

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

Willan Henrique Anghinoni

**ANCORAGEM EM ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO
APLICADA ÀS OBRAS RODOVIÁRIAS**

Porto Alegre
Novembro de 2018

Willan Henrique Anghinoni

**ANCORAGEM EM ESTRUTURA DE CONTENÇÃO APLICADA ÀS OBRAS
RODOVIÁRIAS**

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

Orientadora: Prof. Dr. Karla Salvagni Heinech

Coorientador: Prof. Dr. Cesar Alberto Ruver

Porto Alegre

Novembro de 2018

CIP - Catalogação na Publicação

Henrique Anghinoni, Willan
Ancoragem em Estruturas de Contenção Aplicadas Às
Obras Rodoviárias / Willan Henrique Anghinoni. --
2018.

73 f.

Orientadora: Karla Salvagni Heinech.

Coorientador: Cesar Alberto Ruver.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Civil, Porto Alegre,
BR-RS, 2018.

1. Estabilização de encostas naturais e taludes
rodoviários. 2. Sistema de ancoragem. 3. Tirantes.
I. Salvagni Heinech, Karla, orient. II. Alberto
Ruver, Cesar, coorient. III. Título.

WILLAN HENRIQUE ANGHINONI

**ANCORAGEM EM ESTRUTURA DE CONTENÇÃO APLICADA ÀS OBRAS
RODOVIÁRIAS**

Este 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 atividade de ensino - Trabalho de Conclusão de Curso II - Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 26 de dezembro de 2017

Prof^a. Karla Salvagni Heinech
Doutora pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Orientadora

BANCA EXAMINADORA

Prof. Sérgio Filipe Veloso Marques (UFRGS)
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho a minha família, Liames Oliva Anghinoni e Renata Gatto, por todo o amor e suporte que me deram não somente durante esse período, mas também por toda a minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus familiares, Liames Oliva Anghinoni e Renata Gatto, que durante todo o curso de graduação me deram o suporte necessário para que eu realizasse o sonho de ser engenheiro civil.

Agradeço a professora Karla Salvagni Heinech, orientadora deste trabalho, pela grande compreensão e auxílio dado na elaboração da pesquisa, tanto em conselhos sobre informações necessárias para desenvolvimento do presente trabalho, como pela disposição nos momentos em que necessitei de orientação nos encontros e conversas. Agradeço aos Professores da Escola de Engenharia pelo empenho em ensinar e fazer com que a Engenharia Civil da UFRGS seja destaque pela excelência.

Agradeço aos meus amigos e colegas, principalmente à Carima Atiyel, que me apoiaram e me compreenderam durante o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos moradores e ex-moradores do Centro Estudantil Universitário de Porto Alegre (CEUPA) que me acolheram durante toda a minha graduação.

Agradeço aos meus amigos do curso de graduação, principalmente ao Alisson Sauer, pela amizade e apoio ao longo dos últimos anos.

Agradeço aos meus amigos Alan Carlos Rossetto, Anselmo Rafael Cukla, Tiago Torres, José Henrique Braz, Susete Machado, Luís Gustavo Ribeiro, Laís Genro, Camila Stella e Tales Costa, sobre tudo pela amizade, pelo grande apoio e incentivo durante a graduação.

A fé invade o infinito e da resposta do impossível!
Malcom X

RESUMO

O presente trabalho, necessário para a obtenção do Título de Bacharelado em Engenharia Civil pela UFRGS, tem o propósito de fornecer informações importantes a respeito da utilização dos diferentes modelos de ancoragens em estruturas de contenção aplicadas às obras rodoviárias em conformidade com a normativa brasileira, com exceção dos túneis e cabeceira de pontes. O gênero em questão serve de auxílio no estudo de dimensionamento, construção e ensaios de verificação das estruturas de reforços para a estabilização de encostas naturais, como também de taludes de corte e aterro, de acordo com as características dos principais tipos de solo do Brasil. Em outras palavras, pretende-se elaborar uma breve documentação para abordar as necessidades da indústria nacional, através de uma revisão da literatura da especialidade comparando as ideias mais relevantes e logo em seguida, confrontando-as para obter a melhor solução aceitável para o problema apresentado. Além disso, uma amostragem detalhada das características dos modelos matemáticos com base nos métodos de aplicação dos sistemas de ancoragem, como também o comportamento mecânico do maciço e da superfície de contato do mesmo com o a estrutura de suporte antes e depois da protensão dos tirantes, além de abordar as dificuldades e limitações inerentes à sua aplicação. Finalmente, anunciam-se algumas conclusões de caráter geral das informações aqui descritas, tendo em conta vantagens e desvantagens num contexto comparativo e individual, e, por fim, a viabilidade da escolha do projeto referente ao custo, aproveitamento do espaço e segurança.

Palavras-chaves: Estabilidade de encostas naturais e taludes rodoviários, sistema de ancoragem e tirantes

ABSTRACT

The present work, necessary to obtain the Bachelor's Degree in Civil Engineering by UFRGS, is intended to provide important information regarding the use of different anchorage models in containment structures applied to road works in accordance with the Brazilian regulations, except for tunnels and head of bridges. The genus in question serves as an aid in the study of sizing, construction and verification tests of reinforcement structures for the stabilization of slopes and slopes according to the characteristics of the main soil types of Brazil. In other words, it is intended to prepare a brief documentation to meet the needs of the national industry, through a critical review of the literature of the specialty comparing the most relevant ideas and then confronting them to obtain the best acceptable solution to the problem introduced. In addition, a detailed sampling of the characteristics of the mathematical models based on the methods of construction of the containment structures, as well as the mechanical behavior of the natural mass and the contact surface thereof with the support structure. Also, it will be the analysis of the load that the anchorage will support due to the movements of the soil, besides the difficulties and limitations inherent to its evaluation. Finally, we announce some general conclusions of the information described here, taking into account advantages and disadvantages in a comparative and individual answer, and finally the feasibility of choosing the project regarding cost, space utilization and safety factor.

Key words: Stability of natural slopes and road slopes, anchorage system and tie rods.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1- ESTADO DE TENSÕES EM REPOUSO	21
FIGURA 2- ESTADO ATIVO DE RANKINE	24
FIGURA 3- ESTADO PASSIVO DE RANKINE	25
FIGURA 4- EFEITO DE DESLOCAMENTO DA CONTENÇÃO NOS ESTADOS ATIVO E PASSIVO....	26
FIGURA 5- ROTURA DE UMA CORTINA ATIRANTADA; A, B) ROTURA POR ESTABILIDADE GLOBAL; C, D, F) ROTURA POR ARRANCAMENTO DE ANCORAGEM; G) ROTURA POR FORÇAS VERTICAIS APLICADAS À CORTINA; H) ROTURA DO TIRANTE	28
FIGURA 6- PARAMENTO DE CONCRETO ARMADO	30
FIGURA 7- PLACAS PRÉ-MOLDADAS DE CONCRETO ARMADO CORTINA.....	30
FIGURA 8- GRELHA DE CONCRETO ARMADO ATIRANTADA	31
FIGURA 9- PLACAS DE CONCRETO ARMADO ATIRANTADA	32
FIGURA 10- POLÍGONO DE FORÇAS DO MÉTODO BRASILEIRO ADAPTADO.....	34
FIGURA 11- ANÁLISE DE ESTABILIDADE PELO MÉTODO DE KRANZ (1953)	36
FIGURA 12- MODELO ADMITIDO PARA CASOS DE CORTINAS COM UMA LINHA DE ANCORAGEM SEGUNDO RANKE-OSTERMAYER.....	37
FIGURA 13- CUNHAS POTENCIAS DE RUPTURA COM TIRANTES DIFERENTES, COM O PRIMEIRO NÍVEL MAIS CURTO	38
FIGURA 14- CUNHAS POTENCIAS DE RUPTURA COM TIRANTES DIFERENTES, COM O PRIMEIRO NÍVEL MAIS COMPRIDO	39
FIGURA 15- CONSTITUIÇÃO TÍPICA DE UMA ANCORAGEM EM TERRENO	45
FIGURA 16- DETALHES DE CABEÇA PARA ANCORAGENS PARA ARMADURAS CONSTITUÍDAS POR: A) CORDÕES OU FIOS; B) BARRAS	47
FIGURA 17- SEÇÃO TRANSVERSAL TIPO COMPRIMENTO DE UMA ANCORAGEM DEFINITIVA	48
FIGURA 18- SEÇÃO TRANSVERSAL TIPO BULBO DE SELAGEM: A) ANCORAGEM PROVISÓRIA; B1) ANCORAGEM DEFINITIVA; B2) SEÇÃO SIMPLES COM CENTRALIZADORES E ESPAÇADORES.....	48
FIGURA 20- ESCORREGAMENTO CAUSADO POR DESCONTINUIDADE DO MACIÇO.....	52
FIGURA 21- ESCORREGAMENTO DEVIDO A SATURAÇÃO DO TALUDE.....	52
FIGURA 22- ESCORREGAMENTO DEVIDO A EVOLUÇÃO DA EROSÃO.....	53
FIGURA 23- QUEDA DE BLOCOS EM TALUDES DE ROCHAS ÍGNEAS E DE ROCHAS SEDIMENTARES.....	54
FIGURA 24- ROLAMENTO DE BLOCOS	54

FIGURA 25- COLUNAS ATIRANTADAS DE CONTENÇÃO DE BLOCOS DE ROCHA.....	55
FIGURA 26- EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DE TIRANTES.....	57
FIGURA 30 - DETALHE DE UM DRENO SUB-HORIZONTAL PROFUNDO – DHP	61
FIGURA 32- RUPTURA DE CORTINA ATIRANTADA NA ERS-115.....	66

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – SISTEMA DE PROTEÇÃO EM FUNÇÃO DO MEIO E LOCAL	50
---	-----------

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
DIN	Deutsches Institut für Normung ou Instituto Alemán de Normalización
DHP	Dreno Sub-Horizontal Perfurado
EM	Norma Europeia
MEF	Método dos Elementos Finitos
NBR	Norma Brasileira de Regulamento
NP	Norma Portuguesa

LISTA DE SÍMBOLOS

A_s	Área da seção transversal máxima do aço
C	Coesão do solo
c'	Coesão efetiva do solo
C^*	Coesão reduzida pelo FS a ser usada na simulação
f_{yk}	Resistência característica do aço à tração
F	Força de ancoragem
Fa	Força de protensão
FS	Fator de segurança
H	Altura da cortina
I_l	Empuxo ativo
OCR	Razão de sobreadensamento do solo
P	Peso da cunha mais a componente devida ao carregamento distribuído na superfície do talude, por metro linear
P_l	Peso próprio
R	Força reativa
k_0	Coefficiente de empuxo em repouso
L	Comprimento da linha de maior declive do plano crítico de deslizamento
M	Valor para redução dos parâmetros de resistência
T	Força na ancoragem por metro linear
T_{max}^h	Componente horizontal da força T_{max} que conduz a cunha à condição de equilíbrio limite
$T_{atuante}^h$	Componente horizontal da força real do tirante
$T_{1atuante}^h$	Componente horizontal da força do tirante do primeiro nível
$T_{2atuante}^h$	Componente horizontal da força do tirante do segundo nível
z	Profundidade
σ'_a	Pressão efetiva no estado ativo
σ'_h	Pressão efetiva horizontal
σ'_p	Pressão efetiva no estado passivo
σ'_v	Pressão efetiva vertical
γ	Peso específico do solo
γ_d	Peso específico seco real compactado da areia
$\gamma_{d\,m\,i\,n\,i}$	Peso específico seco da areia no estado mais fofo

Φ	Ângulo de resistência ao cisalhamento do solo
ϕ'	Ângulo de atrito interno
Φ^*	Ângulo de atrito do solo reduzido pelo FS a ser usada na simulação
θ	Inclinação da superfície de potencial de ruptura
θ_{cr}	Ângulo formado pela horizontal com plano crítico de deslizamento (plano de menor coeficiente de segurança ao deslizamento)
λ	Relação entre o fator de segurança obtido com as forças de protensão e o fator de segurança mínimo relativo ao plano crítico de deslizamento
β	Ângulo formado pelos tirantes com plano crítico de deslizamento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	DIRETRIZES DA PESQUISA	18
2.1	TEMA	18
2.2	PROBLEMA DE PESQUISA	18
2.3	OBJETIVO GERAL	18
2.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
3	MÉTODO DE PESQUISA	19
3.1	PESQUISA BIBLIOGRÁFICA	19
4	JUSTIFICATIVAS	20
5	REVISÃO DE LITERATURA E PRESSUPOSTOS CONCEITUAIS	21
5.1	EMPUXOS LATERAIS DE TERRA.....	21
5.1.1	Empuxo em Repouso	21
5.1.2	Teoria de Rankine.....	23
5.1.3	Teoria de Coulomb.....	27
5.1.4	Estados limites	27
5.2	ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO.....	29
5.2.1	Cortina Atirantada	29
5.2.2	Grelha atirantada.....	30
5.2.3	Placas Ancoradas	31
6	METODOLOGIA	33
6.1	MÉTODO BRASILEIRO (1987)	33
6.2	MÉTODO DE KRANZ (1953).....	35
6.3	MÉTODO DE RANKE-OSTERMAYER (1968)	36
6.4	Método dos Elementos Finitos (MEF).....	40
6.5	Classificação das Ancoragens.....	41
6.5.1	Ancoragens Provisórias e Definitivas.....	41
6.5.2	Ancoragens Ativas e Passivas.....	42
6.6	TIRANTES	43
6.6.1	Histórico.....	43
6.6.2	Conceitos Básicos	44
6.6.3	Princípios de Funcionamento.....	45
6.6.4	Partes Componentes Típicas	46
6.6.5	Sistema de Injeção.....	49
7	ESTABILIZAÇÃO DE ENCOSTAS E TALUDES COM O USO DE SISTEMA DE ANCORAGEM	51
7.1	CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES	51
7.2	ESTABILIZAÇÃO DE ESCORREGAMENTOS COM O USO DE ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO COM ANCORAGEM	51
7.3	ESTABILIZAÇÃO DE QUEDA E ROLAMENTO DE BLOCOS COM O USO DE ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO COM ANCORAGEM	53
8	OBRAS ESPECIAIS DE ESTABILIZAÇÃO	56
8.1	ESTABILIZAÇÃO DE MACIÇO TERROSO E ROCHOSO COM O USO DE VÁRIOS TIRANTES E COM TIRANTE ISOLADO	56
8.2	ESTABILIZAÇÃO DE TALUDES DE CORTE E ATERRO COM O USO DE CONTENÇÃO COM ANCORAGEM	57
8.3	SISTEMA DE DRENAGEM	59

9	ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA DE ESTRUTURA DE CONTENÇÃO COM SISTEMA DE ANCORAGEM.....	62
9.1	LIMITAÇÕES NA APLICAÇÃO DE OBRAS DE CONTENÇÃO COM ANCORAGEM	62
9.2	VANTAGENS NA APLICAÇÃO DE OBRAS DE CONTENÇÃO COM ANCORAGEM	63
9.3	ASPECTOS TÉCNICOS A SE CONSIDERAR EM UM PROJETO DE CONTENÇÃO COM TIRANTES	64
9.4	ASPECTOS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS A SE CONSIDERAR EM UM PROJETO DE CONTENÇÃO COM TIRANTES.....	66
9.5	ASPECTOS ECONÔMICOS A SE CONSIDERAR EM UM PROJETO DE CONTENÇÃO COM TIRANTES	67
10	CONCLUSÃO	69
	REFERÊNCIAS.....	71

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Santos (2017), uma das causas da movimentação do maciço é desencadeada pela modificação da geometria da massa terrosa ou rochosa, para a implantação de taludes, geralmente, para a elaboração de projetos de estradas e ruas. Muitas vezes, a execução de cortes em taludes e encostas de estradas podem atingir zonas de fraqueza de origem rochosa ou sedimentar, ou oriundas da ação do neotectonismo como, juntas, falhas e sismitos.

Para que os cortes em estradas atinjam a estabilidade esperada, faz-se necessário a execução de obras de contenção, que devem ser escolhidos, de acordo com a dimensão, os materiais constituintes e as zonas de fraqueza da encosta.

No Brasil, inúmeros projetos de estruturas pré-esforçadas para estabilização de taludes e encostas foram implantados em obras rodoviárias em razão dos desafios e das solicitações do mercado. Diante desses desafios, pretende-se descrever sobre os aspectos técnicos e econômicos de se implantar obras de contenção com ancoragem encontradas na literatura da especialidade, dedicando esse espaço para abordar os procedimentos, critérios e padrões mínimos recomendados pelas normas brasileiras, a fim de elaborar projetos e contribuir no estudo do comportamento de obras ancoradas visando a otimização das metodologias com a finalidade de garantir a vida útil prevista das obras de engenharia.

Estruturas ancoradas são aquelas cuja estabilidade é garantida através de tirantes ancorados no terreno. A estrutura pode ser contínua, em grelha, em placas ou em contrafortes (NBR 11682:2009).

Esse trabalho objetiva analisar estruturas de contenção com sistema de ancoragem aplicado às obras rodoviárias, as informações aqui contidas limitam-se em falar da importância dos tirantes em obras de estabilização de encostas, como também de taludes de corte e aterro, com exceção de túneis e pontes que fogem do problema de pesquisa.

