

Estudo do Desempenho de uma Cortina Atirantada através da Instrumentação de Tirantes com Células de Carga

Rodman Raúl Córdova Rodríguez

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, eng.raulcordova@gmail.com

Erland González Leño

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, gonzalez.erland@gmail.com

Pedricto Rocha Filho

Consultor, Rio de Janeiro, Brasil, rocha@puc-rio.br

RESUMO: O objetivo deste trabalho é analisar o comportamento de uma cortina atirantada a partir dos dados obtidos de um programa de instrumentação geotécnica concentrado na medição de cargas nos tirantes com o uso de células de carga que utilizaram extensômetros elétricos. As células de carga foram instaladas na cabeça dos tirantes, e as medições foram realizadas ao longo do tempo durante e após a conclusão da obra. Os resultados obtidos através das células de carga, foram analisados e comparados com as soluções propostas por: Terzaghi & Peck (1967), Tschebatorioff (1951) e uma abordagem numérica com o software GeoStudio, módulo Sigma/W. Verificou-se com a instrumentação que houve perda da carga nos tirantes ao longo do tempo sendo a perda média total de 25% da carga aplicada, a máxima perda de 53% e a perda mínima de 6%. As comparações entre as diferentes abordagens mostraram que os métodos tradicionais são apropriados e o estudo numérico permitiu avaliar o desempenho da cortina apresentando uma adequada concordância quando comparados aos dados obtidos na instrumentação geotécnica e aos resultados dos métodos tradicionais.

PALAVRAS-CHAVE: Instrumentação Geotécnica, Cortina atirantada, Tirantes, Célula de Carga

ABSTRACT: The objective of this work is to analyze the behavior of a retaining wall from the data obtained from a geotechnical instrumentation program focused on the measurement of loads on the anchors using load cells that use electrical extensometers. Load cells were installed on the head of the anchors, and measurements were made over time during and after the completion of the work. The results obtained through the load cells were analyzed and compared with the solutions proposed by: Terzaghi & Peck (1967), Tschebatorioff (1951) and the numerical approach with the GeoStudio software, module Sigma/W. It was verified with the instrumentation that there was a loss of load on the anchors over time, with the average total loss of 25% of the applied load, the maximum loss of 53% and the minimum loss of 6%. The comparisons between the different approaches showed that the traditional methods are appropriate and the numerical study allowed to evaluate the performance of the retaining wall presenting an adequate agreement when compared to the data obtained in the geotechnical instrumentation and the results of the traditional methods.

KEYWORDS: Geotechnical Instrumentation, Retaining wall, Anchor, Load cell.

1 Introdução

A cortina atirantada foi projetada para a duplicação da ferrovia paulista no km74 que liga as cidades de São Paulo-Santos, e que atravessa a Serra do Mar, caracterizada por escarpas abruptas e declives irregulares. A cortina atirantada tem um comprimento total de 205,0 m e uma profundidade em relação ao nível da linha férrea de 18,0 m na parte central, reduzindo a profundidade em direção aos extremos 1,0 m no canto direito e 2,75 m no canto esquerdo. A estrutura possui seis juntas de expansão vertical e uma junta de expansão

horizontal contínua ao longo de todo o comprimento, separando os painéis superior e inferior. Para suportar o empuxo de terra foram utilizados 786 tirantes, correspondendo a 89 colunas e 12 linhas de tirantes (centro).

O programa de monitoramento geotécnico consiste na instrumentação de 36 tirantes, usando células de carga de resistência elétrica. As leituras foram feitas em um curto intervalo de tempo após a instalação dos tirantes e em intervalos regulares antes e após cada etapa principal da sequência construtiva. Observou-se que a perda total média foi de 25% da carga média aplicada, o valor mais alto 53% e valor mais baixo 6,0%. As principais causas para a perda total da carga nos tirantes são: 1) redução imediata da carga do tirante 55%; 2) redução a longo prazo 28% e 3) redução devido ao carregamento de tirantes adjacentes 17%.

São apresentados neste trabalho a análise e interpretação dos dados da instrumentação, e a comparação desses valores com os valores estimados através dos diagramas de empuxos aparentes propostos por Terzaghi e Peck (1967), Tschebatorioff (1951) e pelo método dos Elementos Finitos. Os resultados obtidos, mostram que o projeto das cargas dos tirantes foi baseado no empuxo ativo do solo mais uma sobrecarga devido ao trem e, as cargas de ancoragem do projeto impuseram à parede uma pressão total de ação maior que a reação do solo correspondente à condição de repouso.

2 Aspectos gerais do projeto

2.1 A cortina atirantada

A estrutura tem 18 m de altura e 205 m de comprimento e está constituída por painéis concretados in situ, com uma altura entre 1,5 e 2,0 m e comprimento de 4,5 m, geralmente cada painel contém dois tirantes. A cortina tem 89 seções, espaçadas a cada 2 m e correspondendo uma fila de tirantes, sendo o ‘Nível A’ o nível superior o ‘Nível L’ o inferior, em total são 786 tirantes. A Figura 1, mostra a parte instrumentada que é o trecho central da estrutura, são 10 seções instrumentadas, ao longo de 70 metros, a instrumentação foi realizada entre as seções 34 e 69 e os tirantes instrumentados são apresentados na cor vermelho.

