

Avaliação de Desempenho da Técnica de Cortina Atirantada em uma Obra de CONTENÇÃO na Região Metropolitana do Recife

Maria Eduarda de Arruda Dourado

Discente, Universidade de Pernambuco, Recife, Brasil, mead@poli.br

Pedro Eugênio Silva de Oliveira

Professor Doutor, Universidade de Pernambuco, Recife, Brasil, pedro.oliveira@poli.br

Alexandre Duarte Gusmão

Professor Doutor, Universidade de Pernambuco, Recife, Brasil, gusmao.alex@poli.br

RESUMO: Este trabalho avalia o desempenho de uma cortina atirantada em uma obra na Região Metropolitana do Recife, a partir da análise do Estado Limite Último (ELU) de 38 ensaios de recebimento. A metodologia consistiu na estimativa da carga de ruptura de cada tirante pelo método de extrapolação de Van der Veen modificado por Aoki. Para garantir a confiabilidade, aplicaram-se critérios rigorosos de exclusão baseados na convergência do modelo matemático e no critério de Décourt e Niyama, o que resultou em uma amostra final de 24 ensaios válidos. Os resultados indicaram cargas de ruptura entre 361 kN e 689 kN. Todos os tirantes validados demonstraram Fator de Segurança superior a 1,40, atendendo aos requisitos normativos. A tentativa de correlação entre o desempenho e o perfil geotécnico, obtido por sondagens SPT, foi inconclusiva, sugerindo que fatores executivos, como a qualidade da injeção, foram preponderantes no comportamento dos tirantes.

PALAVRAS-CHAVE: Cortina atirantada, Estado limite último, Capacidade de carga, Ensaios de recebimento, CONTENÇÃO de encostas.

ABSTRACT: This paper evaluates the performance of an anchored retaining wall in a project in the Recife Metropolitan Region, based on the Ultimate Limit State (ULS) analysis of 38 acceptance tests. The methodology involved estimating the failure load of each ground anchor using the Van der Veen extrapolation method, as modified by Aoki. To ensure data reliability, strict exclusion criteria were applied, such as the convergence of the mathematical model and the Décourt and Niyama criterion, resulting in a final sample of 24 valid tests. The results showed failure loads between 361 kN and 689 kN. All validated anchors showed a Safety Factor greater than 1.40, meeting standard requirements. The attempt to correlate performance with the geotechnical profile, obtained from SPT boreholes, was inconclusive, suggesting that construction-related factors, such as grouting quality, significantly influenced the anchors' performance.

KEYWORDS: Anchored wall, Ultimate limit state, Load capacity, Acceptance tests, Slope containment.

1 INTRODUÇÃO

A estabilidade de taludes na Região Metropolitana do Recife (RMR) é um desafio constante devido às suas características geológicas e à densa urbanização. Entre as soluções de engenharia, a técnica de cortina atirantada se consolidou no Brasil como um método eficaz para a contenção de escavações profundas, especialmente após sua normatização pela ABNT NBR 5629.

Apesar de sua ampla utilização, estudos apontam uma carência histórica na avaliação do comportamento real dessas estruturas em serviço (ORTIGÃO; ZIRLIS; PALMEIRA, 1993), destacando a necessidade de análises mais detalhadas baseadas em ensaios de campo para aprimorar a segurança e a eficiência dos projetos. A correlação entre os resultados dos ensaios e as características geotécnicas locais é, portanto, fundamental, especialmente em regiões de geologia complexa como Pernambuco.



