

Análise do comportamento de uma escavação em solo grampeado

Jordana Furman

Engenheira Geotécnica, Head5 Engenharia, Curitiba, Brasil, jordana.furman@head5.com.br

Lucas Ghion Zorzan

Engenheiro Geotécnico, Head5 Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, lucas.zorzan@head5.com.br

RESUMO: A instrumentação geotécnica tem assumido um papel cada vez mais relevante na execução de obras de engenharia, especialmente em obras de escavação, subsidiando o monitoramento de movimentos de maciços rochosos e terrosos. O presente trabalho tem como objetivo apresentar um estudo de caso com a avaliação do comportamento da instrumentação de uma obra de escavação em um talude de solo residual de filito, com cerca de 32 m de altura. Dentre as técnicas utilizadas para estabilização definitiva da escavação, destaca-se a execução de solo grampeado com face em concreto projetado. O monitoramento geotécnico se deu a partir da leitura de marcos superficiais instalados no talude a ser contido, a fim de se detectar possíveis movimentações durante o avanço da escavação e execução dos tratamentos. O monitoramento geotécnico permitiu um acompanhamento do desempenho da obra durante todas as fases de implantação. A partir dos dados da instrumentação foi possível verificar que não houveram movimentações significativas no sentido do declive da encosta, garantindo uma implantação segura da estrutura de contenção. O estudo também propõe uma metodologia para monitoramento do talude após o término das obras, considerando a velocidade de deslocamentos ao longo do tempo de vida útil da estrutura de contenção.

PALAVRAS-CHAVE: Instrumentação, monitoramento, escavação, contenções.

ABSTRACT: Geotechnical instrumentation has played an increasingly important role in engineering works, particularly in excavation projects, by enabling the monitoring of displacements in rock and soil masses. This study aims to present a case study evaluate the behavior of an excavation in residual phyllite soil, approximately 32 meters in height. The permanent stabilization techniques employed consist of soil nailing combined with a shotcrete facing. Geotechnical monitoring was conducted through readings of surface markers installed on the slope to be retained, with the objective of detecting potential movements during the excavation process and the implementation of stabilization measures. This monitoring allowed for performance tracking of the structure throughout all phases of construction. Instrumentation data indicated that no significant downslope movements occurred, ensuring the safe construction of the retaining structure. Additionally, the study proposes a methodology for post-construction monitoring of the slope, considering displacement rates over the service life of the retaining system.

KEYWORDS: Instrumentation, geotechnical monitoring, excavations, retaining structures.

1 INTRODUÇÃO

A observação e a auscultação de obras geotécnicas consistem na aplicação de métodos e instrumentos especializados para a medição de grandezas físicas, visando à compreensão do comportamento estrutural, bem como à avaliação da segurança e da funcionalidade da obra durante sua fase de construção e operação (Gusmão Filho, 2006).

A instrumentação aplicada ao controle e monitoramento de obras geotécnicas constitui um componente fundamental no contexto da segurança de escavações a céu aberto. Um plano de instrumentação bem planejado e implementado permite o acompanhamento e avaliação do desempenho da estrutura ao longo de suas diferentes fases de implantação e operação. Esse monitoramento contínuo é essencial para a identificação precoce de anomalias, contribuindo para a tomada de decisões técnicas em tempo adequado, assegurando a integridade e a segurança da estrutura.

O uso da instrumentação demanda avaliação e análise para a definição dos níveis de controle, seja para a fase de implantação, quanto para a o período de vida útil da contenção. Embora o monitoramento faça parte

da prática da engenharia geotécnica desde os primórdios, as questões metodológicas para definição de níveis de controle ainda é bastante variável e dependente das condições particulares de cada projeto, empreendimento e condicionantes específicas. Para estruturas em aterro, como barragens, a literatura técnica nacional permite a obtenção de boas referências (Silveira, 2006; Cruz, 2014). Para escavações, todavia, permanece o desafio técnico.