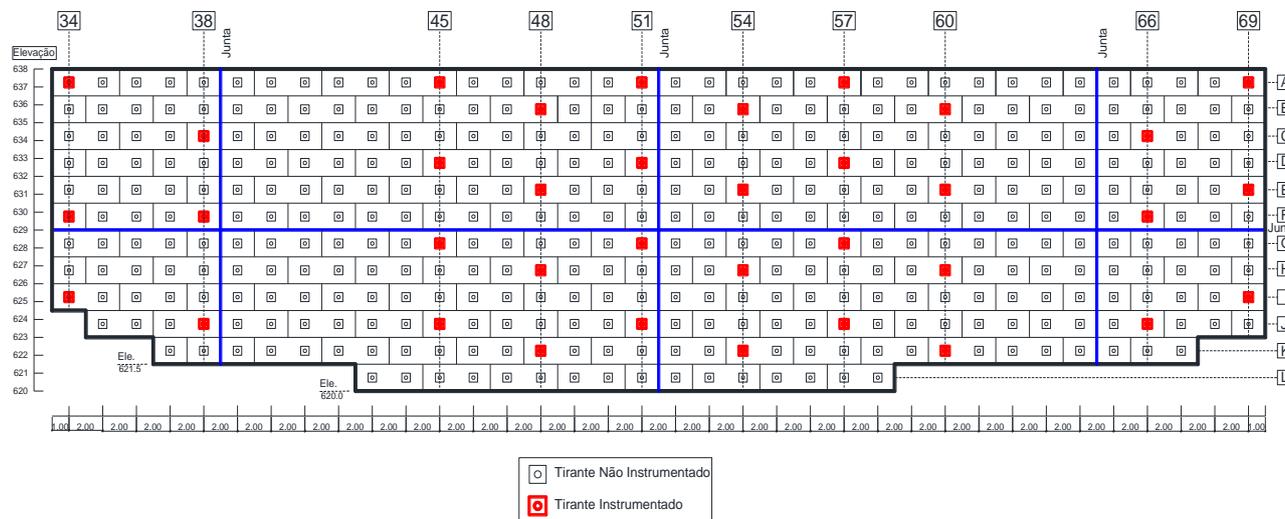


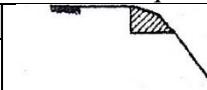
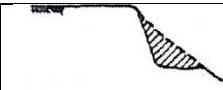
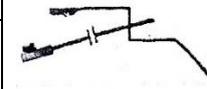
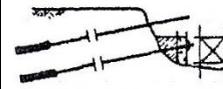
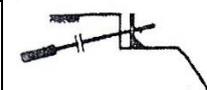
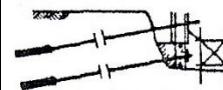
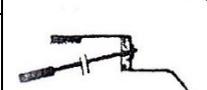
Figura 1. Esquema geral da Cortina Atirantada (Adaptado de Polo, 2015).

2.2 O processo construtivo.

Segundo Rocha Filho et al. (1984), a construção compreendeu 3 frentes, sendo adotadas para diferentes segmentos da cortina ancorada. A primeira frente foi caracterizada por não apresentar aterro de preenchimento, e a sua execução teve início em corte, pelo primeiro nível de tirantes. A segunda frente encontrava-se em área cujos três primeiros níveis de tirantes foram aterrados com material escolhido, devidamente compactado, proveniente da escavação da primeira frente, a sua execução foi iniciada no terceiro nível de tirantes, realizando-se o aterro, para continuar em corte os demais níveis inferiores. A terceira frente, em condições

análogas às da segunda frente, teve sua iniciação pelo quarto nível de tirantes. Na Tabela 1, são apresentadas as etapas construtivas.

Tabela 1. Sequência construtiva.

Etapa	Corte		Aterro	
1	Regularização e escavação do terreno.		Regularização do terreno.	
2	Execução e incorporação dos tirantes.		Execução e incorporação dos tirantes.	
3	Escavação dos painéis, armação e concretagem da cortina.		Escavação dos painéis, armação e concretagem da cortina.	
4	Protensão dos tirantes e execução de obras de drenagem.		Reaterro, protensão dos tirantes e execução de obras de drenagem.	