Neste contexto, este artigo apresenta a avaliação de desempenho de uma cortina atirantada executada na RMR, com foco na análise do Estado Limite Último (ELU) dos tirantes. O trabalho detalha a metodologia de extrapolação de carga de Van der Veen, aplicada aos dados de 38 ensaios de recebimento, e o rigoroso processo de filtragem dos resultados para garantir a confiabilidade da análise. O objetivo é apresentar uma interpretação crítica do desempenho da contenção, contribuindo com dados práticos para a engenharia geotécnica regional.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Técnica de Cortina Atirantada

A cortina atirantada é uma técnica de contenção que utiliza estruturas verticais, geralmente em concreto armado, ancoradas por tirantes inclinados que penetram o solo e transmitem forças da contenção ao terreno. A utilização desta técnica é mais comum em taludes de grande altura e em áreas onde o solo apresenta baixa resistência ao cisalhamento. Segundo Oliveira e Souza (2017), a cortina atirantada é eficaz na contenção de encostas com inclinações acentuadas, pois os tirantes adicionam resistência ao solo e impedem o movimento de massa. Uma das principais vantagens desse método é sua capacidade de suportar grandes tensões e proporcionar estabilidade em encostas de grande porte (COSTA; ALMEIDA, 2019). Além disso, a técnica permite a realização de contenções profundas e em terrenos de difícil acesso, por isso é amplamente utilizada em regiões de risco.

O princípio de funcionamento das cortinas atirantadas baseia-se na transferência de cargas do maciço instável para uma zona mais estável do terreno por meio dos tirantes, que são tensionados para proporcionar força contrária aos empuxos do solo (PACHECO, 2019). Os tirantes são geralmente compostos por cabos de aço ou barras metálicas que, uma vez instalados, recebem uma força de protensão para garantir que a contenção permaneça estável diante das pressões do solo e das cargas externas.

2.2 Análise da Capacidade de Carga

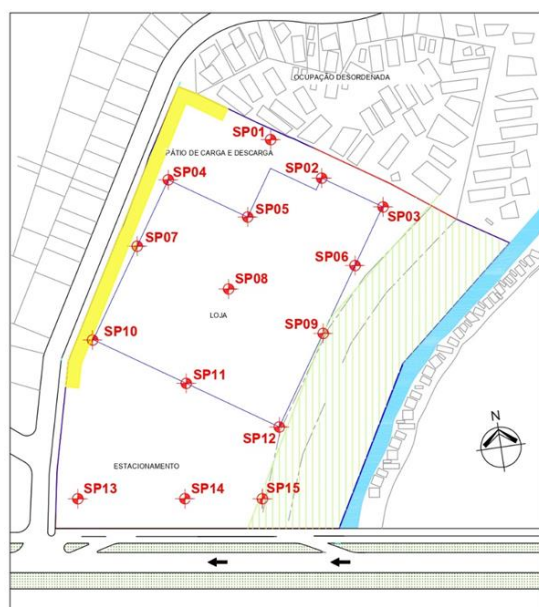
A capacidade de carga dos tirantes é o parâmetro mais crítico para garantir a estabilidade e segurança da estrutura. Sua estimativa teórica, no entanto, apresenta desafios, pois os métodos semi-empíricos podem apresentar variações significativas quando aplicados a diferentes tipos de solo (CARVALHO et al., 2016). No Brasil, o dimensionamento de ancoragens muitas vezes carece de metodologias adaptadas à realidade dos solos locais (PORTO; GOMES, 2016), e a grande dispersão dos resultados experimentais evidencia a necessidade de métodos mais racionais (AZEVEDO et al., 2018).

Diante disso, a verificação do desempenho em campo torna-se indispensável. A norma ABNT NBR 5629 (2006) estabelece a execução de ensaios de qualificação e recebimento para avaliar a capacidade real dos tirantes. Para uma análise mais aprofundada desses ensaios, métodos de extrapolação de carga, como o proposto por Massad (1986), permitem estimar de forma mais precisa a carga última dos tirantes com base nos dados dos ensaios de recebimento, possibilitando uma verificação mais segura e otimizada da estrutura.