A execução de escavações induz a redistribuição das tensões no maciço de solo, resultando em movimentações da massa de solo. A estimativa dos deslocamentos associados a esse processo constitui um desafio significativo, considerando as diversas variáveis envolvidas no processo, como as características do material escavado, geometria e magnitude da escavação, além da velocidade e qualidade do método executivo (Milititski, 2016). Neste sentido, a troca de experiências bem sucedidas no monitoramento geotécnico é uma ferramenta importante para aprimoramento das técnicas aplicáveis em obras geotécnicas, em especial de contenções, considerando as particularidades de cada obra.

2 DESCRIÇÃO DA OBRA

A obra consistiu em uma escavação e estabilização de um maciço em solo residual de filito, com aproximadamente 32 m de altura máxima. O projeto em questão fez utilização da técnica de solo grampeado com face em concreto projetado para estabilização definitiva da escavação do talude. O projeto da contenção englobou cerca de 1800 m² de contenção com 14.633 m de chumbadores distribuídos na face de escavação, totalizando 972 grampos.

As escavações foram feitas com equipamentos mecanizados em bancadas, seguidas de limpeza da face do talude para instalação da tela metálica e aplicação de concreto projetado. Utilizou-se a técnica de solo grampeado, com execução de furos de 100 mm para inserção de chumbadores em barras de aço CA-50, com 16 m de comprimento, inclinadas a 20° e espaçadas a 1,5 m. O talude foi revestido com tela de aço CA-60 e concreto projetado em duas camadas, totalizando 10 cm de espessura e resistência de 25 MPa. A drenagem foi garantida por drenos barbacãs com tubos de PVC.

3 PLANO DE MONITORAMENTO GEOTÉCNICO

A instrumentação instalada objetivou monitorar o talude a ser contido pela contenção com marcos superficiais e teve por objetivo detectar a ocorrência de eventuais recalques e deslocamentos horizontais no talude de escavação e, posteriormente, na estrutura de contenção durante as fases construtiva e definitiva. Esse monitoramento foi concebido para detectar a ocorrência de eventuais anomalias de forma que pudessem ser identificadas e solucionadas em tempo hábil. Para o monitoramento das escavações, foram instalados 09 (nove) marcos superficiais. A Figura 1 e a Tabela 1 apresentam as informações referentes a instalação dos instrumentos.

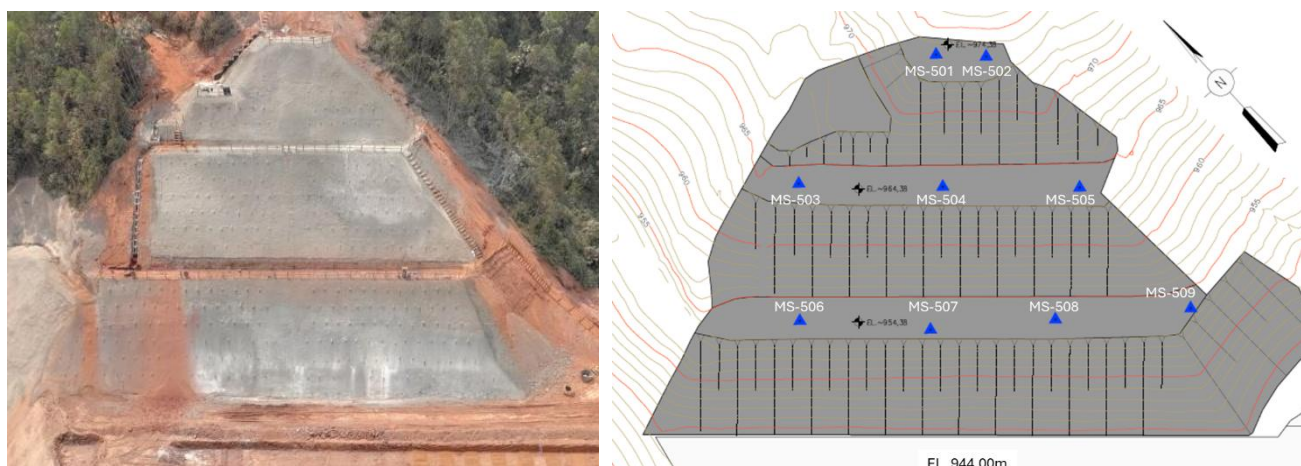


Figura 1. Vista aérea da contenção em fase final de construção (à esquerda) e locação em planta da instrumentação da contenção (à direita).



