

VERIFICAÇÃO DA CARGA DE RUPTURA DOS TIRANTES PELO MÉTODO DE VAN DER VEEN EM OBRA DE CONTENÇÃO RODOVIÁRIA EM ESTRUTURA CORTINA ATIRANTADA, ESTUDO DE CASO BR 376 KM 667+300 OBRA ÁREA DE ESCAPE.

VERIFICATION OF TIE-ROD FAILURE LOAD USING THE VAN DER VEEN METHOD IN A ROAD RETAINING STRUCTURE IN A CABLE STAYED CURTAIN WALL, CASE STUDY BR 376 KM 667+300 ESCAPE AREA.

Dionatan Oliveira - Centro Universitário Sociesc de Joinville
dionatan.eng@outlook.com.br

Mariana Marilyn Alecrim - Centro Universitário Sociesc de Joinville
alecrim_m@yahoo.com

Prof^o MSc. Guilherme de Luca - Centro Universitário Sociesc de Joinville
guilherme.campos@unisociesc.com.br

Resumo:

Estruturas de contenção são obras de engenharia com a finalidade de promover a estabilidade de taludes contra a ruptura desses maciços. A proposta apresentada nesse trabalho foi verificar a carga de ruptura dos tirantes pelo método de Van Der Veen, através de dados obtidos na análise dos gráficos tensão x deformação adquiridos na protensão dos tirantes. Inicialmente, o texto apresenta os elementos constituintes da cortina atirantada e seu processo executivo, com ênfase em metodologias semi-empíricas para o pré-dimensionamento do trecho ancorado dos tirantes, elemento característico em estrutura de contenção pelo método cortina atirantada. Em sequência, foi apresentada a metodologia de Van Der Veen (1953) referente à obtenção da carga de ruptura do trecho ancorado, ou seja, a mensuração da extrapolação dos tirantes através da aplicação de sua formulação matemática, com os dados de tensão e deformação obtidos na protensão dos tirantes. Foram descritos os ensaios necessários nos tirantes conforme prescreve a NBR 5629, na etapa de execução a respeito da protensão dos mesmos, tais como, ensaio de recebimento, qualificação e fluência. Os dados técnicos necessários para o desenvolvimento desse trabalho, afim de atingir os objetivos propostos, foram coletados na empresa X. E as metodologias semi-empíricas de Souza (2001) e Falconi (2005) foram utilizadas para comparação com a metodologia utilizado em projeto, Costa Nunes (1987). Observou-se, portanto, que a discrepância nos resultados no comprimento do trecho ancorado está relacionada a particularidade de cada método. Quanto ao fator de segurança dos tirantes, obteve-se um coeficiente de 2,17 em relação a carga de incorporação do mesmo. Considera-se, portanto, que o objetivo inicial proposto foi alcançado, e que o estudo se mostra relevante para a área de conhecimento, diante da quantidade de obras de infraestrutura viária realizadas que contemplam a utilização de cortinas atirantadas pelo país e mundo.

Palavras-chave: *Cortina atirantada; Tirantes; Contenção; Protensão; Ancoragem.*

Abstract:

Containment structures are engineering works with the purpose of promoting the stability of slopes against the rupture of these masses. The proposal presented in this work was to verify the rupture load of the ties by the Van Der Veen method, through data obtained in the analysis of stress-strain graphs acquired in the tie prestressing. Initially, the text presents the constituent elements of the curtain wall and its executive process, with emphasis on semi-empirical methodologies for the pre-dimensioning of the anchored section of the ties, a characteristic element in containment structures by the curtain wall method. Then, the methodology of Van Der Veen (1953) was presented, concerning the obtaining of the rupture load of the anchored section, i.e., the measurement of the tie rod extrapolation through the application of its mathematical formulation, with stress and strain data obtained in the tie rod protension. The necessary tests in the tension specimens were described, according to NBR 5629, in the execution stage, regarding the prestressing of the tension specimens, such as, receipt, qualification and creep tests. The technical data necessary for the development of this work, in order to achieve the proposed objectives, were collected in the company X. And the semi-empirical methodologies of Souza (2001) and Falconi (2005) were used for comparison with the methodology used in the project, Costa Nunes (1987). It was observed, therefore, that the discrepancy in the results in the length of the anchored section is related to the particularity of each method. As for the safety factor of the ties, a coefficient of 2.17 was obtained in relation to the incorporation load of the same. It is considered, therefore, that the initial objective proposed was achieved, and that the study is relevant to the area of knowledge, given the amount of road infrastructure works carried out that include the use of curtain walls in the country and the world.

Keywords: *Anchored Curtain; Ties; Restraint; Prestressing; Anchoring.*

1. INTRODUÇÃO

A ocupação do solo em encostas e a execução de estradas em trechos de serra justifica a necessidade de implantação de muros de arrimos, com a finalidade de conter e garantir a estabilidade do talude principalmente quando necessitam de intervenção. Outro fator que apresenta relevância é o controle de execução, a fim de garantir a qualidade e vida útil da estrutura para qual foi projetada.

Os tirantes são os principais componentes desse tipo de contenção. Esses elementos são submetidos a esforços de protensão na interface com elemento estrutural, o concreto armado. No dimensionamento do sistema de ancoragem, é possível observar que existem diversos parâmetros utilizados, que estão relacionados ao sistema de tração e informações do solo. Dessa maneira, é importante analisar esses parâmetros, com a finalidade de assegurar um correto dimensionamento do sistema, haja vista que na maioria das vezes, observa-se que as ancoragens suportam cargas maiores do que a estabelecida em projeto. Outro procedimento válido é a verificação da carga de ruptura dos tirantes, para determinar o fator de segurança real do elemento e a partir disso comparar com o projetado (PORTO, 2015).

O presente estudo de caso refere-se a uma área de escape para veículos pesados sem freio, localizada nas margens da BR 376 no km 667+ 300, pista sul na serra do mar. Devido à existência de uma faixa de desaceleração para que os veículos possam acessar a área de escape, se fez necessário a implantação da cortina atirantada para conter o corte do talude existente.

