

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/704

Análise Comparativa dos Deslocamentos Verticais Previstos em Modelagem Numérica e Registrados Durante a Escavação de Túnel de Adução em Colúvio/Tálus

Andressa Rizzi Kuzjman
Geóloga, G5 Engenharia, Curitiba, Brasil, ark@g5engenharia.com.br

Milena Arruda Silva
Geóloga Geotécnica, G5 Engenharia, Curitiba, Brasil, mas@g5engenharia.com.br

Isabela Grossi da Silva
Engenheira Civil Geotécnica, G5 Engenharia, Curitiba, Brasil, igs@g5engenharia.com.br

Ana Paula Mikos
Engenheira Civil Geotécnica, UFPR, Curitiba, Brasil, anapaulamikos@hotmail.com

Joaquim Duarte
Engenheiro Civil Geotécnico, G5 Engenharia, Curitiba, Brasil, jd@g5engenharia.com.br

RESUMO: A modelagem numérica do comportamento tensão-deformação é empregada em projetos de escavação subterrânea para a avaliação do comportamento da escavação. Por meio destas análises, obtêm-se os deslocamentos previstos com o avanço da escavação do túnel, os quais são dependentes das condições de contorno do modelo numérico e dos parâmetros geológico-geotécnicos adotados do maciço e dos tratamentos. Este trabalho tem como objetivo comparar os deslocamentos previstos em modelagem numérica e os deslocamentos registrados por meio de instrumentação geotécnica durante a escavação do desemboque do túnel de adução de uma Pequena Central Hidrelétrica (PCH) localizada no estado do Paraná. O túnel de adução foi escavado, em sua maior parte, em seção arco-retângulo em arenitos das Formações Piramboia e Rio do Rastro. Entretanto, no trecho próximo ao desemboque, cerca de 135 m de escavação se deu em solo coluvionar/tálus caracterizado pela presença de matacões, pedras e pedregulhos com argila arenosa de cor marrom, exigindo a implementação de arco invertido. Durante a escavação deste trecho do túnel, os deslocamentos do terreno foram acompanhados através de tassômetros e marcos superficiais instalados no talude de escavação do desemboque. Como resultado, é possível comparar os deslocamentos verticais previstos pela modelagem numérica e os deslocamentos registrados durante o avanço das escavações do túnel.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem Numérica, Deslocamento Vertical, Túnel de Adução, Instrumentação.

ABSTRACT: The numerical modeling of stress-strain behavior is employed in underground excavation projects to assess the behavior of the excavation. Through these analyses, predicted displacements are obtained with the advancement of tunnel excavation, which are dependent on the input conditions of the numerical model and the assumed geological-geotechnical parameters of the rock mass and treatments. This work aims to compare the predicted displacements in numerical modeling with the displacements recorded through geotechnical instrumentation during the excavation of the tunnel portal of a Small Hydroelectric Power Plant's headrace tunnel located in the state of Paraná. The tunnel was excavated, for the most part, by drill-and-blast with an arc-rectangular section in sandstones of the Piramboia and Rio do Rastro Formations. However, at the tunnel portal about 135 m of excavation was carried out in colluvial/talus soil characterized by the presence of large rocks, stones, and pebbles with sandy clay of brown color and an inverted arch had to be implemented. During the excavation of this stretch of the tunnel, vertical displacements in the terrain were monitored by deep and surficial settlement markers installed on the excavation slope of the tunnel portal. As a result, it is possible to compare the displacements predicted by numerical modeling and the displacements recorded during the advancement of the tunnel excavations.

KEYWORDS: Numerical Modeling, Vertical Displacement, Intake Tunnel, Geotechnical instrumentation.

1 INTRODUÇÃO

Na implantação de usinas hidrelétricas, a alternativa com túnel de adução é selecionada para compor o sistema hidráulico de geração quando as condições topográficas, geológicas e geotécnicas não favorecem a adução da água por canais e condutos (Oliveira, 2017). Neste caso, as condições geológicas e geotécnicas do maciço são mapeadas com o avanço das escavações, de forma que os tratamentos necessários são definidos de acordo com as observações realizadas em campo.