O trabalho se estrutura da seguinte maneira, para além dessa introdução será apresentado uma revisão de literatura que apresentará os principais conceitos utilizados, os objetivos que motivaram a produção desse trabalho, o método empregado para a realização dessa pesquisa, bem como, uma seção que retrata as dificuldades executivas das estruturas de contenção com ancoragem, os aspectos técnicos e econômicos e os principais tipos de estabilidade de encostas com o uso de contenção ancorado no maciço em questão.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

2.1 TEMA

Estruturas de contenção com sistema de ancoragem projetado para obras rodoviárias.

2.2 PROBLEMA DE PESQUISA

A presente pesquisa aponta o seguinte questionamento: quais os principais procedimentos de construção e aplicação de estruturas de contenção com sistema de ancoragem em rodovias e os principais entraves para operacionalização desses projetos?

2.3 OBJETIVO GERAL

Descrever quais os procedimentos de construção e aplicação de estruturas de suporte de terra, identificando as diferentes metodologias empregadas nas estruturas de contenção com sistema de ancoragem aplicadas às obras rodoviárias, bem como, investigar os principais entraves para a aplicação prática da estrutura do empreendimento.

2.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Apresentar o referencial teórico das metodologias utilizadas nos projetos de estrutura de contenção com sistema de ancoragem e apresentar os principais métodos empregados nesses projetos;
- Classificar as estruturas de contenção com sistema de ancoragem mais utilizadas no Brasil;
- Apresentar os cálculos de dimensionamentos das estruturas de suporte e dos tirantes
- Apresentar as ancoragens e especificar os tipos de tirantes empregados em projetos de estruturas de contenção;
- Apontar os problemas estruturais que podem ocorrer durante e após a execução do projeto de estruturas de ancoragens.

3 MÉTODO DE PESQUISA

3.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

De acordo com Gil (1996), a pesquisa bibliográfica é desenvolvida a partir de materiais já publicados, constituídos principalmente de livros e artigos científicos. Tanto as pesquisas ideológicas, como aquelas que se propõem à análise de situações diversas de um determinado problema, também podem ser desenvolvidas a partir de fontes bibliográficas.

Através do exercício da pesquisa bibliográfica é possível desenvolver a análise crítica, meticulosa e ampla das publicações correntes de uma determinada área do conhecimento. A pesquisa bibliográfica não é uma mera repetição daquilo que já foi dito ou escrito sobre determinado assunto, mas sim, proporciona o exame de um tema sob um novo enfoque ou abordagem, chegando a conclusões inovadoras.

As fontes bibliográficas são em grande número e podem ser assim classificadas: periódicos, dicionários, enciclopédias, anuários, almanaques, publicações periódicas, impressos diversos, livros de leitura corrente, livros de informativa, livros de referência, notas remissivas, jornais e revistas.

Neste trabalho adotou-se como estratégia metodológica, a pesquisa bibliográfica. Os principais objetivos que conduziram a realização desta pesquisa bibliográfica sobre o tema proposto: Ancoragem em estruturas de contenção aplicadas às obras rodoviárias deve-se ao fato de ser um tema muito amplo e pouco esclarecido. “Assim, a pesquisa bibliográfica é adotada a fim de proporcionar melhor visão do problema ou torna-lo mais específico ou, ainda, para possibilitar a construção de hipóteses. Neste caso, a pesquisa bibliográfica assume um caráter de estudo exploratório” (GIL, 1996).

Em outras palavras, esta análise busca compreender os significados dos dados coletados e também tem o objetivo de facilitar o entendimento dos conteúdos através de alguma classificação apresentada de forma sistematizada, que pode ser a divisão em categorias (qualitativas) ou pela contagem de palavras e termos contidos nas respostas (quantitativas).

A pesquisa foi desenvolvida durante um ano, a partir de leituras criteriosas dos artigos, teses, dissertações, livros e manuais técnicos da especialidade. Utilizou-se apenas de publicações que corresponderam à questão de estudo, incluindo bibliografias clássicas e recentes, pertencentes a área de Engenharia Geotécnica, no idioma português, todos os tipos de delineamento metodológicos foram aceitos. A seguir, serão apresentadas as principais justificativas que levaram à realização do presente trabalho.

4 JUSTIFICATIVAS

Grandes catástrofes como as ocorridas no Rio de Janeiro nos anos de 1966 e 1967, devido a fortes enchentes, causaram desmoronamentos de encostas e a interdição de rodovias devido à queda de barreiras, deixando a cidade praticamente isolada. O acidente obrigou os engenheiros a estudarem técnicas eficazes de contenção de massa a fim de garantir a estabilidade de encostas, como também evitar danos sociais, econômicos e ambientais.

Por se tratar de um país em desenvolvimento, o Brasil deixa a desejar no que se refere à manutenção, cuidados ambientais e monitoramento das obras rodoviárias. A ausência dessas medidas mitigadoras pode provocar prolongadas consequências econômicas, sociais, ambientais e paisagísticas. No caso de vias de transporte, podem interromper o fluxo de veículos, causar acidentes e comprometer a estrutura física do sistema.

Com o objetivo de tornar possível a manutenção da malha e estabilizar qualquer mobilização de maciço adjacente à própria via, garantindo a segurança da sociedade, são comuns obras de contenção. Sob um ponto de vista geotécnico, estruturas de contenções ancoradas no maciço terroso e rochoso parecem ser umas das técnicas mais eficazes e de ganho econômico, quando se trata da segurança do sistema, capazes de suportar elevadas forças horizontais do solo, também conhecidas de empuxos de terra, como também amenizar os impactos ambientais devido a sua implantação.

Em outras palavras, pretende-se elaborar uma breve documentação para abordar as necessidades da indústria nacional em relação a estabilidade de encostas e taludes rodoviários com o uso de tirantes, solução essa muito ampla e pouco discutida, através de uma revisão crítica da literatura da especialidade comparando as ideias mais relevantes e logo em seguida, confrontando-as para obter a melhor solução aceitável para o problema apresentado.

Os próximos capítulos tratarão dos pressupostos conceituais para a elaboração de projetos de estabilização de encostas naturais e taludes rodoviários.

5 REVISÃO DE LITERATURA E PRESSUPOSTOS CONCEITUAIS

5.1 EMPUXOS LATERAIS DE TERRA

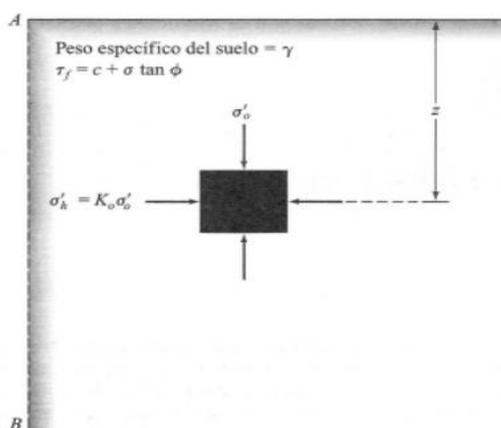
Em se elaborar um projeto de contenção, deve-se considerar um parâmetro de segurança suficiente o bastante para suportar os efeitos dos empuxos laterais, que nada mais é que pressões laterais exercidas pelo solo na parede, devido ao peso próprio do solo ou através de sobrecargas.

Serão abordadas a seguir as principais teorias da pressão de terra, como também o estudo do comportamento dos empuxos laterais do solo sobre as contenções quando elas se encontram no estado de repouso, no estado ativo e no estado passivo.

5.1.1 Empuxo em Repouso

No estado Limite de Equilíbrio o valor do empuxo depende exclusivamente da deformação do solo. Quando a estrutura de suporte de terra se mantém imóvel na posição inicial, corresponde a um empuxo em repouso, ou seja, nesta condição não há uma completa mobilização de resistência do maciço, - a massa do solo estará em um estado de equilíbrio estático, de acordo com o desenho da figura 1. A determinação do estado de tensões em repouso deverá ter também em conta a história de pressões do terreno.

Figura 1- Estado de tensões em repouso



Fonte: Crispim (2011, p. 3)

Sua determinação pode ser feita a partir de ensaios de laboratório ou de campo. Seu parâmetro de cálculo é o coeficiente “ k_o ”, definido como a relação de pressões efetivas horizontais e verticais no solo, com deformação lateral nula. Para terrenos compostos de areia

e argilas normalmente adensadas é usual a expressão baseada nas teorias de Jàky (DAS, 2007, p. 351), dada por:

$$k_o = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v} = 1 - \sin \phi' \quad (1)$$

Onde:

k_o : é o coeficiente de empuxo em repouso;

σ'_h : é a pressão lateral em repouso (horizontal);

σ'_v : é a pressão efetiva vertical atuante;

ϕ' : é o ângulo de atrito interno.

Entretanto, para areia compacta e compactada, a equação anterior pode subestimar grosseiramente a pressão lateral do maciço em repouso devido à compactação do terreno. Quando isso ocorre, deverá se usar a seguinte equação:

$$k_o = (1 - \sin \phi) + \left[\frac{\gamma_d}{\gamma_{d\text{mín}}} - 1 \right] \cdot 5,5 \quad (2)$$

Onde:

γ_d : é o peso específico seco real compactado da areia atrás do muro;

$\gamma_{d\text{mín}}$: é o peso específico seco da areia no estado mais fofo.

Para solos pré-adensados, apresenta-se coeficiente k_o como uma função do ângulo de atrito e da razão de sobreadensamento (OCR) do solo, conforme a expressão baseada na teoria de Mayane e Kulhawy (DAS, 2007, p. 352), dada por:

$$k_o = (1 - \sin \phi') \cdot OCR^{\sin \phi'} \quad (3)$$

em que

$$OCR = \frac{\text{pressão de pré-adensamento, } \sigma'_{1c}}{\text{pressão presente de sobrecarga efetiva, } \sigma'_v} \quad (4)$$

Onde:

k_o : é o coeficiente de empuxo em repouso;

OCR : é a razão de sobreadensamento do solo;

ϕ : é o ângulo de atrito interno.

A determinação do coeficiente k_o é calculada através de ensaios triaxiais drenados e saturados, em uma argila normalmente adensada isotrópica e anisotropicamente, submetida à extensão e compressão lateral. Apesar de sua importância, os ensaios triaxiais são pouco usados atualmente, justificados pelo efeito da perfuração que impossibilita a coleta de uma amostra perfeita, além do elevado custo de execução.

Segundo Ranzini e Negro (1998), o fato de o Brasil não utilizar muito este parâmetro de investigação, é porque os solos tropicais tendem a apresentar uma apreciável dispersão de suas características naturais, dificultando a interpretação dos ensaios realizados em laboratórios.

Nas próximas seções deste trabalho apresentam-se os estados limites de equilíbrio e os dois principais métodos, Rankine (1776) e Coulomb (1857).

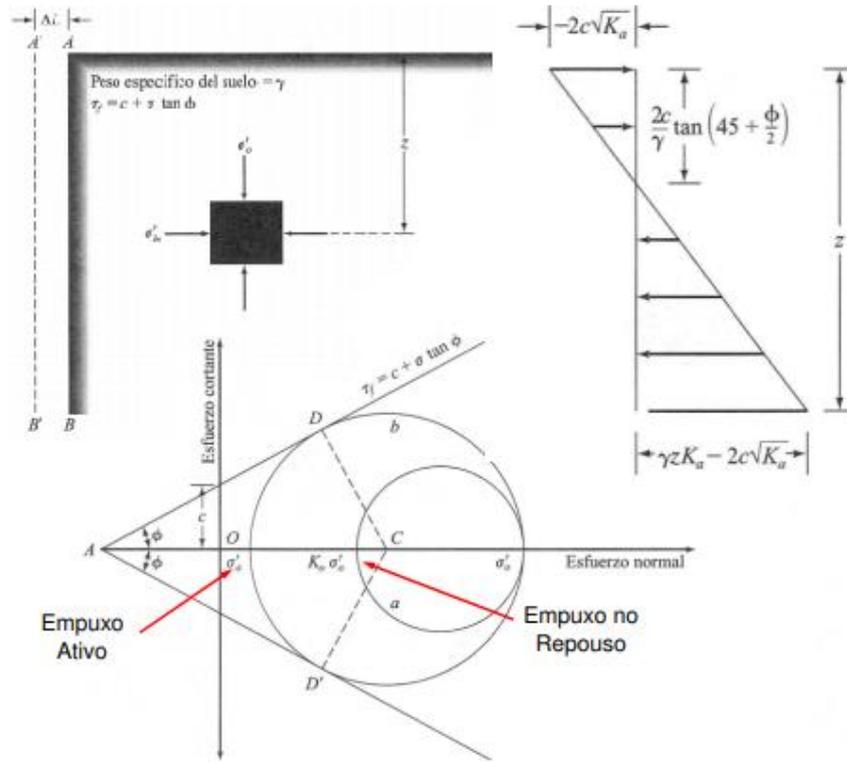
5.1.2 Teoria de Rankine

De acordo com Fernandes (1983), dentro do estado limite de equilíbrio existem dois métodos considerados importantes, Coulomb (1776) e Rankine (1857). Divergindo da forma de linha de ruptura adaptada e das condições de equilíbrio estático, mas tendo em comum a teoria de que o corte no solo tem sua resistência completamente mobilizada, Fernandes também afirma que nestes problemas não é possível determinar as deformações internas do maciço terroso. Estas deformações são controladas indiretamente dentro de um limite razoável através de um coeficiente de segurança relativamente alto.

Através da teoria de Rankine é possível determinar as pressões ativas e passivas do solo, como também possibilitar o cálculo do empuxo lateral da massa sobre as estruturas de contenção, com a hipótese de que o terreno se encontra em condições de ruptura, ou seja, no estado de equilíbrio plástico.

Relembrando que as tensões efetivas principais horizontais e verticais de um elemento de solo com uma massa específica “ γ ” à uma profundidade “ z ” são representadas por σ'_h e σ'_v , em que $\sigma'_v = \gamma.z$. Quando a relação solo-estrutura se encontra no estado de equilíbrio estático, então $\sigma'_h = k_o.\sigma'_v$. No entanto, quando a contenção AB, mostrada na figura 2.a, se afasta gradualmente do solo, a pressão principal horizontal diminuirá, conseqüentemente, o estado de equilíbrio plástico e a ruptura do solo ocorrerão. Essa situação representa o estado ativo de Rankine, onde $\sigma'_a = k_o.\sigma'_v$. Essa tensão pode ser determinada através da envoltória de ruptura do círculo de Mohr, representada na figura 2.

Figura 2– Estado ativo de Rankine



Fonte: Crispim (2011, p. 11, 12 e 16)

A pressão efetiva no estado ativo é representada pela expressão seguinte:

$$\sigma'_a = \gamma \cdot z \cdot \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi'}{2} \right) - 2 \cdot c' \cdot \tan \left(45^\circ - \frac{\phi'}{2} \right) \quad (5)$$

Onde:

σ'_a : é a pressão efetiva no estado ativo;

γ : é o peso específico do solo;

z : é a profundidade;

ϕ : é o ângulo de atrito interno;

c' : é a coesão do solo.

Para solos não coesivos, $c' = 0$, a equação de Rankine é:

$$\sigma'_a = \sigma'_v \cdot \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi'}{2} \right) \quad (6)$$

σ'_v : é a pressão efetiva vertical.

Onde o coeficiente de empuxo ativo de Rankine é dado por:

Onde:

σ'_p : é a pressão efetiva no estado passivo;

γ : é o peso específico do solo;

z : é a profundidade;

ϕ : é o ângulo de atrito interno;

c' : é a coesão do solo.

Para solos não coesivos, $c' = 0$, a equação de Rankine é:

$$\sigma'_p = \sigma'_v \cdot \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi'}{2} \right) \quad (9)$$

Onde:

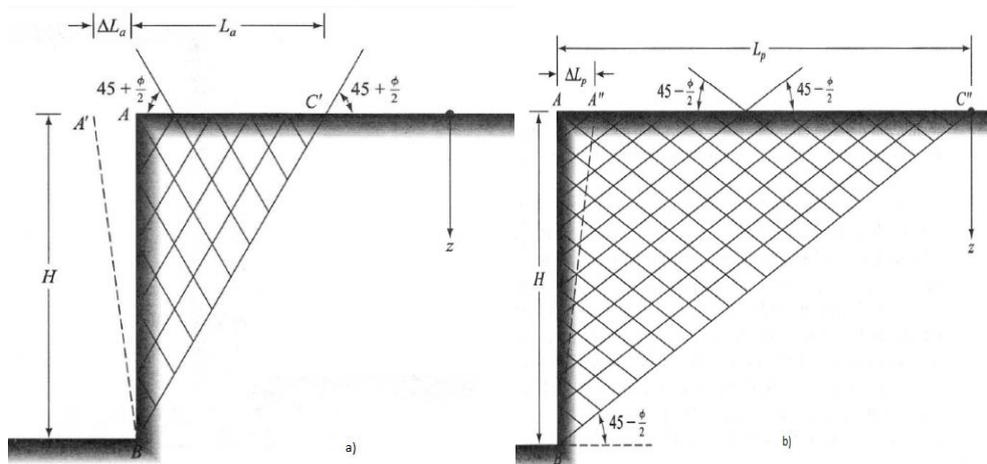
σ'_v : é a pressão efetiva vertical.

