige que seja feita a proteção da cabeça com revestimento de concreto ou argamassa. A espessura mínima deste revestimento deve ser de 2 cm. A Associação Brasileira de Empresas de Engenharia de Fundações e Geotecnia (2012) recomenda que o revestimento seja feito com 5 cm de espessura.

6.7.2 Proteção da cabeça segundo prática nos Estados Unidos

A proteção da região da ancoragem começa com a execução do *trumpet* conforme comentado no capítulo anterior. Sabatini et. al (1999) afirmam que o *trumpet* não deve estar danificado ou danificar a proteção contra corrosão do trecho livre na sua instalação. O *trumpet* deve cobrir a proteção do trecho livre, não sendo necessária vedação na sua extremidade para conter a nata caso esteja perfeitamente ajustado ao redor do tubo do trecho livre. Ohio Department of Transportation (2012) indica uma sobreposição de ao menos 10 cm do *trumpet* quando for feita vedação e 30 cm quando não for feita. Antes do preenchimento do *trumpet* com nata de cimento, deve-se assegurar que a proteção do trecho livre não esteja em contato com a placa de apoio. Neste caso, Ohio Department of Transportation (2012) recomenda que seja cortada parte da proteção para evitar o contato. A injeção deve ser feita de maneira cuidadosa para não permanecerem espaços vazios. Quando necessário, pode ser feita nova injeção para garantir o preenchimento total após o assentamento da nata na primeira injeção.

A cobertura externa da cabeça é recomendada pela Sabatini et. al (1999) da mesma maneira da prática brasileira. É indicado o cobrimento com uma camada de 5 cm de concreto. Também é sugerido o uso de uma cobertura plástica ou metálica, que deve ser preenchida por nata de cimento garantindo o mesmo recobrimento. É recomendado o mesmo cuidado da injeção do *trumpet* para o preenchimento da cabeça no sentido de se evitar a presença de vazios.

6.7.3 Proteção da cabeça segundo BS EN 1537:2000

A norma BS EN 1537 (BRITISH STANDARDS, 2000) prevê, para a região entre a cabeça e o trecho livre de tirantes permanentes, uma proteção semelhante à recomendada pela prática norte-americana. Deve ser empregado um tubo externo à proteção do trecho livre desde a placa de apoio. O tubo pode ser plástico ou metálico, neste último caso podendo ser soldado com a placa de apoio. Após a incorporação do tirante este trecho deve ser preenchido por nata de cimento ou outro componente de proteção contra corrosão. Para tirantes provisórios, o tubo externo também deve ser selado ou soldado com a placa de apoio e cobrir parte da proteção do trecho livre, mas não é necessário o preenchimento com outros materiais. Caso os tirantes temporários tenham seu uso estendido, é recomendado o preenchimento do trecho como no caso de tirantes permanentes.

Na cabeça, as recomendações da BS EN 1537 (BRITISH STANDARDS, 2000) para tirantes permanentes e provisórios também são diferentes. Para tirantes permanentes deve ser feita cobertura com capa metálica galvanizada de 3 mm de espessura, ou com capa plástica de 5 mm de espessura. A proteção deve ser conectada à placa de apoio e preenchida por nata de cimento, caso não seja prevista a necessidade de remoção da proteção, ou por outro componente de proteção contra corrosão, caso a proteção seja removível. A cabeça de tirantes provisórios pode ser coberta apenas por algum material não fluido que ofereça proteção contra corrosão. Esta prática é recomendada para tirantes que tenham fácil acesso, podendo ser feita nova proteção se necessário. Nos casos em que o tirante esteja em meio agressivo ou esteja em local de difícil acesso e tenha seu uso prolongado, é recomendada proteção semelhante ao caso de tirantes permanentes.

7 DIRETRIZES PARA PROJETO E EXECUÇÃO DE TIRANTES EM ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO DE SOLO

Com base na pesquisa bibliográfica, que teve o objetivo de verificar práticas de projeto e execução de tirantes em diferentes locais do mundo, foram elaboradas as diretrizes para estes serviços. Esta elaboração de diretrizes foi feita buscando identificar pontos onde as recomendações das diferentes regiões possam se complementar. Onde as indicações na bibliografia forem semelhantes, o critério de escolha é o de adotar valores que confirmam mais segurança ao projeto ou à execução. Por fim, as diretrizes indicadas são apresentadas de forma resumida nos quadros 8 e 9

7.1 DIRETRIZES PARA PROJETO DE TIRANTES

Seguindo o formato e a sequência utilizados no capítulo 5, a seguir são apresentadas as indicações em cada etapa do projeto dos tirantes.

7.1.1 Diretrizes para investigação do terreno

Primeiramente é necessária a avaliação da questão do terreno vizinho. O contratante do serviço deve obter a autorização por escrito permitindo a inserção dos tirantes no terreno vizinho para que seja viabilizado o início do projeto. O engenheiro projetista deve analisar a existência de interferências no subsolo que devem ser evitadas e avaliar a integridade das edificações nos terrenos adjacentes para evitar discussões posteriores à escavação e execução dos tirantes. Ainda, o projetista deve fazer uma análise visual no local da obra, analisando as questões de acessibilidade, de topografia e da dimensão da obra em si. Assim, pode solicitar os ensaios necessários para iniciar os dimensionamentos.