Em complemento, o projeto de obras subterrâneas deve contemplar a utilização de modelagens numéricas do comportamento tensão-deformação do maciço, de forma a avaliar os deslocamentos previstos com o avanço da escavação do túnel, os quais são dependentes das condições de entrada do modelo numérico e dos parâmetros geológico-geotécnicos utilizados.

Conforme descrito por Silveira (2006), estruturas geotécnicas devem ser monitoradas quando há questões a serem acompanhadas durante a construção ou operação do empreendimento. No caso de túneis, o monitoramento é realizado durante a fase de escavação e, eventualmente, durante a vida útil do túnel (Melo, Albuquerque e Garcia, 2017). A combinação da modelagem numérica na previsão dos deslocamentos com o plano de monitoramento da escavação auxilia na avaliação do comportamento do maciço, assim como na previsão de deslocamentos e distorções induzidas pela escavação que possam provocar um eventual colapso da estrutura. Assim, é possível programar as medidas corretivas a serem adotadas em caso de alguma mudança do comportamento observado do maciço em relação ao previsto. Neste caso, foram utilizadas análises numéricas de tensão-deformação que possuem os parâmetros de elasticidade, como módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, como os de maior influência na modelagem. No entanto, nos modelos numéricos, as condições de contorno adotadas regem o comportamento da estrutura e estão relacionadas aos resultados obtidos.

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo comparar os deslocamentos verticais previstos em modelagem numérica e os deslocamentos registrados por meio de instrumentação geotécnica instalada no desemboque de um túnel de adução de uma Pequena Central Hidrelétrica localizada no estado do Paraná.

2 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TÚNEL DE ADUÇÃO

O túnel de adução em análise faz parte do circuito de geração da PCH, o qual também é composto por um canal de adução e um conduto forçado até a casa de força do empreendimento. O túnel de adução apresenta aproximadamente 1,0 km de extensão e conduz a água do reservatório a partir da estrutura da tomada de água de baixa pressão localizada no emboque do túnel, até o desemboque, a partir de onde a água é conduzida na sequência por um canal de adução com aproximadamente 2,7 km.

A estrutura do túnel de adução foi escavada, em sua maior parte por meio de explosivos em seção arco-retângulo com altura e largura de 4,5 m, em arenitos das Formações Piramboia e Rio do Rastro. Entretanto, no desemboque do túnel, cerca de 135 m de escavação foi efetuado por meio de retro-escavadeira em solo coluvionar/tálus caracterizado pela presença de matacões, pedras e pedregulhos com argila arenosa de cor marrom exigindo a implementação de um arco invertido para garantir sua estabilidade. Nesta região, a seção do túnel apresenta 5,7 m de diâmetro, sendo 1,54 m do arco invertido. Devido à presença de solo coluvionar/tálus, o talude do desemboque do túnel foi escavado com bancadas intermediárias de 10 m de altura da El. 658 m à El. 617 m, sendo esta última a cota aproximada do piso do túnel nesta região.

Os tratamentos do túnel consistiram majoritariamente, na região escavada em rocha, na aplicação de concreto projetado, tela metálica e ancoragens passivas. Já na seção do túnel em solo, isto é, no desemboque, foram aplicadas cambotas metálicas treliçadas e concreto projetado, além de drenos horizontais profundos (DHPs) utilizados para a drenagem da água presente no maciço e consequentemente a diminuição do nível freático.

Para a caracterização dos materiais que compõem o maciço em que o túnel de adução foi escavado, foram realizadas sondagens mistas, caracterizadas por serem um método direto de investigação, em que a sondagem a percussão com medida de N_{SPT} é realizada nos trechos em solo. Associada à sondagem a percussão, é realizada a sondagem rotativa no trecho abaixo de onde se encontra o nível impenetrável à percussão no furo

de sondagem, com coleta dos testemunhos do maciço rochoso, o qual é caracterizado a partir dos parâmetros de recuperação, índice RQD, alteração, fraturamento, entre outros.