2.3 Características geológicas - geotécnicas

De acordo com Zeitoun (1982), a cortina se localiza numa região com um relevo abrupto, situada em meia encosta com limitações à esquerda por corte íngreme e desnível de quase 80 m, e à direita por desnível da mesma dimensão. A inclinação é variável entre 45° e 80° para corte e aterro. Uma vista em corte da cortina, do solo e um perfil SPT é apresentado na Figura 2 que corresponde à seção 45. Na camada mais superficial, os ensaios de SPT (perfuração rotativa) apresentaram valores na faixa de 5 golpes finais e não atingiram o lençol freático, que deve existir a mais de 60 m de profundidade, é evidenciado na seção 45 a uma profundidade de 18 m rocha sã. Entre as seções 51 e 69 o solo está constituído por uma areia siltosa variada, micácea, de cor marrom acinzentada variegada, com fragmentos de rocha. A espessura aproximada é de 12 m e comprimento de 250 m, também se evidenciou solo de alteração (10 m) sendo uma areia siltosa amarelada, variegada, micácea, com intercalações de rocha alterada dura ou mole, conferindo ao maciço de solo uma grande heterogeneidade. A fundação do aterro se encontra na camada do solo de alteração, abaixo desta camada há uma camada de rocha alterada mole com intercalações de solo, e abaixo desta, o topo de rocha sã. Devido à pouca informação correspondente a ensaios de laboratório ou de campo, decidiu-se estudar as seções 57 e 54, a seção geológica nesta região do projeto foi simplificada, apresentando-se dois materiais representativos, os parâmetros de resistência e deformabilidade foram estabelecidos com correlações empíricas propostas por Bowles (1996) e apresentados na Tabela 2. Os parâmetros dos materiais serão aplicados ao modelo constitutivo elasto-plástico, delimitado pelo critério de ruptura de Mohr-Coulomb. O módulo de elasticidade da interface é muito menor do que o do solo, afim de desvincular a movimentação da estrutura a movimentação do solo.

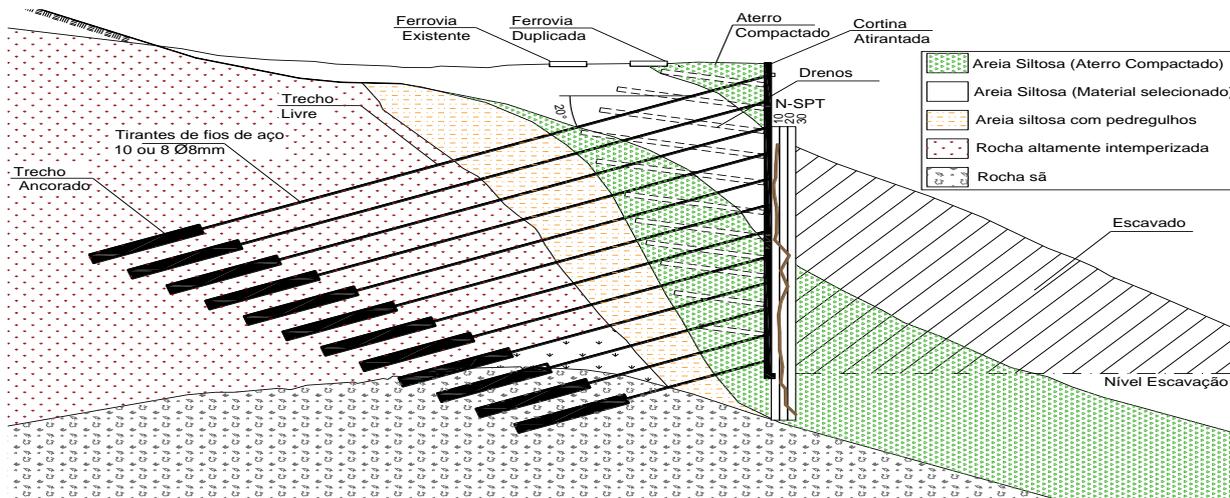


Figura 2. Vista em corte da seção 45 da cortina atirantada.

Tabela 2. Parâmetros do solo adotados.

Características	ϕ' (°)	c' (kPa)	P. Específico (kN/m ³)	E (MPa)	ν	H (m)
Areia Siltosa Micácea	25	0	18	30	0,334	12,0
Areia Siltosa (solo residual)	28	15	18	12	0,334	15,0
Material de interface	20	0	18	1,5	0,334	-

2.4 Características dos tirantes protendidos

A nomeação dos tirantes foi realizada segundo a seção na qual o tirante foi instalado seguido da letra do nível correspondente, por exemplo, o tirante 45A está situado no nível A e seção 45. Os tirantes são de dois tipos, o de 10Ø8 mm com carga de trabalho de 35 t montados nos níveis B, C, D, E, I, J, K e o de 8Ø8mm com carga de 25 t instalados nos níveis A, F, G, H e L. Todos os tirantes formam ângulos de 20° com a horizontal, os comprimentos totais estão na faixa entre 13,9 m a 31 m, sendo o trecho ancorado de 5 m ou 6 m dependendo do tipo de terreno, a Figura 2 ilustra o posicionamento dos tirantes. O aço dos tirantes é do tipo CP-150 RB8 ($\phi = 8\text{mm}$), área de 50,3 mm², módulo de elasticidade de 210 Mpa, as bainhas em polipropileno, os tubos de injeção de plástico de polipropileno, com espaçadores tipo anéis metálicos e vedações com tubos de PVC. As perfurações para os tirantes foram feitas em coroa de diâmetro NX 76 mm, com alargamento para a colocação de revestimento, no processo rotativo convencional e, no diâmetro de 115 mm no processo retrocursor.

