

EQUILÍBRIO LIMITE APLICADO À ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE CONTENÇÃO ATIRANTADA COM PRÉ-CONTENÇÃO EM ESTACAS RAIZ

LIMIT EQUILIBRIUM APPLIED TO STABILITY ANALYSIS OF ANCHOR RETAINING WALL WITH PRE-CONTAINMENT IN ROOT PILES

Melo, Rodrigo Alvares de Araújo; *Unicamp, Campinas, Brasil, rodrigo.melo@mendesjunior.com.br*
Lima Neto, José Mendes de; *Unicamp, Campinas, Brasil, jmnino13@yahoo.com.br*
Garcia, Jean Rodrigo; *Unicamp, Campinas, Brasil, eng.garcia@gmail.com*

RESUMO

Analisa-se por meio do método do equilíbrio limite, a estabilidade de um talude em grelha com utilização de tirantes e estacas raiz como elemento de pré-contenção e fundação. O substrato é caracterizado fundamentalmente por um aterro de aproximadamente 8,0 m, sobrejacente ao solo residual (SR) composto por argila siltosa pouco arenosa, com espessura variável da ordem de 3,0 m, sobreposto ao solo de alteração de rocha (SAR), constituído por um silte areno-argiloso. A partir dos parâmetros de resistência dos solos adotados realizaram-se as simulações numéricas, visando definir os fatores de segurança (FS) e conseqüentemente a probabilidade de ruína e seu índice de confiabilidade (β). Depois de realizada a análise global, efetuou-se os cálculos e dimensionamento relativos a estabilidade interna da grelha e tirantes.

ABSTRACT

The stability of a grid slope is analyzed by means of the slope stability limit equilibrium method with the use of anchor and root piles as the elements of pre-containment and foundation. The substrate is basically characterized by an embankment of approximately 8.0 m, overlying residual soil (sr) composed by slightly sandy silty clay with variable thickness of 3.0 m, overlaying the rock alteration soil (SAR) of sandy-clayey silt. From the parameters of soil resistance adopted, numerical simulations were made to determine the safety factors (FS) and, as a consequence, the probability of ruin and reliability index (β). After completing the global analysis, calculations and sizing of internal stability of the grid and anchor were made.

1 - INTRODUÇÃO

O caso analisado encontra-se localizado na região sul da Cidade de São Paulo/SP/Brasil. A partir do levantamento topográfico foi possível traçar as seções do talude a ser contido e também analisar as condições entre o primitivo e a proposta do projeto. Contudo, as verificações foram realizadas principalmente a partir dos dados geotécnicos do aterro e do solo residual que compõe o substrato do maciço. A solução de contenção e estabilização concebida para o local consiste na execução de estacas tipo raiz de pré-contenção do solo, contenção em grelha atirantada e o retaludamento a jusante da contenção. O desnível entre a crista do talude na cota 753,25m e o "pé" na 732,00m é de 21m aproximadamente.

As características das estacas raiz empregadas como elemento de pré-contenção são apresentadas no Quadro 1. As estacas tipo raiz, tinham a função de pré-estabilizar o maciço quando da escavação até à execução da respectiva fase da grelha atirantada.

Quadro 1 - Características das estacas raiz

Diâmetro (ϕ)	410 mm
Espaçamento (e)	1,25 m
Comprimento (L)	18 m
Armação longitudinal ($A_{s,L}$)	6 ϕ 16 mm
Armação transversal ($A_{s,T}$)	Estribos 6,3 mm c 20 cm

Na Quadro 2, apresentam-se as características da grelha atirantada.