Em complemento, também foram realizados ensaios de laboratório com amostras deformadas para a caracterização dos materiais, como granulometria, obtenção dos limites de Atterberg e massa específica real dos grãos. Amostras indeformadas também foram coletadas para a realização de ensaio de cisalhamento direto e triaxial CIU. Ambos os ensaios são utilizados para obtenção dos parâmetros de resistência do solo (ângulo de atrito e coesão), considerando a envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb. No ensaio de cisalhamento direto, a amostra de solo é submetida a uma tensão normal fixa e a uma tensão cisalhante crescente até que a ruptura por cisalhamento do solo ocorra. O ensaio triaxial CIU (adensado não drenado) consiste na aplicação de tensões confinantes em uma amostra de solo permitindo a drenagem da água apenas na fase de adensamento, de forma que não ocorre a variação de volume do corpo de prova durante o carregamento axial. Na fase do cisalhamento não se permite a drenagem da água e o incremento de tensão axial é realizado até o rompimento do corpo de prova com medida concomitante da pressão neutra na amostra.

3 METODOLOGIA

Este item apresenta os dados necessários para a elaboração da análise numérica deste trabalho, apresentando a caracterização geológico-geotécnica dos materiais, definição das seções e instrumentos instalados, parâmetros adotados e concepção do modelo numérico.

3.1 Caracterização Geológico-geotécnica

O reconhecimento dos materiais existentes na área de interesse foi realizado através de ensaios realizados em campo, sendo executados neste caso sondagens mistas e ensaios de laboratório. Com base nas sondagens executadas, o perfil geológico-geotécnico foi definido com presença de colúvio/tálus na camada superficial com espessura entre 3 e 5 m na região em que o túnel foi escavado em rocha e a rocha definida como arenito com classificação R1 (rocha muito branda, resistência à compressão uniaxial entre 1 e 5 MPa). Na região do desmboque do túnel de adução, a escavação se deu completamente em solo em cerca de 135 m de comprimento, sendo que no trecho mais profundo a espessura do colúvio/tálus foi de cerca de 50 m com relação ao terreno natural. Nesta região, o nível d'água foi encontrado a aproximadamente 21 m de profundidade, também em relação ao terreno natural, próximo a El. 624 m. As sondagens mistas realizadas na região de estudo classificaram o material colúvio/tálus como solo argilo-arenoso com presença de matações, pedras e pedregulhos e o N_{SPT} médio resultou em 17 para este material. Os testemunhos da sondagem rotativa, coletados neste mesmo material, apresentaram grande variação no valor de recuperação resultando entre 20 e 90%, no entanto, os demais parâmetros referentes à classificação de rocha como índice RQD, alteração, consistência e grau de fraturamento retornaram nulos, devido à presença de matações no solo coluvionar. O solo coluvionar foi ensaiado em laboratório através de ensaio de caracterização completa e da retirada de blocos indeformados em 7 locais diferentes para execução de ensaios de cisalhamento direto e triaxial tipo CIU. Através do compilado de informações de observações de campo, ensaios de campo e de laboratório os parâmetros dos solos puderam ser estimados considerando a variabilidade geotécnica.

3.2 Instrumentação

O monitoramento geotécnico deve ter clareza nos principais parâmetros a serem observados para compreensão do comportamento da estrutura de acordo com seu tipo, material existente no local e resultados esperados. No caso do presente estudo, de acordo com a estrutura geotécnica construída e material existente na região, isto é, túnel escavado em solo, a instrumentação para medição dos deslocamentos verticais foi composta por marcos superficiais e tassômetros. A precisão dos resultados depende da precisão do equipamento utilizado para a realização das leituras e o acompanhamento é feito de forma comparativa com a leitura inicial (antes do início da escavação) ao longo do decorrer do tempo.