Onde o coeficiente de empuxo ativo de Rankine é dado por:

$$\frac{\sigma'_p}{\sigma'_v} = k_p = \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi'}{2} \right) \quad (10)$$

Os efeitos de deslocamentos, tanto no estado ativo como no estado passivo, estão representados na figura 4.

Figura 4– Efeito de deslocamento da contenção nos estados ativo e passivo



Fonte: Crispim (2011, p. 22 e 23)

Dando-se sequência ao trabalho, será apresentado a seguir a Teoria de Coulomb (1776) para os empuxos laterais do solo.

5.1.3 Teoria de Coulomb

O cálculo dos empuxos ativo e passivo de terra sobre os muros de arrimo, sob condições de equilíbrio limite, teve influência direta de Coulomb (1776). Além disso, a teoria de Coulomb permitiu observar elementos não previstos na teoria de Rankine.

Os cálculos de empuxo de Coulomb baseiam-se na presença de atrito entre o muro e o solo, além de um comportamento não coesivo do aterro com uma resistência ao cisalhamento ($\tau_f = \sigma' \cdot \tan \phi'$). No entanto, dentre as soluções não rigorosas, o método de Coulomb é o mais conhecido por desprezar o efeito do atrito entre solo-contenção na rotação das tensões principais. Este efeito é mais marcante no modo passivo de ruptura que no ativo (RANZINI E NEGRO, 1998).

A comparação em relação a teoria de empuxo sobre superfícies de ruptura curvilíneas, como a teoria de Caquot – Kerisel, confirma que os coeficientes de empuxo passivo de Coulomb “ k_p ” apresentam valores muito elevados, tornando inviável sua utilização na prática.

A seguir, serão discutidos os Estados Limites de Equilíbrio que influenciam na ruptura de todo o sistema de contenção com tirantes.

5.1.4 Estados limites

Uma das melhores definições de Estado Limite de Ruptura foi referida por Ranzini e Negro (1998, p. 500) “Chama-se Equilíbrio Limite o que resulta da satisfação simultânea das condições de equilíbrio estático e de ruptura”.

De acordo com a Norma Portuguesa (Eurocódigo 7 Parte 1, 2010), o dimensionamento de uma contenção deverá contemplar a verificação dos estados limite de ruptura para cada situação de projeto analisado. Os cálculos de projeto que devem ser utilizados para assegurar o equilíbrio são os valores das ações ou dos efeitos das ações e também os resultados dos parâmetros de resistência ou a capacidade resistente dos elementos mobilizados de um terreno.

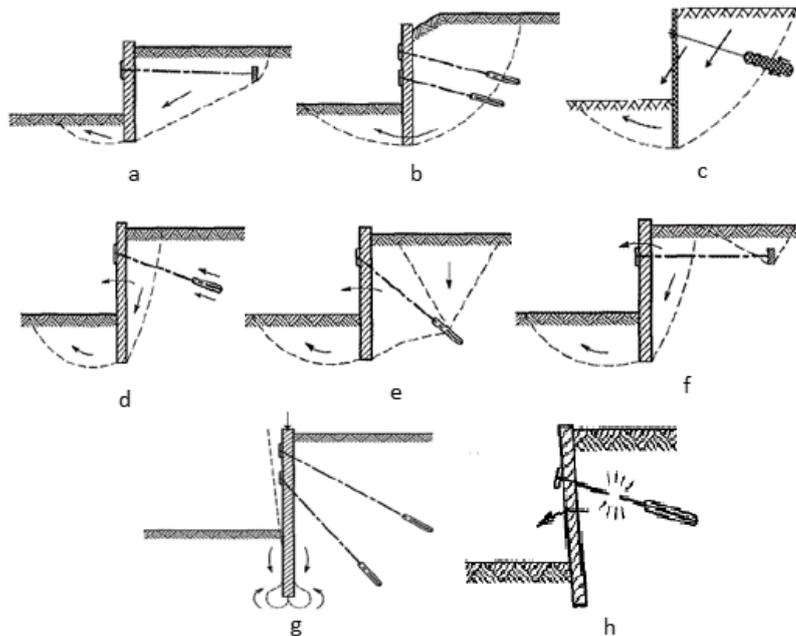
Na elaboração de um projeto de reforço de terra, trabalha-se com as seguintes convicções:

- Usar os princípios de cálculo para demonstrar que não haverá ruptura e nem liquefação da estrutura por estabilidade global, e que as deformações correspondentes sejam suficientemente pequenas;

- O equilíbrio vertical de uma cortina deve ser assegurado através dos valores de cálculo das propriedades de resistência ou da capacidade resistente do terreno, e ainda do valor das forças verticais aplicadas à estrutura;
- Quando apresenta movimento descendente da cortina, deve se utilizar de valores de cálculo superiores às forças de pré-esforço como, por exemplo, as forças devido a ancoragem, que apresenta uma componente vertical descendente;
- Os valores de cálculo e o sentido das tensões cisalhantes entre a estrutura e o solo, devem apresentar valores compatíveis na dedução dos equilíbrios verticais e rotacionais.
- É preciso demonstrar que é possível assegurar o equilíbrio de uma cortina sem que ocorra a rotura por arrancamento de ancoragens.

Os tipos de combinações dos estados limites últimos que uma cortina atirantada está sujeita, são mostradas com mais detalhes na figura 5.

Figura 5– Rotura de uma cortina atirantada; a, b) Rotura por estabilidade global; c, d, f) Rotura por arrancamento de ancoragem; g) Rotura por forças verticais aplicadas à cortina; h) Rotura do tirante



Fonte: EC 7 – 1. Modificado (2010)

Depois de estudado o comportamento do conjunto solo/estrutura, o próximo capítulo será abordado as principais estruturas de contenção com sistema de ancoragem.

5.2 ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO

Entre os processos de estabilização de talude e encostas que mais evoluíram com o passar dos anos, em razão da pesquisa tecnológica, estão os métodos que utilizam obras de contenção com sistema de ancoragem.

Compreendem-se por obras de contenção todas aquelas estruturas com geometria capazes de suportar os esforços tendentes à estabilização da massa instável, ou seja, possam oferecer resistência à movimentação e a ruptura do solo com segurança aceitável. Conforme a NBR 11682 (2009), as estruturas de contenções devem ser projetadas para suportar uma sobrecarga acidental mínima de 20 KP_a, uniformemente distribuída ao longo da superfície de arrimo.

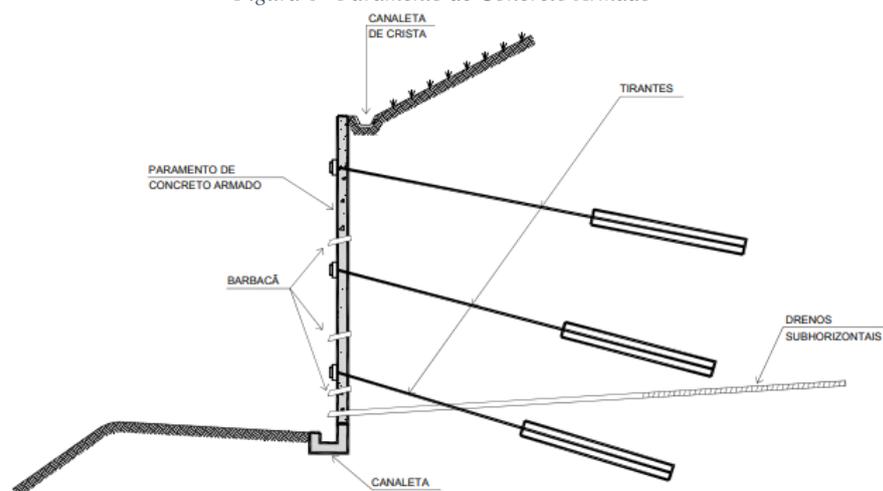
De acordo com Carvalho (1991), estas soluções apresentam altos custos aplicados quando tem alternativas técnicas a considerar. Em outras palavras, a evolução da tecnologia envolvida deverá ser acompanhada de uma conscientização e racionalização nos processos de decisão quanto ao tipo de obra com verdadeiro conhecimento dos fatores como custo, prazo e segurança da contenção sem levar em consideração a escolha mais eficaz. Os tipos de contenção contemplados anteriormente serão apresentados a seguir.

5.2.1 Cortina Atirantada

Dentre as estruturas de reforço com maior eficácia, versatilidade e segurança estão as cortinas atirantadas. Elas são contenções revestidas de concreto armado de parede contínua que funcionam como paramento como a figura 6, ou de placas isoladas ou justapostas mostrada na figura 7, fixadas no substrato resistente do maciço através de tirantes protendidos. As cortinas que, pelo fato de serem ancoradas, possuem a menor deslocabilidade em relação às outras contenções, levando o maciço a comportar-se em regime elastoplástico, com solicitações maiores do que aquelas desenvolvidas no estado limite de equilíbrio. Em obras rodoviárias são empregadas cortinas em contenções de encostas, como também em taludes de corte ou aterro.

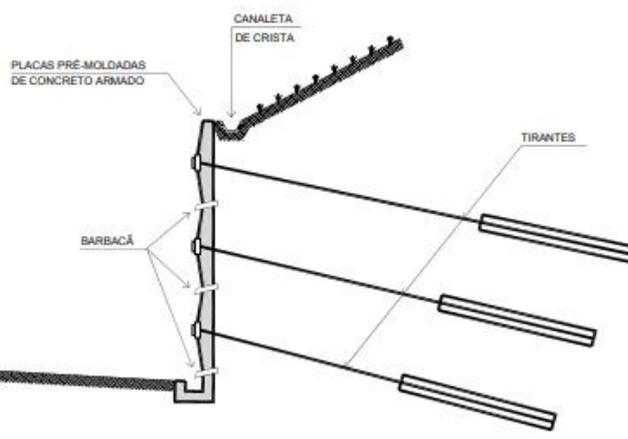
Apesar do custo elevado, a execução da cortina atirantada é bastante utilizada em rodovias e ferrovias, pois viabiliza a contenção de encostas em regiões com limitação geométrica e terrenos acidentados (GOMES et al, 2016).

Figura 6– Paramento de Concreto Armado



Fonte: DER/SP (2005, p.23)

Figura 7- Placas pré-moldadas de concreto armado cortina



Fonte: DER/SP (2005, p.23)

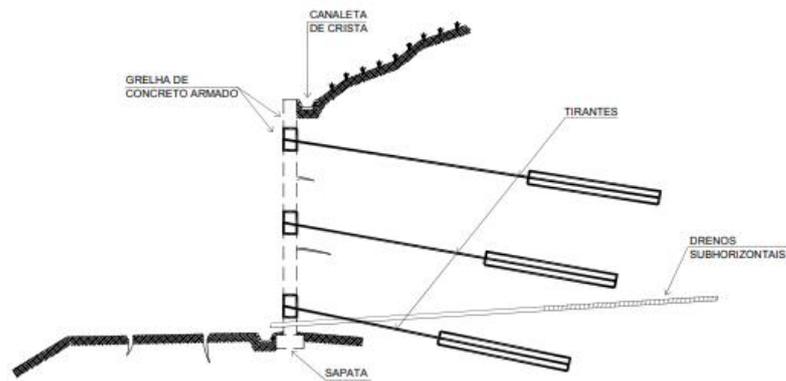
Além da cortina atirantada, outra solução de reforço que ganhou muito destaque na engenharia é a grelha atirantada, por se tratar de uma estrutura feita geralmente in loco e que sustenta um paramento em alvenaria ou concreto, também executado nessa fase, como veremos a seguir.

5.2.2 Grelha atirantada

Grelha atirantada é uma contenção em que o paramento é construído por vigas e pilares entrecruzados e produzidas com concreto armado, fixada no terreno por meio de tirantes ancorados, ver figura 8. A grelha também sustenta um paramento de parede contínua de concreto armado ou de alvenaria mais esbeltas. Essa forma de contenção é bastante utilizada

em obras que apresentam cortes de topografia acidentadas para o acesso de rodovias ou ferrovias. De acordo com a NBR 11682 (2009), as grelhas ancoradas são aplicadas em taludes rochosos fraturados, quando se pretende consolidar uma região com terreno potencialmente instável.

Figura 8– Grelha de concreto armado atirantada



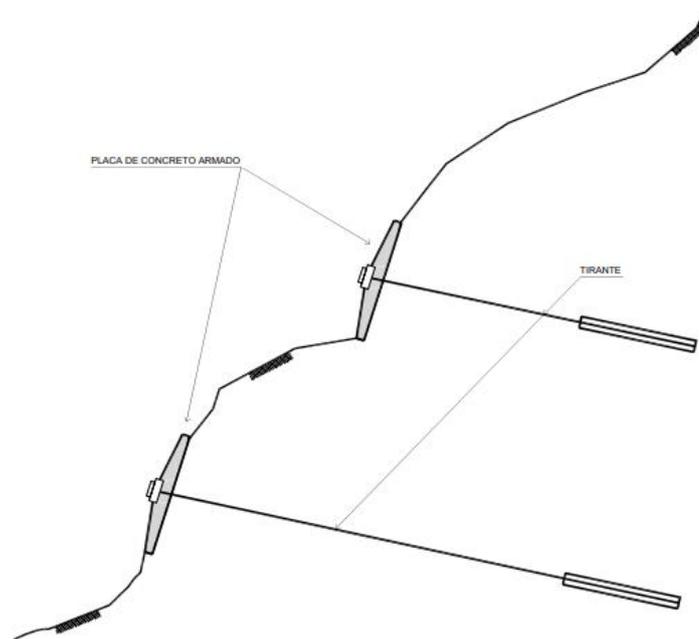
Fonte: DER/SP (2005, p.24)

Quando se pretende estabilizar parte de uma encosta rochosa, utiliza-se de placas isoladas e ancoradas no maciço, como veremos a seguir.

5.2.3 Placas Ancoradas

São contenções em que a estabilização do solo é engendrada por placas formadas através de concreto armado, moldado ou projetado. A placa é fixada no terreno por meio de tirantes conforme a figura 9. A função destas estruturas está nas distribuições de tensões através de ancoragens protendidas, principalmente na estabilização de taludes rochosos.

Figura 9– Placas de concreto armado atirantada



Fonte: DER/SP (2005, p.24)

Para o dimensionamento de uma estrutura de contenção atirantada, é extremamente importante conhecer os empuxos de terra e sua distribuição nas ancoragens. Tanto o valor do empuxo como a sua distribuição dependem das deformações da parede estrutural da contenção, que variam conforme as deformações da ancoragem e da distribuição dos empuxos (CRAIZER, 1981, apud GERSCOVICH et al, 2016).

Para a realização dessa análise de condições, seria necessária uma análise com métodos numéricos como veremos a seguir.

6 METODOLOGIA

Os métodos de dimensionamento aproximado mais simples de uma estrutura de contenção, são aqueles em que os tirantes são dimensionados simplesmente para se contraporem aos empuxos que atuam contra as estruturas de contenção. Nesse sentido, a análise da estabilidade de uma cortina atirantada pode ser realizada através do método das cunhas, também conhecido de equilíbrio limite.

Em seguida, serão apresentados alguns desses métodos, entre eles o método brasileiro de Costa Nunes, que além importante, foi também o pioneiro da técnica empregada no Brasil.

6.1 MÉTODO BRASILEIRO (1987)

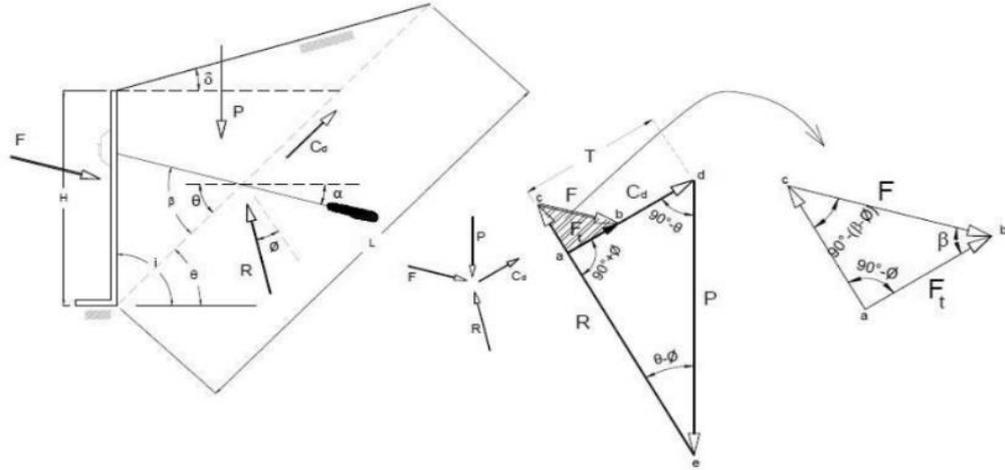
Ao se tratar da prática da construção de ancoragem, não podemos deixar de citar o Prof. Antônio José da Costa Nunes, engenheiro brasileiro que dedicou anos de sua vida pesquisando e desenvolvendo a prática da execução da ancoragem em solos argilosos. Seus conhecimentos contribuíram para a realização do projeto da primeira cortina ancorada construída no Brasil, em 1957 (GERSCOVICH et al, 2016).