Diante do exposto, o presente trabalho tem por objetivo verificar a carga de ruptura dos tirantes pelo método de Van Der Veen, através de dados obtidos na análise dos gráficos tensão x deformação adquiridos na protensão dos tirantes. A respeito dos objetivos específicos, esse trabalho propõe: (1) identificar o método de dimensionamento do sistema de ancoragem (bulbo) utilizado em projeto e redimensionar o trecho ancorado por outros dois autores a título de comparação com o projetado e (2) verificar a variação do comprimento do trecho ancorado, entre os métodos de dimensionamento, e encontrar o fator de segurança estimado dos tirantes através da extrapolação.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Nesse tópico será apresentada uma breve exposição sobre a cortina atirantada acerca dos elementos constituintes, bem como, as definições, princípios construtivos a respeito desse tipo de contenção, metodologia utilizada e resultados.

2.1 CORTINA ATIRANTADA

Segundo Barros (2016, p. 06) “estruturas de contenção ou de arrimo são obras civis construídas com a finalidade de prover estabilidade contra a ruptura de maciços de terra ou rocha”. Ranzini e Negro Jr (1998, apud MAGALHÃES, 2016) afirmam que contenção é todo elemento ou estrutura destinado a contrapor-se a empuxos ou tensões geradas em maciço cuja condição de equilíbrio foi alterada por algum tipo de escavação, corte ou aterro.

Entre os diversos tipos de estruturas de contenção, podemos citar a cortina atirantada, como sendo um modelo de contenção constituído por paramento de concreto armado, com tirantes ancorados em solos ou rochas em profundidade cuja camada se apresenta estável. É também caracterizada por permitir cortes verticais com pequenos deslocamentos em seu período de execução (GERSCOVICH, SARAMAGO E DANZIGER, 2016).

Os elementos constituintes da cortina atirantada são compostos da seguinte maneira: paramento em concreto armado, conjunto tirante, injeção da calda de cimento, dispositivos de drenagens (FIGUEIREDO, 2018).

De acordo com Vasconcelos (2016), os tirantes são componentes de ancoragens em solos ou rochas, constituídos por elementos resistentes à tração, usualmente o aço, com válvulas (manchetes) para injeção de calda sob pressão, que formará o bulbo de ancoragem, e pode ser dividido em dois trechos, o ancorado e o livre. O trecho ancorado transmite a carga de tração ao terreno através da calda de cimento e o trecho livre transmite a carga de tração entre a cabeça da ancoragem e o trecho ancorado.

O comprimento do trecho ancorado deverá estar descrito em projeto, e calculado através de formulações teóricas ou semi-empíricas a fim de servir simplesmente para estimativas preliminares. Entretanto, o seu desempenho deverá ser verificado através de ensaios de qualificação relacionados às características da tensão de escoamento do aço conforme descrito no item 4.5.2 da NBR 5629 (ABNT, 2018).

2.1.1 Método executivo cortina atirantada

Todos os procedimentos para a execução da contenção pelo método cortina atirantada deverão estar de acordo com a metodologia preconizada pela NBR-5629/2018. Portanto, uma das premissas iniciais e fundamentais para construção de contenções, é o conhecimento do perfil topográfico e geotécnico do talude no qual será implantado a estrutura, abrangendo levantamentos locais, coletas de dados, ensaios “in situ” e de laboratório (NBR 11682, 2009).

O método a ser empregado na perfuração tem relação direta na capacidade de carga geotécnica da ancoragem do tirante, no caso de perfurações com circulação de água, devido à pressão da mesma, acaba alterando as características do solo próximo ao furo, modificando o estado de tensão do solo na região. Para que seja corrigida essa deformação local do solo decorrente da perfuração, se faz necessário a injeção da calda sob pressão, a fim de garantir a capacidade de carga na ancoragem conforme estabelecida em projeto (PORTO, 2015).

A NBR 5629 não estabelece qual a pressão ideal para injeção de fase, dessa forma, é de responsabilidade do projetista preconizar em projeto. Caso a pressão na injeção das manchetes seja inferior com o estabelecido em projeto, deve-se limitar a um saco de cimento por válvula na primeira

fase, as demais fases limitadas a meio saco por manchete até que se observe um ganho de pressão na injeção (SOLOTRAT, 2018).

Depois de realizado as perfurações, injeções e a cortina em concreto armado, realiza-se a protensão do tirante, que consiste em tracionar com aplicação de carga por um conjunto manômetro, bomba e macaco hidráulico, podendo somente ser executado após respeitar o período de cura tanto das fases de injeção do tirante, quanto à cura do paramento (VASCONCELOS, 2016).

Conforme descrito na NBR 5629 (ABNT, 2018), a carga de incorporação dos tirantes deve ser definida em projeto. Entretanto, a incorporação só será considerada finalizada, se o mesmo for submetido ao ensaio de recebimento, conforme descrito no item D.4.1.5 em seu anexo D.

2.1.2 Ensaios de recebimento, qualificação e fluência

A NBR 5629 (ABNT, 2018), preconiza que os tirantes deverão obrigatoriamente ser ensaiados e verificados seus respectivos desempenhos, através dos ensaios de recebimento, qualificação e fluência.

Os ensaios de recebimento são aqueles executados para controlar a capacidade de carga e o comportamento de todos os tirantes da obra. Contudo, a NBR 5629 divide esse ensaio em: tipo A, no mínimo 10% dos tirantes deverão ser ensaiados, recebendo 1.75 da carga de trabalho e tipo B nos demais tirantes, que recebem 1.4 da carga de trabalho. O ensaio consiste em acoplar um macaco hidráulico na cabeça do tirante abrangendo elemento de tração (monobarra ou cordoalha), realizado o bombeamento para tracionar os cabos (ABNT, 2018). A carga de trabalho por sua vez, é a carga definitiva do tirante, comumente chamada de incorporação, onde é somente realizada após o término do ensaio no tirante.

Quanto ao de qualificação, é realizado para determinar o desempenho dos tirantes em um respectivo terreno. Onde, no mínimo 1% de todos os tirantes da obra deverão ser ensaiados. Nesse caso, o ensaio é realizado em ciclos de carga e descarga em todos os estágios, com a finalidade de mensurar a capacidade de carga, atrito ao longo do trecho livre e comportamento sob carga de longa duração (ABNT, 2018).