Quadro 2 - Características da grelha atirantada

Carça de trabalho nos tirantes	500 kN
Altura máxima da cortina	8 m
Espaçamento horizontal entre tirantes	2,5 m
Espaçamento vertical entre tirantes	3 m
Número de linha de tirantes	3 linhas
Comprimento ancorado dos tirantes	9 m

2 - ANÁLISE DA ESTABILIDADE

As análises de estabilidade foram efetuadas utilizando-se o programa computacional Slide versão 5.0, da Rocscience Inc. (University of Toronto - Dr. Evert Hoek). Este software utiliza o método do equilíbrio limite e destaca a superfície crítica de ruptura entre as diversas superfícies potenciais de ruptura para a seção típica de contenção (Figura 1). Empregou-se, em conjunto com a análise determinística (tradicional), a avaliação da probabilidade de sucesso da estabilização concebida para o maciço, através do algoritmo Monte Carlo, presente no programa. Os valores de desvio padrão (δ) do peso específico (γ), coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ) foram adotados com base em valores de coeficiente de variação encontrados na literatura especializada. Os parâmetros geotécnicos utilizados nas análises, apresentados a seguir, foram adotados a partir das sondagens a percussão.

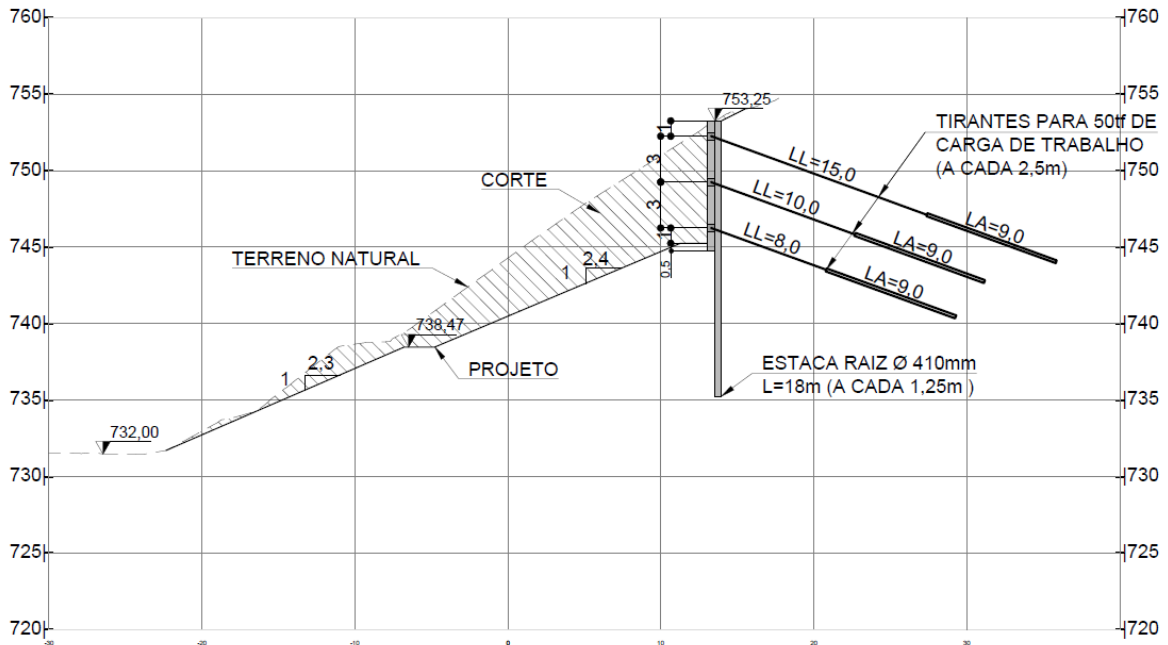


Figura 1 - Seção típica da estrutura de contenção

A norma brasileira considera estáveis taludes que exibam FS determinísticos maiores que 1,5, a literatura nacional considera estáveis taludes com índice de confiabilidade (β) > 1,8, e Teixeira & Virgili (1984) propõe a magnitude de 0,3 % como valor aceitável de probabilidade de ruína, para taludes cujas consequências da ruptura são classificados como "muito graves". Estes autores classificam com estas consequências "os taludes médios e altos em estradas de acesso importantes".

Whitman (1984) propõe valores limites de probabilidade de ruína da ordem de 1% para o risco da perda de vidas humanas. Sandroni & Sayão (1984) sugerem um valor mínimo do índice de confiabilidade do coeficiente de segurança de 2. Os parâmetros geotécnicos empregados na Quadro 3 foram adotados de Pelloggia (1997).