2.5 Características das células de carga

As cargas nos tirantes e as variações com o tempo, registraram-se com células de carga elétricas (ponte de Wheatstone completa), com núcleo vazado e do tipo carretel (Figura 3 e Figura 4). As células de carga foram calibradas, com atenção especial à estabilidade a longo prazo e efeitos causados por cargas excêntricas e deformações de cisalhamento e verificadas na instalação em relação à carga do macaco hidráulico.

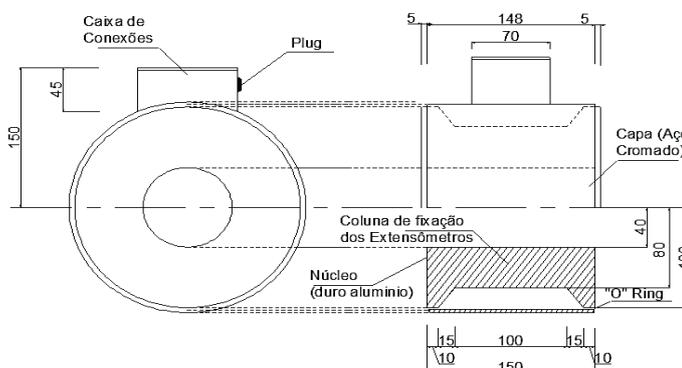


Figura 3. Célula de carga, vista superior e corte, dimensões em mm (Adaptado de Zeitoun, 1982).

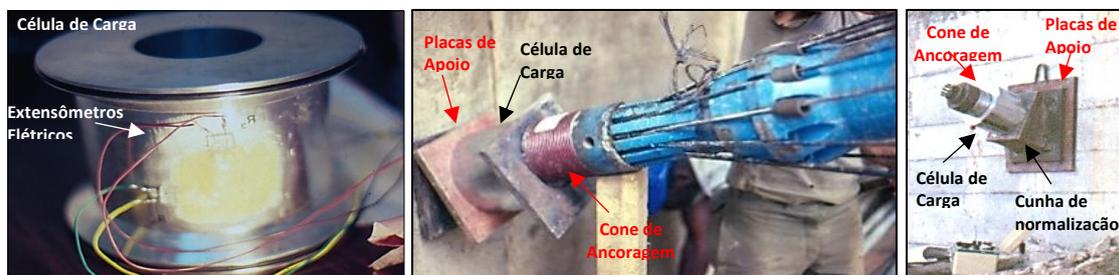


Figura 4. Detalhes da célula de carga utilizada.

3 Instrumentação geotécnica

O trecho central da cortina instrumentada abrange 10 seções: 34, 38, 45, 48, 51, 54, 57, 60, 66 e 69. Foram instrumentados 3 ou 4 tirantes de cada uma das 10 seções, sendo as seções centrais da cortina as que apresentam a maior quantidade de instrumentos. As células de carga elétricas foram localizadas com um

espaçamento correspondente a cada duas seções na direção horizontal e a cada dois níveis na direção vertical. A geometria da cortina e a localização das células de carga são apresentados na Figura 1 e na Figura 5. Mediuse a carga nos tirantes desde a protensão, durante a construção e até seis meses após da conclusão da obra.

Se identificaram 4 tipos de comportamento nos tirantes, não necessariamente presentes simultaneamente em todas as seções. O primeiro comportamento apresentou uma queda acentuada e instantânea da carga seguida de uma pequena variação da força durante o período construtivo e se estabilizando após da finalização da obra, por exemplo, o comportamento do tirante 48E (Figura 7). O segundo comportamento indica uma leve queda da carga seguida de um aumento da carga durante a construção e depois se estabiliza, como observado no tirante 54B (Figura 9). O terceiro comportamento identificado foi a oscilação da carga desde a instalação e ao longo da construção, atingindo a estabilização após a conclusão da obra, o tirante 51A é um exemplo deste comportamento (Figura 8). O quarto comportamento, exibe uma perda constante de carga desde a instalação do tirante e durante a construção da obra, atingindo cargas finais muito baixas em relação a carga de trabalho, realizou-se então a reprotensão desses tirantes para diminuir os deslocamentos e melhorar a sua eficiência, assim a carga final aumentou ficando próxima da carga de trabalho; um exemplo de este comportamento é observado no tirante 57D na Figura 10. As maiores perdas de carga apresentaram os tirantes dos níveis superiores, registrando uma carga final de aproximadamente 80% da carga de trabalho e os tirantes dos níveis inferiores apresentaram pouca perda de carga, atingindo cargas finais próximas à carga de trabalho.



Figura 5. Vista da cortina atirantada concluída (esquerda) e a colocação das células de carga (direita).