3 METODOLOGIA

3.1 Caracterização da Obra e Investigação Geotécnica

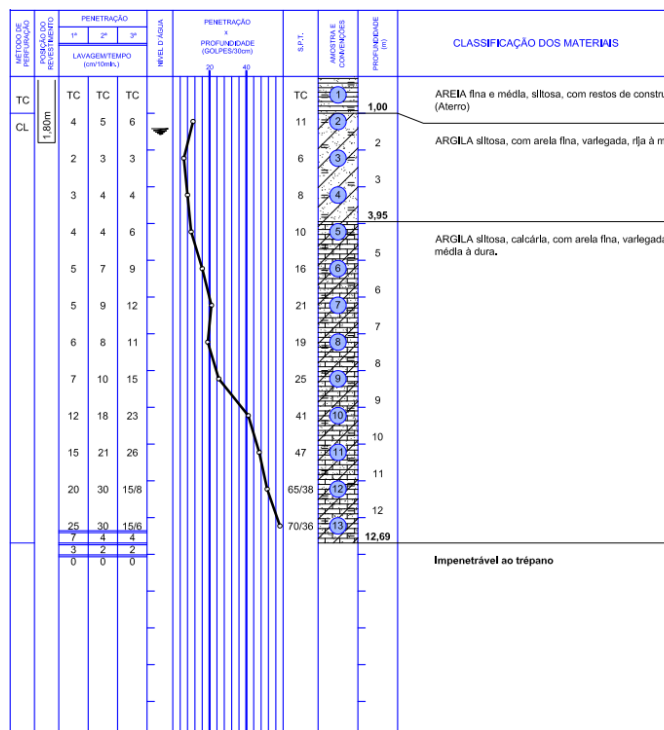
O presente estudo de caso avalia o desempenho de uma cortina atirantada executada em um talude na Região Metropolitana do Recife, cuja planta de locação, juntamente com a distribuição das sondagens, é apresentada na Figura 1. A estrutura é composta por 68 tirantes, dos quais 38 foram submetidos a ensaios de recebimento, cujos dados formaram a base para esta análise. A caracterização geotécnica do local foi realizada a partir de 15 furos de sondagem à percussão (SPT), executados conforme a ABNT NBR 6484:2020.



LEGENDA:

 LOCAÇÃO DA
CORTINA ATIRANTADA

a)



b)

Figura 1. (a) Planta de localização das sondagens SPT e da cortina atirantada, (b) sondagem representativa

Para investigar a influência do solo no desempenho da contenção, buscou-se correlacionar os resultados de cada ensaio com as características do maciço. Utilizando os dados de projeto (comprimento e ângulo de inclinação de cada tirante) e as sondagens mais próximas à cortina (SP01, SP04, SP07 e SP10), foi possível estimar a profundidade de cada bulbo de ancoragem e, assim, identificar o tipo de solo correspondente ao trecho ancorado de cada elemento.

3.2 Análise do Estado Limite Último (ELU)

A análise dos 38 ensaios de recebimento focou na verificação do Estado Limite Último (ELU), com o objetivo de estimar a carga de ruptura (Q_u) de cada tirante. Os dados de cada ensaio, compostos por estágios de carregamento e seus respectivos deslocamentos, foram organizados e plotados em gráficos de carga \times deslocamento, como exemplificado na Figura 2.

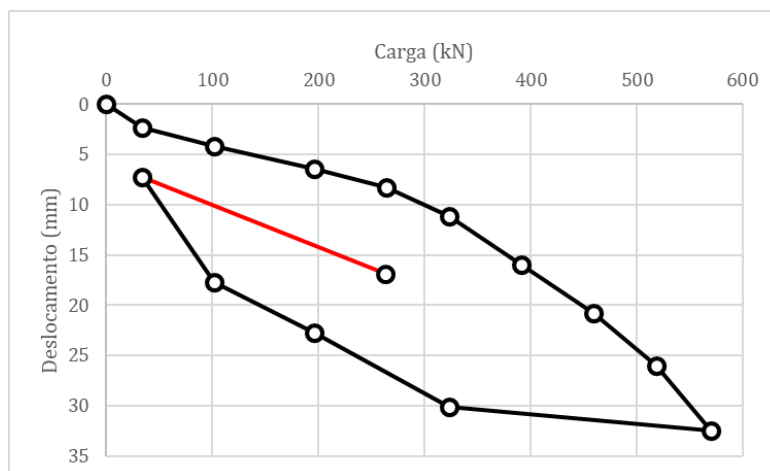


Figura 2. Gráfico de carga x deslocamento do ensaio de recebimento do tirante T3 P48 elaborado no Excel.