Quadro 3 - Parâmetros geotécnicos empregados nas análises

Material	γ (kN/m ³)	c' (kN/m ²)	ϕ' (°)	Consistência / compacidade
Argila silto-arenosa / areia média argilosa	18 $\delta = 1$	10 $\delta = 5$	22 $\delta = 2,2$	Mole a muito mole (com entulho, lixo matéria orgânica)
Argila siltosa pouco arenosa	18 $\delta = 1$	20 $\delta = 10$	25 $\delta = 2,5$	Mole a rija
Silte areno-argiloso	19 $\delta = 1$	25 $\delta = 12,5$	27 $\delta = 2,7$	Medianamente compacto a muito compacto

Foi adotada uma sobrecarga de 10 kN/m² na crista do maciço estabilizado, efetuando-se as seguintes análises utilizando-se a seção mais crítica à estabilidade:

- (A) análise de estabilidade da situação atual do talude;
- (B) análise de estabilidade local da contenção;
- (C) análise de estabilidade global da contenção;
- (D) análise de estabilidade do talude à jusante da contenção.

2.1 - Resultado das análises por equilíbrio limite

Na Figura 2, observa-se que para a condição natural o talude inserido em uma camada inicial de aterro apresenta riscos de escorregamento em virtude do fator de segurança abaixo da norma e alto percentual relacionado a probabilidade de ruína.

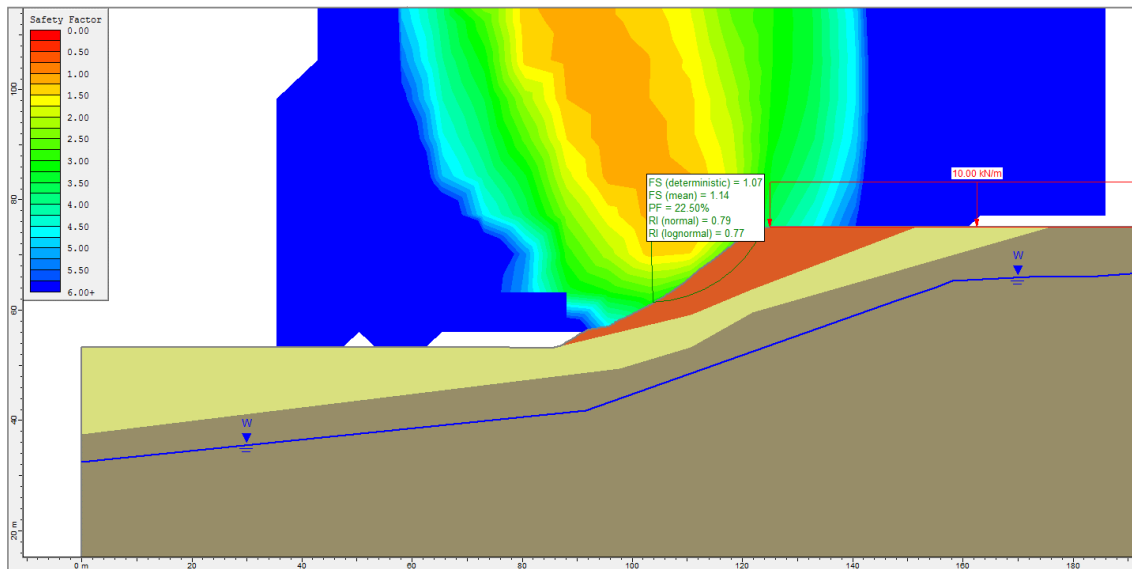


Figura 2 - Análise da estabilidade da situação atual do talude

As análises do fator de segurança pelo método determinístico e probabilidade de ruína são apresentados para a condição atual do talude, estabilidade local e geral dos tirantes, conforme verifica-se nos quadros 4, 5 e 6, respectivamente.