A escolha dos ensaios deve fornecer dados suficientes para o pré-dimensionamento do trecho ancorado e para a escolha dos métodos de perfuração e de injeção mais apropriados. A maioria dos ensaios disponíveis fornece uma boa indicação do perfil do terreno, permitindo que sejam inferidas informações básicas quanto ao comportamento durante a perfuração e a injeção. A principal indicação de locação de pontos para ensaios de campo é que se

concentrem nas proximidades da estrutura de contenção e na região de ancoragem. Para o trecho ancorado, os métodos de dimensionamento empíricos são frequentemente função do ensaio SPT, que também oferece um reconhecimento do solo satisfatório. Desta maneira, e também por possuir custo baixo em comparação a outros ensaios, o ensaio SPT aparece como principal alternativa. Evidentemente, para obras de maior dimensão, onde o custo da investigação é menos significativo no custo total da obra, a realização de ensaios de campo e laboratório que forneçam parâmetros mais precisos e detalhados é recomendada.

7.1.2 Diretrizes para cálculo da estabilidade global

A estabilidade global da estrutura, que é função do tamanho da escavação e das cargas introduzidas pelos tirantes, deve ser feita através de *software* computacional com base nos parâmetros obtidos nos ensaios e na geometria do problema. A estabilidade global após a inserção dos tirantes deve ser garantida com um fator de segurança satisfatório. Os valores de fator de segurança indicados na bibliografia são semelhantes, e aqui será recomendado o valor de 1,5 em qualquer superfície de ruptura, da mesma maneira que indicado pela NBR 5629 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006).

Para a definição da geometria do problema, devem ser definidas as cargas dos tirantes e sua locação na estrutura de contenção (espaçamentos e inclinação). É indicado um processo iterativo, alternando a quantidade de tirantes e seu espaçamento para a determinação da carga através do “Método da área tributada” sugerido por Sabatini et. al (1999), apresentado no item 5.2.2.1 deste trabalho. O método considera que cada tirante é responsável por aplicar uma carga na estrutura de contenção referente a uma área do diagrama de empuxos de Terzaghi e Peck. A locação também deve variar para evitar a interação com interferências no subsolo no terreno perfurado.

O espaçamento dos tirantes deve ser tal que evite interferência entre tirantes adjacentes. É indicado um espaçamento mínimo de 1,5 m proposto pelo Eurocode 7 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2004), que é um pouco maior do que as recomendações mínimas nos Estados Unidos (1,3 m). Para o tirante superior, é necessária atenção com a resistência passiva do solo para evitar grandes movimentações no sentido oposto à escavação. O centro trecho ancorado deve estar, conforme indicação de Sabatini et.

al (1999), ao menos a 4,5 m de distância da superfície para evitar deformações na superfície durante a injeção.

Valores entre 15° e 30° são indicados para a inclinação, de modo a facilitar a injeção. Caso seja necessário, para realizar a ancoragem em terreno mais competente ou para desviar de interferências, é possível aumentar a inclinação. Quando isto ocorrer, deve ser analisada a componente vertical da carga do tirante e a capacidade de carga do solo de fundação. Se for necessário, deve ser prevista a execução de algum elemento de fundação sob a estrutura ancorada.

7.1.3 Diretrizes para projeto dos componentes do tirante

Seguindo a sequência de projeto, após recebidos os dados dos ensaios de campo e definidas as cargas e o posicionamento dos tirantes, o engenheiro projetista deve projetar os componentes de cada tirante, conforme indicado nos itens a seguir.

7.1.3.1 Trecho livre

A bibliografia analisada aponta que o comprimento do trecho livre é função das superfícies de ruptura potenciais. O comprimento deve ser tal que garanta a introdução dos esforços no terreno longe da superfície de ruptura existente antes da construção dos tirantes. Esforços agindo dentro do maciço sujeito à ruptura são ineficientes para a estabilização. Conforme indicação da NBR 5629 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006), é recomendado que o comprimento do trecho livre possibilite que o centro do trecho ancorado esteja sobre uma superfície com fator de segurança igual a 1,5 antes da colocação dos tirantes. Ainda, devem ser seguidas as recomendações de Sabatini et. al (1999) de se manter um comprimento mínimo no trecho livre de 4,5 m para tirantes monobarra e 3 m para tirantes cordoalha para evitar perdas de carga transferidas à estrutura na protensão.

7.1.3.2 Trecho ancorado

O trecho ancorado deve ser pré-dimensionado na etapa de projeto em função dos ensaios realizados. Na etapa de execução, este pré-dimensionamento é verificado através dos ensaios de protensão, e os devidos ajustes devem ser feitos.

Conforme apresentado, os métodos diferem basicamente na metodologia para a obtenção da resistência na interface solo/nata de cimento. Estas relações são empíricas e se baseiam, em sua maioria, em situações específicas de solo de uma região estudada. Desta maneira, para o dimensionamento preliminar dos tirantes em território brasileiro, a metodologia mais adequada é a proposta pela NBR 5629 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006), onde a resistência é função da tensão efetiva do solo na ancoragem e de um coeficiente de ancoragem (função da resistência do solo) para solos arenosos, e da resistência ao cisalhamento não drenado e de um coeficiente redutor para solos argilosos. Caso a ancoragem seja feita em rocha, o cálculo é função da resistência da rocha e da argamassa. O roteiro de cálculo é apresentado no item 5.2.3.1 deste trabalho.

Feito o pré-dimensionamento de acordo com o método da norma brasileira, é interessante que os resultados obtidos sejam comparados com as proposições de outros métodos. Os métodos propostos neste trabalho de Bustamante e Doix (1985) e Sabatini et. al (1999) podem servir de base para estas comparações.