O ensaio de fluência é executado para avaliar a estabilização dos tirantes em ensaios de longa duração. Dessa forma, deverão ser aplicados em 0,5% dos tirantes, com objetivo de avaliar a perda

de carga longo do tempo. Ou seja, são aplicadas cargas nos tirantes e o comportamento ao longo do tempo é acompanhado, conforme prescrito na NBR 5629 (ABNT, 2018).

2.2 PRÉ-DIMENSIONAMENTOS DA ÂNCORAGEM

O pré-dimensionamento do bulbo de ancoragem depende especificamente dos parâmetros do solo e da carga de incorporação do tirante. Nessa etapa, é possível dimensionar o comprimento do bulbo, o ângulo de inclinação e espaçamento entre os tirantes (FIGUEIREDO, 2018). O comprimento do trecho ancorado deverá estar descrito em projeto, de tal forma que seu desempenho seja testado por meio de ensaios. A NBR 5629 (ABNT, 2018), destaca que o cálculo do comprimento do trecho ancorado deve ser dimensionado por método teórico e semi-empírico constantes em publicações técnicas. Dessa forma, será descrito nesse capítulo, três autores amplamente utilizados para dimensionamento do bulbo.

O método proposto por Costa Nunes (1987, apud MORE, 2003), considera que a capacidade de carga do tirante depende de uma série de fatores relacionados a injeção do bulbo, aos valores de projeto e também de cisalhamento do solo na interface com o bulbo, esse último determinado como q_s . Dessa forma, o autor estabelece o valor de q_s , com base na região de ruptura do solo, conforme proposto por Mohr-Coulomb. Portanto, o cálculo da capacidade de carga e cisalhamento se expressa da seguinte maneira, respectivamente:

$$T_L = \pi \cdot D_p \cdot n_d \cdot L_a \cdot n_1 \cdot q_s \quad (2.1)$$

$$q_s = \tau = c + (\sigma' + \sigma'_r) \tan \phi \quad (2.2)$$

$$q_s = c + (\gamma h n_h + \sigma'_r) \tan \phi \quad (2.3)$$

Onde:

T_L = Capacidade de carga do bulbo (kN);

D_p = diâmetro perfurado (m);

n_d = fator de aumento do diâmetro pela pressão de injeção;

L_a = comprimento do trecho ancorado do tirante (m);

n_1 = fator de redução do comprimento do bulbo pela pressão não uniforme sobre o mesmo. (Para $L_b \leq 8m$, $n_1 = 1$);

$q_s = \tau$ = resistência ao cisalhamento na interface solo bulbo (kN/m²);

c = aderência entre a calda e o solo, pode-se usar c igual à coesão real do solo (kn/m³);

γ = peso específico do solo (kN/m^3);

h = profundidade do centro do bulbo (m);

n_h = fator de redução da profundidade (para $h \geq 9\text{m}$, $n_h = 1\text{m}$);

ϕ = ângulo de atrito do solo;

σ'_v = tensão vertical efetiva no ponto médio do bulbo;

σ'_r = pressão residual efetiva de injeção, no ponto médio do bulbo.

A proposta apresentada por Souza (2001, apud PORTO, 2015), determina o valor da capacidade de carga em função do N_{SPT} do solo, aplicando formulações típicas para cada tipo de solo e determinadas faixas de N_{SPT} . Seu estudo foi elaborado com base em ancoragens protendidas e reinjetáveis com diâmetro do furo variando de 10,2 cm a 14 cm, conforme equações abaixo:

Para argila silto-arenosa com N_{SPT} entre $5 \leq \text{SPT} \leq 60$:

$$T_L = (60 + 2N_{\text{SPT}})L_a \quad (2.4)$$

Para argila argilosa com N_{SPT} entre $5 \leq \text{SPT} \leq 35$:

$$T_L = (6,4 \cdot N_{\text{SPT}})L_a \quad (2.5)$$

Para silte areno-argiloso com N_{SPT} entre $5 \leq \text{SPT} \leq 40$:

$$T_L = 4,5 \cdot N_{\text{SPT}} \cdot L_a \quad (2.6)$$

Onde:

T_L = capacidade de carga do bulbo (kN);

L_a = comprimento ancorado (m);

A análise de Souza (2001, apud PORTO, 2015), decorreu em função das seguintes circunstâncias: pressões de injeção entre 2 e 3 Mpa, diâmetro do bulbo entre 16 e 30 cm, fator água/cimento de 0,5, espaçamento entre manchetes de 0,5 metro e consumo de cada entre 20 e 40 litros.

Na metodologia apresentada por Falconi (2005), leva em consideração informações semelhante a Costa Nunes (1987), tendo como sua principal diferenciação no cálculo da resistência ao cisalhamento, que pode ser definido dependendo apenas do N_{SPT} do solo de acordo com a fórmula abaixo:

$$q_s = 15 \cdot \left(\frac{\text{SPT}}{3} + 1 \right) \quad (2.7)$$

Desse modo, pode-se aplicar a fórmula seguinte a fim de calcular a capacidade de carga da ancoragem:

$$T_L = \pi \cdot D_s \cdot L_a \cdot q_s \quad (2.8)$$

Onde:

T_L = capacidade de carga do bulbo (kN);

D_s = diâmetro médio do bulbo (m);

L_a = comprimento ancorado (m);

q_s = resistência ao cisalhamento (kN/m²);

2.3 CARGA DE RUPTURA DA ANCORAGEM (VAN DER VEEN)

A extrapolação matemática tem mostrado uma boa opção para mensurar a carga de ruptura do elemento de ancoragem, uma vez que não depende exclusivamente da análise do engenheiro para obtenção do resultado (VASCONCELOS, 2016). As extrapolações baseiam-se basicamente em ajustes da curva de carga x deslocamento em relação a uma curva conhecida, podendo ser parábola ou exponencial (VAN DER VEEN, 1953 apud PORTO, 2015).