Quadro 4 - Resultados da condição atual do talude

Fs determinístico:	1,07
Fs médio:	1,14
Probabilidade de ruína:	22,50 %
β (índice de confiabilidade):	0,79

Por outro lado, verifica-se na Figura 3 com a aplicabilidade da estaca raiz, carga dos tirantes e a execução da cortina na região do paramento uma redução bastante considerável da probabilidade de ruína e conseqüentemente um valor mais adequado para o fator de segurança

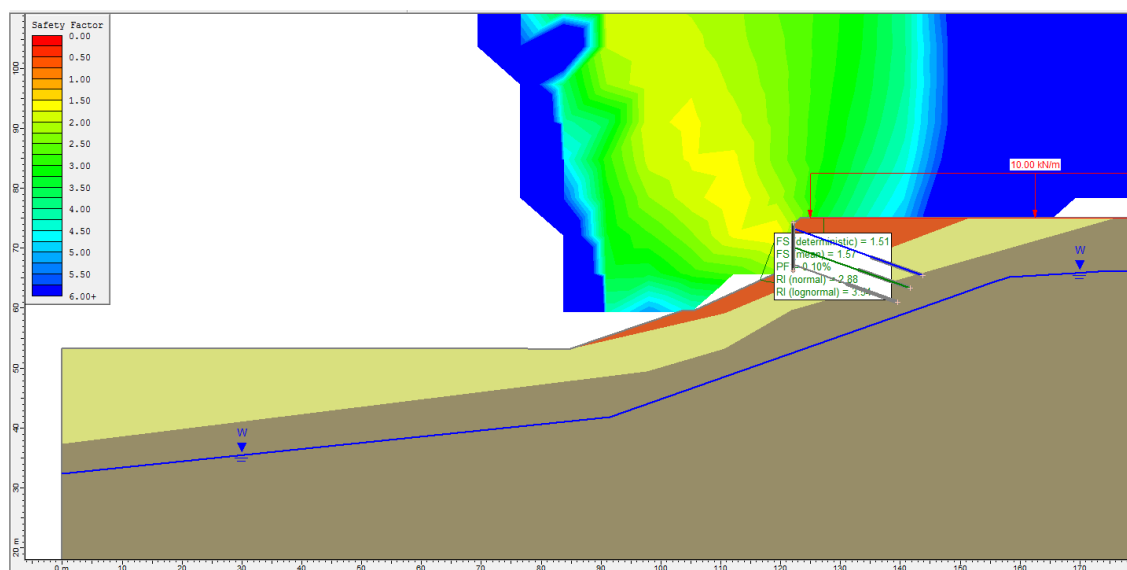


Figura 3 - Análise da estabilidade da situação local da contenção

Quadro 5 - Resultados da situação local da contenção

Fs determinístico:	1,51
Fs médio:	1,57
Probabilidade de ruína:	0,10 %
β (índice de confiabilidade):	2,88

Com a solução da análise global (Figura 4) verificou-se a estabilidade através do maior círculo de ruptura pelo centro das ancoragens com resultado ideais para o fator de segurança eliminando a probabilidade de ruína com alto índice de confiabilidade.