Os marcos superficiais são instrumentos utilizados para medir o recalque na superfície do terreno, sendo possível também o acompanhamento da movimentação do ponto em planta através de suas coordenadas. Estes são instalados cerca de 0,5 a 1,0 metro de profundidade e possuem a leitura realizada através de estação total de topografia. Os tassômetros são instrumentos utilizados para medir o recalque em profundidade e são

normalmente instalados a cerca de 1,0 a 1,5 metros acima da geratriz superior do túnel, sendo possível também o acompanhamento do deslocamento do ponto em planta. A leitura também é realizada através de estação total de topografia. Utilizando estes dois tipos de instrumentação faz-se o acompanhamento dos deslocamentos verticais tanto em profundidade quanto em superfície durante a escavação do túnel, monitorando, assim, o comportamento do maciço frente a esta escavação.

3.3 Seção de Análise e Instrumentos Instalados

Para se obter a comparação entre a análise numérica e a instrumentação instalada, foi estudada uma seção transversal do túnel de adução escavado em trecho de solo com cerca de 8,00 m de profundidade localizada na berma da El. 631,87 m, incluindo o tassômetro TAS-703 e também os marcos superficiais MS-706 a MS-710. A Figura 1 exhibe a seção longitudinal ao eixo do túnel em seus 50 m finais de escavação, mostrando a geometria após as obras de escavação dos taludes que antecederam a escavação do túnel e a localização dos instrumentos utilizados para a comparação deste estudo.

Dentre os medidores de deslocamento superficial instalados na região do desemboque do túnel de adução, foram considerados para a análise 10 marcos superficiais, sendo que cinco deles (MS-706 a MS-710) foram instalados na berma inferior (El. 631,87 m), e os outros cinco (MS-712 a MS-716) na berma superior (El. 639,24 m). Foram analisados também 2 tassômetros, sendo um deles instalado na vertical correspondente à berma inferior (TAS-703) e outro na berma superior (TAS-702).

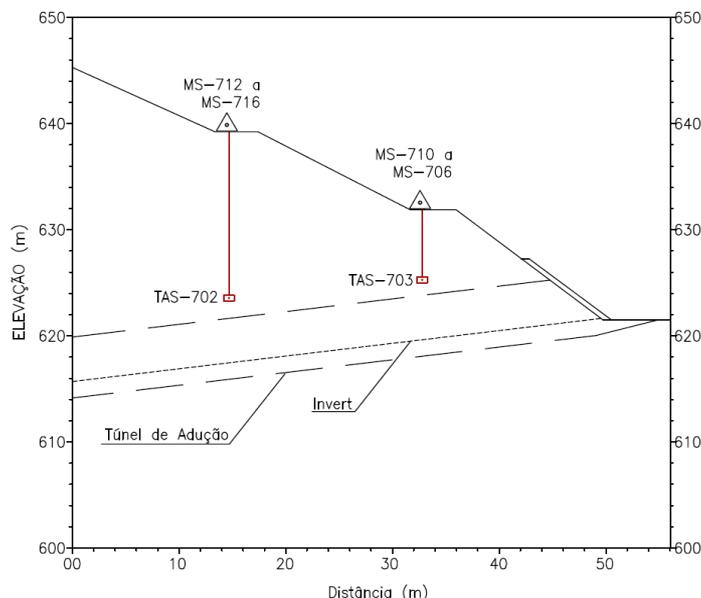


Figura 1. Seção longitudinal ao desemboque do túnel.

3.4 Parâmetros Adotados

Com base nos ensaios de caracterização realizados, o solo foi classificado como argilo-arenoso com plasticidade média a alta. A média do peso específico resultou em 18 kN/m³, a coesão efetiva média obtida dos ensaios de cisalhamento direto e triaxial foi de 20 kPa e o ângulo de atrito efetivo de 27°. Entretanto, entende-se que os resultados dos parâmetros de resistência do material ensaiado não são representativos do maciço como um todo, uma vez que o solo natural presente *in situ* apresenta pedregulhos e matacões com diferentes dimensões fazendo com que a matriz do solo tenha uma estrutura divergente em termos de compactidade e arranjo estrutural daquela da amostra indeformada ensaiada em laboratório, resultando em uma menor resistência do material na condição *in situ*. Dessa forma, para a análise numérica os parâmetros de coesão efetiva e ângulo de atrito efetivo apresentados na Tabela 1 foram minorados quando comparados com as médias dos resultados dos ensaios de laboratório.