7.1.3.3 Elemento resistente à tração

Para a escolha do elemento resistente à tração do tirante, o engenheiro projetista deve recorrer a catálogos de fabricantes que atendam ao local da obra. A escolha se dará basicamente em função das cargas máximas de ensaio, sendo normalmente utilizadas barras para cargas mais baixas e cordoalhas para cargas mais elevadas. No projeto, deve constar a seção dos elementos indicados (bitola de barra ou bitola e número de cordoalhas) e as cargas previstas (ensaio, trabalho e incorporação), permitindo que o contratante ou o executor tenham opção de consultar o produto com mais de um fabricante. As emendas necessárias para tirantes de barra também são fornecidas pelo fabricante e devem suportar as cargas indicadas no projeto.

Na prática, como os produtos são fornecidos por fabricantes de acordo com as cargas solicitadas, o dimensionamento, por parte do projetista, utilizando os valores de tensão admissível sugeridos por norma, não é aplicado. Este dimensionamento é feito pelo fabricante considerando as recomendações da Norma.

7.1.3.4 Corrosão

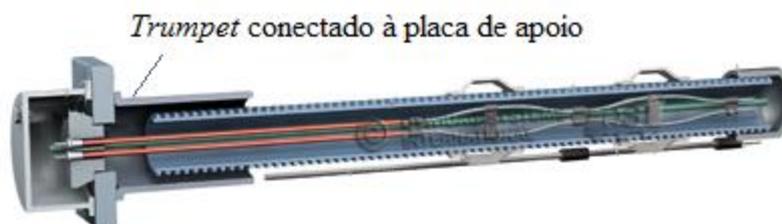
A definição da proteção contra corrosão, conforme verificado na bibliografia, é função basicamente da vida útil do tirante e da agressividade do meio no qual o tirante está inserido.

Nos trechos livre e ancorado as recomendações apresentadas são semelhantes, tanto no número de proteções necessárias em cada situação, quanto nos materiais utilizados (tubos lisos, corrugados, graxas anticorrosivas, pintura anticorrosiva, etc.). Desta maneira, as classes de proteção recomendadas pela NBR 5629 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006) são suficientes para os trechos livre e ancorado.

Para a escolha da classe de proteção a ser aplicada, a recomendação do Post-Tensioning Institute¹⁸ (1996, apud Sabatini et. al, 1999) é bastante interessante. A avaliação da vida útil do tirante e da agressividade do meio de maneira conjunta com a avaliação da consequência da falha da ancoragem no sistema e da relevância do custo da proteção no custo total da obra oferece mais suporte ao engenheiro projetista na tomada de decisão. As classes de proteção sugeridas pela norma brasileira são apresentadas no item 5.3.4.1 deste trabalho, e o diagrama para escolha da classe de proteção sugerido pela prática americana é apresentado na figura 15, no item 5.4.3.2.

Complementando as recomendações de proteção da norma brasileira, a prática internacional sugere que, em todas as classes de proteção, seja feita uma proteção adicional na região entre a cabeça da ancoragem e o início do trecho livre. Esta parte, que é local das principais ocorrências de problemas de corrosão relatados, deve ser protegida por um tubo externo a toda a proteção da região, a partir da placa de ancoragem e cobrindo a proteção do trecho livre por um comprimento mínimo de 10 cm. Este tubo, chamado de *trumpet* pela prática americana, deve ser instalado no momento da instalação do tirante, e injetado com nata de cimento após a fase de protensão. A figura 42 apresenta um corte longitudinal de um tirante, onde pode ser visto o *trumpet*.

Figura 42 – Esquema de proteção contra corrosão com *trumpet*



(fonte: adaptado de DSI DYWIDAG-SYSTEMS INTERNATIONAL, c2015)

¹⁸ POST-TENSIONING INSTITUTE. **Recommendations for Prestressed Rock and Soil Anchors**. 3. ed. Phoenix, Arizona, 1996.

7.1.3.5 Diâmetro

O diâmetro mínimo de perfuração deve ser suficiente para comportar todos os elementos do tirante (barras/cordoalhas, proteções contra corrosão, sistema de injeção, etc.) e oferecer um revestimento mínimo de nata de cimento à estes elementos. Nas bibliografias referenciadas, o valor de 2 cm sugerido pela NBR 5629 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006) é o maior, sendo, portanto, o valor recomendado por este trabalho. Devem ser evitados diâmetros muito superiores ao necessário, pois a formação de uma espessa coroa de cimento ao redor das válvulas de injeção pode restringir a abertura das mesmas nos estágios de reinjeção, inviabilizando esta etapa caso seja necessária.

7.2 DIRETRIZES PARA EXECUÇÃO DE TIRANTES EM ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO DE SOLO

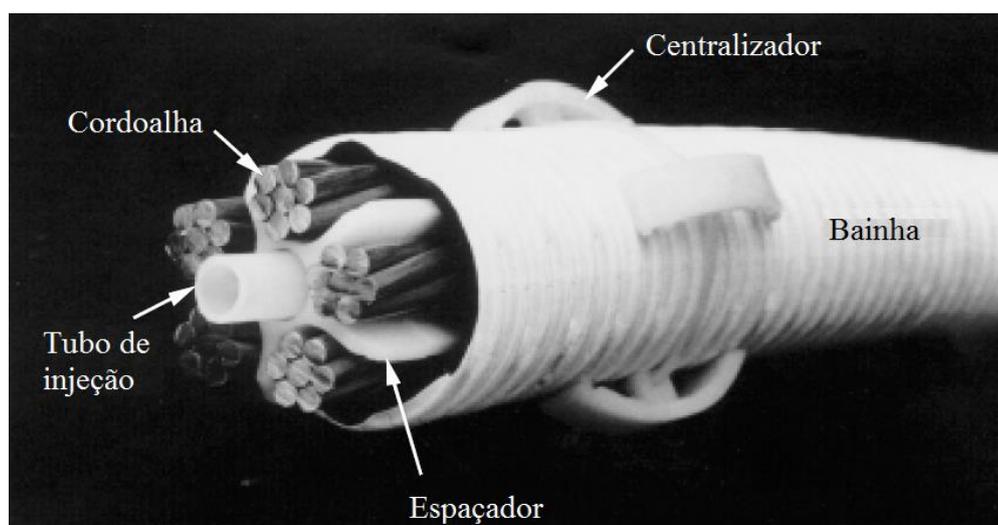
Assim como na elaboração de diretrizes para projeto de tirantes, a elaboração de diretrizes de execução é feita seguindo o formato e a sequência propostos no capítulo destinado à revisão bibliográfica do assunto.