O método proposto pelo autor consiste em mensurar a extrapolação do tirante através de uma forma exponencial conforme a equação 2.9, concordando a curva carga x deslocamento em uma função matemática, por intermédio da coleta de dados obtidos nos ensaios de recebimento (CARVALHO, PORTO E GOMES, 2016).

$$F = F_R (1 - e^{-ad}) \quad (2.9)$$

Onde:

F = Carga aplicada na ancoragem (kN);

F_R = carga última correspondente à assíntota vertical da curva (kN);

e = base dos logaritmos naturais;

a = coeficiente que define a forma da curva (mm⁻¹);

d = deslocamento correspondente à carga F (mm).

Entretanto, é possível rescrever a equação de Van Der Veen (1957, apud PORTO, 2015) da seguinte maneira:

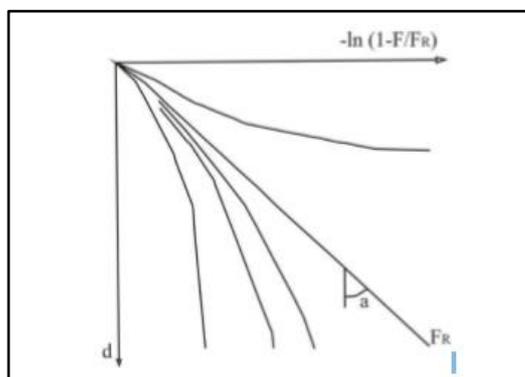
$$1 - \frac{F}{F_R} = e^{-ad} \quad (2.10)$$

Ou ainda:

$$ad = -\ln\left(1 - \frac{F}{F_R}\right) \quad (2.11)$$

A equação 2.11 refere-se à equação de uma reta em que a e F_R são duas constantes, onde, em um processo por tentativas, adotando-se valores para F e plotando-se os gráficos correspondentes de $-\ln\left(1 - \frac{F}{F_R}\right)$ por d . O gráfico que mais se aproximar de uma reta demonstrará o valor de F_R (incógnita do problema). O coeficiente angular desta reta, é o próprio a (incógnita do problema), representado na Figura 1.

Figura 1: Solução gráfica de Van der Veen (1953)



Fonte: Vasconcelos (2016)

Em estudos realizados por Aoki *et al.* (1976, apud VACONCELOS, 2016), o autor propôs alteração na fórmula de Van Der Veen (equação 2.9) dado que em um de seus estudos, verificou que a curva ajustada não precisa necessariamente passar pela origem do gráfico.

$$F = F_R(1 - e^{-adb}) \quad (2.12)$$

Em que b = intercepto no eixo dos deslocamentos, da reta obtida na escala semi logarítmica. A partir da análise do melhor coeficiente R^2 obtido no gráfico, obtém-se a carga de ruptura estimada. No entanto, o autor considera o resultado satisfatório quando o valor de R^2 é próximo a 1. Todavia, quando o resultado não for próximo a 1, o método de Van Der Veen não deverá ser aplicado à curva para medir a extrapolação. Contudo, Aoki *et al.* (2013) propõe níveis de confiabilidade da carga de ruptura descoberta em razão a carga máxima aplicada no ensaio conforme tabela a seguir.

Tabela 1 – Condições de validade da extrapolação de Van der Veen (1953) segundo Aoki et al. (2013)

$[(F/F_{\text{máx}}) - 1] * 100$	Extrapolação
$\leq 25\%$	Confiável
25% - 50%	Aceitável
50% - 75%	Tolerável
$\geq 75\%$	Inaceitável

Fonte: UIP et al (2015)

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Esta seção apresenta a caracterização da pesquisa e as etapas e procedimentos realizados.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

A pesquisa realizada foi de caráter exploratório, com propósito em um estudo de caso com abordagem quantitativa e qualitativa, baseada em análises de documentos, projeto executivo, pesquisa de campo, normas, especificações técnicas e pesquisa bibliográfica que trouxe informações acerca do tipo de contenção apresentada. Tendo como ênfase, a análise do pré-dimensionamento da capacidade de carga e verificação da extrapolação do trecho ancorado do tirante.

3.2 AMBIENTE DA PESQUISA

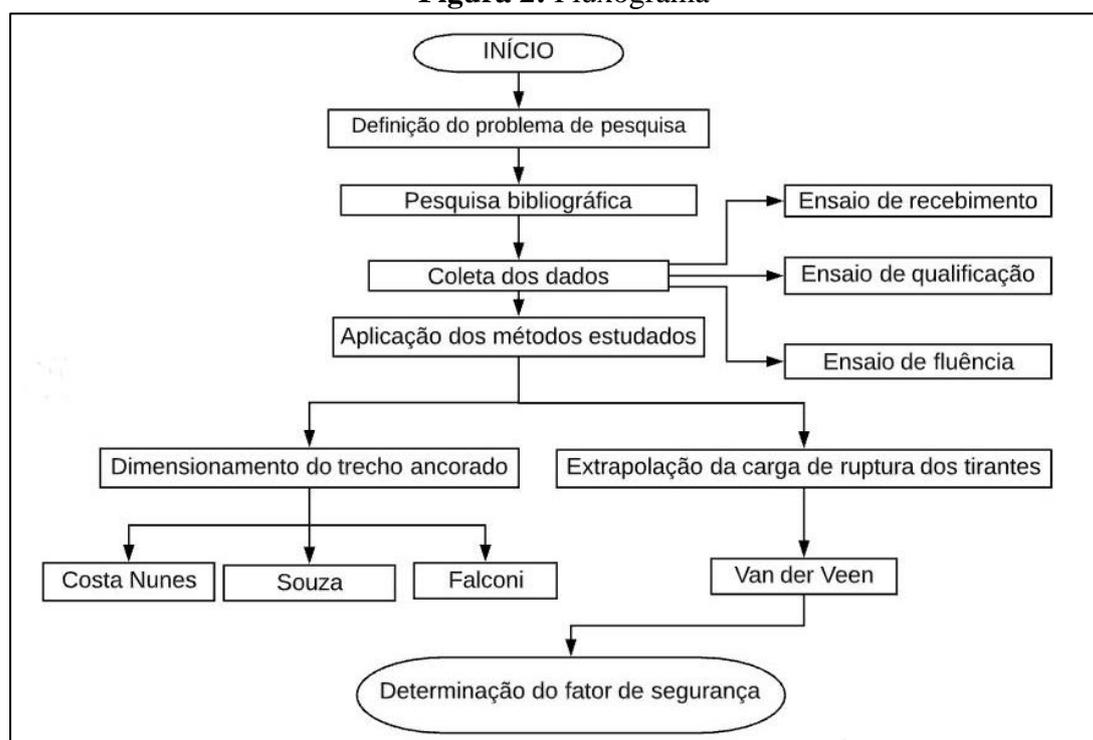
O estudo de caso foi realizado em uma área de escape para veículos pesados sem freio, localizada nas margens da BR 376 no km 667+ 300 pista sul (Anexo A.), na serra do mar. Devido a existência de uma faixa de desaceleração para que os veículos possam acessar a área de escape, se fez necessário a implantação da cortina atirantada para conter o corte do talude existente.