Com base na literatura (Teixeira e Godoy, 1996; Cintra, Aoki e Albiero, 2011), o valor do coeficiente de Poisson varia entre 0,2 e 0,4 para areias, a depender de sua compactidade, e de 0,1 a 0,5 para argilas de acordo com a condição de saturação. O módulo de elasticidade foi calculado pela Eq. 1 (Schnaid e Odebrecht, 2012) e comparado com os dados de Joppert (2007). A Eq. 2 (Jacky, 1944 *apud* Pinto, 2006) foi utilizada para

a estimativa do coeficiente de empuxo no repouso (K_0). Os parâmetros adotados apresentados na Tabela 1 são os necessários para a realização da análise numérica que é um dos objetivos deste trabalho.

$$E = 2,01 N_{SPT,60} [MPa] - Schnaid e Odebrecht (2012) \quad (1)$$

$$K_0 = 1 - \sin \varphi \quad (2)$$

Tabela 1. Parâmetros adotados

Parâmetro	Unidade	Valor adotado
Peso específico natural – γ_{nat}	kN/m ³	18
Coesão efetiva – c'	kPa	10
Ângulo de atrito efetivo – φ'	Graus	26
Módulo de elasticidade – E	MPa	20
Coefficiente de Poisson – ν	-	0,3
Coefficiente de empuxo no repouso – K_0	-	0,56

3.5 Modelo Numérico

Para a análise numérica foi utilizado o *software* RS2 da Rocscience em que se modelou uma seção do terreno com o túnel na região central, com 25 metros para cada lado no modelo, em relação ao eixo do túnel, e 8 m abaixo do arco invertido. O topo do terreno foi definido com base na elevação da berma inferior (El. 631,87 m) apresentada na seção longitudinal. Para as condições de contorno, o nível de água foi aplicado na profundidade verificada pelas sondagens, e se restringiu a movimentação XY do modelo nas laterais e na base, deixando apenas a superfície superior livre para movimentação. Por fim, para a construção da malha, considerou-se triangulações com 6 vértices, e sua densidade foi definida com base nas geometrias e necessidades de cálculo, aumentando a densidade da malha na superfície do terreno, na região do túnel e na profundidade dos tassômetros analisados.

Além disso, foi utilizado o método de análise Gausseano em que se considerou apenas a etapa de escavação final do túnel, com a aplicação de concreto projetado com 40 cm de espessura na abóbada e no arco invertido do túnel. Foram utilizados os parâmetros do concreto projetado após 28 dias de aplicação em que a resistência considerada foi de 30 MPa e o módulo de elasticidade de 26,90 MPa. O túnel foi escavado em material colúvio-aluvionar e, para o modelo, foi considerada uma camada homogênea de solo em que os parâmetros de entrada foram os apresentados na Tabela 1.

4 RESULTADOS

Na sequência são apresentados os resultados obtidos na modelagem numérica, assim como as leituras registradas pela instrumentação geotécnica instalada na região de escavação do túnel.

4.1 Resultados da Modelagem Numérica

Como resultado da análise numérica para o desemboque do túnel, obteve-se um deslocamento vertical máximo (Figura 2) na superfície do terreno no eixo do túnel de 30,7 mm, região em que estão instalados os marcos superficiais MS-708 e MS-714, bem como deslocamento vertical máximo de 46,30 mm em profundidade, próximo à abóbada do túnel, região em que estão instalados os tassômetros TAS-702 e TAS--703.