7.2.1 Diretrizes para preparo do tirante

Na etapa de preparo do tirante, as recomendações apresentadas foram bastante semelhantes. Antes da montagem, devem ser seguidas as indicações dos fabricantes de todos os produtos quanto ao seu correto armazenamento. Devem estar protegidos de exposição às intempéries e contra danos mecânicos.

A montagem deve ocorrer sobre bancada que comporte o tirante em todo seu comprimento. Nesta etapa, são montados todos os elementos de emendas, centralizadores, espaçadores, sistema de injeção e proteção contra corrosão. Quando utilizada graxa como proteção, deve-se garantir que permaneça no tirante durante todo o processo de construção para que seja considerada, de fato, uma proteção contra corrosão. No trecho ancorado devem ser utilizados espaçadores e centralizadores a cada 2 ou 3 metros, de acordo com a indicação de Yassuda e Dias (1998), para garantir a permanência do tirante no centro da perfuração e a existência do revestimento mínimo previsto, conforme exemplificado na figura 43.

Figura 43 – Exemplo de tirante montado



(fonte: SABATINI et. al, 1999, p. 10, tradução nossa)

O manuseio dos tirantes montados até o momento da instalação também deve ser feito com cuidado, sem danificar nenhum de seus componentes. O armazenamento deve ser feito em local coberto e sem contato com o solo, evitando danos na proteção contra corrosão e a presença de materiais que possam afetar o contato entre a nata de cimento e o elemento de tração ou sua vida útil.

7.2.2 Diretrizes para perfuração do terreno

A escolha do método de perfuração deve partir dos resultados dos ensaios de campo realizados. O método deve garantir a estabilidade do furo e que este se mantenha aberto até a etapa de injeção. Conforme colocado por Joppert Júnior (2007), solos arenosos podem causar colapso do furo, sendo necessário o uso de revestimento durante a perfuração que será retirado à medida que o tirante vai sendo preenchido na etapa de injeção. Outros tipos de solo também podem apresentar alguma instabilidade, como solos coesivos encharcados, também podendo ser utilizado revestimento ou fluidos estabilizantes que não afetem a integridade ou a vida útil do tirante. Conforme Sabatini et. al (1999), a estabilização não deve ser feita com lama bentonítica, pois enfraquece a interação aço/nata de cimento.

A perfuração deve ser mantida retilínea, preservando o diâmetro, a inclinação e a profundidade previstos em projeto. Deve ser retirado o material de escavação com água limpa ou ar comprimido, conforme indicado por Solotrat Engenharia Geotécnica Ltda (2015). Como

a remoção completa do material é difícil, é recomendada a indicação feita pela prática internacional de avançar a perfuração em mais 1 m para a acomodação deste material.

Quanto às tolerâncias dos valores de projeto, serão adotados os valores sugeridos pela Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro (2014b), permitindo uma variação de 50 mm na locação do furo e 3° na inclinação. Os valores sugeridos nas outras referências apresentadas são da mesma ordem de grandeza, não apresentando grandes variações.

Durante a perfuração, é importante que seja seguida a recomendação da NBR 5629 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006) de se fazer registros das perfurações através de boletins de campo. As informações mínimas a serem registradas, que servirão para a constante análise do projeto por parte do projetista, são referentes ao tipo de equipamento de perfuração, identificação, diâmetro e inclinação do furo, utilização de revestimento ou fluido de estabilização, espessura e tipo de solo das camadas atravessadas, datas de início e término, e quaisquer outras informações que possam contribuir para o funcionamento do tirante.

7.2.3 Diretrizes para instalação do tirante

Nesta etapa, deve ser feita a verificação dos serviços anteriores imediatamente antes da inserção do tirante do terreno. A perfuração deve estar completamente aberta, limpa (quando não estiverem sendo usados fluidos estabilizantes) e respeitando as tolerâncias de locação e inclinação.

O tirante montado deve ter todas as suas componentes com integridade preservada. As emendas, espaçadores, centralizadores, o sistema de injeção e todos os componentes da proteção devem estar conforme previsto em projeto, sem danos. Devem ser procedidos os devidos reparos caso haja alguma inconformidade.

7.2.4 Diretrizes para injeção

A escolha do tipo de injeção (simples ou múltipla) é feita pelo executor, devendo garantir a resistência prevista em projeto. O preenchimento deve ocorrer no sentido do fundo do tirante para a boca, de modo a evitar presença de ar ou água. O preenchimento do trecho livre e do

trecho ancorado deve ser feito em uma etapa para evitar a criação de uma junta na interface dos trechos, o que aumentaria a vulnerabilidade à corrosão. No trecho livre, o preenchimento deve ser feito até aproximadamente 300 ou 600 mm do *trumpet*. O equipamento utilizado deve ser provido de medidores de pressão e volume de argamassa injetada.