Tabela 1. Dados de instalação dos marcos superficiais.

Instrumento	Cota de Instalação (m)	Instrumento	Cota de Instalação (m)
MS-501	974,054	MS-506	954,788
MS-502	974,113	MS-507	954,857
MS-503	964,806	MS-508	954,848
MS-504	964,853	MS-509	954,670
MS-505	964,727		

4 DEFINIÇÃO DOS VALORES DE CONTROLE PARA A FASE DEFINITIVA

Os valores de controle das leituras dos instrumentos foram divididos, sempre que aplicável, conforme o Nível de Risco associado a cada situação. As seguintes definições de Nível de Risco podem ser consideradas, conforme citado por Bretas (2022):

- Nível Normal → Resultados satisfatórios para o comportamento da estrutura, apresentando leituras de monitoramento de acordo com os níveis esperados e estabelecidos no projeto de auscultação (nível de referência ou nível de projeto);
- Nível de Atenção → Desvio do comportamento estabelecido, apresentando um resultado pontual e fora do padrão em relação à segurança da estrutura, exigindo atenção especial e monitoramento constante. Se durante o monitoramento constante os níveis apresentarem uma tendência de comportamento, medidas corretivas de segurança poderão ser tomadas. Ressalta-se que o nível de atenção não necessariamente corresponde a um limiar determinado, pois alterações no comportamento estabilizado do instrumento devem ser tratadas também como nível de atenção;
- Nível de Alerta → Evolução do Nível de Atenção em que ações/intervenções deverão ser tomadas para mitigar/corrigir os resultados não satisfatórios que sofreram uma evolução de comportamento em relação ao nível anterior, exigindo alerta e medidas corretivas de segurança;

4.1 Níveis de Controle para a Fase Construtiva

Os níveis de controle propostos para o acompanhamento dos deslocamentos durante a fase construtiva foram determinados em termos de deslocamentos horizontais e verticais absolutos, comparando-se estes aos deslocamentos que o talude experimentou durante a sua fase de escavação.

Os deslocamentos máximos admissíveis da contenção foram definidos com base no manual americano de solo grampeado FHWA-NHI-132085 – *Soil Nail Walls Reference Manual*. Os valores de referência para o deslocamento horizontal (δ_h) podem ser obtidos a partir da seguinte equação:

$$\delta_h = \left(\frac{\delta_h}{H} \right)_i H \quad (1)$$

Em que $(\delta_h/H)_i$ é uma razão que depende da característica do material do talude e H corresponde a altura do talude. Considerando que o perfil geológico do talude de escavação corresponde ao solo residual de filito e que este material é constituído predominantemente por material fino, o manual FHWA-NHI-132085 recomenda para solos finos valores de $1/333$ para a relação $(\delta_h/H)_i$.

O nível de alerta para os deslocamentos horizontais foi definido conforme o deslocamento máximo esperado para solos finos, ou seja, foi adotada a relação de $H/333$, sendo H a altura do talude entre a elevação da berma de instalação do marco superficial e a elevação da berma inferior da escavação. Por sua vez, o nível de atenção foi definido como 80% do deslocamento do nível de alerta.

Conforme apresentado em Souza (2020), os níveis de atenção e alerta para os deslocamentos horizontais geralmente são superiores aos níveis de controle dos deslocamentos verticais. Esta diferença de valores entre critérios de deslocamentos horizontais e verticais encontra-se relacionada com o fato de a ocorrência de deslocamentos verticais serem mais relevantes para a segurança e estabilidade da contenção, quando comparados com valores de deslocamentos horizontais. Por este motivo, são definidos valores



limites menores para os deslocamentos verticais ($\delta_v = \delta_h/2$), permitindo a detecção mais rápida de possíveis fenômenos de instabilidade, podendo-se assim atuar sobre os mesmos de maneira hábil.

A Tabela 2 apresenta os valores dos níveis de controle estabelecidos para os marcos superficiais durante a fase construtiva, considerando a altura média do talude de escavação para cada grupo de instrumentos.