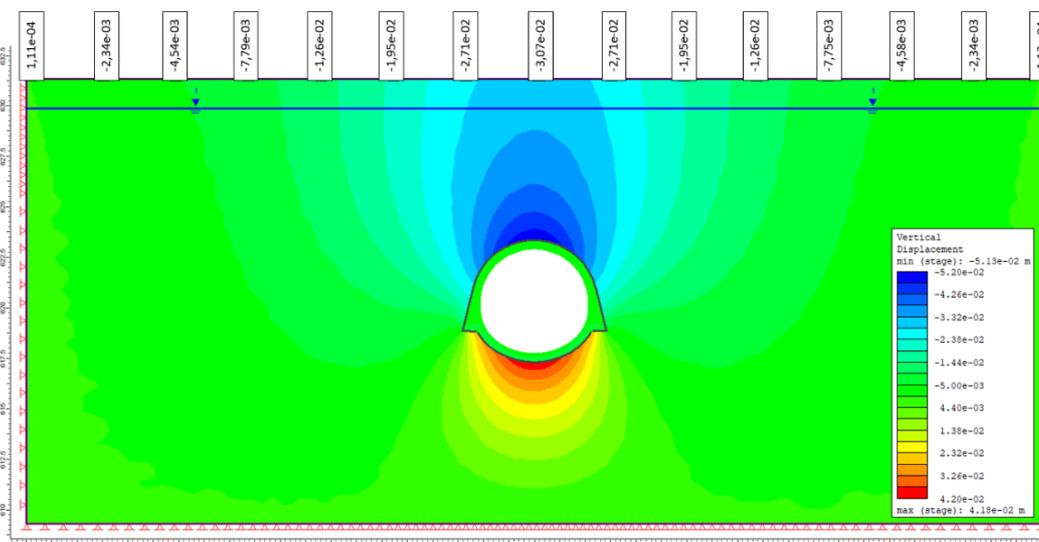


Figura 2. Modelo numérico - Deslocamento vertical em metros.

4.2 Leituras Medidas pela Instrumentação Geotécnica

Neste item são apresentadas as leituras medidas durante o monitoramento das escavações na região de desemboque do túnel de adução pela instrumentação geotécnica. Os dados foram analisados considerando que a passagem da frente de escavação na região da seção de análise ocorreu entre 15 de setembro e 10 de outubro de 2022.

4.2.1 Tassômetros

Conforme apresentado no item 3.3, foram instalados um tassômetro em cada uma das bermas, denominados de TAS-702 (berma superior, El. 639,24 m) e TAS-703 (berma inferior, El. 631,87 m). A Figura 1 exibe as leituras medidas nestes instrumentos com a indicação da passagem da frente de escavação na seção, assim como da execução do arco invertido.

Após a passagem da frente de escavação e da escavação do arco invertido, o tassômetro TAS-702 apresentou um recalque máximo de aproximadamente 30 mm. Já no TAS-703, com a passagem da frente de escavação e antes da escavação do arco invertido ocorreu o recalque máximo de aproximadamente 10 mm.

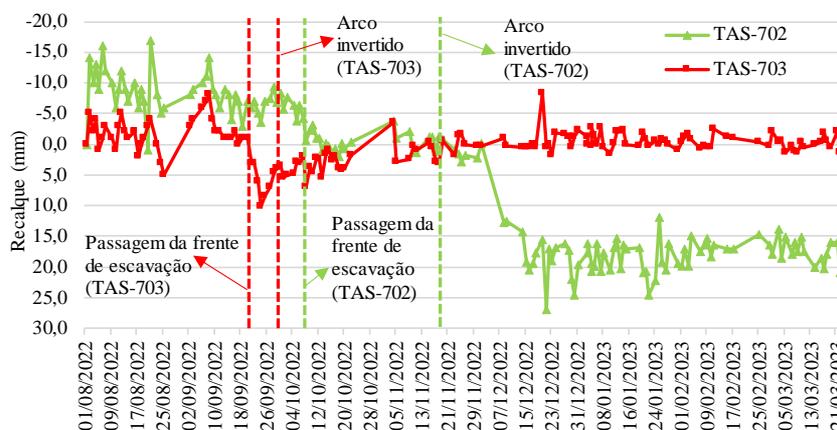


Figura 1. Leituras registradas nos tassômetros.