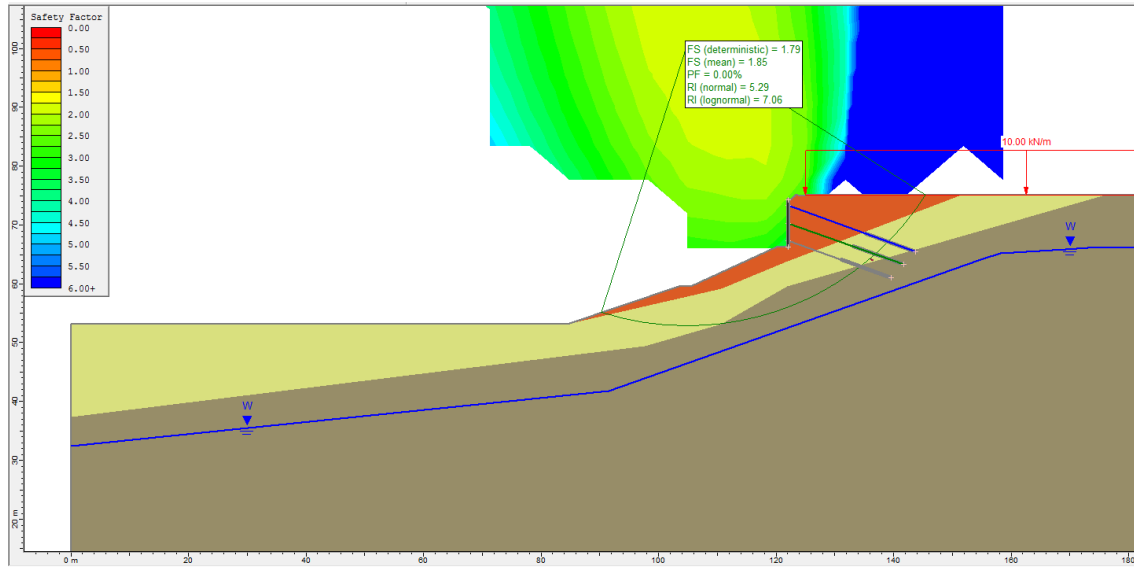


Figura 4 – Análise da estabilidade da situação global da contenção

Quadro 6 - Resultados da estabilidade global da contenção

Fs determinístico:	1,79
Fs médio:	1,85
Probabilidade de ruína:	0,0 %
β (índice de confiabilidade):	5,29

Por fim, na Figura 5 realiza-se uma análise adotando a solução do retaludamento entre o final do paramento com 8,0m e o pé do talude junto a rua, onde tornou-se possível atingirmos um fator de segurança conservador, favorecendo ainda mais a solução adotada, conforme verificam-se os resultados do Quadro 7.

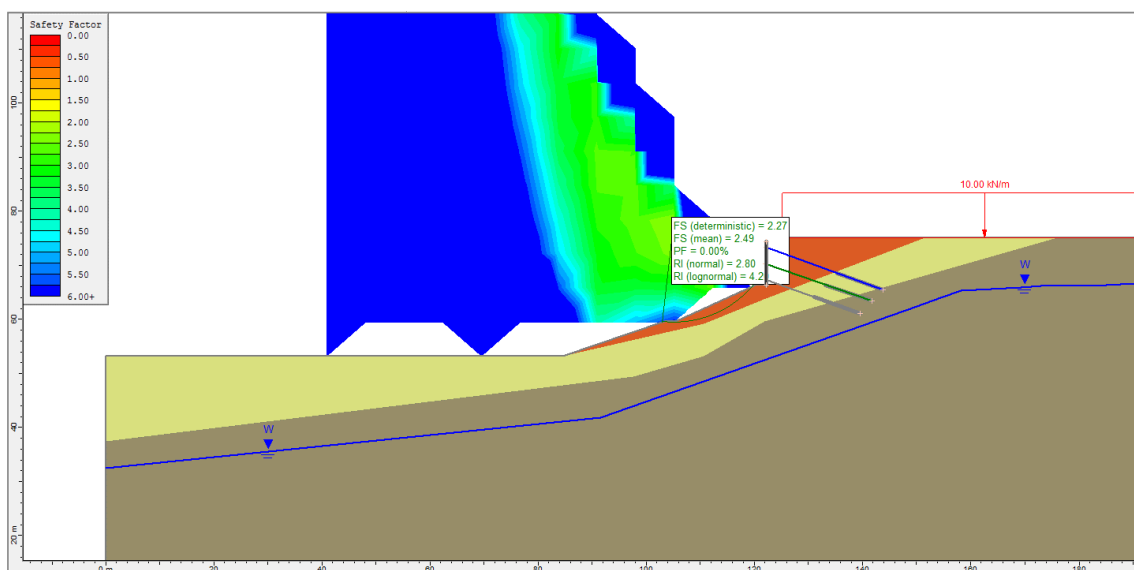


Figura 5 – Análise da estabilidade do talude a jusante da contenção

Quadro 7 - Resultados da estabilidade do talude a jusante da contenção

Fs determinístico:	2,77
Fs médio:	2,49
Probabilidade de ruína:	0,0 %
β (índice de confiabilidade):	2,8