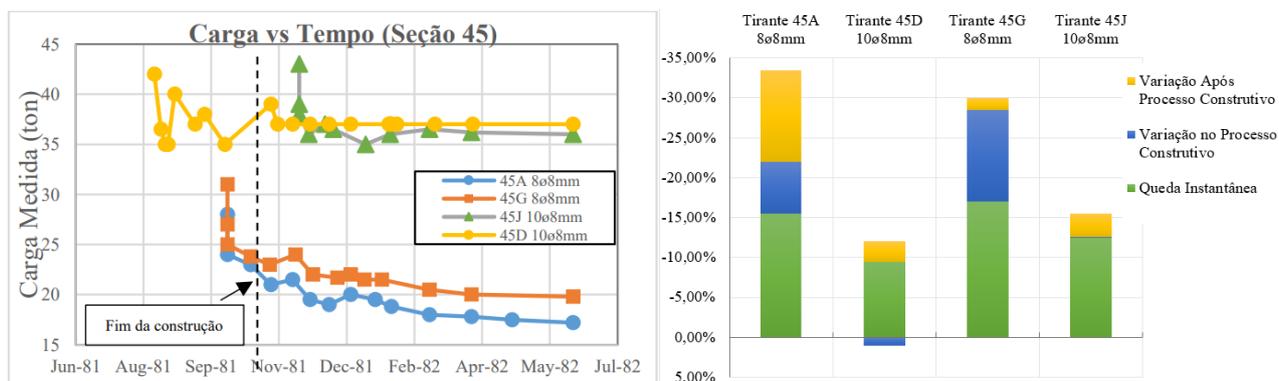


Figura 6. Comportamento e variação da carga dos tirantes da seção 45.

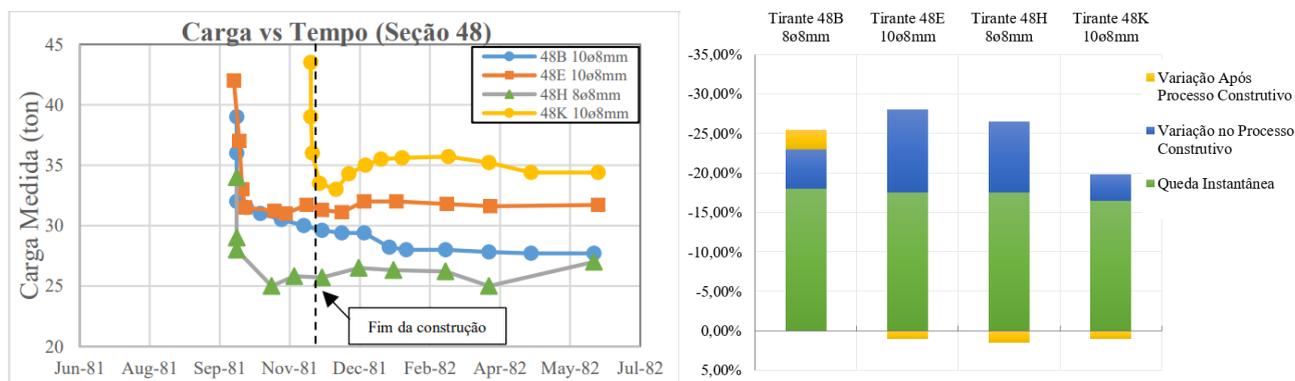


Figura 7. Comportamento e variação da carga dos tirantes da seção 48.

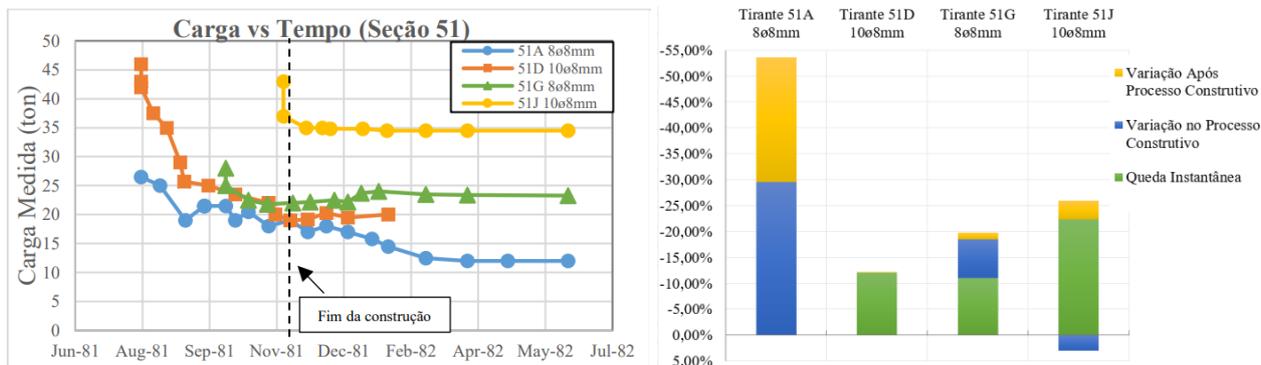


Figura 8. Comportamento e variação da carga dos tirantes da seção 51.