Quanto aos aspectos éticos da pesquisa, a empresa gestora do contrato foi comunicada sobre o projeto de pesquisa, e autorizou o acesso as informações solicitadas. Para tanto, viabilizou o acesso ao projeto executivo, boletins de campo como: perfuração dos tirantes, protensão e injeção, fotos do andamento da obra e normas e especificações técnicas.

3.3 ETAPAS DA PESQUISA

Para melhor exemplificar a sequência executiva desse trabalho, foi realizado um fluxograma (figura 02), demonstrando as etapas da pesquisa para melhor entendimento do processo.

Figura 2: Fluxograma



Fonte: Dos autores (2021)

3.3.1 Procedimento Experimental

A pesquisa foi baseada em análise de arquivos científicos e normas técnicas, a fim de compreender acerca do método construtivo da cortina atirantada e seus elementos constituintes. Para alcançar os objetivos propostos nesse trabalho, foram coletados os resultados dos ensaios geotécnicos referentes aos parâmetros do solo utilizados para dimensionamento do trecho ancorado dos tirantes (bulbo) e demais elementos estruturais executados na referida obra.

3.3.1.1 Pré-dimensionamento da ancoragem dos tirantes

Em posse do laudo geotécnico fornecido pela empresa gestora da obra, foram retiradas as informações geotécnicas utilizada no dimensionamento do trecho ancorado dos tirantes (Tabela 02), e aplicados também nas formulações semi-empíricas propostas por Costa Nunes (1987), Souza (2001) e Falconi (2005).

As informações acerca dos parâmetros do solo foram obtidas através do ensaio de sondagem SPT para obter coesão e ângulo de atrito. Os parâmetros adotados para cada camada e os dados adotados em projeto podem ser observados no Anexo B e C sequencialmente.

Tabela 2 – Dados para dimensionamento dos tirantes

Ângulo de atrito efetivo (ϕ)	25°
Capacidade de carga do tirante (Tl)	1050 KN
Coesão efetiva (c)	20 kN/m ²
Diâmetro de perfuração (D)	0,10 m
Nspt (golpes/30 cm)	10 a 16
Peso específico (γ)	18 kN/m ²
Pressão de injeção no bulbo (σ)	40 kgf/cm ²
Profundidade do centro do bulbo (h)	10 m

Fonte: Dos autores (2021)

Foi possível verificar através do Projeto Executivo (anexo D) que o modelo de cálculo utilizado para o pré-dimensionamento da ancoragem dos tirantes da cortina em estudo, foi o proposto por Costa Nunes (1987). Todavia, essa metodologia também será utilizada para os cálculos desse artigo a fim de comparação.

A teoria de Costa Nunes (1987) utiliza a equação 2.1 já apresentada nesse artigo, considera uma série de fatores do solo como coesão, ângulo de atrito e peso específico. No projeto da cortina estudada, esses dados foram obtidos através do ensaio de SPT, haja visto que o ensaio permite alcançar a profundidade de ancoragem dos tirantes. A teoria também utiliza nos cálculos a pressão de injeção no bulbo, contudo não foi possível identificar o valor considerado pelo projetista. Para tanto, foi utilizado o valor de injeção conforme descrito no boletim de perfuração de campo para dimensionar o comprimento do trecho ancorado.

A metodologia proposta por Souza, leva em consideração o Nspt do solo que foram obtidos também através do perfil individual de sondagem a percussão (SPT) realizado na região estudada. No Anexo E podemos observar um relatório de sondagem onde encontra-se as camadas identificadas. No Anexo F se encontra os dados do solo para cada camada de acordo com a estabilidade analisada na estaca 31+00, considerado um dos pontos críticos da cortina. Deste modo aplicou-se a equação 2.6

apresentada, que se refere à um solo silte areno-argiloso enquadrando-se dentro dos parâmetros obtidos, adotando o valor médio de N_{spt} da camada correspondente a 13 golpes/30cm.

Por fim, a metodologia de Falconi foi calculada conforme as equações 2.7 e 2.8 desse trabalho, utilizando também a média do N_{spt} do solo da camada em que foi ancorado o bulbo (camada D), para encontrar o valor do comprimento do trecho ancorado.

3.3.1.2 Características da estrutura

A estrutura é composta por duas cortinas atirantadas, nomeadas N20 com 102 tirantes distribuídos em 02 linhas, e N30 com 284 tirantes divididos em até 04 linhas de acordo com a seção da cortina, somando 370 metros de comprimento, possuindo altura máxima 7,0 metros e um total de 386 tirantes. De maneira geral os tirantes estão distribuídos a cada 2,0 metros um do outro na horizontal e vertical, salvo exceções conforme projeto.

De acordo com o projeto executivo anexo G, todos os tirantes possuem inclinação de 10° e são ancorados 11,0 metros no solo, o que difere de uma linha para a outra é o comprimento do trecho livre, onde a 1ª linha possui 16,0 metros, 2ª linha 13,0 metros, 3ª e 4ª linha com 9,0 metros de comprimento. O conjunto tirante, sem exceção é constituído por cabos com 07 cordoalhas de 07 fios com diâmetro de 12,7mm do tipo CB – 190 RB, cuja carga de protensão é de 60,0 tf. Esses cabos foram devidamente protegidos contra corrosão conforme indicações da NBR 5629.