Tabela 2. Níveis de Controle estabelecidos para a fase construtiva em função dos deslocamentos.

Instrumento	$H_{méd}$ (m)	Nível de Controle		
		Normal	Atenção	Alerta
MS-501, MS-502	30	$\delta_h \leq 72$ mm $\delta_v \leq 36$ mm	$72 \text{ mm} < \delta_h < 90$ mm $36 \text{ mm} < \delta_v < 45$ mm	$\delta_h \leq 90$ mm $\delta_v \leq 45$ mm
MS-503, MS-504 e MS-505	20	$\delta_h \leq 48$ mm $\delta_v \leq 24$ mm	$48 \text{ mm} < \delta_h < 60$ mm $24 \text{ mm} < \delta_v < 30$ mm	$\delta_h \leq 60$ mm $\delta_v \leq 30$ mm
MS-506, MS-507, MS-508 e MS-509	10	$\delta_h \leq 24$ mm $\delta_v \leq 12$ mm	$24 \text{ mm} < \delta_h < 30$ mm $12 \text{ mm} < \delta_v < 15$ mm	$\delta_h \leq 30$ mm $\delta_v \leq 15$ mm

4.2 Níveis de Controle para a Fase Definitiva (Pós-Obra)

Os níveis de controle das deformações (horizontais e verticais) para a fase definitiva da contenção foram definidos a partir de taxas de deslocamento com o tempo. Os valores de referência apresentados neste item foram definidos a partir de referências bibliográficas, da qual destacam-se as publicações de Souza (2020), Slob *et al.* (2007) e Intrieri *et al.* (2012).

Sabe-se que antes da deflagração de um evento de ruptura pode existir um deslocamento relativo acentuado que progride gradualmente, e que este comportamento poderia ser identificado considerando-se as taxas de deslocamento com o tempo. Quanto maiores as taxas de deslocamento ao longo do tempo, mais próxima a estrutura monitorada encontra-se da ruptura, e, por outro lado, se estas taxas diminuírem com o tempo, a instrumentação pode estar indicando um processo estabilizante.

A velocidade de deslocamento para fins do acompanhamento dos marcos superficiais foi considerada como sendo $v = \Delta\delta/\Delta t$ (mm/dia), onde $\Delta\delta$ é a diferença entre deslocamentos sucessivos medidos para um mesmo instrumento e Δt é o intervalo de tempo entre leituras.

A categorização dos níveis de controle da instrumentação foi representada para três situações, anteriormente definidas: normal, atenção e alerta, sendo esta, a ordem crescente da probabilidade de ruptura, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3. Níveis de Controle estabelecidos para a fase definitiva da obra em função das velocidades de deslocamento (adaptado de Souza, 2020).

Nível de Controle	Taxa de Deformação Horizontal	Taxa de Deformação Vertical	Periodicidade de leituras
Normal	$\leq 1,5$ mm/dia	$\leq 0,5$ mm/dia	Mensal
Atenção	$> 1,5$ mm/dia e $\leq 3,0$ mm/dia	$> 0,5$ mm/dia e $\leq 1,0$ mm/dia	Semanal
Alerta	$> 3,0$ mm/dia	$> 1,0$ mm/dia	Diária

5 RESULTADOS DO MONITORAMENTO GEOTÉCNICO PARA A FASE CONSTRUTIVA

As obras da contenção iniciaram em abril de 2024 e finalizaram em meados de dezembro de 2024. Os dados da instrumentação disponibilizados constam até início de fevereiro de 2025. Após a conclusão das obras, foram realizadas leituras a cada 10 dias, aproximadamente.

As Figuras 2 a 7 apresentam as medições de deslocamentos verticais e horizontais dos marcos superficiais em operação. Os gráficos apresentam no eixo horizontal os períodos onde ocorreram as leituras dos instrumentos e no eixo vertical os deslocamentos que foram observados na direção em questão, sendo que cada linha representa um marco superficial diferente. De um modo geral, observou-se que houveram

variações nas medições com o avanço das escavações, conforme já esperado, tendo em vista a alteração de tensões no maciço provocada pelo processo construtivo.