Para estimar a carga de ruptura, foi utilizado o método de extrapolação de Van der Veen com a expressão corrigida por Aoki, tradicionalmente aplicado em estacas e aqui adaptado para tirantes. A aplicação do método foi realizada por meio de uma planilha automatizada (Schiavon, 2013), que calcula a curva de melhor ajuste aos dados experimentais.

A fim de garantir a confiabilidade dos resultados, foi adotado um processo de filtragem dos dados em duas etapas, detalhado no fluxograma da Figura 3. Primeiro, foram excluídos os ensaios cujos gráficos não apresentaram convergência na regressão logarítmica do modelo matemático. Em seguida, aplicou-se o critério de Décourt e Niyama (1994), que considera o resultado válido apenas se a carga máxima aplicada no ensaio for maior ou igual a dois terços ($2/3$) da carga última estimada pela extrapolação.

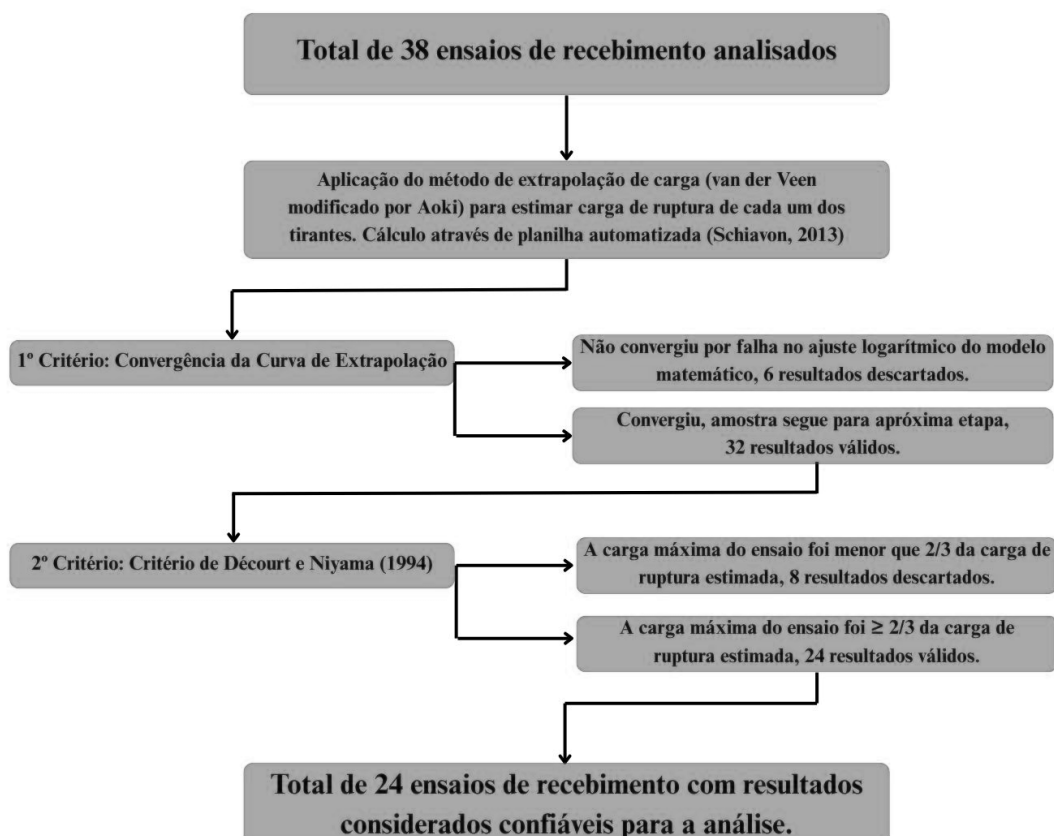


Figura 3. Fluxograma do processo de filtragem dos ensaios de recebimento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização Geotécnica e Análise de Correlação