A injeção simples é recomendada quando o tirante tiver cargas baixas ou quando não há ganho significativo de resistência com a aplicação de mais estágios pressão (por exemplo ancoragem em rochas). Quando for prevista aplicação de pressão de injeção, deve ser feita apenas no trecho ancorado, sendo o trecho livre preenchido com baixa pressão ou pressão gravitacional, conforme colocado por Sabatini et. al (1999). O fator água/cimento recomendado é o sugerido pela norma brasileira, igual a 0,5, contribuindo para a manutenção de um valor de permeabilidade da nata que ofereça boa proteção contra corrosão.

Para injeção em múltiplas fases, deve ser prevista a instalação de sistema com válvulas manchete no trecho ancorado do tirante. As injeções, seguindo recomendação de Joppert Junior (2007), são feitas com bomba de injeção utilizando pressões entre 20 kg/cm² e 60 kg/cm² para a abertura das válvulas. A injeção em uma única válvula por vez é feita com a utilização de um obturador duplo. Pode ser feito um novo estágio de injeção após o tempo de pega do cimento do estágio anterior. Para estas reinjeções, o fator água cimento indicado é de 0,5 a 0,7. Após cada estágio de injeção, deve ser feita a lavagem do tubo de injeção para que não se impossibilite a execução do próximo estágio. Após o último estágio, caso o tubo não for retirado, deve ser mantido preenchido pela nata de cimento.

7.2.5 Diretrizes para Protensão

Conforme apresentado no capítulo anterior, todos os tirantes devem ser ensaiados para garantir as previsões da etapa de projeto e verificar a qualidade da execução até o momento. Nos três conjuntos de ensaios apresentados (norma brasileira, americana e europeia), cada tipo de ensaio tem finalidades semelhantes.

Os primeiros tirantes de cada tipo, em número reduzido, são ensaiados de maneira bastante detalhada, com ciclos de carga e descarga e medição de deslocamento da cabeça em cada ciclo. Este ensaio oferece uma boa caracterização do tirante quanto a deformações elásticas e permanentes, servindo como base para a continuidade do projeto.

Em todos os outros tirantes, deve ser feito um ensaio mais simples, com um ciclo de carga até a carga máxima e descarga no final, sendo medidos os deslocamentos das cabeças. Este tipo de ensaio garante a capacidade de todos os tirantes trabalharem com as cargas previstas em projeto, conferindo grande confiabilidade à técnica de atirantamento de estruturas.

Um último tipo de ensaio, mais longo e também realizado em poucos tirantes, é responsável por avaliar as deformações por fluência. Nesse tipo de ensaio, as cargas são aplicadas por períodos maiores de tempo e de forma constante, sendo medidos os deslocamentos da cabeça em diferentes instantes de tempo.

A análise dos resultados é feita pela construção de gráficos com os resultados dos ensaios. Em todos os casos, a aceitação dos tirantes se dará em função da resposta do tirante às cargas de ensaio, a partir da avaliação do comprimento efetivo do trecho livre e das deformações por fluência.

Frente às semelhanças nos ensaios apresentados, são recomendados os ensaios propostos pela NBR 5629 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006), apresentados no item 6.5.1 deste trabalho, que indicam carregamentos máximos um pouco maiores, se comparados aos outros apresentados. Para auxiliar o engenheiro projetista nas suas decisões após analisar os resultados dos ensaios e os critérios de aceitação da norma brasileira, é indicado o uso do diagrama da figura 37, apresentado no item 6.5.2.4 deste trabalho. Este diagrama é utilizado na prática americana para ilustrar algumas opções de medidas que podem ser tomadas pelo projetista na avaliação dos resultados.

Quanto ao sistema de aplicação de carga, as recomendações apresentadas também são semelhantes. O carregamento deve ser feito no sentido da inclinação do tirante, de forma a gerar apenas esforços de tração. O equipamento utilizado deve ser aferido anualmente, composto por macaco hidráulico e dotado de medidor de pressão, permitindo correlação com a carga aplicada. Quando for necessária a manutenção da carga de forma constante (medida de deformações por fluência), devem ser utilizadas células de carga, que conferem maior precisão.

7.2.6 Diretrizes para incorporação e preparo da cabeça

A bibliografia referenciada aponta como mecanismo de ancoragem a utilização de sistema com rosca para tirante de barras e cunhas e clavetes para cordoalhas, apresentados nas figuras 39 e 40, no item 6.6 deste trabalho. O restante da cabeça deve ser composto pela cunha de grau, para manter a ancoragem no alinhamento da perfuração e instalação do tirante, e pela placa de apoio, para distribuir a carga na estrutura de contenção. Estes acessórios devem ser fornecidos juntos dos elementos de tração do tirante, sendo dimensionados pelo fabricante para absorver as mesmas cargas máximas de ensaio. Estes elementos, conforme indicação da BS EN 1537 (BRITISH STANDARDS, 2000), devem ser capazes de se adequar às deformações que podem ocorrer na estrutura ao longo da sua vida útil.

Quanto ao valor da carga de incorporação à estrutura, os valores referenciados variam entre 75% e 100% da carga de trabalho. A carga total do tirante seria mobilizada depois de ocorridas as deformações na estrutura após as etapas de escavação. Deste modo, quanto mais restritas forem as deformações, tanto no terreno escavado e na estrutura de contenção, quanto no terreno adjacente à escavação, mais próxima de 100% da carga de trabalho deve ser a carga de incorporação.

Uma recomendação bastante importante é feita baseada na indicação da prática americana de se verificar a carga após a incorporação. É importante que seja feito o teste *lift-off*, conforme indicado no item 6.6.2 deste trabalho, para ser realizada essa verificação. Este ensaio compreende uma nova protensão do tirante até que a ancoragem comece a perder o contato com o apoio. A carga necessária para que isso aconteça não deve variar 5% em relação à carga de incorporação prevista. Caso seja maior do que 5%, a incorporação deve ser feita novamente. Esta avaliação é bastante importante, pois, caso a carga seja muito inferior à prevista para incorporação, a carga de trabalho só será mobilizada após ocorrerem deformações na estrutura maiores do que as esperadas. Estas deformações podem não ser admissíveis para a estrutura de contenção ou para as estruturas existentes no terreno adjacente.