Os parâmetros de ancoragem de Costa Nunes foram baseados no método de Culmann (1866), muito embora o fator de segurança seja obtido apenas em função da coesão. Este método está restrito a casos mais simples, para taludes verticais (ou praticamente verticais), com presença de solo homogêneo, sem percolação e com superfície de ruptura passando pelo pé do talude.

Conforme a NBR 5629 (2018), para o cálculo da estabilidade geral, a contenção ancorada deve ser estável para as superfícies potenciais de ruptura com fator de segurança (FS) mínimo. No caso de obras provisórias, o fator de segurança mínimo é de 1,2. No caso de obras permanentes, o projeto deve definir o limite inferior do fator de segurança (FS) utilizado, dependendo dos riscos envolvidos. Partindo dessas informações, será apresentado a seguir a descrição do método brasileiro de acordo com o livro *Contenções: teoria e aplicações em obras*.

O método brasileiro leva em consideração a força de protensão dos tirantes no equilíbrio da cunha, ilustrada na figura 10.

Figura 10- Polígono de forças do Método Brasileiro adaptado



Fonte: Gerscovich et al (2016)

Aplicando a lei dos senos no Δabc da figura acima, teremos:

$$\frac{F}{\sin(90-\phi)} = \frac{F_t}{\sin[90-(\beta-\phi)]} \quad (11)$$

Da expressão acima, pode-se dizer que:

$$F_t = \frac{F \cos(\beta-\phi)}{\cos \phi} \quad (12)$$

A partir do Δade da figura 10 e pela lei dos senos, obtemos:

$$\frac{T}{\sin(\theta-\phi)} = \frac{P}{\sin(90+\phi)} \quad (13)$$

Portanto:

$$T = \frac{P \sin(\theta-\phi)}{\cos \phi} \quad (14)$$

A expressão do fator de segurança fica sendo assim definida:

$$FS = \frac{C}{C_d} = \frac{cL}{T-F_t} \quad (15)$$

Substituindo T e F_t na equação acima, teremos:

$$FS = \frac{cH \cos \delta}{\sin(\theta-\delta)} \frac{1}{\frac{P \sin(\theta-\phi)}{\cos \phi} - \frac{F \cos(\beta-\phi)}{\cos \phi}} \quad (16)$$

Daí:

$$FS = \frac{c \cos \delta \cos \phi}{\sin(\theta-\delta)[P \sin(\theta-\phi) - F \cos(\beta-\phi)]} \quad (17)$$

Se:

$$\lambda = \frac{FS_{desejado}}{FS_{existente}} = \frac{cL/T-F_t}{cL/T} = \frac{T}{T-F_t} \quad (18)$$

Ainda:

$$\frac{\lambda}{\lambda-1} = \frac{T}{F_t} \quad (19)$$

Logo, a força total que deve ser aplicado nos tirantes será dado por:

$$F = \frac{\lambda}{\lambda-1} \frac{P \sin(\theta-\phi)}{\cos(\beta-\phi)} \quad (20)$$

Para $\theta = \theta_{cr}$, tem-se:

$$F = \frac{\lambda}{\lambda-1} \frac{P \sin\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right)}{\cos\left(45^\circ - \frac{\phi}{2} + \alpha\right)} \quad (21)$$

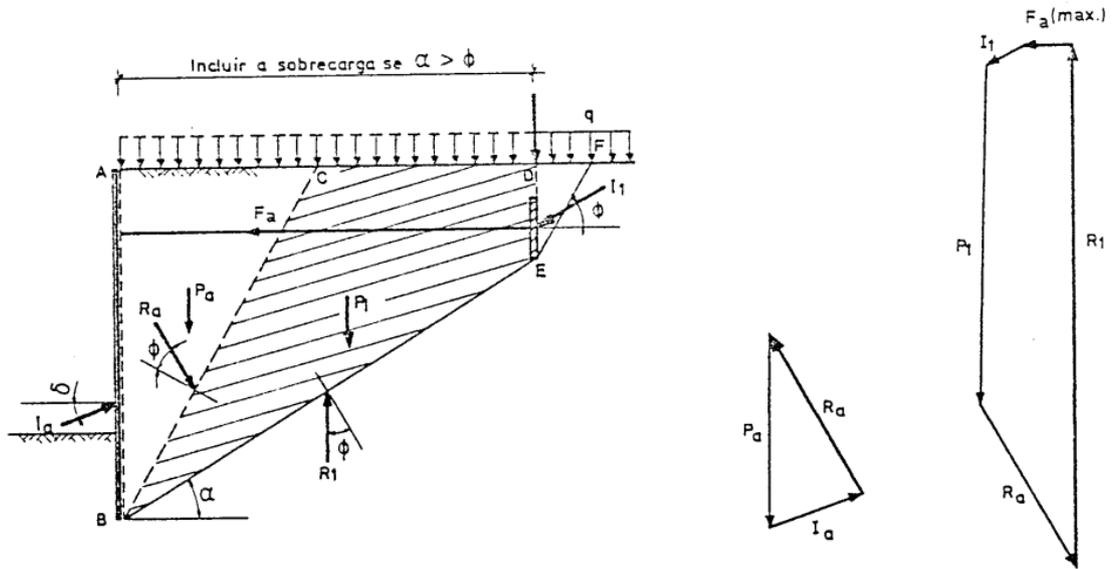
De maneira idêntica, apresentaremos o método de Kranz que se utiliza do equilíbrio limite das cunhas, a fim de garantir a estabilidade do sistema de contenção, que poderá vir a ser mobilizada quando o tirante é protendido.

6.2 MÉTODO DE KRANZ (1953)

De acordo com Marzionna et al (1996), a instabilidade do conjunto formado pela estrutura de suporte e o maciço envolvente, ocorre quando o maciço localizado na parte posterior da parede de contenção, comprimida pela protensão dos tirantes, sofre ruptura do maciço ao longo de um plano teórico que passa pelo pé da ficha da parede de contenção até o bulbo de ancoragem dos tirantes. Segundo Hobst e Jajíc (1983, apud Marzionna et al, 1996), essa possibilidade de ruptura foi apresentada pela primeira vez por Kranz em 1953.

Em termos práticos, o estudo da estabilidade global estabelecida por Kranz, baseia-se na análise do equilíbrio limite do bloco BEDC, formada pelas forças atuantes no maciço de ancoragem, ver figura 11. Assegurado o equilíbrio deste maciço, está igualmente garantida a estabilidade de todo o conjunto.

Figura 11- Análise de estabilidade pelo método de Kranz (1953)



Fonte: Fernandes (1983, p. 61)

De acordo com a figura acima, o maciço de ancoragem é solicitado pelo seu peso próprio, P_1 , pela força de protensão, F_a , pelo empuxo ativo, I_1 , da cunha gerada atrás da placa de ancoragem e pelas forças reativas R_a e R_1 mobilizadas ao longo dos planos de deslizamentos BC e BE.

Da cunha ABC, calcula-se a força de reação, R_a , que depois será substituída na expressão formada pelas solicitações representadas pelo polígono BEDC, onde permite-se calcular o valor máximo de F_a que conduz a cunha na condição de equilíbrio.

O coeficiente de segurança para esta condição é definido por Kranz como a razão entre valor máximo, F_a , e a força de serviço do tirante protendido:

$$FS = \frac{F_a(\text{máximo})}{F_a(\text{serviço})} \quad (22)$$

Conforme Fernandes (1953), o valor do coeficiente de segurança nestes casos é maior ou igual a 1,5.

Imediatamente, Ranke e Ostermayer (1968) generalizaram o método de Kranz para estruturas de contenção associados a vários níveis de ancoragens.

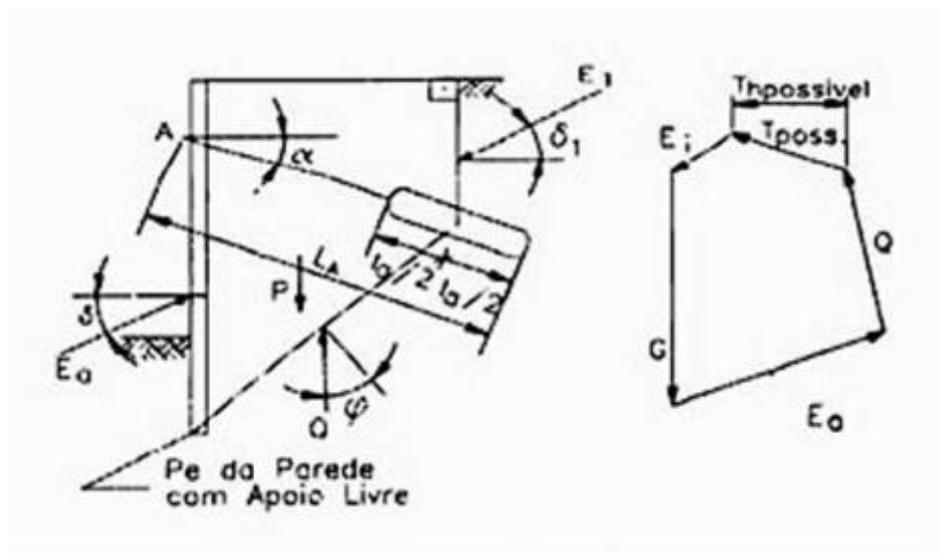
6.3 MÉTODO DE RANKE-OSTERMAYER (1968)

Segundo Gerscovich, Danziger e Saramago (2016), o método alemão de Ranke-Ostermayer foi desenvolvido para solos granulares, com intercepto de coesão (C) e ângulo de atrito (ϕ).

De encontro a segurança do conjunto contenção e maciço, o método generalizado de Kranz tem a superfície de deslizamento deslocado do ponto E, figura 11, para o centro do bulbo de ancoragem, atendendo eventuais diferenças entre o comprimento real da ancoragem e o comprimento de projeto. Além disso, o método apresenta cálculos de trecho livre menores que aqueles calculados por metodologia usuais.

Para o caso de um único nível de ancoragem, o método analisado está representado na figura 12, também representado pelo polígono de forças:

Figura 12- Modelo admitido para casos de cortinas com uma linha de ancoragem segundo Ranke-Ostermayer



Fonte: Marzionna et al (1996, pag. 565)

O coeficiente de segurança para um único nível de ancoragem é definido da seguinte forma:

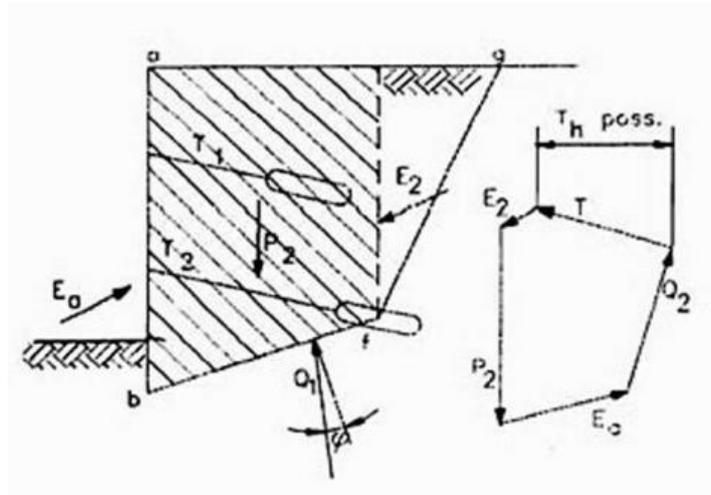
$$FS = \frac{T_{max}^h}{T_{atuante}^h} \quad (23)$$

Os autores também apresentam metodologias de cálculos usadas para descobrir os coeficientes de segurança para os casos de duas ancoragens. O método consiste na verificação do posicionamento do bulbo de ancoragem, analisando a presença ou não do fator de instabilidade presente na superfície de ruptura em análise.

A seguir, será feita a descrição do método de Ranke-Ostermayer para duas situações particulares que merecem destaque, com o mesmo encaminhamento apresentado por Marzionna et al (1996). Em ambos os casos, procurasse o menor coeficiente de segurança para cada um dos níveis de ancoragem e para o conjunto quando for preciso.

O primeiro caso é de uma cortina onde o tirante do nível superior apresenta comprimento livre menor que o tirante inferior, com bulbo de ancoragem dentro da cunha do segundo tirante. A figura 13 apresenta esquematicamente essa cortina.

Figura 13- Cunhas potencias de ruptura com tirantes diferentes, com o primeiro nível mais curto



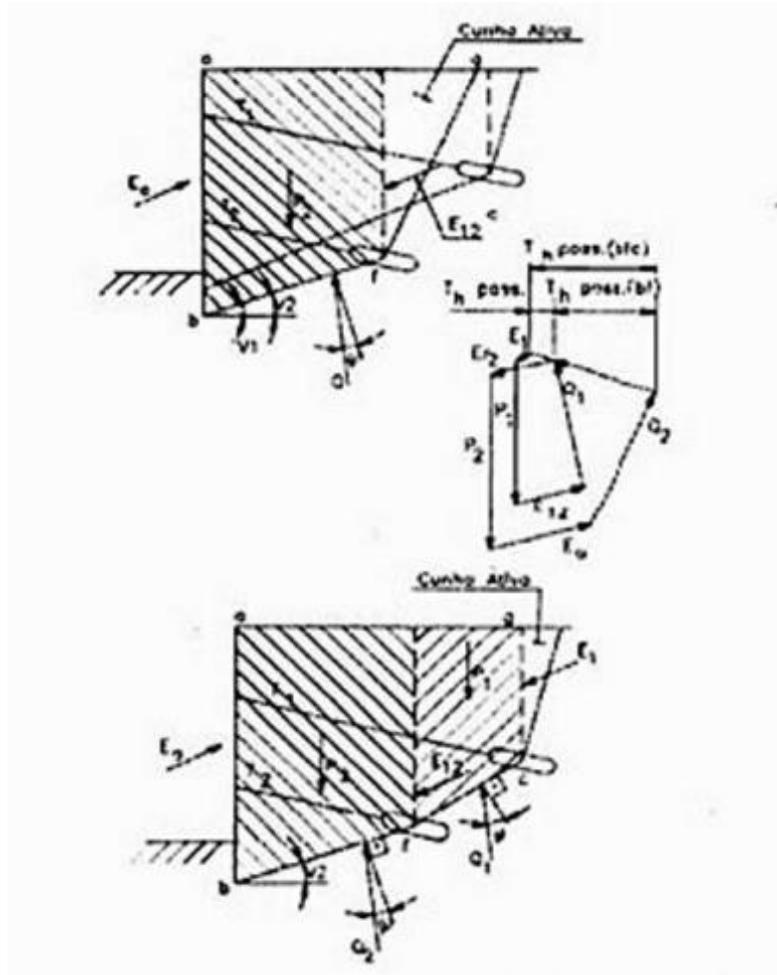
Fonte: Marzionna et al (1998, pag. 565)

O coeficiente de segurança da ancoragem inferior para o método representado é definido como:

$$FS = \frac{T_{max}^h}{(T_{1atuante}^h + T_{2atuante}^h)} \quad (24)$$

O segundo caso, refere-se a uma cortina em que seu tirante superior tem comprimento livre maior que o inferior, com o bulbo de ancoragem completamente fora da cunha do tirante inferior, ver figura 14.

Figura 14- Cunhas potencias de ruptura com tirantes diferentes, com o primeiro nível mais comprido



Fonte: Marzionna et al (1998, pag. 565)

O coeficiente de segurança do tirante inferior para esta condição é definido como:

$$FS = \frac{T_{max}^h}{T_{2atuate}^h} \quad (25)$$

E o coeficiente de segurança geral é dado por:

$$FS = \frac{T_{max}^h}{(T_{1atuate}^h + T_{2atuate}^h)} \quad (26)$$

Além desses métodos, a seguir será apresentado um dos métodos mais utilizados nos dias de hoje na engenharia para análise de estruturas de contenção, o Método dos Elementos Finitos.

6.4 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF)

De acordo com Machado e Mendes (2018), a modelagem numérica de elementos finitos tornou-se, com o uso indispensável de softwares, umas das ferramentas mais usadas no meio geotécnico para análise de estruturas de contenção com sistema de ancoragem.

O Método dos Elementos Finitos permite analisar tanto a sequência executiva da contenção quanto o seu comportamento ao longo do tempo, incluindo os efeitos adicionais de sobrecarga sobre as estruturas e sobre os tirantes ancorados no terreno. Além disso, através da análise da tensão-deformação do solo estimado pelo MEF, pode-se obter o fator de segurança por meio dos parâmetros de resistência do solo ou da carga de trabalho que estão envolvidos no trabalho em questão.

Segundo Fernandes (1983), o Método dos Elementos Finitos, quando aplicado ao problema em questão, também permite analisar, ainda que complexo, a estratigrafia do terreno e a posição do nível do lençol freático, bem como a geometria do terreno em estudo. Ainda, não só permite analisar a rigidez e as condições de apoio da cortina e do pré-adensamento, como também a inclinação e o comprimento dos tirantes.