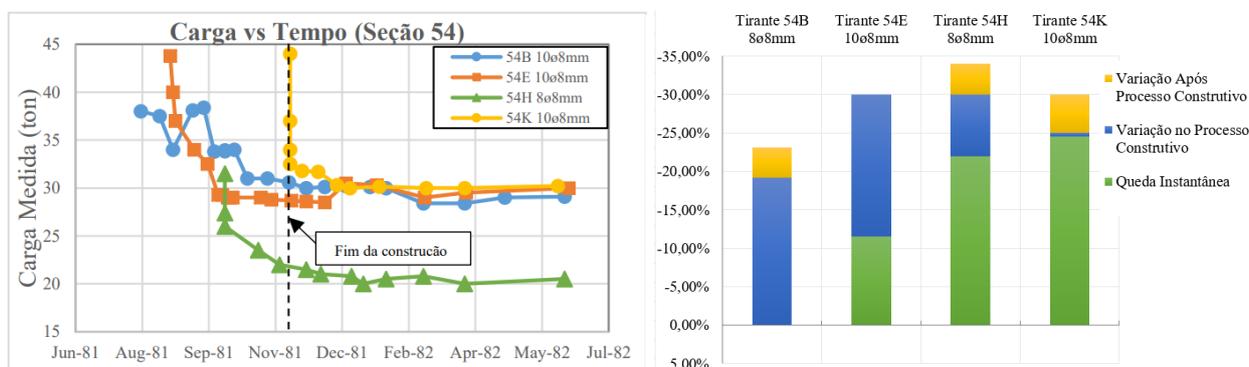


Figura 9. Comportamento e variação da carga dos tirantes da seção 54.

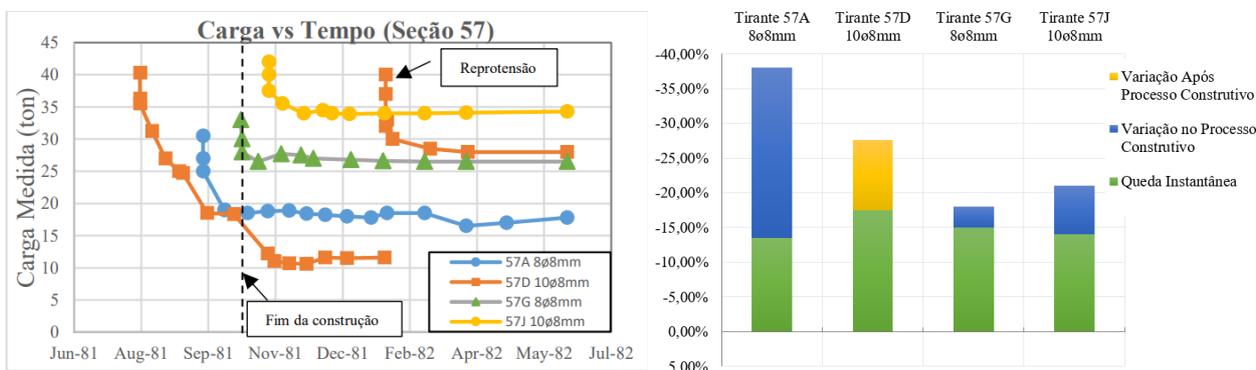


Figura 10. Comportamento e variação de Carga nos tirantes da Seção 57.

4 Determinação do empuxo aparente de tensões

Avaliou-se os dados obtidos na instrumentação comparando-os com a distribuição da tensão horizontal em relação aos diagramas de empuxo aparente de Terzaghi e Peck (1967), Tschebotarióff (1951) e pelo método de Elementos Finitos, com o uso do módulo Sigma/W (tensão-deformação) do sistema GeoStudio.

Segundo Polo (215) a sobrecarga do projeto foi de 20kPa, esse valor de sobrecarga é também previsto pela Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 11.682 “Estabilidade de Encostas”. Neste estudo, o cálculo da distribuição da tensão horizontal inclui a sobrecarga uniforme considerada constante de 20kPa. Na Figura 11, se apresenta a envoltória da componente horizontal dos empuxos medidos com a instrumentação em campo para a seções 57 e 54, e os estimados pelos Diagramas de Empuxo propostos por Terzaghi e Peck (1967), Tschebotarióff (1951) e pelo método de Elementos Finitos. Os diagramas de tensões horizontais obtidos com dados da instrumentação possuem, em média, valores próximos aos obtidos pelo método de Elementos Finitos e pelos diagramas de empuxo aparente de Terzaghi e Peck (1967), sendo que com o método de Tschebotarióff (1951) se obtiveram pressões de terra, em média, inferiores aos obtidos pelos outros métodos.