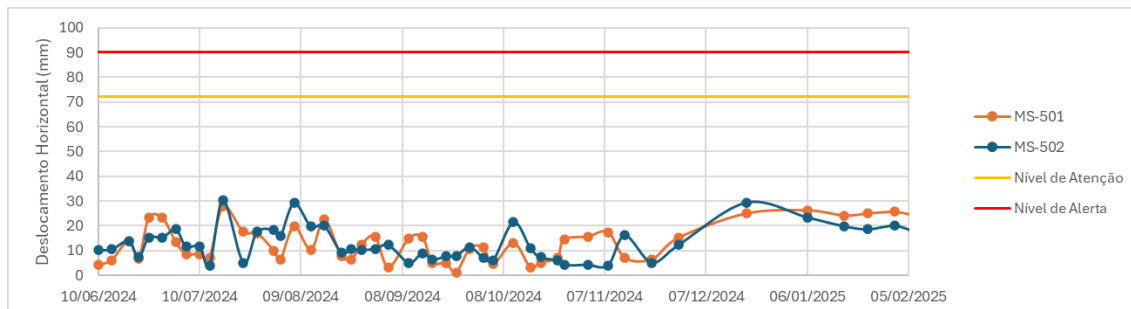


Figura 2. Deslocamentos horizontais dos marcos superficiais – MS-501 e MS-502.

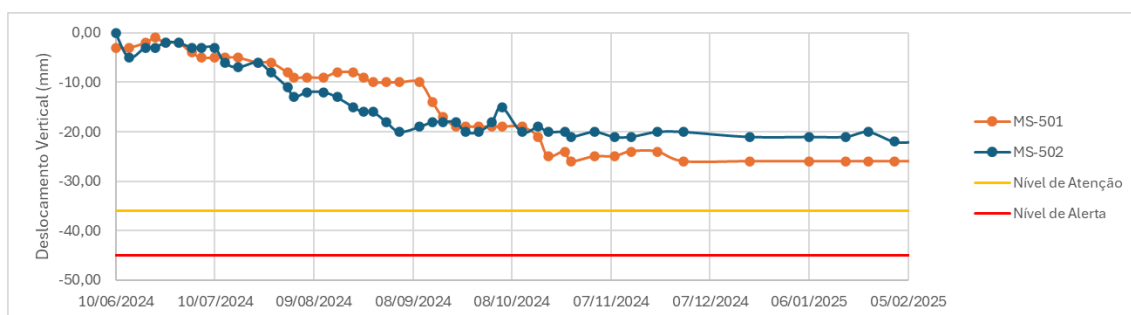


Figura 3. Deslocamentos verticais dos marcos superficiais – MS-501 e MS-502.

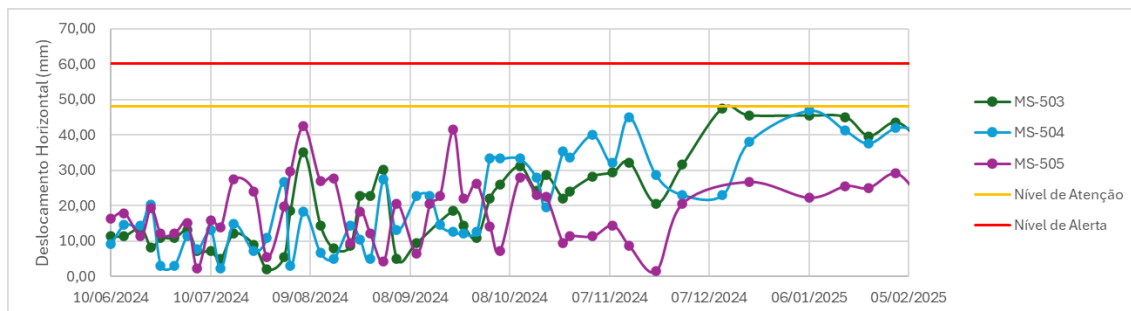


Figura 4. Deslocamentos horizontais dos marcos superficiais – MS-503 a MS-505.