O fator de segurança é avaliado em função da redução dos parâmetros de resistência do solo, dividindo os parâmetros reais por um valor estimado. A seguir, é feita a descrição do método, com o mesmo acompanhamento apresentado por Machado e Mendes (2018), na Revista ALCONPAT publicada no ano de 2018:

$$C^* = \frac{c}{M} \quad (27)$$

$$\tan \Phi^* = \frac{\tan \Phi}{M} \quad (28)$$

Onde:

c - Coesão do solo;

C^* - Coesão reduzida pelo FS a ser usada na simulação;

Φ - Ângulo de atrito do solo;

Φ^* - Ângulo de atrito do solo reduzido pelo FS a ser usada na simulação;

M - Valor para redução dos parâmetros de resistência

Quanto a estabilidade global do modelo, o fator de segurança poderá ser determinado quando à eminência de ruptura do solo, ou seja, sua plastificação. Isto ocorre quando o fator de segurança for igual ou quando a carga de trabalho do sistema for dividida por um valor estimado, em ambos os casos sempre se avaliando quanto da resistência está sendo mobilizada.

$$FS = M \quad (29)$$

A seguir, abordaremos sobre os principais tipos de ancoragens: ancoragens provisórias e definitivas; ancoragens ativas e passivas.

6.5 CLASSIFICAÇÃO DAS ANCORAGENS

A classificação dos tirantes ancorados é determinada de acordo com o terreno que os sustenta, que são os seguintes:

- Ancoragem em solos;
- Ancoragem em rochas.

As características das ancoragens definem-se de acordo com: sua capacidade de serviço; pré-esforço inserido nos tirantes; comportamento; natureza do solo; forma e método de transferência de carga. Dentre os fatores que afetam o comportamento e a capacidade de carga estão:

- Resistência ao corte e as deformações devido as cargas e tensões constantes no conjunto da obra;
- Desenvolvimento construtivo, principalmente o modelo construtivo associado ao bulbo;
- Qualidade da mão-de-obra utilizada na realização dos trabalhos de campo.

6.5.1 Ancoragens Provisórias e Definitivas

De acordo com a norma brasileira, as ancoragens provisórias ou definitivas têm por objetivo:

- Apoiar as estruturas de suporte;
- Assegurar a estabilidade dos taludes;
- Resistir a forças de levantamento global das contenções.

A cultura das ancoragens é de natureza arbitrária e acadêmica, cuja literatura divide essas ancoragens em curto e longo prazo. As ancoragens provisórias são elementos de curto prazo, com tempo inferior a dois anos. É também de natureza temporária limitada, desnecessária e inoperantes após determinada fase de trabalho.

Segundo Yassuda e Dias (1996), esta classificação é importante uma vez que a norma fixa um coeficiente de segurança para cada caso em particular, o tipo de proteção anticorrosiva e as precauções construtivas diferentes para cada caso.

As ancoragens permanentes são aquelas com vida útil superiores há dois anos. Além disso, tem a missão de garantir de forma permanente a estabilidade da obra, e tem uma importância vital no comportamento global da contenção em longo prazo.

Os tirantes provisórios são divididos em subcategorias.

- Construções temporárias: estruturas que apresentam vida útil inferiores a 6 meses, sem a necessidade de proteção anticorrosiva e ou monitorização da ancoragem, isso porque não é provável qualquer tipo de corrosão com dimensão prejudicial durante esse tempo.
- Suporte semi-permanentes: contenções com vida útil entre 6 a 24 meses, não sendo necessário proteção anticorrosivo, mas aconselhado monitorização como procedimento durante a execução da obra.
- Contenções definitivas: estruturas com vida útil superiores a 24 meses, sendo necessária proteção anticorrosiva, plano de instrumentação e monitorização, estabelecidos em função da longevidade da instrumentação e das características da obra. No entanto, a norma atual não obriga a verificação das cargas nas ancoragens definitivas.

6.5.2 Ancoragens Ativas e Passivas

Os conceitos das ancoragens ativas e passivas relacionam-se diretamente com a força de tração externa aplicada.

Nas ancoragens pré-esforçadas, também designadas por ativas, aplica-se uma força inicial na contenção, aplicada através de artifícios de compressão a um sistema de pré-esforço, independente da interação final presente entre a estrutura e o solo. A ancoragem ativa é preparada por uma cabeça de ancoragem, um comprimento livre de armadura e por um comprimento de selagem na armadura na qual ficara presa ao terreno por meio de uma calda de cimento.

Nas ancoragens passivas não se aplica pré-esforço, ou seja, os esforços ocorrerão antes de iniciar as ancoragens. No entanto, se a estrutura se deslocar logo após a aplicação de uma carga mínima de construção ou de blocagem, a resistência das ancoragens deverá se mobilizar de acordo com o movimento ocorrido. Na ocasião de uma ancoragem passiva, ela será constituída por uma cabeça de ancoragem, um comprimento livre de armadura e por um dispositivo preso ao terreno, seja ele um predeterminado comprimento de ancoragem preso ao terreno por meio de uma calda cimentada, um corpo passivo, uma ancora helicoidal ou uma pregagem em rocha.

Atualmente é comum recorrer às ancoragens intermediárias que apresentam carga máxima de pré-esforço parcial, geralmente entre os valores 1/2 e 1/3 em relação a tração de projeto.

É fundamental proceder às estimativas dos esforços máximos que ocorrerão durante o período de serviço de execução das ancoragens, em razão de que as várias fases de construção posteriores à respectiva instalação pretendida, provocarão conseqüentemente variações nos esforços instalados, na qual dependerão inevitavelmente do valor inicial. Cabe ao projetista estabelecer um valor estimado de pré-esforço capaz de reduzir os efeitos devido às variações dos esforços, e que este não ultrapasse a tração máxima admissível na ancoragem (FERNANDES, 1983).

Como elemento estrutural de transferência de carga, a ancoragem depende particularmente de um tirante de aço introduzido no terreno. Tal tirante será estudado com mais detalhes a seguir.

6.6 TIRANTES

6.6.1 Histórico

De acordo com Carvalho (2009), a prática da execução do sistema de ancoragem, na América do Norte e na América do Sul, concentrou-se principalmente nas áreas metropolitanas. No Brasil as ancoragens foram introduzidas em 1957, sobretudo em obras de estabilização de taludes. Um dos trabalhos mais importante, sem dúvida, foi o programa de ensaio de ancoragem aplicados em solos argilosos. A partir deste programa, realizaram-se ensaios de carga para a construção da obra do Metrô de São Paulo.

Segundo Gerscovich et al (2016, apud YASSUDA; DIAS, 1996, p. 603), “ não se pode falar em ancoragem em solo sem citar o Prof. Antônio José da Costa Nunes, engenheiro brasileiro que dedicou praticamente toda a sua vida à pesquisa e desenvolvimento da técnica”. O professor Costa Nunes, também foi fundador da Tecnosolo S.A., pioneiro de uma série de técnicas, especialmente na área de ancoragens injetadas e protendidas, e fundações em geral. Além disso, recorda ainda que as primeiras obras de cortina atirantadas no Brasil foram construídas no Rio de Janeiro, Copacabana, na estrada Rio-Teresópolis e na estrada Grajaú-Jacarepaguá, no fim de 1957.

De acordo com Yassuda e Dias (1996), mundialmente a técnica de aplicação da ancoragem foi mais desenvolvidas na Europa e no Brasil, só ganhando espaço na América no

Norte mais recentemente. As primeiras aplicações da metodologia vieram a ser datadas no Brasil no final de 1957, como vimos anteriormente, e princípio de 1958 na Alemanha.

Estes mesmos autores, disseram que houve um grande avanço da técnica no Brasil após as chuvas catastróficas no Rio de Janeiro nos anos de 1996 e 1997, que possibilitaram a aplicação da ancoragem em diversas estruturas de contenção de taludes, para restauração das encostas da cidade e de estradas próximas.

Estas obras trouxeram projetos mais sofisticados e complexos, além de uma maior confiabilidade e controle. Consequência disso foi a crescente instalação de empresas especializadas na produção de tirantes, como também, a vinda de técnicas e empresas estrangeiras. Nesta mesma época, criou-se a primeira norma brasileira de ancoragem, a NBR 5629 (1977), baseada na tradução da norma alemã DIN 4125 (1972).

6.6.2 Conceitos Básicos

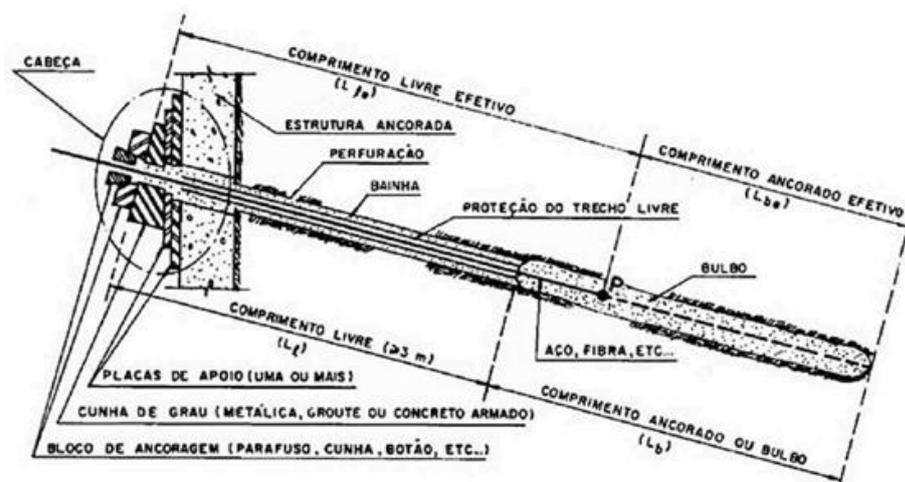
Na elaboração de um projeto de contenção, cada ancoragem é composta por uma cabeça, um comprimento livre de armadura e um comprimento de selagem, na qual sua capacidade de carga estará condicionada na preservação da resistência de seus componentes e nas reações mobilizadas do terreno ao longo do comprimento de ancoragem e na região envolvente da cabeça.

Durante a fase de serviço, o tirante é injetado no furo, numa larga variedade de maciços formados de solos e ou rochas. A execução do projeto de ancoragem envolve procedimentos complexos e altamente especializados, carecendo de cuidado com:

- A produção e montagem das armaduras;
- A perfuração do terreno aonde será inserida os componentes da armadura;
- A colocação das ancoragens no interior dos furos e a realização das injeções;
- O mecanismo de aplicação do pré-esforço.
- O controle da qualidade, monitoramento e inspeção.

Neste trabalho, estaremos dando ênfase às ancoragens pré-esforçadas, com armaduras de aço de alta resistência, como monobarras, cordoalhas e fios. Os tirantes de aço são selados ao terreno, por injeção de calda de cimento de acordo com a NBR 7681 (2013) ou outro aglutinante, desde que com eficiência comprovada. O tirante pode ter uma inclinação com a horizontal entre os 15° e 45°, intervalo caracterizada de ancoragem sub-horizontal. Inclinações maiores que esse intervalo, geralmente exige técnicas especiais para a sua implantação. Na figura 15, apresentaremos os elementos constituintes de um tirante.

Figura 15– Constituição típica de uma ancoragem em terreno



Fonte: Yassuda e Dias (1996, p. 604)

Os tirantes são elementos lineares capazes de transmitir esforços de tração entre suas extremidades. Seu funcionamento será abordado com mais detalhe a seguir.

6.6.3 Princípios de Funcionamento

A função principal do tirante é transmitir forças externas de tração para o interior do terreno, através do comprimento de selagem. A carga é aplicada na cabeça e transferida para o bulbo através do comprimento livre.

Os tirantes são tracionados pelo conjunto manômetro-macaco-bomba hidráulicos com atestado de avaliação cuja data seja igual ou inferior a um ano conforme a NBR 5629 (2018). A armadura de aço deve atingir uma carga determinada em projeto (carga de incorporação) e também serem fixadas na parede por meio de um sistema de placas de apoio, cunhas, cones, porcas, etc. A carga aplicada no tirante ficara atuando contra a parede de contenção e será o carregamento que irá se contrapor ao empuxo de terra e garantir a estabilidade da obra (GERSCOVICH et al, 2016).

De acordo com Gomes et al (2016), o controle tecnológico das ancoragens reinjetáveis e atirantadas é controlada pela NBR 5629 (2018). Segundo a norma, as ancoragens permanentes devem ser ensaiadas em campo 1,75 vezes a carga de trabalho. No entanto, em muitas ocasiões as ancoragens suportam esforços muito superiores às cargas solicitadas, ocasionando projetos não otimizados (comprimentos de ancoragem muito grande) e, conseqüentemente, custos elevados.

Nas explicações geotécnicas dos tirantes, a extremidade que fica fora do terreno é a cabeça do tirante e a extremidade que fica dentro do terreno é conhecida de trecho livre e trecho ancorado, melhor detalhado a seguir.

6.6.4 Partes Componentes Típicas

6.6.4.1 Cabeça do Tirante

É o dispositivo que fica fora do terreno, colada na parte externa da parede de contenção, constituída de placas de apoio, cunha de grau ou clavete e bloco de ancoragem representados na figura 16. A cabeça do tirante ainda é protegida por uma cobertura de concreto que serve de proteção anticorrosiva.

Nas ancoragens pré-esforçadas, a cabeça do tirante é a peça onde se aplica o pré-esforço, gerados através de cargas de ensaio e de blocagem, permitindo também que se realizem operações de desblocagem e reblocagem. A cabeça também é o componente onde se transfere a carga do tirante à estrutura a ser ancorada. Essas ações requerem aplicação tecnológica das cabeças dos tirantes nos sistemas ancorados, juntamente com os sistemas de aplicação de pré-esforço. O arranjo cabeça, armadura de aço e parede de concreto, devem apresentar características e comportamentos, que se ajustem de acordo com as deformações previstas na obra durante a sua vida útil.

De acordo com a NBR 5629 (2018), a cabeça do tirante deve ser projetado para suportar uma carga máxima de ensaio correspondente à carga de trabalho (F_t), multiplicado por um fator de segurança adotado, dado como:

$$\text{Carga de trabalho} = \text{Carga máxima} / 1,5 \quad (30)$$

$$\text{Carga máxima} \leq 0,9 \cdot f_{yk} \cdot A_s \quad (31)$$

Onde:

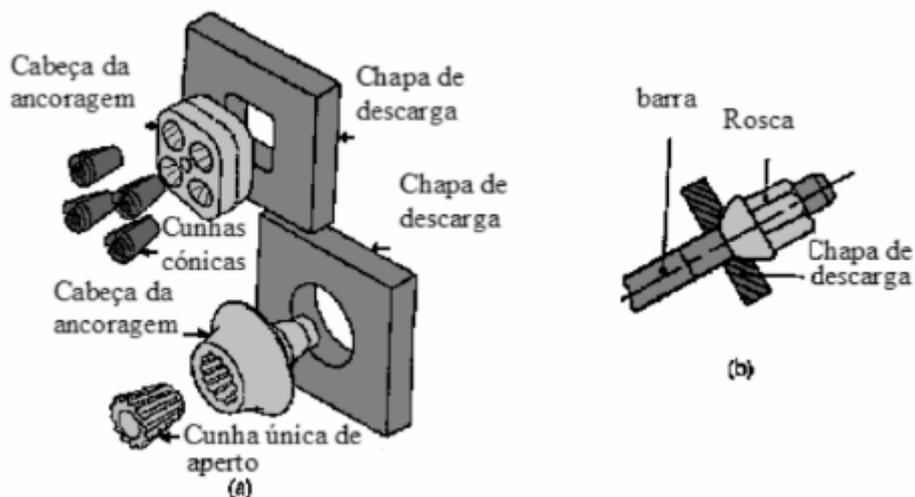
f_{yk} : é a resistência característica do aço à tração;

A_s : é a área da seção transversal máxima do aço.

Em caso de ancoragens provisórias o fator de segurança passa a ser 1,2, ficando:

$$\text{Carga de trabalho} = \text{Carga máxima} / 1,2 \quad (32)$$

Figura 16– detalhes de cabeça para ancoragens para armaduras constituídas por: a) cordões ou fios; b) barras



Fonte: CARVALHO, (2009, p. 161)

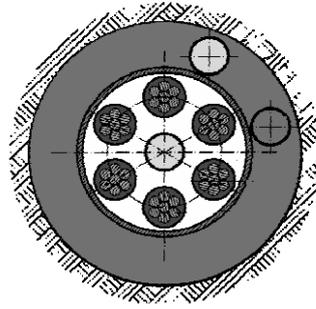
6.6.4.2 Trecho Livre

O trecho livre corresponde ao comprimento entre as seções de início do bulbo de selagem e a cabeça da ancoragem. De acordo com Yassuda e Dias (1996), a distância do ramo livre é datada de um comprimento mínimo de 3 metros no caso de fixação com rosca e 5 metros no caso de fixação com clavetes conforma a NBR 5629 (2018). O comprimento da zona livre refere-se à ramada da armadura de pré-esforço onde o tirante se encontra livre para se deformar elasticamente e transferir para a estrutura de paramento a carga proveniente da resistência da ancoragem. Além disso, o trecho referente ao comprimento livre, não deve transferir carga para o solo, estando intencionalmente afastado do terreno envolvente.

No que se refere à proteção, o trecho livre tem aço revestido por uma ou duas bainhas, lisa ou corrugada. Normalmente, para ancoragens provisórias se usa apenas uma bainha, podendo ser coletiva ou individual. No entanto, para tirantes definitivos, necessita-se proteção adicional, como por exemplo, bainhas individuais preenchidas com massas anticorrosivas. Usualmente aplica-se ao ramo livre, graxa grafitada ou elastômero, antes de revestir com a bainha. A graxa tem a função de evitar o atrito ao longo do comprimento livre, além de proteger o tirante contra a corrosão.