3 - DIMENSIONAMENTO GEOTÉCNICO DOS TIRANTES

O comprimento do trecho ancorado do tirante projetado é de 9 m. A verificação do comprimento dos bulbos de ancoragem dos tirantes foi estimado conforme o Método Costa Nunes (1987), cuja formulação segue abaixo.

$$L_b = \frac{F}{\pi \cdot D_d \cdot [c + (\sigma'_z + \Delta p) \cdot \tan \phi]} \quad [1]$$

onde:

L_b : comprimento mínimo do bulbo;

F: carga do tirante;

D_d : diâmetro da perfuração;

c: coesão do solo;

σ'_z : tensão efetiva do solo no ponto médio da ancoragem;

Δp : aumento da tensão efetiva devido à pressão residual de injeção

ϕ : ângulo de atrito do solo.

Os parâmetros de resistência do solo do trecho ancorado do tirante são:

$$\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$$

$$c = 20 \text{ kN/m}^2$$

$$\phi = 25^\circ$$

Apresenta-se no Quadro 8, o dimensionamento do trecho ancorado do tirante, considerando a carga de ensaio de 1,75 vezes a carga de trabalho de 500 kN, conforme a norma NBR 5629-2006-Tirantes ancorados no terreno. A carga de ensaio foi obtida multiplicando-se o fator de 1,75 pela carga de 500kN, resultando em 875 kN.

Quadro 8 - Dimensionamento trecho ancorado dos tirantes – Método Costa Nunes

F	875	kN	Carga no tirante
D_b	10	cm	Diâmetro do bulbo de ancoragem
h	8	m	Profundidade do ponto médio do bulbo
h_{na}	1,5	m	Altura nível d'água em relação ao ponto médio do bulbo
γ	18	kN/m ³	Peso específico do solo
c	20	kN/m ²	Resistência não drenada do solo
f	25	°	Ângulo de atrito do solo
σ'_z	129	kN/m ²	Tensão efetiva vertical no ponto médio do bulbo
D_p	550	kN/m ²	Aumento da tensão efetiva devido a pressão residual de injeção
L_b	8,3	m	Comprimento mínimo do bulbo de ancoragem

4 - DIMENSIONAMENTO DA ARMAÇÃO DA CORTINA - GRELHA

Apresentam-se nos Quadros 9, 10 e Figura 6, as características geométricas e detalhes construtivos da grelha atirantada.

Quadro 9 - Dados gerais para armação da cortina grelha

Carga incorporação do tirante	t = 500 kN
Resistência característica do concreto	$f_{ck} = 30 \text{ MPa}$
Espaçamento horizontal máximo entre tirantes:	eh = 2,5 m
Espaçamento vertical máximo entre tirantes:	ev = 2,3 m
Dimensões da viga (vertical e horizontal):	50 x 50 cm
Cobrimento da armadura:	c = 3,0 cm

Quadro 10 - Dados gerais para armação da cortina grelha

Comprimento horizontal da grelha:	L = 71 m
Quantidade de tirantes:	29 tirantes
Carga total:	290 x 50 = 14500 kN
Carregamento distribuído:	Q = 14500/71 \approx 200 kN/m

Os esforços atuantes na grelha foram determinados empregando o programa computacional Ftool – Two-Dimensional Frame Analysis Tool, versão 2.12, da Tecgraf/PUC-Rio – Computer Graphics Technology Group (Pontifícia Universidade Católica do Rio – Luiz Fernando Martha) conforme apresentado a seguir.

Os cálculos para se determinar a área de armação necessária para os esforços solicitantes foram realizados através do software ConDe2, desenvolvido pelo prof. Lauro Modesto dos Santos da Escola Politécnica da USP.

Foram empregados coeficiente de majoração dos esforços de 1,4 (segundo a NBR-6118), coeficiente de minoração de resistência do concreto e aço de 1,4 e 1,15, respectivamente, e resistência característica do concreto de $f_{ck}=30$ MPa e conforme outros dados apresentados na Quadro 11.