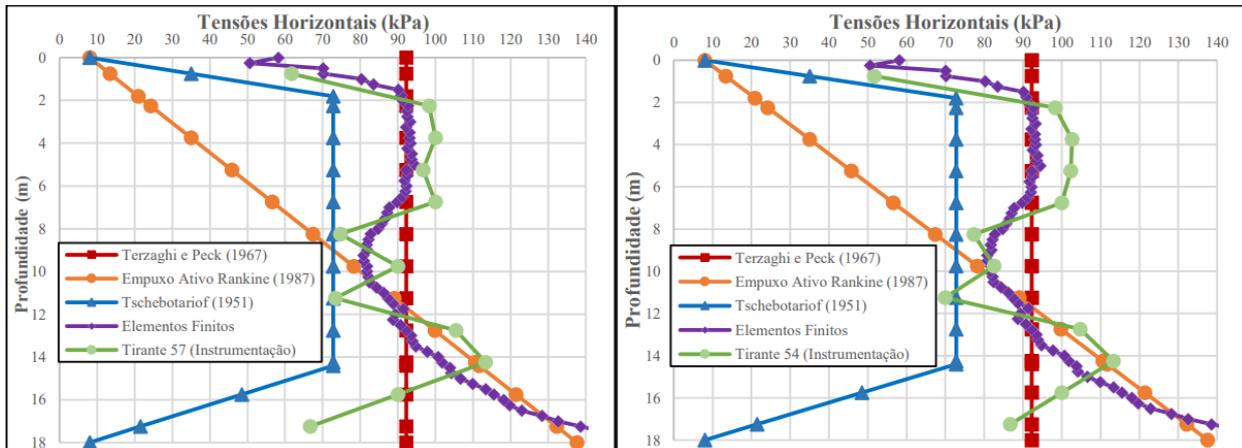


Figura 11. Distribuição das tensões horizontais no solo após a execução da cortina atirantada. Seções 57 (esquerda) e 54 (direita).

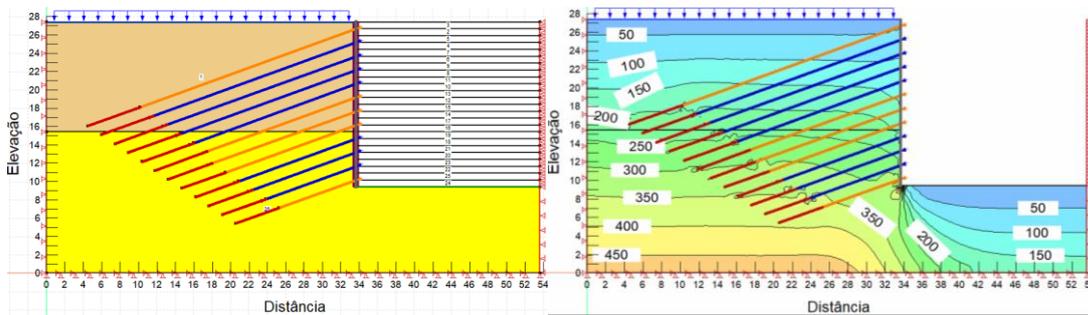


Figura 12. O modelo numérico (esquerda) e a Distribuição das tensões verticais no solo (kPa) (direita).

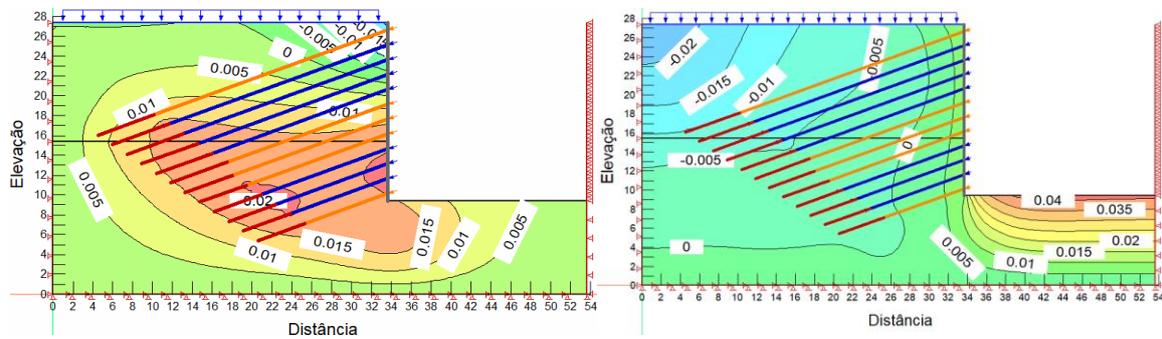


Figura 13. Deslocamentos horizontais (esquerda) e verticais (direita) do solo (m).