A cortina por sua vez, possui espessura de 40,0 centímetros, fck de 30 Mpa, juntas de dilatação tipo *fugenband* a cada 20 metros, drenos sub-horizontais com profundidade de 10 metros, distanciados a cada 8,0 metros ao longo da cortina e dreno tipo barbacãs de contato com o paramento a cada 02 metros em todo o comprimento.

3.3.1.3 Critério de escolha e análise dos ensaios realizados

Todos os resultados acerca dos ensaios realizados nos tirantes, sendo eles: recebimento, qualificação e fluência foram devidamente apresentados em boletins de campo e armazenados. Esses boletins, expõe informações referentes as cargas aplicadas, seus respectivos deslocamentos, gráficos, informações pertinentes ao equipamento utilizado para a protensão e do tirante.

Portanto, realizou-se uma avaliação documental acerca dos ensaios executados nos tirantes, disponibilizados pela empresa gestora do contrato da obra. Ao todo, identificou-se a realização de 42 ensaios de recebimento tipo A, 337 ensaios de recebimento tipo B, 05 ensaios de qualificação e 02 ensaios de fluência, representado na tabela 3:

Tabela 3 – Relação dos tirantes ensaiados

Elemento	Quantidade	Relação de tirantes		
		Tipo de ensaio	Quantidade	%
Cortina N20/N30	386	Recebimento tipo A	42	10,88%
		Recebimento tipo B	337	87,31%
		Qualificação	5	1,30%
		Fluência	2	0,52%

Fonte: Dos autores (2021)

Devido a ampla quantidade de tirantes, se fez necessário implantar um critério de inclusão dos ensaios a serem analisados. Com isso, foi escolhido a cortina N30 entre as estacas 30+00 a 32+00, uma extensão de 40 metros de comprimento contemplando 65 tirantes, alocados em até 4 linhas com seção máxima no trecho de 7,0 metros de altura, representando aproximadamente 23,0% dos tirantes da estrutura.

O critério utilizado para a escolha dos tirantes a serem extrapolados, caracterizou-se pelo fato de obter-se uma amostragem significativa de tirantes em uma pequena extensão da cortina, visto que a contenção N30 possui 370 metros de comprimento e a região estudada possui a maior altura da contenção com 7,0 metros, conseqüentemente obtendo 04 linhas de tirantes para conter a cortina.

3.3.1.4 Extrapolação dos tirantes pelo método Van der Veen

De posse dos boletins de protensão referente aos tirantes da área determinada, foi extraído as informações necessárias: as cargas aplicadas no ensaio de recebimento, deformação do tirante após aplicação das cargas, e a partir disso aplicou-se na formulação matemática de Van der Veen (1953) para a determinação da carga de ruptura de cada tirante. Para melhor processamento e precisão dos dados, foi utilizado o software Excel.

Dessa forma, criou-se uma planilha para cada tirante conforme destaca o apêndice B, onde foram preenchidas as cargas de protensão aplicadas em cada estágio durante o ensaio de recebimento, suas respectivas deformações e a carga de ruptura arbitrária variando de 500 KN a 1700 KN, posteriormente inseridas na formulação 2.11, conforme destaque na tabela 04. Logo, o resultado da

expressão e a deformação em função da carga aplicada formam uma coordenada, assim foi repetido para cada estágio de carga para a plotagem do gráfico.

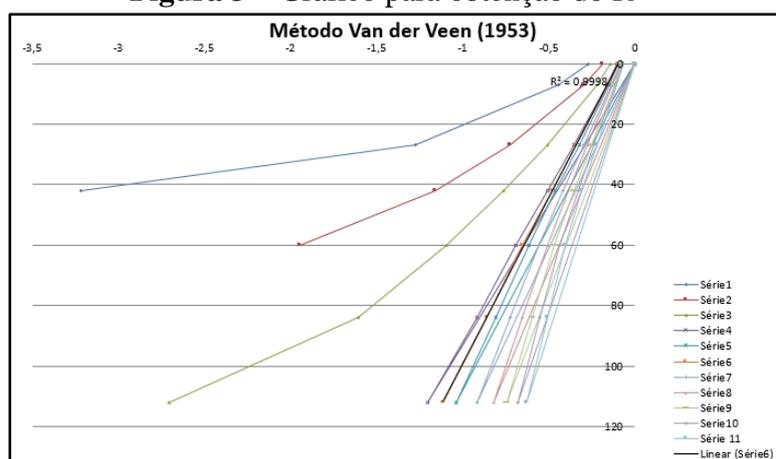
Tabela 4 – Exemplo de extrapolação do tirante

MÉTODO VAN DER VEEN (1953)			
Q rup (KN)	Carga aplicada (KN)	Y (Deformação mm)	X (LN (1-F/FR))
1100	60	0	-0,056089467
1100	180	6	-0,178691789
1100	360	24	-0,396415273
1100	480	38	-0,573345981
1100	600	53	-0,78845736
1100	720	67	-1,062894206
1100	840	83	-1,442383828

Fonte: Dos autores (2021)

O procedimento foi repetido com diferentes cargas de ruptura arbitrária, buscando obter o gráfico que mais se aproxima de uma reta, conseqüentemente com coeficiente R^2 mais próximo de 1,0, obedecendo assim, a consideração de Aoki *et al* (2013) quanto a confiabilidade da extrapolação do tirante. Dessa maneira, o gráfico que atender essas condições será correspondente a carga de ruptura do tirante, conforme demonstra a Figura 3 a seguir.

Figura 3 – Gráfico para obtenção do R^2



Fonte: Dos autores (2021)

Por fim, foi construída uma tabela contemplando todos os tirantes analisados, contendo o tipo do ensaio, carga máxima aplicada durante o ensaio de recebimento, carga de ruptura através de Van der Veen (1953), situação dos tirantes acerca da condição de Aoki *et al* (2013) explícita na tabela 01, fator de segurança em relação a carga máxima aplicada durante o ensaio de recebimento e fator de segurança do tirante em relação a carga de trabalho de 600kN, demonstrados no apêndice A.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo será apresentado e discutido os resultados obtidos com a pesquisa realizada.