A interpretação das sondagens mais próximas aos bulbos de ancoragem de cada um dos tirantes revelou a predominância de solos argilosos e siltosos, com variações de consistência ao longo da profundidade. Um ponto de destaque foi a identificação de um bolsão de argila siltosa muito mole na sondagem SP09, classificado por Silva (2015) como área de risco muito alto para deslizamentos, indicando zona de maior vulnerabilidade geotécnica.

A análise de correlação demonstrou que todos os 38 tirantes ensaiados estavam ancorados em uma mesma camada de argila siltosa calcária com areia fina, de consistência média a dura. Portanto, a tentativa de estabelecer uma relação direta entre a rigidez dos tirantes e as características do solo (como o NSPT) foi inconclusiva. Tirantes com desempenhos muito distintos estavam posicionados em condições geotécnicas semelhantes, sugerindo que a variabilidade não era ditada primariamente pelo tipo de solo, mas sim por outros fatores como execução, qualidade do contato solo-tirante ou características locais de compactação.

4.2 Análise de Desempenho no Estado Limite Último (ELU)

A análise de ruptura foi realizada a partir dos 38 ensaios de recebimento, aplicando-se o método de extrapolação de Van der Veen para estimar a carga última (Q_u) de cada tirante. Para garantir a confiabilidade dos dados, aplicou-se um rigoroso processo de filtragem em duas etapas, conforme detalhado na metodologia. No primeiro critério, 6 ensaios (15,8% da amostra) foram descartados por falha no ajuste logarítmico do modelo, uma vez que apresentaram cargas estimadas excessivamente altas. Em seguida, sobre os 32 ensaios restantes, aplicou-se o critério de Décourt e Niyama (1994), que invalidou mais 8 ensaios (21,1% da amostra).

O Quadro 1 consolida os resultados deste processo, apresentando os valores estatísticos (mínimo, médio e máximo) da carga última para a amostra inicial (Q_{u0}), após o primeiro filtro (Q_{u1}) e para a amostra final validada (Q_{u2}). A análise final, baseada na amostra confiável de 24 tirantes, indicou que a carga de ruptura (Q_{u2}) variou entre 361 kN e 689 kN, com uma média de 579,95 kN.

Quadro 1. Resumo comparativo da carga última estimada (Q_u) por etapa de filtragem dos dados.

	Q_{u0} (kN)	Q_{u1} (kN)	Q_{u2} (kN)
Carga Mínima (kN)	361	361	361
Carga Média (kN)	2267,61	792,83	579,95
Carga Máxima (kN)	9709	3296	689

A verificação final da segurança da estrutura, considerando a carga de trabalho de 323 kN, mostrou que o menor Fator de Segurança (FS) obtido entre todos os 24 ensaios válidos foi de 1,40. Este valor é superior ao mínimo preconizado pela norma ABNT NBR 5629:2006, confirmando o desempenho satisfatório e a segurança de todos os elementos testados no que tange ao Estado Limite Último.

5 CONCLUSÃO

A presente pesquisa permitiu uma avaliação detalhada do comportamento de uma cortina atirantada executada em um terreno com desafios geotécnicos significativos, como a presença de solos moles e nível freático elevado. A análise focada no Estado Limite Último (ELU), realizada a partir de um rigoroso processo de filtragem que validou 24 dos 38 ensaios de recebimento, confirmou que a estrutura atende aos critérios de segurança. O menor Fator de Segurança (FS) obtido foi de 1,40, valor superior ao mínimo preconizado pela ABNT NBR 5629:2006, atestando o desempenho satisfatório de todos os elementos testados.