7.2.7 Diretrizes para proteção da cabeça do tirante

A região da cabeça do tirante, por estar sujeita à ação direta das intempéries, deve ser cuidadosamente protegida. A região protegida pelo *trumpet*, conforme colocado anteriormente, deve receber, nesta etapa, o preenchimento total com nata de cimento. Antes do preenchimento, deve-se seguir a recomendação de Ohio Department of Transportation (2012) e verificar se a proteção do trecho livre não está em contato com a placa de apoio. Se estiver, deve ser cortada. Garantida esta condição, pode ser feita a injeção da região com nata de cimento. É recomendado que se aguarde o assentamento da nata de cimento e, caso necessário, se complete o espaço vazio, de forma a garantir o total preenchimento até a placa de apoio.

Na parte externa da cabeça do tirante, as referências recomendam a cobertura com concreto ou argamassa. Diferentes valores de espessura para o cobrimento são indicados. Aqui, será adotado o maior valor indicado, como sendo igual a 5 cm de espessura, conforme recomendação de Sabatini et. al (1999) e da Associação Brasileira de Empresas de Engenharia de fundações e geotecnia (2012). Para tirantes sujeitos a condições mais agressivas, é recomendada a utilização de uma cobertura plástica ou metálica a ser preenchida pela argamassa ou pelo concreto com os mesmos cuidados do preenchimento do *trumpet*, conforme recomendações de Sabatini et. al (1999) e da BS EN 1537 (BRITISH STANDARDS, 2000).

Quadro 8 – Resumo das diretrizes de projeto

PROJETO		
1. INVESTIGAÇÃO	a) Terreno vizinho	Obtenção da autorização para a instalação do tirante no terreno vizinho (responsabilidade do contratante)
		Avaliação de interferências no subsolo e verificação da integridade da superestrutura (projetista)
	b) Ensaios de campo e laboratório	Fornecer base para pré-dimensionamento do trecho ancorado e escolha dos métodos de perfuração e injeção. Executar ao menos SPT (boa estimativa de perfil de solo e correlações para cálculo da carga admissível no trecho ancorado)
		Avaliação do custo-benefício. Se possível, executar mais ensaios de campo e laboratório
2. GEOMETRIA	a) Carga	Determinação da carga de trabalho através do Método da área tributada, alternando número de tirantes e espaçamento.
		Indicar as cargas máximas de ensaio, trabalho e incorporação
	b) Espaçamento	Mínimo de 1,5m para evitar interação entre tirantes adjacentes.
		Linha superior não pode superar resistência passiva do solo e o trecho ancorado não pode causar deformações na superfície, devendo estar ao menos a 4,5 metros de profundidade
	c) Inclinação	Entre 15° e 30° para facilitar injeção Se necessário aumentar, verificar os esforços na fundação
d) Verificação	Verificar FS global em software. Mínimo de 1,5 para todas as superfícies de ruptura após inserção dos tirantes.	
3. TIRANTE	a) Trecho livre	Possibilitar que o centro do trecho ancorado esteja sobre uma superfície com FS de 1,5 antes da colocação dos tirantes
	b) Trecho ancorado	No Brasil, dimensionar conforme a NBR 5629:2006
		Comparar com outros métodos (Bustamante e Doix, 1985; Sabatini et. al, 1999, por exemplo) Ajustar após ensaios de protensão

continua

continuação

3. TIRANTE	c) Elemento de tração	Indicação de bitola da barra ou bitola e número de cordoalhas em função das cargas no projeto
		Contratante tem a opção de consultar diferentes fabricantes que atendam as especificações
		Fabricante fornece as emendas de barras, que devem suportar as cargas previstas
	d) Corrosão	Classes de proteção dos trechos livre e ancorado conforme NBR 5629:2006
		Escolha da classe de proteção em função da vida útil do tirante, agressividade do meio, consequências da falha do tirante e relevância do custo da proteção no custo da obra, conforme figura 15
		Entre a placa de apoio e o início do trecho livre, instalar um tubo de maior diâmetro conectado à placa (<i>trumpet</i>) para reforçar a proteção, a ser preenchido com nata de cimento após a protensão do tirante
	e) Diâmetro da perfuração	Deve comportar todos os elementos do tirante e permitir cobertura com nata de cimento (pelo menos 2cm)
		Se forem previstos estágios de reinjeção, não exceder muito o valor mínimo de cobrimento. A formação de uma coroa de cimento muito espessa pode impedir a abertura das válvulas na reinjeção

(fonte: elaborado pelo autor)