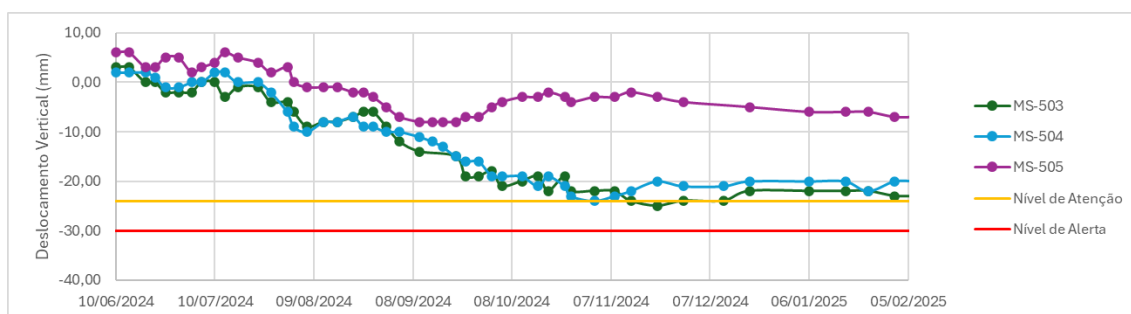


Figura 5. Deslocamentos verticais dos marcos superficiais – MS-503 a MS-505.

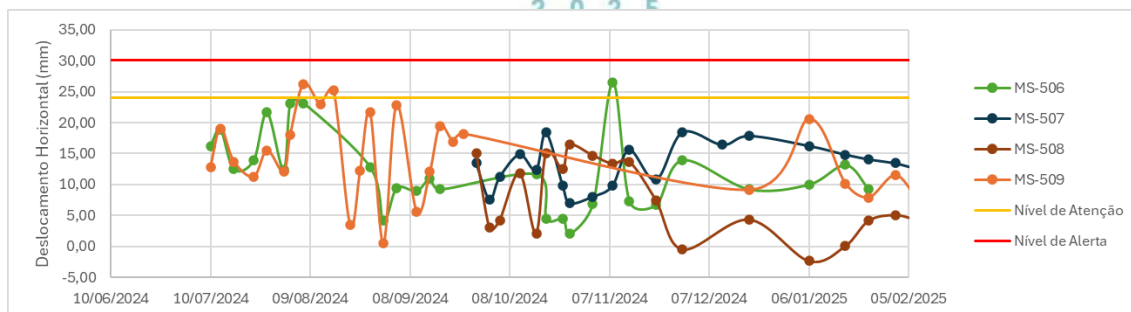


Figura 6. Deslocamentos horizontais dos marcos superficiais – MS-506 a MS-509.

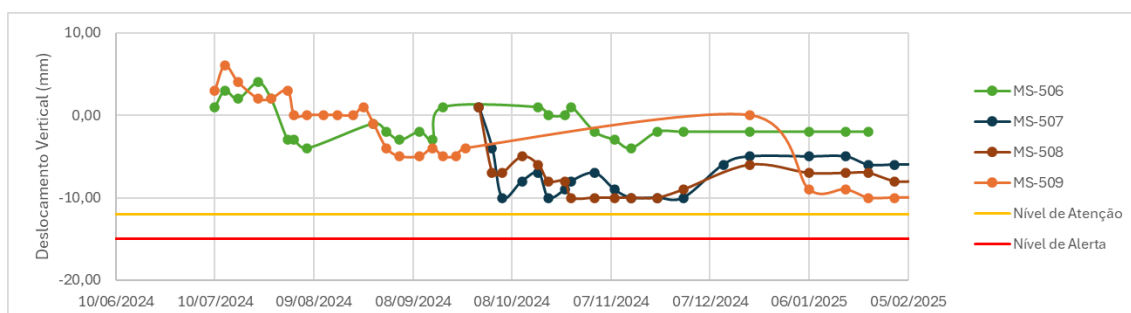


Figura 7. Deslocamentos verticais dos marcos superficiais – MS-506 a MS-509.