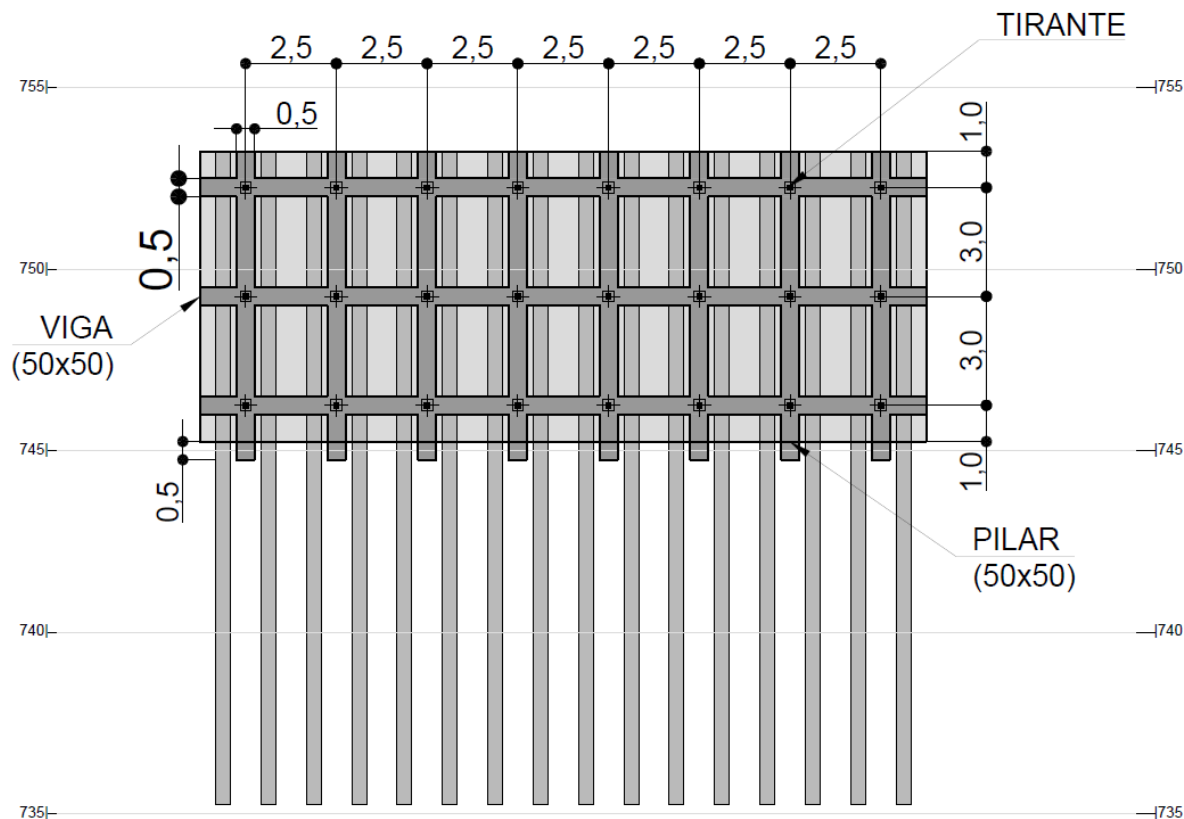


Figura 6 – Situação Final do Paramento de Contenção

Quadro 11 - Dimensionamento da seção retangular à flexão normal à flexão normal simples – NBR 6118/2007

RESULTADOS	EXTRADORSO (LADO TERRA)	INTRADORSO (LADO EXTERNO)
Maior momento fletor atuante nas grelhas – M_k :	175 kN·m/m	89 kN·m/m
Momento de cálculo – M_d :	245 kN·m/m	125 kN·m/m
Armadura – As_1 :	13,57 cm ²	6,70 cm ²
Armadura – As_2 :	0,00 cm ²	0,00 cm ²
Armadura mínima para combater fissuração:	-	7,16 cm ²
Braço de alavanca:	41,5 cm	42,9 cm