4.1 DIMENSIONAMENTO DO TRECHO ANCORADO

Os resultados obtidos através das formulações semi-empíricas utilizadas para a determinação da capacidade de carga dos tirantes, apresentam valores consideravelmente discrepante entre os métodos. Na tabela 5 abaixo, estão relacionados os comprimentos de ancoragem dos tirantes calculada de acordo com a proposta de cada autor.

Tabela 5 – Comprimento do trecho ancorado de acordo com cada autor

Autor	Fórmula	Comprimento trecho (m)
Costa Nunes	$T_l = \pi \cdot D_p \cdot n_d \cdot L_a \cdot n_l \cdot q_s$	11,50
Souza	$T_l = 4,5 \cdot N_{spt} \cdot L_a$	17,95
Falconi	$T_l = \pi \cdot D_p \cdot L_a \cdot q_s$	41,80

Fonte: Dos autores (2021)

Diante do exposto, percebe-se uma variação significativa entre eles, apontando que a metodologia de Falconi (2005), dentre as estudadas, é a mais conservadora, tendo em vista que o autor utiliza apenas os números de golpes obtidos através do ensaio SPT (N_{spt}) para encontrar a resistência ao cisalhamento a qual é usada posteriormente para dimensionar o trecho ancorado.

O autor Souza (2001) também faz uso dos números de golpes (N_{spt}) atingidos na camada escolhida e aplica junto a um coeficiente que varia de acordo com o tipo de solo no local, no entanto, sem informações mais detalhadas sobre o próprio tirante e da região da qual será ancorado.

Diferentemente dos métodos acima, a metodologia de Costa Nunes (1987), adotada em projeto, que apesar de também utilizar dados do ensaio de SPT, leva em consideração dados do solo com maior exatidão, como coesão, ângulo de atrito e peso específico, que foram obtidos por correlação através do ensaio de SPT bem como dados do próprio tirante como diâmetro da perfuração, distância do centro do bulbo até a parte superior do terreno e capacidade de carga do tirante definida em projeto, o que torna o dimensionamento do comprimento do trecho a ser ancorado mais preciso.

Diante dos resultados a respeito do pré-dimensionamento do trecho ancorado, observa-se que pelo fato do solo ser um material variável para cada trecho, a quantidade de informações acerca do

tipo de solo onde será realizada a obra, e a utilização de mais de um método de dimensionamento, contribui positivamente para uma escolha mais precisa, neste caso, do trecho ancorado em cortinas atirantadas.

4.2 CARGA DE RUPTURA ATRAVÉS DE VAN DER VEEN

Acerca dos resultados de ruptura dos tirantes utilizando o método de extrapolação determinado por Van der Veen (1953), e aplicando o critério proposto por Aoki *et al* (2013) referente aos níveis de confiabilidade de utilização do método, demonstrado na tabela 01, destaca-se que dos 64 tirantes extrapolados, 35 foram aceitos, ou seja, que não se caracterizaram inaceitáveis.

Diante dos resultados apresentados e com a finalidade de trazer fidedignidade ao trabalho, após a obtenção da carga de ruptura, foram objetos de análise deste trabalho somente as extrapolações que não foram classificadas como inaceitáveis, conforme estabelece o critério de Aoki *et al* (2013). Dessa forma obteve-se uma carga de ruptura média de 1299,6 kN, suportando em média 52,7% a mais de carga em relação a carga máxima aplicada no ensaio de recebimento/qualificação e 122,8% superior a carga de trabalho de 600,0 kN, carga determinada para suportar os esforços solicitantes na cortina, conforme demonstrado na tabela 06.

Tabela 06 – Fatores de segurança dos tirantes

TIRANTES SEÇÃO MÁXIMA N30 - VAN DER VEEN (1953)						
Tirante	Tipo	Qaplicada (kN)	Qrup (kN)	Qtrabalho (Kn)	FS Qa	FS Qt
80	B	840,0	1100	600,0	130,95%	183,33%
81	B	840,0	1125	600,0	133,93%	187,50%
82	B	840,0	1210	600,0	144,05%	201,67%
83	B	840,0	1430	600,0	170,24%	238,33%
84	B	840,0	1380	600,0	164,29%	230,00%
85	B	840,0	1200	600,0	142,86%	200,00%
86	B	840,0	1360	600,0	161,90%	226,67%
87	B	840,0	1450	600,0	172,62%	241,67%
88	B	840,0	1280	600,0	152,38%	213,33%
89	A	1050,0	1360	600,0	129,52%	226,67%
90	B	840,0	1180	600,0	140,48%	196,67%
91	B	840,0	1100	600,0	130,95%	183,33%
92	B	840,0	1400	600,0	166,67%	233,33%
93	B	840,0	1450	600,0	172,62%	241,67%
94	B	840,0	1350	600,0	160,71%	225,00%

95	B	840,0	1100	600,0	130,95%	183,33%
96	B	840,0	1170	600,0	139,29%	195,00%
97	B	840,0	1230	600,0	146,43%	205,00%
98	B	840,0	1100	600,0	130,95%	183,33%
99	B	840,0	1320	600,0	157,14%	220,00%
161	B	840,0	1470	600,0	175,00%	245,00%
162	B	840,0	1450	600,0	172,62%	241,67%
163	A	1050,0	1700	600,0	161,90%	283,33%
165	Q	1050,0	1570	600,0	149,52%	261,67%
167	B	840,0	1450	600,0	172,62%	241,67%
171	B	840,0	1100	600,0	130,95%	183,33%
172	B	840,0	1080	600,0	128,57%	180,00%
174	A	1050,0	1410	600,0	134,29%	235,00%
177	B	840,0	1460	600,0	173,81%	243,33%
256	B	840,0	1300	600,0	154,76%	216,67%
259	A	1050,0	1650	600,0	157,14%	275,00%
269	A	1050,0	1700	600,0	161,90%	283,33%
272	B	840,0	1380	600,0	164,29%	230,00%
273	B	840,0	1370	600,0	163,10%	228,33%
276	B	840,0	1400	600,0	166,67%	233,33%
Percentual médio de ruptura					152,74%	222,79%

Fonte: Dos autores (2021)

Contudo, em relação aos demais tirantes da região em análise que não atenderam a condição de Aoki *et al* (2013), obtiveram uma média de ruptura de 1978,0 kN, 52,2% superior em relação à média de ruptura dos 35 tirantes analisados correspondente a 1299,6 kN.