Quadro 9 – Resumo das diretrizes de execução

EXECUÇÃO		
1. PREPARO DO TIRANTE	a) Armazenamento	Seguir as recomendações do fabricante, evitar danos mecânicos e manter em local longe da ação de intempéries
	b) Montagem	Deve ser feita em bancada com tamanho igual ou superior ao comprimento do tirante
		Aplicação da proteção contra corrosão. Montagem de Emendas, centralizadores, espaçadores e válvulas de injeção
c) Manuseio e armazenamento dos tirantes montados	Não danificar a proteção e demais componentes instalados durante o transporte. Deve-se evitar que o tirante dobre excessivamente	
2. PERFURAÇÃO	a) Equipamento	Deve ser escolhido pelo executor, sendo capaz de perfurar o terreno e manter a perfuração estável, retilínea e na locação adequada
	b) Revestimento/estabilização	Usar revestimento ou fluidos estabilizantes quando o solo apresentar instabilidade, podendo ser previsto após a análise dos ensaios. Os fluidos estabilizantes não podem afetar a vida útil do tirante ou a interação aço/nata de cimento (não utilizar lama bentonítica)
	c) Cuidados/tolerâncias	Furo deve ser mantido retilíneo, com variação de até 50 mm na locação e 3° na inclinação
3. INSTALAÇÃO	a) Verificação do furo	Conferir se o furo está aberto, limpo e respeitando as tolerâncias de locação e inclinação
	b) Verificação e instalação do tirante	Verificar integridade de todos os componentes e realizar os reparos necessários antes da inserção na perfuração

continua

continuação

4. INJEÇÃO	a) Equipamento	Deve ser dotado de medidor de volume e pressão
	b) Simples	Utilizar para tirantes de cargas relativamente baixas ou quando não há ganho significativo de resistência com a aplicação de mais estágios de injeção (ancoragem em rochas, por exemplo)
	c) Múltiplos estágios	Para tirantes com cargas elevadas. Aplicar múltiplos estágios de injeção com sistemas de válvulas manchete no trecho ancorado, respeitando o período de pega do cimento da etapa anterior
5. PROTENSÃO	a) Equipamento	Macaco hidráulico com medidor de pressão (aferido anualmente) e que permita a aplicação da carga no eixo do tirante. Para medições com carga constante (ensaios de fluência), deve também contar com células de carga
	b) Ensaios	Ensaios da NBR 5629
	b.1) Qualificação	Ensaio de qualificação da NBR 5629 - validação do projeto (poucos tirantes, ensaio detalhado)
	b.2) Recebimento	Ensaio de recebimento da NBR 5629 - aceitação de cada tirante (todos os tirantes, ensaio mais expedito)
	b.3) Fluência	Ensaio de fluência da NBR 5629 - avaliação das deformações com cargas de longa duração (poucos tirantes, ensaio mais longo)
c) Avaliação	Verificar limites da NBR 5629 e considerar avaliação pela figura 37	
6. INCORPORAÇÃO	a) Carga de incorporação	Entre 75% e 100% da carga de trabalho. Mais próxima de 100% quanto maior for a restrição a deslocamentos da estrutura ou do terreno adjacente
	b) Bloco	Sistema com placa de apoio, cunha de grau e bloco de ancoragem, fornecidos pelo fabricante para resistir às cargas de projeto
	c) Verificação	Verificação da carga após a incorporação (teste <i>lift-off</i>)
7. PROTEÇÃO DA CABEÇA	a) Trumpet	Preenchimento da região do <i>trumpet</i> com nata de cimento
	b) Cabeça	Pintura anticorrosiva nas componentes metálicas e cobrimento com camada de 5 cm de concreto ou argamassa

(fonte: elaborado pelo autor)

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo a elaboração de diretrizes para projeto e execução de tirantes em estruturas de contenção de solo a partir da identificação de práticas recomendadas em diferentes locais do mundo. Com a análise de bibliografia disponível principalmente no Brasil, nos Estados Unidos e na Europa, o objetivo do trabalho foi alcançado, com a apresentação dos resultados no capítulo 7.

Por se tratar de um trabalho realizado no Brasil, é inevitável a comparação dos resultados obtidos com as recomendações locais. Desta maneira, as recomendações brasileiras mostraram-se consolidadas em diversos procedimentos de projeto e execução de tirantes. Em questões importantes como os dimensionamentos na etapa de projeto (estabilidade global, trechos livre e ancorado, por exemplo), indicações de procedimentos injeção e ensaios de protensão, entre outros, as recomendações nacionais são bastante próximas das internacionais. Por outro lado, em alguns pontos bastante significativos, as recomendações locais, principalmente da NBR 5629 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006) se mostraram insuficientes se comparadas às recomendações internacionais.

Podem se destacar dois pontos principais onde as indicações da norma brasileira são insuficientes. O primeiro, na etapa de projeto, é a respeito da proteção contra corrosão da região entre a placa de apoio e o início da proteção do trecho livre. Para a proteção deste local, onde são apontados problemas de corrosão com grande incidência, a norma brasileira indica apenas o preenchimento com nata de cimento. A prática europeia e dos Estados Unidos oferece um complemento a esta proteção com a utilização de um tubo externo, denominado *trumpet* pelos americanos, conferindo uma camada extra de proteção.

O segundo ponto, que não é mencionado na norma brasileira e na norma europeia BS EN 1537 (EUROPEAN STANDARDS, 2000), é a verificação da carga no tirante após a ancoragem. A verificação através do teste *lift-off* proposto pela prática americana é importante no sentido de se manter as previsões de projeto quanto às deformações da estrutura. Caso a carga de incorporação seja muito inferior à carga prevista, podem ocorrer deformações na estrutura e no terreno adjacente maiores do que as esperadas até que seja mobilizada a carga final do tirante.

Um fator que pode ser aprimorado na etapa de projeto, tanto no Brasil quanto nos outros locais pesquisados, é referente às investigações geotécnicas. As práticas se mostraram bastante restritas ao ensaio SPT, que, apesar de fornecer um bom indicativo do perfil do solo, é limitado quanto à obtenção de outros parâmetros. Além disso, a dependência de um ensaio onde a padronização da execução e da comparação de resultados é baixa, oferece menos segurança ao engenheiro projetista durante as etapas de dimensionamento.

Por outro lado, a consolidação da prática de ensaios de protensão em todos os tirantes nos locais pesquisados aparece de forma bastante positiva. A conferência total do desempenho dos tirantes faz com que exista grande confiabilidade no sistema de contenção após sua execução, além de permitir ajustes de projeto durante a execução.