4.2.2 Marcos Superficiais

Foram instalados 5 marcos superficiais ao longo de cada berma: sendo na berma superior (El. 639,24 m) MS-712 ao MS-716 e na berma inferior (El. 631,87 m), MS-706 ao MS-710. A Figura 2 apresenta as leituras

de recalque registradas nas duas bermas. Nos gráficos são apresentadas a leitura inicial, 5 leituras antes da passagem da frente de escavação, 5 leituras após a passagem da frente de escavação e, em destaque em cada gráfico, a última leitura registrada em cada seção de análise referente ao perfil de recalque superficial gerado após a escavação do túnel. Na berma superior, a passagem da frente de escavação ocorreu no dia 7 de outubro de 2022, e o recalque máximo foi registrado aproximadamente no eixo do túnel, com um valor de 31 mm. Na berma inferior, a passagem da frente de escavação ocorreu no dia 20 de setembro de 2022, o recalque máximo foi registrado a 10,00 m do eixo do túnel na direita hidráulica, sendo de 14 mm.

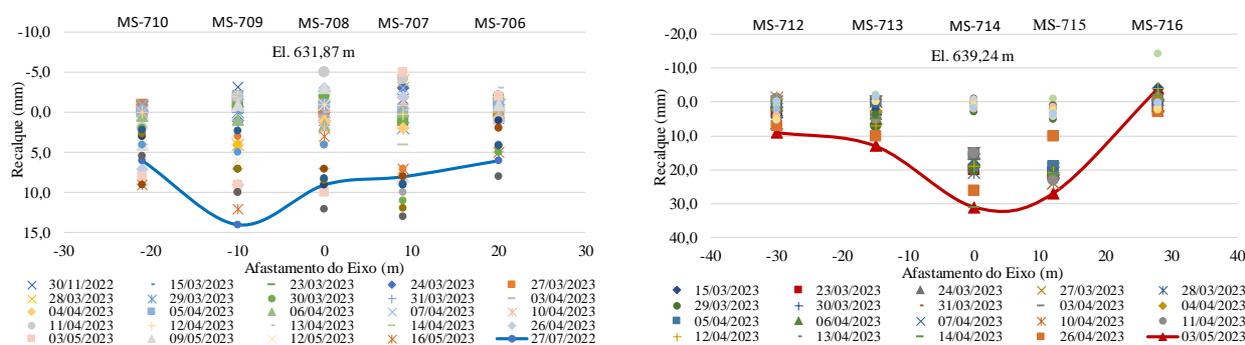


Figura 2. Leituras registradas nas linhas dos marcos superficiais.

4.3 Análise Comparativa dos Deslocamentos Previstos e Medidos

A Tabela 2 apresenta um resumo da comparação dos deslocamentos verticais obtidos do modelo numérico e aqueles medidos em campo pela instrumentação geotécnica. Verifica-se que a maior diferença entre as movimentações medidas foi obtida entre a instrumentação instalada em superfície e a instalada em profundidade.

Para os marcos superficiais, o maior deslocamento medido na berma inferior foi no MS-709, o qual apresentou recalque de 11,11% a mais do que o valor medido em campo, já para a berma superior, essa diferença foi menor, com 0,98% de acréscimo na movimentação em relação ao deslocamento previsto em modelagem. Em relação à instrumentação geotécnica instalada em profundidade, ocorreu maior variação entre os valores medidos e calculados, para a berma inferior, a movimentação foi 76,30% a menos que o previsto para o TAS-703 e 35,21% a menos para o TAS-702 do indicado pelo modelo numérico.

Com base nestas informações, é possível identificar que a modelagem superestimou os valores de deslocamento em profundidade e, para os recalques superficiais, a modelagem subestimou os deslocamentos. Essa variação é atribuída aos dados de entrada considerados para a realização da modelagem (Tabela 1), já que o material da região não era homogêneo possuindo matacões, pedras e pedregulhos em meio a argila arenosa, logo, os dados de entrada, não representam a região como um todo.