A análise dos resultados da carga de ruptura estimada, que variou de 361 kN a 689 kN, torna-se particularmente relevante ao notar que essa variação de desempenho ocorreu apesar de todos os tirantes analisados estarem ancorados na mesma camada geotécnica de argila siltosa calcária. Tal fato reforça que a tentativa de correlacionar os valores de desempenho com os tipos de solo identificados nas sondagens não apresentou resultados conclusivos.

A ausência de uma correlação geotécnica clara e a variabilidade nos resultados indicam que aspectos construtivos, como a qualidade da perfuração e da injeção da calda de cimento, tiveram papel preponderante no desempenho final dos tirantes. Portanto, este trabalho evidencia a importância crítica do controle de qualidade durante a execução de contenções atirantadas e demonstra que a análise detalhada de ensaios de campo é uma ferramenta essencial não apenas para a verificação da segurança, mas para a compreensão do comportamento real da estrutura e para o aprimoramento contínuo das práticas da engenharia geotécnica.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela força, sabedoria e perseverança concedidas ao longo da realização deste trabalho.

À Universidade de Pernambuco, pela oportunidade de aprendizado e pelo ambiente de desenvolvimento científico e profissional proporcionado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aoki, N.; Alencar, D. De. An approximate method to estimate the bearing capacity of piles. In: Pan-American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 5., 1975, Buenos Aires. *Proceedings* [...]. Buenos Aires: [s.n.], 1975. p. 367-376.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5629: *execução de tirantes ancorados no terreno*. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6484: *execução de sondagens de simples reconhecimento dos solos*. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.
- Azevedo, E. F. S. De; Sousa, A. M. D. De; Costa, Y. D. J. Avaliação de modelos de capacidade de carga para tirantes de uma estrutura de contenção em solo arenoso. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 19., 2018, Salvador. *Anais....* Salvador: ABMS, 2018.
- Carvalho, L. A.; Porto, T. B.; Gomes, R. C. Ancoragens em solo: estudo de caso, proposta e comparação entre métodos semi-empíricos e extrapolação de Van der Veen. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 18., 2016, Belo Horizonte. *Anais....* Belo Horizonte: ABMS, 2016.
- Costa, F.; Almeida, P. Aplicação de cortinas atirantadas em áreas de risco geotécnico. *Revista Brasileira de Engenharia Geotécnica*, v. 22, n. 2, p. 198-208, 2019.
- Décourt, L.; Niyama, S. Capacidade de carga dos solos e das estacas determinadas por normas e por métodos semi-empíricos. In: Seminário Nacional de Fundações, 1., 1994, São Paulo. *Anais....* São Paulo: ABMS, 1994. p. 45-64.
- Massad, F. D. Notes on the interpretation of failure load from routine pile load tests. *Solos e Rochas*, v. 9, p. 33-36, abr. 1986.



- Ortigão, J. A. R.; Zirlis, A.; Palmeira, E. M. Estruturas atirantadas: aspectos técnicos e práticos. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica - COBRAMSEG, 1993, São Paulo. *Anais....* São Paulo: ABMS, 1993.
- Pacheco, C. S. *Avaliação de processos de dimensionamento de cortinas atirantadas*. 2019. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.
- Porto, T. B.; Gomes, R. C. Proposta de uma formulação simplificada para o cálculo de capacidade de carga de ancoragens. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica - COBRAMSEG, 18., 2016, Belo Horizonte. *Anais....* Belo Horizonte: ABMS, 2016.
- Schiavon, J. A. *Planilha Excel Utilização do Método de Van der Veen*. [S.l.]: 2013.
- Silva, D. J. Da. *Mapa de risco de deslizamento e erosão em encostas com ocupações desordenadas no município de Abreu e Lima - PE*. 2015. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.
- Van Der Veen, C. The bearing capacity of a pile. In: International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 3., 1953, Zurich. *Proceedings....* Zurich: [s.n.], 1953. p. 84-90.