A seção transversal do trecho livre de um tirante permanente está representada na figura 17 com mais detalhes.

Figura 17– Seção transversal tipo comprimento de uma ancoragem definitiva



Fonte: CARVALHO (2009, p. 15)

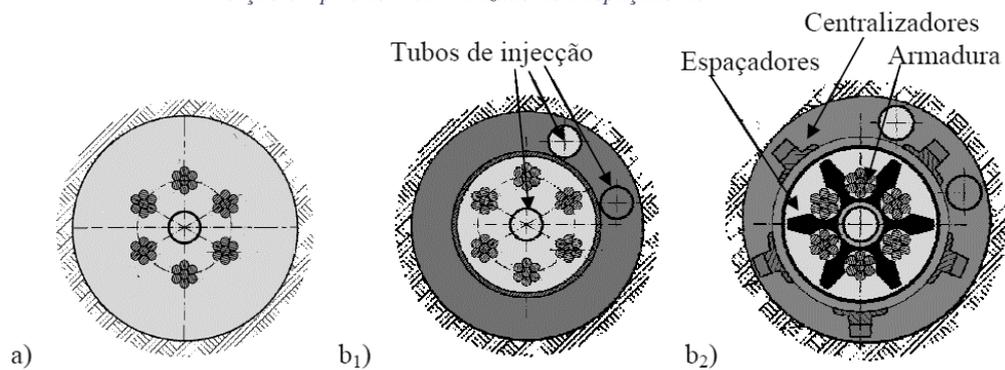
6.6.4.3 Trecho Ancorado

O trecho ancorado, também conhecido de comprimento fixo de ancoragem, corpo ou selagem da ancoragem, é normalmente constituído aglutinante. Na maioria dos casos, este aglutinante é o cimento Portland, que é injetado em forma de calda. A calda de cimento tem a função de desempenhar a transferência de carga, da armadura para o bulbo, e deste para o terreno, e também serve de elemento protetor contra a corrosão do aço.

Segundo a norma, o aço deve ter uma proteção anticorrosiva ao longo do comprimento ancorado. A NBR 5629 (2018) preconiza proteção dupla, com a diferença de que, para ancoragens definitivas se tenha proteção adicional constituída de um cone corrugado, que deva assegurar o isolamento da armadura relativamente ao meio envolvente do bulbo. Além disso, a norma recomenda que se evite a construção de ancoragem em solos orgânicos moles, aterros ou solos coesivos, com $N_{stp} \leq 4$, e aterros sanitários.

A seção transversal do trecho ancorado é representada pela figura 18, tanto para as ancoragens ativas como para as ancoragens passivas.

Figura 18– Seção transversal tipo bulbo de selagem: a) ancoragem provisória; b1) ancoragem definitiva; b2) seção simples com centralizadores e espaçadores



Fonte: CARVALHO (2009, p. 15)

A norma também define cobrimentos de ancoragem inferiores a 5 metros sobre o trecho ancorado.

A calda de cimento que constitui o bolbo de selagem é transmitida ao terreno envolvente através de um sistema de injeção que veremos a seguir com mais detalhes.

6.6.5 Sistema de Injeção

A selagem de uma ancoragem pode ser executada através de injeções em fase única ou em fases múltiplas. A primeira é executada por um simples preenchimento do furo aberto no solo, ou através da aplicação de pressão apenas na boca do furo.

Caso a injeção seja aplicada por gravidade, ou seja, sem pressão, podem se verificar dois cenários: (a) o peso próprio do tirante pode colocá-la em contato direto com o terreno, mesmo com a utilização de espaçadores e centralizadores; (b) a resistência ao arranque da ancoragem irá se mobilizar ao longo da superfície de contato entre o comprimento de selagem e o terreno, cenário este desejado pelo projetista.

Na fase múltipla, utilizam-se válvulas que permitem a injeção através de um longo tubo inserido no interior do furo, permitindo o fluxo, em sentido único, de calda de cimento ou outro aglutinante em uma ou mais fases, de acordo com as necessidades do projeto.

Nas injeções múltiplas, resultam em um novo posicionamento da selagem da ancoragem no interior do furo. Em cada nova fase de injeção, a calda injetada rompe a calda existente, fluindo em seu entorno e alojando-se entre a ancoragem e a terra, com o bulbo aumentando de volume (CARVALHO, 2009).

A caracterização dos sistemas de proteção contra corrosão também se faz por meio de injeção de calda de cimento aplicado em todos os elementos dos tirantes e devem seguir as especificações estabelecidas pela NBR 5629 (2018) apresentados na tabela 1.

Tabela 1 – Sistema de proteção em função do meio e local

Vida útil de projeto	Meio ^a	Proteção		
		Cabeça	Trecho livre	Trecho ancorado
Provisório	Não agressivo	Calda de cimento	Calda de cimento	Calda de cimento
	Agressivo	Calda de cimento + 1 barreira	Calda de cimento + 1 barreira	Calda de cimento
Permanente	Não agressivo	Calda de cimento + 2 barreiras + Tubo protetor	Calda de cimento + 2 barreiras	Calda de cimento + 1 barreira
	Agressivo	Calda de cimento + 3 barreiras + Tubo protetor	Calda de cimento + 3 barreiras	Calda de cimento + 1 barreira

^a A referência de meio não agressivo é o critério pH > 6, podendo ser necessários outros critérios e ensaios, devidamente a ser prescritos no projeto.

Fonte: NBR 5629 (2018, p.19)

De encontro a tudo que vimos até agora, os próximos capítulos contribuirão para entender os processos de execução das estruturas de contenção com ancoragem, os aspectos técnicos e econômicos devido a sua implantação, e os principais tipos de estabilidade de encostas com o uso de soluções de contenção com tirantes.

7 ESTABILIZAÇÃO DE ENCOSTAS E TALUDES COM O USO DE SISTEMA DE ANCORAGEM

7.1 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

De acordo com Carvalho (1991), os diversos casos de instabilização de encostas naturais, como também de taludes de corte e aterro, tem mostrado que estas evoluíram ao passar dos anos. Contudo, se diagnosticado na fase inicial, quando os problemas ainda são pequenos, podem ser resolvidos com menor custo e esforço do que na fase de desenvolvimento da instabilização.

Em vista disso, a conservação rodoviária é extremamente importante, pois além de garantir o fluxo contínuo e eficiente da malha rodoviária, evita gastos elevados de operação, uma vez que os recursos viabilizados para um programa eficaz de manutenção são inferiores aqueles destinados a estabilização de obras de contenção de grande porte.

A seguir, mostraremos os principais problemas de instabilização de taludes rodoviários, suas formas de ocorrência e causas. As soluções de estabilização para os fenômenos de ruptura do solo apresentados a seguir, serão o uso de contenção com tirante ancorado no maciço rochoso ou terroso, conforme a estratigrafia do terreno em análise.

7.2 ESTABILIZAÇÃO DE ESCORREGAMENTOS COM O USO DE ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO COM ANCORAGEM

Escorregamentos são movimentos rápidos de porções de massa ocasionadas em taludes naturais, de cortes ou aterros. Apresentam superfícies de ruptura bem definidas, relacionadas com o tipo de solo ou rocha, geometria do talude e das condições do fluxo de água.

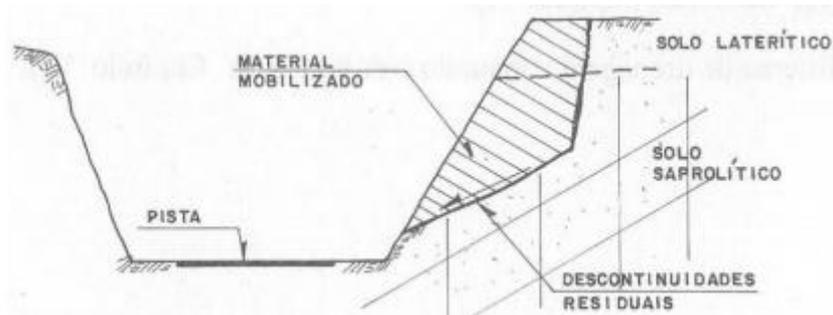
Entre os diversos fatores responsáveis pelos escorregamentos, está a água como principal agente deflagrador. Em razão disso, são observados com maior frequência em períodos chuvosos.

A execução de corte nas encostas provoca mudanças no estado de tensões atuantes no maciço, ocasionando instabilidade na zona de montante do talude. Das vezes, essas tensões de tração contribuem para a formação de trincas, que preenchidas com água proveniente da chuva, resultam no escorregamento do talude.

De acordo com o Departamento de Estrada de Rodagem (1987), em seu Manual Básico de Estradas Vicinais, recomenda o uso de tirantes em alguns projetos de estabilização de taludes de corte, quando as superfícies de ruptura apresentam descontinuidade dos materiais, resultante

dos planos de fraqueza (fraturas e xistosidade), também conhecidas de estruturas residuais. O contato solo/rocha também é uma descontinuidade, que devido a sua substancial mudança na permeabilidade e na resistência dos materiais, permitem o desenvolvimento das forças de percolação que ocasionam na ruptura, ver figura 20.

Figura 19- Escorregamento causado por descontinuidade do maciço

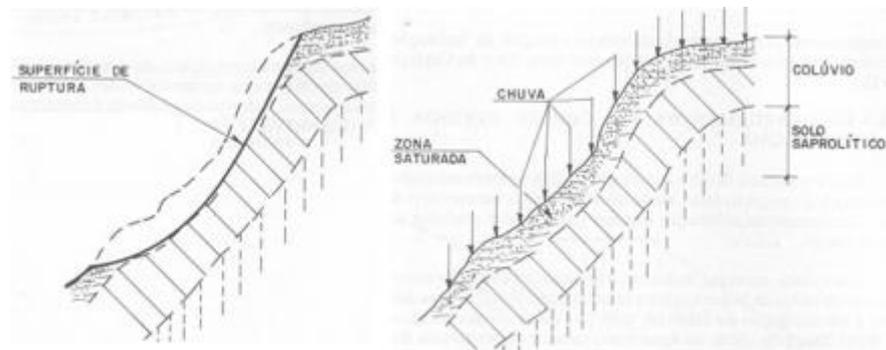


Fonte: Carvalho (1991, p. 110)

Outro caso de escorregamento em corte ocorre quando há saturação do maciço devido à elevação do lençol freático, decorrente de prolongados períodos de precipitação. Estes casos acontecem principalmente quando os pequenos cortes interceptam o lençol de água, podendo ocasionar instabilidade do maciço, quer por aumento da poro-pressão, redução dos parâmetros de resistência do solo pela água, ou ainda pela atuação da água nos processos erosivos, ver figura 21.

A execução de obras de contenção com ancoragens também pode ser usada em situações específicas em que há presença de diques de diabásio que criam condições para formação de lençóis freáticos suspensos, propiciando na saturação do talude que pode desencadear escorregamentos de grande proporção.

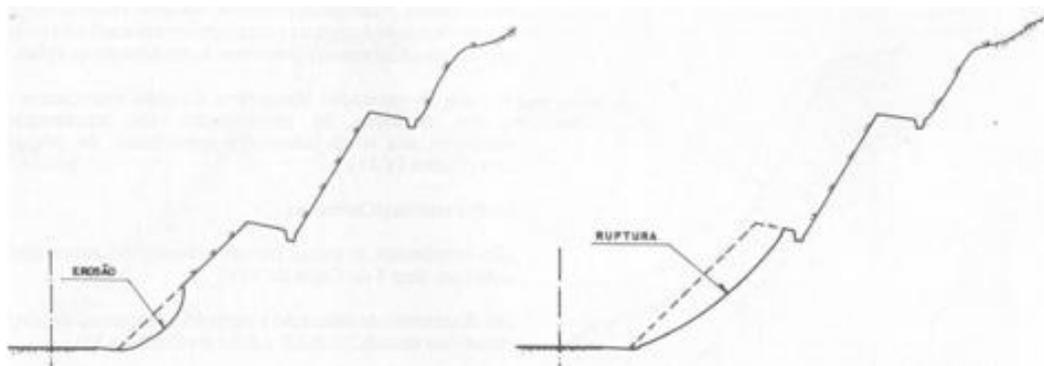
Figura 20- Escorregamento devido a saturação do talude



Fonte: Carvalho (1991, p. 114)

Muitos processos de escorregamentos em corte ocorrem devido a evolução da erosão, em sulcos ou diferenciada, modificando a forma do talude, propiciando paredes subverticais, geralmente incompatível com a resistência do talude, ver figura 22. O controle destas situações pode ser resolvido pela aplicação de obras de contenção com ou sem tirantes.

Figura 21- Escorregamento devido a evolução da erosão



Fonte: Carvalho (1991, p.116)

De acordo com Santos (2017), as cortinas atirantadas podem ser usadas na estabilização de taludes em colúvio em solos residuais que sofreram corte. Na aplicação da solução, a presença de água na região da contenção deve ser levada em consideração. Diante disso, estudos revelam que tanto as cortinas atirantadas com face drenante (drenagem funcionando perfeitamente) quanto as cortinas com drenos sub-horizontais profundos, reduzem consideravelmente as porros pressões desenvolvidas na superfície de ruptura e conseqüentemente a redução do nível de água nas proximidades da cortina, além de manter a água distante da região de ancoragem, elevando assim, o fator de segurança de toda estrutura.

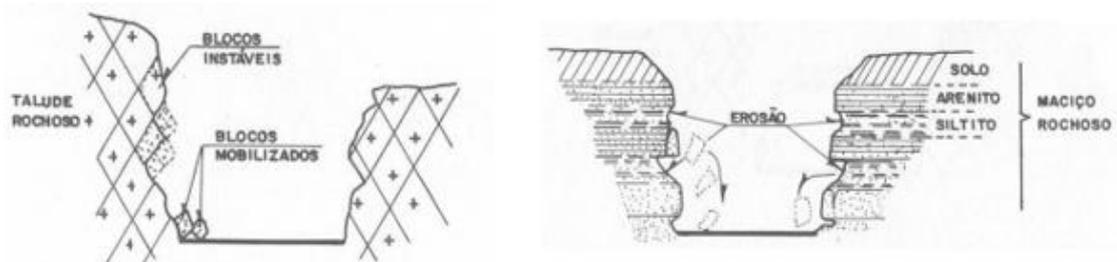
7.3 ESTABILIZAÇÃO DE QUEDA E ROLAMENTO DE BLOCOS COM O USO DE ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO COM ANCORAGEM

A queda/rolamento de blocos ou formação de cunhas, apesar de serem processos distintos, merecem uma atenção especial, pois podem ocasionar acidentes graves nas rodovias, principalmente em regiões de escarpas, trechos de encostas caracterizados por altas declividades.

A queda de bloco se caracteriza pelo movimento rápido e em queda livre, geralmente ocasionada ou pela descontinuidade do maciço rochoso devido aos planos de fraqueza (fraturas e xistosidade), que resulta no desprendimento dos blocos unitários da rocha da encosta, ou

também, pela queda de bloco de rochas sedimentares formada de camadas intercaladas de arenito, siltito e argilito, conforme figura 23. Esta situação ocorre quando as camadas de siltito e argilito sofrem o fenômeno de desagregação de suas partículas, propiciando no desprendimento dos blocos de arenito da camada superior.

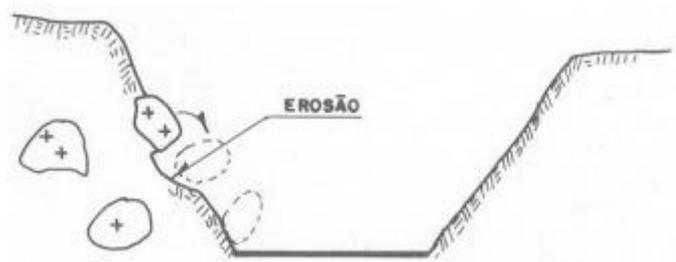
Figura 22- Queda de blocos em taludes de rochas ígneas e de rochas sedimentares



Fonte: Carvalho (1991, p. 138, 140)

Já o rolamento de blocos, representado na figura 24, geralmente associadas em regiões de rochas graníticas, que originam os blocos de rocha sã ou matacões, ocorrem em razão da erosão ou dos pequenos escorregamentos que removem o apoio de sua base (descaçamento), ocasionando o rolamento de blocos rochosos de encostas.

Figura 23- Rolamento de blocos



Fonte: Carvalho (1991, p. 142)

Entre as possíveis medidas preventivas e corretivas para estas duas situações acima, a fixação dos blocos soltos utilizando-se da execução de tirantes. Na figura 25 é possível observar duas colunas atirantadas que promovem a contenção de três blocos de rocha instáveis.

Figura 24- Colunas atirantadas de contenção de blocos de rocha



Fonte: De Andrade (2016)

De acordo com Pinotti e Carneiro (2013), os tirantes, quando utilizados provisoriamente, ajudam a conter blocos em regiões de escavação, como também, funcionam como contenção de blocos ou cunhas de rocha, isoladas por descontinuidades do maciço rochoso (falhas ou xistosidade). Quando executadas em sistema de suporte definitivo, de forma sistemática em malha geométrica, consegue-se que as rochas instáveis fiquem comprimidas na própria escavação ou encosta natural, contendo eventuais deslocamentos ou deformações do maciço rochoso e precavendo possíveis acidentes. A seguir, serão apresentados os processos de execução na estabilidade de encostas naturais, como também de taludes de corte e aterro.