Conforme se pode observar nos gráficos, algumas leituras pontuais ultrapassaram ligeiramente o valor limite do nível de atenção, porém com leituras subsequentes voltando para a faixa de normalidade. Também observou-se alguma variação mais significativa nos deslocamentos horizontais, que apresentaram variações nos deslocamentos horizontais na ordem de 10 a 30 mm. Por outro lado, os deslocamentos verticais mostraram redução gradual, indicando situação estável, principalmente após o fim da obra (a partir de dezembro/2024), indicando um processo de estabilização dos recalques.

Como os marcos superficiais geralmente apresentam algumas incertezas devido à erros de medição dos operadores e/ou instrumentos utilizados, em especial durante o período construtivo, variações pontuais identificadas nos deslocamentos – como a oscilação dos deslocamentos horizontais apresentada nas Figura 62, 4 e 6 – não indicam necessariamente um risco iminente para a estrutura. A realização de leituras periódicas e confirmatórias – como, por exemplo, em dias subsequentes –, associada à inspeções geotécnicas, permite a compreensão destas nuances do monitoramento geotécnico em período construtivo.

Desta maneira, os valores obtidos com a instrumentação durante a fase construtiva foram considerados normais, uma vez que não foram constatadas, mediante inspeções de campo, outras anomalias que indicassem algum risco à estrutura, como fissuras ou deformações excessivas na região das escavações.

Recomendou-se que a equipe de monitoramento prosseguisse com as leituras dos instrumentos com uma frequência mais acentuada durante o período inicial após a construção, de modo a acompanhar a evolução dos deslocamentos ao longo do tempo, até a estabilização dos deslocamentos. Esta prática permite concluir o período construtivo com uma base de dados sólida que possa ser utilizada durante o acompanhamento definitivo da contenção.

6 RESULTADOS DO MONITORAMENTO GEOTÉCNICO PARA A FASE DEFINITIVA – PERÍODO INICIAL PÓS-OBRA

A Tabela 4 apresenta os valores de velocidade horizontal e vertical de deslocamentos resultantes nos marcos superficiais para o período inicial pós-obra, considerando a velocidade média entre as últimas cinco leituras do histórico de monitoramento. Os valores resultantes dos deslocamentos verticais e horizontais dos marcos superficiais apresentaram-se dentro do *range* de velocidades considerado normal para a fase definitiva da estrutura, conforme definido no item 4.2.



Tabela 4. Tabela de taxas de deformação para os marcos superficiais – Período inicial pós-obra.

Instrumento	Taxas de deformação		Nível de Risco	
	Horizontal (mm/dia)	Vertical (mm/dia)	Horizontal	Vertical
MS-501	0,14	0,00	Normal	Normal
MS-502	0,29	0,00	Normal	Normal
MS-503	0,39	0,00	Normal	Normal
MS-504	0,43	0,00	Normal	Normal
MS-505	0,40	0,00	Normal	Normal
MS-506	0,38	0,00	Normal	Normal
MS-507	0,11	0,00	Normal	Normal
MS-508	0,28	0,00	Normal	Normal
MS-509	0,59	0,00	Normal	Normal

Ressalta-se que o histórico de leituras após a finalização da obra ainda é limitado, não sendo suficiente para atestar uma tendência de movimentação ou estabilização dos deslocamentos, visto que ainda se apresentam variações nas taxas de deslocamento horizontal. Quanto maior for a frequência das medições, maior a segurança da estrutura, pois o comportamento é representado pela coleta de dados nas campanhas de campo. Desta forma, o gráfico de comportamento passa a ser mais representativo e seguro quanto maior a repetição da coleta de dados através das campanhas de campo, pois caso haja um aumento de velocidade de deslocamento mais significativo nestes pontos, isso será detectado em período menor de tempo, possibilitando tomadas de decisão em tempo hábil.

Desse modo, recomendou-se pela continuidade do monitoramento de maneira mais intensa, com leituras dos instrumentos com uma frequência mais acentuada, principalmente durante o período inicial após a construção, de modo a acompanhar a evolução das velocidades dos marcos superficiais. Recomendou-se que, em conjunto com as leituras de monitoramento, fossem realizadas inspeções periódicas na região do talude, de modo a constatar possíveis anomalias visuais tais como deformações e/ou fissuras, seja no terreno adjacente ou no elementos da contenção.