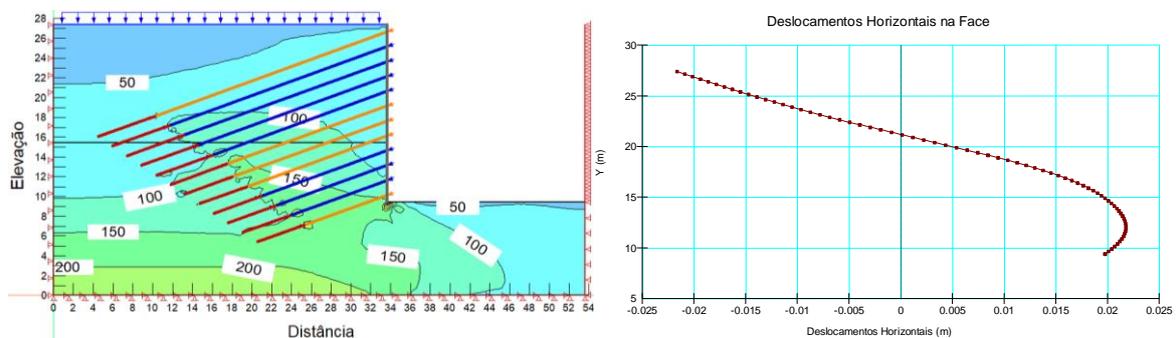


Figura 14. Distribuição das tensões horizontais no solo (kPa) (esquerda) e deslocamentos horizontais da cortina (m) (direita).

A modelagem numérica permitiu fazer uma avaliação abrangente do comportamento do solo e da cortina. As Figuras 12, 13 e 14 obtidas através do programa GeoStudio ilustram o modelo numérico e alguns

resultados da análise como ser a distribuição de tensões verticais e horizontais no solo, deslocamentos verticais e horizontais no solo e deslocamentos horizontais da cortina. Apesar da ausência de medidas dos deslocamentos da cortina na instrumentação, pode-se concluir que as cargas de ancoragem do projeto impuseram movimentos para trás da estrutura de retenção, estabelecendo um novo equilíbrio, reduzindo as cargas de ancoragem e aumentando a reação do solo, devido à mobilização parcial do empuxo passivo do solo.

5 Conclusões

A maior perda de carga foi observada no tirante 51A, a perda foi de 53% da carga de instalação, em quanto o tirante com a menor perda de carga total (6%) ao longo do tempo foi o 34E. A perda média total foi de 25% e os tirantes dos níveis superiores reportaram maiores perdas que os tirantes dos níveis inferiores, este devido ao processo construtivo. As principais causas para a perda total da carga nos tirantes são: 1) redução imediata da carga do tirante 55%; 2) redução a longo prazo 28% e 3) redução devido ao carregamento de tirantes adjacentes 17%.

As cargas nos tirantes obtidas na instrumentação foram consistentes quando comparadas com os diagramas de pressões de terra estimados pelo diagrama proposto por Terzaghi e Peck (1967).

O método proposto por Terzaghi e Peck (1967) para o projeto de cortinas ancoradas é apropriado, possibilitando a análise rápida, por outra parte, o diagrama de Tschebortioff (1951) é menos conservador.

A análise numérica 2D realizada das seções 54 e 57, permitiu avaliar o desempenho da cortina nessas seções apresentando uma adequada concordância quando comparado aos dados obtidos na instrumentação e aos resultados do método de Terzaghi e Peck, apresentando algumas vantagens como modelar o processo construtivo e a interfase de materiais. No entanto, é recomendável estudar as outras seções da cortina, por exemplo, a 45 já que as três linhas inferiores de tirantes nessa seção se localizam na região de rocha sã, e pelo fato de ser um material mais rígido os deslocamentos seriam menores do que na região do solo.

A comparação da distribuição das tensões horizontais no solo após a execução da estrutura realizadas por instrumentação de campo e métodos numéricos deve ser cuidadosa, pois no campo existe heterogeneidade de materiais, variação de tensões e deslocamentos durante a execução da obra, o que conduz a estrutura a diferentes comportamentos durante sua execução.

Se sugere a modelagem 3D a fim de representar apropriadamente a variação dos perfis geológicos-geotécnicos das diferentes seções do projeto e a fim de complementar os dados experimentais de campo.

AGRADECIMENTOS

À GeoSlope pela licença de pesquisa do programa GeoStudio e a GEOFAST por sua mediação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). ABNT NBR 11.682: “Estabilidade de Encostas”. Rio de Janeiro, 33p.
- Bowles, J.E. (1996) *Foundation Analysis and Design*, 5th ed., International Edition, McGraw-Hill, Illinois, IL, USA, 154-166p.
- Geo-Slope (2020) Stress deformation modeling with Sigma/W, an engineering methodology. 335p.
- Polo, Y. E. (2015) *Retroanálise da Cortina Instrumentada da Ferrovia São Paulo – Santos (FEPASA – km 74)*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 161p.
- Rocha Filho, P., Zeitoune, N.M. (1984) Load Measurements of an Anchored Retaining Wall. *Proceedings of The International Conference on Cases Histories in Geotechnical Engineering*, v.1, p. 387-392.
- Terzaghi, K., Peck, R.B. (1967) *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, NY, USA, 685 p.
- Tschebotarioff, G.P. (1951) *Soil Mechanics: Foundations and Earth Structures*, McGraw Hill, New York, NY, USA, 655 p.
- Zeitoune, N.M. (1982) *Instrumentação e análise de uma cortina atirantada localizada no km 74 da ferrovia Santos – São Paulo, Fepasa*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 263 p.