Observou-se através do método executivo dos tirantes, que as perfurações do mesmo foram executadas com a utilização de água.

É possível acrescentar ainda, que falhas no processo de protensão dos tirantes, bem como leitura imprecisa dos alongamentos nos estágios de cargas, afetam a precisão e confiabilidade da carga de ruptura dos tirantes, visto que a extrapolação depende exclusivamente das cargas aplicadas e seus respectivos deslocamentos.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do exposto, os resultados obtidos nessa pesquisa acerca do pré-dimensionamento dos tirantes foram satisfatórios, apesar de demonstrar uma variação considerável, de 11,50m para 41,80m,

entre os métodos para o dimensionamento comprimento do trecho ancorado. A partir dessa variação, observou-se a extrema importância de realizar um estudo geotécnico, bem como uma escolha adequada do método de dimensionamento a ser utilizado.

A respeito das extrapolações dos tirantes, observou-se que o método de Van der Veen (1953) se apresenta como uma ferramenta bastante útil na determinação da carga de ruptura através dos ensaios de recebimento. Desse modo, a partir das análises da ruptura dos tirantes constatou-se que os mesmos possuem um fator de segurança de 2,2 em relação a carga de incorporação, ou seja, demonstrando, portanto, que o tirante suporta uma carga bem superior à qual foi projetado.

Contudo, o trabalho de escrita é limitado, e a experiência de pesquisa no campo, intensa. Muitas informações foram produzidas, demais questões que poderiam ser aprofundadas, indicando, portanto, futuras análises. Dentre as temáticas que poderiam dar origem a outras análises, podem ser citadas: dimensionar o trecho ancorado alterando as características do solo, a fim de analisar com maior profundidade a variação dos comprimentos em função dos parâmetros do solo. Extrapolar os tirantes por outros métodos a título de comparação, devido ao índice considerável de tirantes inaceitáveis conforme critério de Aoki *et al* (2013). Identificar a base de dados no qual foi pautado o estudo de Aoki *et al* (2013) para estabelecer o critério de confiabilidade, visto que o método de perfuração com circulação de água e as altas pressões na injeção de calda de cimento propiciam um ganho de resistência na ancoragem justificando, portanto, o aumento na capacidade de carga em determinados tirantes.

Na mecânica dos solos a precisão dos resultados calculados nunca excede a uma estimativa aproximada, e a função da teoria é nos ensinar de como devemos observar o campo. Nesse sentido, conclui-se que o objetivo inicial proposto foi alcançado, e que o estudo se mostra relevante para a área de conhecimento, diante da quantidade de obras de infraestrutura viária realizadas que contemplam a utilização de cortinas atirantadas pelo país e mundo.

REFERÊNCIAS

AOKI, Nelson; CINTRA, José Carlos; TSUHA, Cristina; GIACHETI, Heraldo. **Fundações, ensaios estáticos e dinâmicos**. Oficina de Textos. 2013.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Estabilidade de encostas. NBR 11682.** Rio de Janeiro, 2009.

BARROS, Pérsio Leister de Almeida. **Obras de contenção, Manual técnico.** São Paulo. Maccaferri do Brasil Ltda, 2005

CARRION, Carlos Williams;. **contenção de taludes com cortinas atirantadas em obras rodoviárias** In: 7º SEMINÁRIO NACIONAL MODERNAS TÉCNICAS RODOVIÁRIAS, 2012, São Paulo. Artigo. Florianópolis: 2012 p.10.

CARVALHO, Alvarenga Luma; PORTO, Thiago Bomjardim; GOMES, Romero Cesar. **Ancoragens em Solo: Estudo de Caso, Proposta e Comparação entre Métodos Semi-Empíricos e Extrapolação de Van der Veen.** In: XVIII CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 2016, Belo Horizonte. Artigo. Belo Horizonte: Abms, 2016. p.8.

D'HYPPOLITO, Lays Cristina Barcelos de Souza. **relações empíricas para estimativa da resistência ao arrancamento de ancoragens.** 2017. 206 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

FIGUEIREDO, Juliana Gonzalez. **CONTRIBUIÇÃO AO PROCESSO DE DIMENSIONAMENTO DE CORTINAS ATIRANTADAS.** 2018. 140 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

GERSCOVICH, Denise M. S. **Estabilidade de talude.** 2ª edição. São Paulo. Oficina de textos, 2016.

GOMES, Romero Cesar; PORTO, Thiago Bomjardim; GOMES; ANJOS, Tamires Cristina Ferreira dos. **Utilização do Método de Extrapolação de Cargas Proposto Por Massad (1987) Para Controle de Ancoragens Utilizando Aplicativo Web.** In: XVIII CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 2016, Belo Horizonte. Artigo. Belo Horizonte: Abms, 2016. p.8.

MACHADO, Alexandre Xavier; MENDES, Luiz Carlos; **Durabilidade e vida útil de estruturas de contenção de encosta situadas na cidade do Rio de Janeiro.** In: VIII CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS, 2014, Rio de Janeiro. Artigo. Rio de Janeiro: 2016. p.10.

MAGALHÃES, Thiago Abdala; AZEVEDO, Crysthian Purcino Bernardes. **Análise Técnica e Econômica de Estrutura de Contenção de Taludes.** In: XVIII CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 2016, Belo Horizonte. Artigo. Belo Horizonte: Abms, 2016. p. 1 - 8.

MORE, Javier Zenobio Pérez. **Análise numérica do comportamento de cortinas atirantadas em solos.** Rio de Janeiro: PUC, 2003. 120 p. Dissertação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2003.