7 CONCLUSÕES

O início de uma obra de escavação desencadeia deformações no maciço, que podem continuar progredindo após o término da obra. As movimentações durante ou imediatamente após a escavação ocorrem devido ao desconfinamento do material e acomodação à nova face do maciço. A maioria das deformações acontecem nesses estágios preliminares. Entretanto, as deformações posteriores à execução podem estar associadas à relaxação de tensões e movimentações de *creep*, as quais tendem a estabilizar após certo período pós-obra.

Os valores de controle da instrumentação buscam avaliar a condição da estrutura frente ao processo de escavação e durante o período de vida útil, auxiliando na identificação de possíveis anomalias. Assim, em caso de instrumentos em níveis de atenção ou alerta, ações devem ser tomadas com o intuito de mitigar possíveis anomalias na estrutura.

Durante a fase construtiva, os marcos superficiais indicaram movimentações no terreno, como já esperado em função do processo de escavação. Diante da análise do conjunto de dados da instrumentação, conclui-se que o comportamento da estrutura se apresentou dentro da normalidade esperada, considerando os deslocamentos verticais e horizontais apresentados durante a fase de escavação.

Para a fase definitiva (período inicial pós-obra), foram avaliadas as taxas de deslocamento dos marcos superficiais com o tempo. Apesar dos deslocamentos horizontais nesses instrumentos apresentarem ainda alguma movimentação, não indicam necessariamente um risco iminente para a estrutura. Por outro lado, os deslocamentos verticais são estáveis e sem indicação de movimentos progressivos. Logo, a indicação foi pela continuidade do monitoramento de maneira mais intensa durante o período pós-obra, de modo a avaliar o comportamento da estrutura, principalmente durante este período posterior à conclusão da obra.

Os valores de controle foram determinados teoricamente e devem ser comparados criteriosamente com as medidas obtidas da instrumentação e acompanhados de inspeções visuais na região do empreendimento. Devem, portanto, ser encarados como um referencial para a tomada de decisão quanto à realização de ações corretivas. Eventuais ajustes dos valores de controle são naturais, em função de uma análise global da



estrutura e de seu comportamento à medida que as leituras de monitoramento e acompanhamento forem realizadas e o histórico de deslocamentos for complementado.

Destaca-se, por fim, que o acompanhamento da estrutura em questão está em andamento, sem quaisquer indícios de anomalias, e com a complementaridade da instrumentação em progresso mediante a instalação de inclinômetros no terreno.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bretas, T. C.; Brito, G. H. M.; Cella, P. R. C. (2022). Metodologia para elaboração de níveis de controle de inclinômetros e marcos superficiais em barragem de terra. In: XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica e IX Simpósio Sul-Americano de Jovens Geotécnicos, Campinas, SP. Anais... vol. 1, p. 142803.

Cruz, P. T. D. (2014). 100 barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto. Ed. Oficial de Textos, São Paulo, 680 p.

Gusmão Filho, J. (2006). Desempenho de obras geotécnicas. Ed. Universitária UFPE, Recife, 523 p.

Intrieri, E., Gigli, G., Mugnai, F., Fanti, R., Casagli, N. (2012). Design and implementation of a landslide early warning system. *Engineering Geology*, 147–148:124–136.

Milititski, J. (2016). Grandes escavações em perímetro urbano. Ed. Oficina de Textos, São Paulo, 144 p.

National Highway Institute (2015). FHWA-NHI-14-007. *Soil Nails Walls Reference Manual*. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 425 p.

Silveira, J. F. A. (2006) Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento. 1. Ed, Oficina de Textos, São Paulo, 416 p.

Slob, S., Hack, H.R., Feng, Q., Röshoff, K., Turner, A.K. (2007). Fracture mapping using 3D laser scanning techniques. In: L. Ribeiro e Sousa; C. Olalla; N. Grossmann (Eds.), *Proceedings of the 11th Congress of the International Society for Rock Mechanics*, Lisbon. Taylor & Francis, London, pp. 299-302.

Souza, J. R. P. (2020) *Estudo e definição de critérios gerais de alerta e de alarme para muros de suporte e taludes rodoviários na sua fase de exploração. Casos de estudo*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 181 p.