8 OBRAS ESPECIAIS DE ESTABILIZAÇÃO

A execução de obras especiais de estabilização apresenta um processo de grande complexidade, pois existe uma grande variedade de sistemas de contenções disponível no mercado e, em muitas situações mais de uma solução pode ser aplicada em um projeto. Isso torna a pesquisa mais interessante, o que exalta a importância dos profissionais da área na otimização de metodologias avançadas, contribuindo significativamente no desenvolvimento de novos conceitos de engenharia.

Há, assim, problemas que são inerentes à Engenharia Geotécnica e que levaram autores e pesquisadores a desenvolver conceitos gerais que merecem uma maior divulgação entre os profissionais da especialidade. Entre eles, destacam-se os conceitos de previsões, risco calculado e Método Observacional. (VELLOSO; LOPES, 2010, p. 03).

Entre as soluções de estabilização de encostas e taludes, existe a contenção com tirante isolado e a contenção com vários tirantes mostrados a seguir.

8.1 ESTABILIZAÇÃO DE MACIÇO TERROSO E ROCHOSO COM O USO DE VÁRIOS TIRANTES E COM TIRANTE ISOLADO

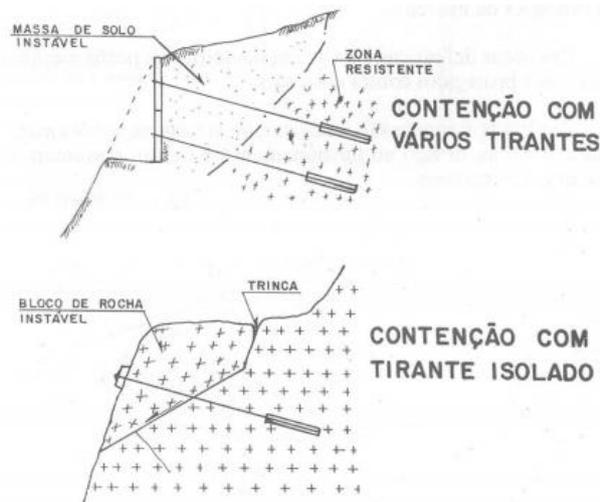
A principal função de um tirante é aumentar as componentes resistente por atrito através do aumento da tensão normal por protensão. Além disso, tem o objetivo ancorar massas de solo e blocos de rocha através da aplicação de forças de protensão, que transmitem esforços diretamente para zona mais instável do maciço através de fios, barras ou cordoalhas de aço.

Para remediar situações de riscos envolvendo queda de blocos em rodovias ao longo das encostas rochosas, geralmente ocasionadas por blocos ou lascas de rocha instável e cortes de rocha muito fraturadas, pode-se optar pela aplicação de tirantes isolados, protendidos diretamente contra a rocha, através de cabeças ou placas de distribuição, ver figura 26.

No caso de estruturas verticais ou subverticais de concreto armado, que funcionam como paramento para contenção de taludes, é necessário o uso de vários tirantes. O paramento pode ser montado com placas isoladas para cada tirante, com placas isoladas englobando um ou mais tirantes ou com cortina única, contendo todos os tirantes.

Tanto contenção com vários tirantes quanto contenção com tirante isolado são apresentados na figura 26:

Figura 25- Exemplos de aplicação de tirantes



Fonte: Carvalho (1991, p. 212)

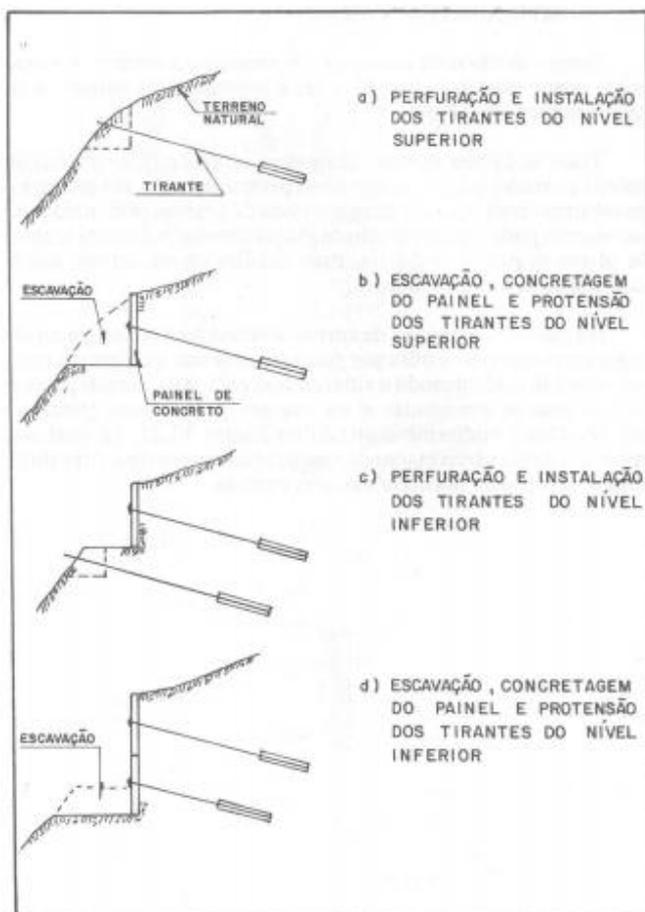
A execução de uma estrutura de contenção com o uso de tirantes em taludes de corte e aterro de grandes alturas precisa ser executado em etapas consecutivas a fim de garantir a segurança da obra e dos funcionários, como também facilitar o processo executivo, conforme o capítulo seguinte.

8.2 ESTABILIZAÇÃO DE TALUDES DE CORTE E ATERRO COM O USO DE CONTENÇÃO COM ANCORAGEM

De acordo com Carvalho (1991), em seu Manual de Taludes de Rodovias e Orientação para Diagnóstico e Soluções de Seus Problemas, classifica as cortinas e muros atirantados como um dos mais importantes sistemas de contenção de encostas devido a sua versatilidade e segurança.

Nos casos de contenção de cortes, a execução é realizada em etapas sucessivas, partindo-se do topo da encosta (método descendente), sendo que a etapa subsequente somente estará apta a começar assim que as placas e a protensão (total ou parcial) dos tirantes da etapa anterior (em cota mais elevada) já estejam sendo executadas, conforme ilustrado na figura 27.

Figura 27 - Sequência construtiva, simplificada, de cortinas atirantadas na contenção de cortes

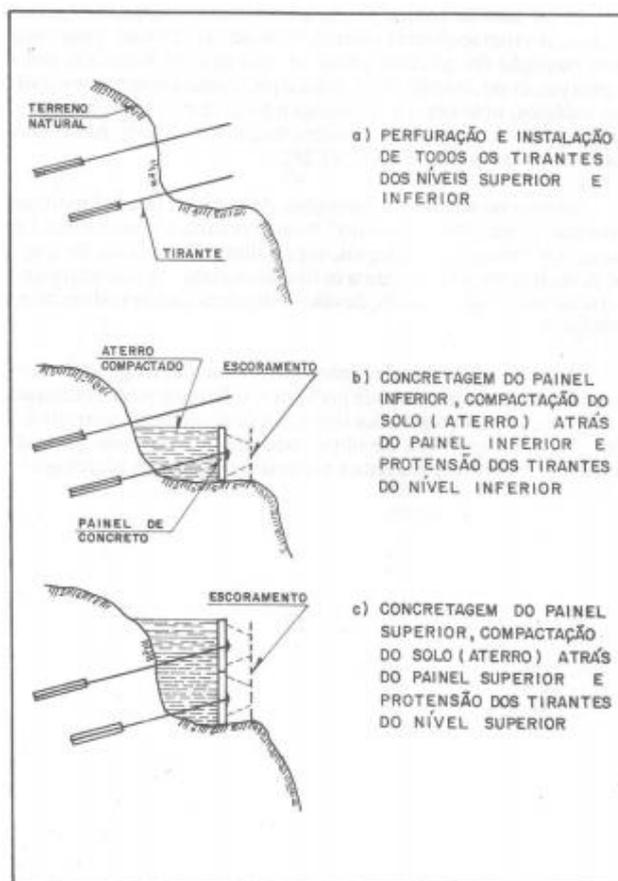


Fonte: Carvalho (1991, p. 216)

De acordo como Carvalho (1991), mesmo no caso de contenções em cortes e taludes naturais, as cargas de protensão nos tirantes devem ser aplicadas em estágios, a fim de evitar que a protensão de cada tirante afete diretamente nos tirantes vizinhos, que tendem a perder parte de sua carga devido às deformações introduzidas no maciço.

Já para o caso de contenção em aterros, o processo executivo é inverso, de baixo para cima (método ascendente), promovendo a execução das placas e protensão dos tirantes à medida que o aterro vai sendo alteado. Neste caso, as cargas aplicadas nos tirantes devem ser executadas em estágios, ou seja, as placas inferiores não podem receber a carga total de projeto sem antes o aterro ser compactado totalmente, ver figura 28:

Figura 28 - Sequência construtiva, simplificada, de cortinas atirantadas na contenção de aterros



Fonte: Carvalho (1991, p. 218)

Por fim, deve-se escolher entre as técnicas de melhoria do terreno as contenções que mais se adaptem ao problema apresentado e que permitem a contenção de encostas naturais e de taludes artificiais, por meio de tirantes e drenagem, sendo este último discutido a seguir.

8.3 SISTEMA DE DRENAGEM

O processo de drenagem tem por finalidade a captação e o transporte da água do escoamento superficial, como também a retirada de parte da água de percolação interna do maciço. No caso de obras de contenção, o processo de drenagem é considerado por muitos manuais técnicos como sendo um recurso adicional, também chamado de “obra complementar” ou “auxiliar”.

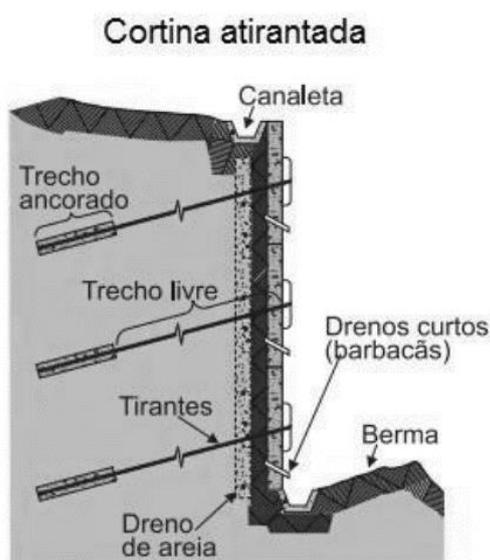
É de fundamental importância, visando reforçar o bom entendimento dos mecanismos de instabilização de taludes, o uso de procedimentos corretivos mais adequados, principalmente

no caso de obras de drenagem profundas, que se usada de forma inconveniente, poderá resultar em gastos desnecessários e também em nenhum benefício.

De acordo com Mikos et al (2017), o sistema de drenagem deve ser implantado antes da execução do paramento, para evitar o fluxo de água dentro do maciço. Os principais dispositivos que devem ser considerados são: drenagem profunda, de paramento e superficial.

A drenagem de paramento tem a função de organizar o fluxo de água que converge através do paramento pelo maciço. Normalmente são utilizados drenos curtos do tipo barbacã, drenos de areia ou geossintéticos na face interna do paramento. Já a drenagem superficial tem a finalidade de captar e direcionar o fluxo proveniente da crista e do pé do talude, como também a água coletada pelos drenos profundos e de paramento, através do uso de canaletas e escadas hidráulicas que conduzem a água para um ponto de captação ou descarga, como apresentado na figura 29:

Figura 29 - Sistema de drenagem em cortina atirantada

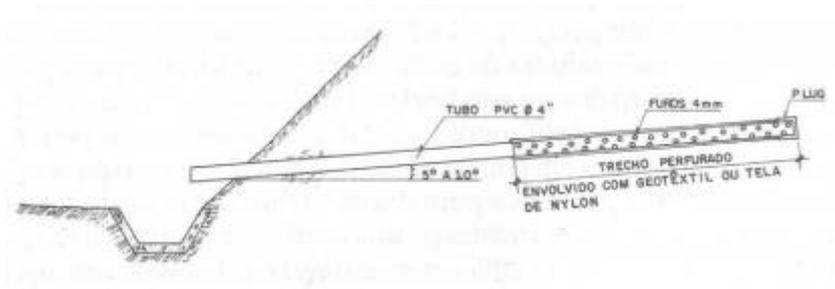


Fonte: Mikos et al (2017)

Segundo Ranzini e Negro Jr (1996), no caso de cortinas de contenção com corte que interceptam o nível do lençol freático, geralmente é empregado o uso de drenagem profunda através de drenos sub-horizontais perfurados, conhecido no meio técnico de DHP. Este método consiste na introdução de um tubo perfurado de pequeno diâmetro, envolvido por uma tela filtrante, diretamente em um furo aberto na horizontal realizado através de sonda rotativa. Sistema este, que tem por objetivo rebaixar o lençol freático e reduzir o efeito da pressão hidrostática atuante na cortina.

O detalhe de um dreno sub-horizontal profundo (DHP), está representado com mais detalhes na figura 30.

Figura 30 26- Detalhe de um dreno sub-horizontal profundo – DHP



Fonte: Carvalho (1991, p.242)

A seguir, será discutido a análise técnica e econômica de se executar uma obra de contenção com o uso de tirantes, como também suas limitações e vantagens executivas.

9 ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA DE ESTRUTURA DE CONTENÇÃO COM SISTEMA DE ANCORAGEM

Em um projeto de estrutura de contenção com sistema de ancoragem, o projetista deve prezar pela segurança da estrutura, duração por toda a vida útil da obra, otimização dos custos e pela geração do menor impacto ambiental possível. A seguir, discutiremos os pontos positivos e negativos de se implantar esse tipo de solução de estabilização.

9.1 LIMITAÇÕES NA APLICAÇÃO DE OBRAS DE CONTENÇÃO COM ANCORAGEM

Em certas ocasiões, o uso de tirantes é basicamente o único sistema de escoramento exequível, podendo ser utilizada para conter solos acima do nível de água. Além disso, geralmente apresentam custo mais elevado em relação aos outros sistemas de contenção e sua execução demanda tempo, mão-de-obra e equipamentos especializados.

Segundo Magalhaes e Azevedo (2016), o seu uso requer autorização dos proprietários dos terrenos adjacentes a contenção, mesmo que de forma provisória. Além disso, a execução dos tirantes pode interferir nas fundações (rasas e profundas) das edificações vizinhas quando houver. A perfuração para colocação dos tirantes pode ocasionar recalques no terreno, a injeção para fixação dos mesmos o levantamento do terreno e a protensão destes pode criar tensões horizontais nas fundações vizinhas.

O fato de o comprimento livre do tirante ter no mínimo 3 metros e o comprimento de ancoragem geralmente 5 metros ou mais, a instalação do tirante requer perfurações de no mínimo 8 metros, o que muitas vezes significa interferência no terreno vizinho.

Estes autores explicam também que as cortinas atirantadas se mostram inviáveis para pequenas alturas, nas quais outros tipos de contenção podem atender com eficácia por menores custos. Por outro lado, o uso de cortinas atirantadas para grandes alturas, onde as cargas de empuxo dos maciços são elevadas, a solução se torna eficaz, pois resiste aos altos carregamentos com pouca deslocabilidade de sua estrutura e com altos fatores de segurança. É uma solução que exige grande movimentação de terra, de equipamentos pesados, de mão-de-obra especializada e de diversos materiais, tornando a obra complexa e bastante onerosa. Além disso, a execução deste tipo de solução em grandes alturas pode exigir fundações mais complexas, como o uso de estacas, tornando a solução mais cara.

Para Marzionna (1996), esse sistema de contenção apresenta dois grandes inconvenientes: Primeiro, uma vez executado o tirante não é mais possível sua reutilização; segundo, pelo seu processo executivo não é mais possível retirá-lo do terreno após sua utilização, podendo gerar interferência significativa com a implantação de futuras obras em terrenos vizinhos.

Outro fator relevante é a escolha do paramento, visto que seu desempenho depende muito das características do meio físico como, as condições do nível do lençol freático, a disponibilidade de espaço para sua implantação e as condições das estruturas vizinhas, tornando esse processo de escolha mais complexo.

Geralmente essas estruturas apresentam perdas ou acréscimos de cargas de trabalho sobre os tirantes, valores que muitas vezes são diferentes daquelas cargas aplicadas na sua implantação. O acréscimo de sobrecarga nos tirantes no decorrer dos tempos gera mudança na distribuição de forças ao longo da parede estrutural da cortina, provocando deformações e formação de fissuras na superfície do concreto, principal entrada de agentes agressivos presentes no terreno arrimado e contaminado (MACHADO; MENDES, 2018).

De acordo com Saes et al (1998), outra situação é a execução de parede-diafragma atirantada que exige a utilização de equipamentos de grande porte, não sendo possível sua execução em locais onde esses equipamentos não conseguem ter acesso. A presença de matacões também pode inviabilizar a execução desse tipo de estrutura de contenção.