5 - DIMENSIONAMENTO DA ARMAÇÃO DA CORTINA - GRELHA

O dimensionamento geotécnico da estaca como elemento de fundação admitiu que o carregamento solicitante seria suportado pela porção da estaca embutida em solo que deverá suportar carga atuante de 300 kN, conforme descrito a seguir:

- Peso Próprio da viga vertical (PPv):
- Dimensão da viga: 50 x 50 cm
- Altura máxima da cortina: $h = 8$ m
- Espaçamento entre estacas raiz: $er = 1,25$ m
- Peso específico do concreto: $b = 25$ kN/m³
- $PPc = A \times h \times b / er = 0,50 \times 0,50 \times 8 \times 25 / 2 = 25$ kN

- Carga vertical dos tirantes (PVT):
- Carga dos tirantes: $T = 500 \text{ kN}$
- Ângulo de inclinação com a horizontal dos tirantes $d = 20^\circ$
- Número de linhas de tirantes: $n = 3$
- Espaçamento entre estacas raiz: $e_r = 1,25 \text{ m}$
- $PVT = T \times \text{sen } d \times n / e_r = 500 \times \text{sen } 20^\circ \times 3 / 2 = 260 \text{ kN}$
- Carga vertical total incidente na estaca
- $N = PP_c + PVT = 25 + 260 = 285 \text{ kN por estaca} \rightarrow \text{adotado: } N = 300 \text{ kN}$

O dimensionamento geotécnico da estaca foi efetuado utilizando-se o método proposto pelos engenheiros Décourt e Quaresma (1978), com carga de trabalho de 300 kN e coeficiente de segurança $F_s = 2$, sendo desconsiderada capacidade de carga da ponta (conforme preconiza a NBR-6122 – Projeto de Execução de Fundações).

Desta forma, o comprimento útil (embutido efetivamente em solo) é de 10m. Por outro lado, o comprimento total da estaca tipo raiz é de 18m, sendo 8m de contenção e 10m de embutimento em solo.

6 - CONCLUSÕES

A pré-contenção com estacas garantiu maior segurança durante a execução dos serviços, diminuindo os riscos da construção da cortina atirantada em subsolo composto de material de aterro;

A construção da contenção em forma de grelha proporcionou uma redução de 30%, quando comparada aos dados dos profissionais envolvidos relacionados aos métodos tradicionais de execução da cortina atirantada convencional.

Face aos resultados obtidos por meio das análises de estabilidade, verifica-se que a solução de contenção em grelha atirantada concebida para o local atende ao valor de coeficiente de segurança mínimo de $FS = 1,5$ estabelecido pela Norma Brasileira NBR - 11.682/2009 – Estabilidade de Encostas.

REFERÊNCIAS

- Bishop, A.W. (1955). The use of the slip circle in the stability analysis of slopes.
- Décourt, L., Quaresma, A.R. (1978). Capacidade de carga de estacas a partir de valores de SPT. In: CBMSEF, 6. Rio de Janeiro. Anais. Rio de Janeiro, v. 1.
- Costa Nunes, A.J. da (1987). First Casagrande Lecture - *Ground Prestressing* – VIII PCSMFE, Cartagena, Colômbia.
- Peloggia, A.U.G. (1997). Parâmetros geomecânicos de solos saprolíticos do Município de São Paulo. Solos e Rochas, São Paulo, v. 20, n.3, pp. 209-213.
- Sandroni, S.S. e Sayão A.S.F.J. (1992). Avaliação estatística do coeficiente de segurança de taludes. 1a Conferência Brasileira Sobre Estabilidade de Encostas - 1a COBRAE, ABMS/ABGE, Rio de Janeiro, RJ, pp. 523-535.
- Teixeira, J.R. e Virgili, J.C. (1984). Métodos Probabilísticos e Métodos Determinísticos em Análise de Estabilidade de Taludes Rochosos. 4º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE), Volume 1, pp. 185-195.
- Whitman, R.V. (1984). Evaluating calculated risk in geotechnical engineering. Journal of Geotechnical Engineering. New York: ASCE, v.110, n.2, pp.144-188. 17th Terzaghi Lecture.