Tabela 2. Comparação entre o modelo numérico e os dados obtidos em campo

Instrumento	Distância do eixo (m)	Deslocamento vertical - Modelo numérico (mm)	Deslocamento vertical - Medido em campo (mm)	Diferença em módulo entre instrumentação e modelo (%)
MS-714	0,00	30,70	31,00	0,98
MS-709	10,00	12,60	14,00	11,11
TAS-702	1,22	46,30	30,00	35,21
TAS-703	1,15	42,20	10,00	76,30

6 CONCLUSÃO

A partir da comparação dos deslocamentos previstos em modelagem numérica com os deslocamentos medidos pela instrumentação geotécnica foi possível identificar que na seção de menor cobertura (igual a um diâmetro do túnel), o modelo superestimou em 76,30% os deslocamentos em profundidade e subestimou em

11,11% os deslocamentos superficiais. Em complemento, para a seção de maior cobertura (mais de um diâmetro do túnel), foi possível verificar que os deslocamentos foram mais assertivos, sendo que as movimentações em superfície indicadas pelo modelo apresentaram pouca diferença dos deslocamentos medidos em campo (0,98%). Já quando comparados os deslocamentos em profundidade, verificou-se que os valores foram diferentes com erro aproximado de 35%. Este resultado foi obtido específico para a análise realizada e não deve ser considerada como regra para outros estudos.

Com base nesses valores, as análises forneceram resultados mais próximos dos reais para os deslocamentos superficiais com uma margem de erro considerada aceitável (em torno de 11%), no entanto, os dados da modelagem foram subestimados, gerando, assim, um resultado menos conservador. Quando comparados os resultados dos recalques em profundidade, os dados foram mais divergentes, com erro aproximado de 35 e 76%, sendo que os valores obtidos pela modelagem numérica forneceram valores conservadores aos obtidos em campo. Esta variação entre real *versus* estimado pode ser causada pela heterogeneidade e a variabilidade espacial dos materiais presentes no terreno.

O trabalho também demonstra a importância da realização da modelagem numérica, assim como, da qualidade dos dados de entrada considerados para verificar os deslocamentos previstos durante a implantação de um projeto de obras subterrâneas, de forma a subsidiar a análise dos dados obtidos durante o monitoramento da instrumentação em campo. Na análise de previsão de recalque, como a desenvolvida no presente estudo, o módulo de elasticidade é o parâmetro de entrada que mais influência no resultado. Além disso, as condições de contorno arbitradas foram definidas visando a obtenção dos recalques na superfície do terreno.

A escavação do túnel de adução no trecho crítico efetuado em colúvio e tálus próximo ao desemboque apresentou desempenho favorável tanto na fase de construção como posteriormente durante a fase de operação da usina, iniciada após o enchimento do circuito de adução no final de maio de 2023.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à G5 Engenharia pela disponibilização das informações e *softwares* utilizados neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cintra, J. C. A.; Aoki, N.; Albiero, J. H. (2011) *Fundações Diretas: Projeto Geotécnico*. São Paulo: Oficina de Textos.
- Godoy, N. S.; Teixeira, A. T. (1996) *Análise, projeto e execução de fundações rasas. Fundação: Teoria e Prática*. São Paulo: Pini Ltda.
- Joppert Jr, I. (2007) *Fundações e Contensões de Edifícios: Qualidade Total na Gestão do Projeto e Execução*. São Paulo: Pini Ltda.
- Melo, R. A. A.; Albuquerque, P. J. R.; Garcia, J. R. (2017) Análise da Instrumentação Durante a Escavação de Túnel de Baixa Cobertura em Solo sob uma Rodovia em Operação. In: 4º Congresso Brasileiro de Túneis e Estruturas Subterrâneas.
- Oliveira, B. A. de. (2017) *Conhecendo os componentes de uma usina hidrelétrica*. São Paulo: Oficina de Textos.
- Pinto, C. de S. (2006) *Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas: 3ª edição*. São Paulo: Oficina de Textos.
- Schnaid, F.; Odebrecht, E. (2012) *Ensaio de Campo e suas Aplicações à Engenharia de Fundações: 2ª edição*. Oficina de Textos.
- Silveira, J. F. A. (2006) *Instrumentação e Segurança de Barragens de Terra e Enrocamento*. Oficina de Textos.