Por fim, as diretrizes elaboradas se mostraram satisfatórias. Foram identificados pontos onde algumas práticas pudessem ser aprimoradas e encontradas, nas recomendações de locais diferentes, medidas alternativas para tais melhorias. Em outros pontos, puderam ser constatadas recomendações já bem estabelecidas, apontando para um padrão de execução a ser seguido.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES E GEOTECNIA, **Manual de Execução de Fundações e Geotecnia: práticas recomendadas**. São Paulo: Pini, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5629**: execução de tirantes ancorados no terreno. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR 11682**: estabilidade de encostas. Rio de Janeiro, 2009.

BOND, A.; HARRIS, A. **Decoding Eurocode 7**. London: Taylor e Francis, 2008.

BRITISH STANDARDS. **BS EN 1537**: execution of special geotechnical work – ground anchors. UK, 2000.

BUDHU, M. **Foundations and earth retaining structures**. Hoboken, USA; John Wiley & Sons, c2008.

BUSTAMANTE, M.; DOIX, B. Une méthode pour le calcul des tirants et des micropieux injectés. **Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées**, Paris, n. 140, p. 75-92, nov.-déc. 1985.

DSI DYWIDAG-SYSTEMS INTERNATIONAL, **DYWIDAG Permanent Strand Anchors with DCP (double corrosion protection)**. New York, USA, c2015. Disponível em: <<http://www.dsiamerica.com/de/products/geotechnic/dywidag-strand-anchor-systems/dywidag-permanent-strand-anchors-with-dcp-double-corrosion-protection.html>>. Acesso em 28 out. 2015.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Eurocode 7 – geotechnical design – part 1: general rules**. Brussels, 2004.

FALCONI, F. F.; SANTOS, M. S.; DIAS, M.; TOSSUNIAN, R. Escavação para subsolos em edificações urbanas. In: SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS E GEOTECNIA, 6., 2008, São Paulo. **Anais...** São Paulo: SEFE VI, 2008. v. 2. p. 199-224.

FUNDAÇÃO INSTITUTO DE GEOTÉCNICA DO MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO. **Manual técnico de encostas**. Rio de Janeiro, 2014a. v. 1.

_____. **Manual técnico de encostas**. Rio de Janeiro, 2014b. v. 2.

GRUPO BRASFOND, **Tirantes**. Guarulhos, c[2015?]. Disponível em: <<http://www.brasfond.com.br/site/tirantes.html>>. Acesso em 28 out. 2015.

INCOTEP SISTEMAS DE ANCORAGEM, **Catálogo Geral**. Guarulhos, 2015. Disponível em: <<http://www.incotep.com.br/downloads/catalogo-geral.pdf>>. Acesso em 28 out. 2015.

JOPPERT JÚNIOR, I. **Fundações e contenções de edifícios: qualidade total na gestão do projeto e execução**. São Paulo: Pini, 2007.

MARZIONNA, J. D.; MAFFEI, C. E. M.; FERREIRA, A. A.; CAPUTO, A. N. Análise, projeto e execução de escavações e contenções. In: HACHICH, W.; FALCONI, F. F.; SAES, J. L.; FROTA, R. G. Q.; CARVALHO, C. S.; NIYAMA, S. (Ed.). **Fundações: teoria e prática**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1998. p. 537-578.

MOLITERNO, A. **Caderno de muros de arrimo**. São Paulo: Edgard Blücher, 1980.

OHIO DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, **Supplemental specification 866 – ground anchors**. Columbus, USA, 2012. Disponível em: <http://www.dot.state.oh.us/Divisions/ConstructionMgt/Specification%20Files/866_10192012_for_2013.PDF>. Acesso em 28 out. 2015.

PREPON SISTEMA DE PROTENSÃO, **Equipamentos**. Regente Feijó, c2011. Disponível em: <<http://www.prepron.com.br/equipamentos.php>>. Acesso em 28 out. 2015.

RANZINI, S. M. T.; NEGRO JÚNIOR, A. Obras de contenção: tipos, métodos construtivos, dificuldades executivas. In: HACHICH, W.; FALCONI, F. F.; SAES, J. L.; FROTA, R. G. Q.; CARVALHO, C. S.; NIYAMA, S. (Ed.). **Fundações: teoria e prática**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1998. p. 497-215.

SABATINI, P. J.; PASS, D.G.; BACHUS, R.C. **Ground Anchors and Anchored Systems**. Report FHWA-IF-99-015, Geotechnical Engineering Circular n. 4, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, DC, USA, 1999, June.

SAES, J. L.; STUCCHI, F. R.; MILITITSKY, J. Concepção de obras de contenção. In: HACHICH, W.; FALCONI, F. F.; SAES, J. L.; FROTA, R. G. Q.; CARVALHO, C. S.; NIYAMA, S. (Ed.). **Fundações: teoria e prática**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1998. p. 517-536.

SCHNAID, F. **Ensaio de campo e suas aplicações à engenharia de fundações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2000.

SOLOTRAT ENGENHARIA GEOTÉCNICA LTDA. **Manual de Serviços Geotécnicos Solotrat**. 5. ed. [São Paulo], 2015.

XANTHAKOS, P. P. **Ground Anchors and Anchored Structures**. Hoboken, USA: John Wiley & Sons, 1991.

YASSUDA, C.T.; DIAS, P. H. V. Tirantes. In: HACHICH, W.; FALCONI, F. F.; SAES, J. L.; FROTA, R. G. Q.; CARVALHO, C. S.; NIYAMA, S. (Ed.). **Fundações: teoria e prática**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1998. p. 603-640.