9.2 VANTAGENS NA APLICAÇÃO DE OBRAS DE CONTENÇÃO COM ANCORAGEM

De acordo com Machado e Mendes (2018), essa solução geotécnica é a forma mais adequada de conter elevados esforços horizontais provenientes de escavações de grandes alturas, com mínimo deslocamento do maciço terroso e rochoso, como também das estruturas localizadas nas vizinhanças.

Apesar de antigo, a cortina atirantada é o método mais utilizado de contenção de encostas, valendo-se de tirantes protendidos para dar sustentação ao terreno. Sua principal vantagem é a possibilidade de aplicação sem necessidade de cortar além do necessário, não somente como também, sua solução geotécnica consegue vencer qualquer altura e situação. No entanto há uma desvantagem, sua implantação gera um elevado custo devido à demora na sua execução. No entanto, a cortina ancorada é uma a solução geotécnica de grande utilidade e

economia por se permitir que se utilize a menor quantidade de concreto armado na execução da estrutura.

No intuito de se reduzir ao máximo a necessidade de remoção vegetal e evitar definitivamente problemas de estabilidade global, garantindo fatores de segurança adequados, é usual o uso de cortinas atirantadas em estabilidade de maciços rompidos. Além de menor supressão vegetal, esta solução também possibilitará redução dos volumes de solo a serem escavados, diminuindo assim custos de transporte e dificuldades com áreas de bota fora.

Em alguns casos, o maciço contido pela cortina poderá também ser regularizado de forma a se proporcionar estabilidade local satisfatória do mesmo, para, em seguida, ser revestido com gramíneas para proteção contra processos erosivos.

Os tirantes são funcionais pois trabalham ativamente devido a protensão. Em outras palavras, isto significa que o sistema pode suportar os esforços com um mínimo de deslocamento da estrutura em relação as outras estruturas convencionais que necessitam de uma movimentação para a contenção começar a trabalhar. Além disso, a carga de reação do sistema é obtida no interior do maciço o que torna a obra mais segura.

Outra particularidade dos tirantes é o fato de serem ensaiados individualmente, garantindo uma qualidade de 100 % dos elementos construídos em relação à capacidade de carga.

A outra vantagem da solução é de que o tirante utilizado é autoportante, conseqüentemente não necessita de detalhes complexos de fundação. Por exemplo, um muro de arrimo por gravidade requer estudos mais complexos de fundação em relação as cortinas com tirantes.

9.3 ASPECTOS TÉCNICOS A SE CONSIDERAR EM UM PROJETO DE CONTENÇÃO COM TIRANTES

Tratando-se de uma solução com elevado custo, por se tratar de uma obra que apresenta alternativas técnicas a considerar, a evolução tecnológica deve ser acompanhada de uma conscientização e racionalização dos processos de execução dessas obras, como também, da escolha da solução mais adequada para aquele tipo de situação, ao invés de aplicar a solução tecnicamente mais eficaz, porém, de maior custo, independente da sua real necessidade.

O projeto de uma cortina atirantada deve apresentar condições de segurança apropriadas durante todo o processo de execução da obra. No caso do método descendente, durante todo o processo de execução da cortina deverá existir todas as condições de segurança adequadas

visando a segurança da obra propriamente dita, a segurança dos trabalhadores, dos equipamentos e de tudo e todos que estiver no entorno.

Durante a implantação do método descendente, a estabilidade da obra pode ser assegurada através do uso de escavação em nichos alternados, ver figura 31, ou ainda, caso as placas estiverem sendo executadas em material de baixa qualidade, poderão fazer o uso de estacas, a fim de apoiar os painéis, desde o topo do terreno.

Figura 31- Escavação em nichos alternados



Fonte: Gerscovich et al (2016, p. 232)

De acordo com Carvalho (1991), a execução da solução não é implantada em uma única só vez, mas sim em várias fases de construção, logo é indispensável o levantamento dos cálculos de combate ao empuxo de terra em todas as fases de execução da obra. Neste aspecto é importante salientar que os acidentes geralmente acontecem durante as fases de construção.

Outro ponto crítico desse tipo de estrutura é a barra de aço, que deve receber proteção através da injeção de argamassa ou nata de cimento para evitar corrosão e conseqüentemente o rompimento do tirante, especialmente próximo a cabeça do tirante e no trecho livre, onde há maior presença de oxigênio e água. A corrosão da cabeça do tirante é uma preocupação relevante em relação à vida útil e desempenho, principalmente em regiões litorâneas.

A figura 32, mostra o caso de ruptura de uma cortina atirantada que ocorreu no trecho da rodovia ERS-115, com presença de rachaduras e afundamento do pavimento. O acidente ocasionou a interdição da rodovia por aproximadamente um mês, acarretando danos sociais, ambientais e econômicos, com isolamento de comunidades.

Figura 272- Ruptura de cortina atirantada na ERS-115



Fonte: Mikos et al (2017)

Segundo Gerscovich et al (2016), no que se refere a NBR 5629 (2018), faz algumas restrições em relação ao solo onde será executado o trecho de ancoragem dos tirantes (bulbo), já vistos anteriormente.

Esses aspectos geológicos-geotécnicos do terreno em questão serão apresentados com mais detalhes a seguir.

9.4 ASPECTOS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS A SE CONSIDERAR EM UM PROJETO DE CONTENÇÃO COM TIRANTES

De acordo com Carvalho (1991), em seu manual de taludes rodoviários, o estudo de investigação do terreno deve preceder qualquer elaboração de projeto de estabilidade de talude. Na elaboração de uma cortina atirantada, por exemplo, é fundamental a presença de um horizonte suficientemente resistente e estável para a ancoragem dos tirantes, a profundidades compatíveis. No entanto, este tipo de obra pode ser aplicado em qualquer situação geométrica, qualquer tipo de terreno e condições hidrológicas.

Para a elaboração de um projeto de contenção, o ambiente físico, descrito a partir das condições do subsolo, constitui-se um pré-requisito muito importante para projetos geotécnicos seguros e econômicos (SCHNAID; ODEBRECHT, 2012).

Estes mesmos autores, através de seu manual de Ensaios de Campo e Aplicações à Engenharia de Fundações, também comentam as orientações apresentadas por Peck (1969), que subdividiu as investigações em três métodos, que servem de orientação preliminar:

- *Método 1*: “executar uma investigação geotécnica limitada e adotar uma abordagem conservativa no projeto, com altos fatores de segurança”;
- *Método 2*: “executar uma investigação geotécnica limitada e projetar com recomendações baseadas em prática regional”;
- *Método 3*: “executar uma investigação geotécnica detalhada.

Além disso, a NBR 11682 (2009) preconiza, para efeito de análise e projeto de estabilização de encostas, a obrigatoriedade de se executar sondagens para determinar as características da encosta e a determinação da estratigrafia do terreno, sendo previsto no mínimo três sondagens por seção.

No projeto de uma cortina atirantada, outros cuidados devem ser considerados, como a existência de camadas de colúvio, sujeito de rastejo, passando por de baixo das fundações das respectivas cortinas. Neste caso, é prudente que a fundação ocupe toda a camada de colúvio ou que garanta, se possível, que não haja a possibilidade de movimentação da referida camada.

Além disso, outro cuidado especial também se dá quando existem camadas de argila de baixa consistência sob os painéis das cortinas atirantadas. É de praxe o uso de estacas (justaposta ou secante) para evitar a instabilidade dessas camadas de argila mole.

Conforme Gerscovich et al (2016), a investigação geotécnica não pode ser encarada como um fator de mero custo adicional do empreendimento, pois, em muitas situações, esse custo pode significar um grande investimento, resultando na elaboração de projetos com fatores de segurança mais adequados e com otimização dos custos para implantação das obras.

Além dos aspectos técnicos a se considerar em uma obra de estabilização de terra, é extremamente importante considerar a viabilidade econômica da obra antes de tomar qualquer decisão. O próximo item abordará os aspectos econômicos a considerar na hora de executar uma obra de estabilização com uso de tirantes.

9.5 ASPECTOS ECONÔMICOS A SE CONSIDERAR EM UM PROJETO DE CONTENÇÃO COM TIRANTES

O talude rodoviário deverá manter a estabilidade e a segurança oferecida pela economia disponibilizada pela sociedade.

De acordo com Saes et al (1998), o custo benefício de implantação de uma estrutura de contenção está diretamente relacionado com a viabilidade técnica e executiva, assim como do estudo comparativos dos preços oriundos de suas escolhas. Este estudo não deve se restringir somente do preço de implantação da estrutura, mas sim dos demais fatores que influenciam o sistema adotado.

Em relação aos preços relacionados à implantação da obra, levaríamos em conta, além dos materiais e da mão-de-obra, os custos de desapropriação, de relocação, de eventuais atrasos na obra, de ganho de prazo, de simplificação construtiva que reduzem serviços e prazo etc. Além dos custos de implantação, deve-se considerar os gastos adicionais relacionados aos serviços sociais de congestionamento, transtornos nos serviços públicos e gastos cessantes.

Outro quadro comum no ramo da construção é a falta de tempo e o descuido da verba financeira, levando a gastos exagerados em imprevistos e redução nos itens indispensáveis. Em outras palavras, tanto os custos de supervisão da obra como o custo do capital investido, ambos sendo proporcionais ao tempo de execução da obra. Salienta-se ainda que, planejamento a longo prazo fornecera melhor qualidade e menor custo.

Mediante ao exposto, é extremamente importante que o projetista não tome decisões com base em planilhas de quantidade ou até mesmo planilhas de preços da obra, sem antes a elaboração de um relatório abrangente dos gastos financeiros de toda a obra.

10 CONCLUSÃO

A análise e controle de instabilidade de taludes e encostas naturais vem crescendo com a aplicação de grandes obras modernas, juntamente com o desenvolvimento de novas técnicas de Engenharia e Geologia de Engenharia para prevenção e contenção de massas.

Sob um ponto de vista prático, buscou-se comentar as ferramentas disponíveis e analisar as condições que levaram ao sucesso e insucessos da implantação de contenção de taludes e encostas naturais com o uso de tirante. Depois, procurou-se estudar os fatores geológicos e geotécnicos de importância, as situações características do meio físico, as metodologias de pesquisa, e as possibilidades de análise e soluções, a fim de buscar respostas quanto à otimização de obras de contenção atirantadas presentes nas vias modais do país.

Diante disso, observamos que a estabilização de encostas com o uso de tirantes ancorados no maciço é o método mais eficiente e de melhor custo benefício quando aplicado em grandes alturas, capazes de suportar grandes empuxos de terra com mínima deslocabilidade da estrutura. Seu uso torna-se viável principalmente quando há a necessidade de menor remoção de terra e vegetação, evitando assim gastos com transporte de material e o uso contínuo de equipamentos pesados. Os tirantes por serem autoportantes, também não necessitam de aplicação de fundações complexas em relação às outras soluções, e evitam problemas de estabilidade global de todo conjunto da estrutura.

Por outro lado, quando a implantação dessas contenções necessita de escavações de grandes alturas, haverá a necessidade de grande movimentação de terra, de mão-de-obra especializada, de equipamentos pesados e de grande quantidade de material, tornando uma obra onerosa devido as dificuldades e demora na sua execução.

Se tratando de obras rodoviárias, deve-se ter uma atenção especial nas cortinas atirantadas localizadas em regiões litorâneas, onde os tirantes estão geralmente expostos a corrosão do aço devido ao contato com a água/sal, principalmente na cabeça do tirante. Quando a corrosão ocorrer no comprimento livre do tirante, deve-se principalmente a patologias como: trincas, fissuras que preenchidas com água/sal, causam infiltrações significativas no interior do solo, onde se encontra o comprimento livre do tirante.

Para melhor avaliação das metodologias de dimensionamento utilizadas para cortinas atirantadas, a monitoração dessas obras mostra-se de suma importância. Através da medição das cargas e deslocamentos envolvidos, seria possível melhor avaliar a exatidão de métodos através do Equilíbrio Limite e Elementos Finitos nos projetos.

Em suma, podemos dizer que um projeto de contenção com o uso de tirantes deve quase que por obrigação, acompanhar a evolução tecnológica de sua aplicação com conscientização e racionalização do processo de execução dessas obras. Esses cuidados farão com que o engenheiro responsável escolha a solução mais adequada para aquele tipo de situação, ao invés de só aplicar a solução tecnicamente mais eficaz, porém de maior custo. Exaltando, dessa forma, a importância de um bom controle de qualidade associado a manutenções periódicas, uma vez que os mecanismos de degradação são cumulativos e somente dessa maneira é possível a obtenção de estruturas de qualidade, segurança e durabilidade.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 7681: Calda de cimento para injeção. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 5629: Execução de tirantes ancorados no terreno. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11.682: Estabilidade de taludes. Rio de Janeiro, setembro de 2009.

CARVALHO, M. A. R. (2009) Ancoragens pré-esforçadas em obras geotécnicas. Construção, ensaios, e análise comportamental. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.495p. 2009.

CARVALHO, PAS de et al. Manual de geotecnia: Taludes de rodovias: orientação para diagnóstico e soluções de seus problemas. São Paulo: Departamento de Estradas e Rodagens do Estado de São Paulo, Instituto de Pesquisa Tecnológicas, 1991.

CRISPIM, F. A. Mecânica dos Solos II: Empuxo Lateral de Solos. Mato Grosso, 2011. Notas de Aula - Departamento de Engenharia, Universidade do Estado de Mato Grosso.

DAS, B. M. Fundamentos Engenharia Geotécnica. 6.ed. São Paulo: Tradução All Tasks, 2007.

DE ANDRADE, F. L; ROCHA, Geraldo César. Avaliação da Estabilidade de Blocos de Rocha na Vertente Tombada do Morro do Cristo em Juiz de Fora-MG. Revista de Geografia-PPGEO-UFJF, v. 5, 2016.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM. Manual básico de estradas vicinais: conservação. Vol. II. São Paulo: Editora Imprensa oficial do estado S.A. IMESP, 1987. 219p.

DER/SP – Instrução de Projeto de Contenção. São Paulo 2005. P. 28.

EC 7 – 1. (2010). Eurocódigo 7 – Projecto Geotécnico – Parte 1: Regras gerais. CEN

FERNANDES, M. A. M. Estruturas Flexíveis Para Suporte de Terras: Novos Métodos de Dimensionamento. Lisboa. Oficinas Gráficas do LNEC: 1983.

GERSCOVICH, D; DANZIGER, B. R.; SARAMAGO, R. Contenções: teoria e aplicações em obras. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

GIL, A. C. Como elaborar projetos de pesquisa. 3. Ed. São Paulo: Atlas, 1991.

GOMES, R.C.; PORTO, T. B.; DOS ANJOS, T. C. F. Utilização do Método de Extrapolação de Cargas Proposto Por Massad (1987) Para Controle de Ancoragens Utilizando Aplicativo Web. 2016.

MACHADO, A. X.; MENDES, L. C. Load check on anchored curtains located in geotechnical hazard areas in the city of Rio de Janeiro. Revista ALCONPAT, v. 8, n. 1, p. 64-78, 2018.

MAGALHÃES, T. A; AZEVEDO, Crysthian Purcino Bernardes. Análise Técnica e Econômica de Estruturas de Contenção de Taludes. 2016.

MARZIONNA, J. D. et al. Análise, projeto e execução de escavações e contenções. Fundações: Teoria e prática, 2ª edição, Hachich et al.(eds.), cap, v. 15, 1996

MIKOS, A. P.; ET AL., MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS DECORRENTES EM SOLO GRAMPEADO E CORTINA ATIRANTADA. 2º Simpósio Paranaense de Patologia das Construções (2º SPPC), artigo 2SPPC2007, pp. 537–546, 2017. DOI: 10.4322/2SPPC.2017.044.

PINOTTI, A. M.; CARNEIRO, C. R. Geologia Estrutural na previsão e contenção de queda de blocos em encostas: aplicação no Granito Santos, SP. Terræ Didática, v. 9, n. 2, p. 132-168, 2013.

RANZINI, S. M. T; NEGRO JR., A. Obras de Contenção: Tipos, Métodos Construtivos, Dificuldades Executivas. In: HACHICH ET AL. Fundações Teoria e Prática. 2º Edição. São Paulo: Pini, 1998. p.497-516.

SAES, J. L., STUCCHI, F.R.;MILITTISKY, J. (1998). Concepção de obras de contenção. In:HACHICH, W. et al. Fundações: Teoria e Prática.2 ed. São Paulo: Pini. p. 517-536.

SANTOS, I. G., 2017, Estabilização de taludes em colúvio com o uso de cortinas ancoradas, Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

SANTOS, J. V. B. Monitoramento das contenções utilizadas nas encostas da BA-099 (período de 2011 a 2016), entre Subaúma e Imbassai, litoral norte da Bahia. Anais Seminário de Iniciação Científica, n. 21, 2017.

SCHNAID, Fernando; ODEBRECHT, Edgar. Ensaios de Campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações: 2ª edição. Oficina de Textos, 2012.

VELLOSO, D. A; LOPES F. R. Fundações: critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais, fundações profundas. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

YASSUDA, C. T., DIAS, P. H. V., Capítulo17 – Tirantes. In: HACHICH et al. Fundações: Teoria e Prática. São Paulo: Pini, 1996. P.603-640.