

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/227

Metodologias de Conservação e Monitoramento de Cortinas Atirantadas

Thais Lucouvicz Dada

Engenheira Civil Geotécnica, TRANSPETRO, São Paulo, Brasil, thais.dada@transpetro.com.br

Douglas de Andrade Neves

Engenheiro Civil Geotécnico, TRANSPETRO, Rio de Janeiro, Brasil, douglas.neves@transpetro.com.br

João Duarte Guimarães Neto

Engenheiro Civil Geotécnico, TRANSPETRO, São Paulo, Brasil, joao.duarte@transpetro.com.br

Wanderley Camargo Russo Junior

Consultor, TRANSPETRO, Rio de Janeiro, Brasil, wanderleyrusso@transpetro.com.br

Rodrigo Alves Spagnolo

Gerente Setorial, TRANSPETRO, Rio de Janeiro, Brasil, rspagnolo@transpetro.com.br

RESUMO: O Brasil possui uma ampla malha de dutos, dos quais mais de 8.500 quilômetros são operados pela TRANSPETRO. As faixas de dutos atravessam uma variedade de relevos do solo, portanto são frequentemente necessárias estruturas de contenção para estabilização. Destacam-se as cortinas atirantadas, devido às altas cargas de ancoragem envolvidas. De acordo com as normas e práticas recomendadas em geral, as cortinas atirantadas de importância crítica devem ser submetidas a um programa de conservação e manutenção durante a vida útil. Para verificar a condição dos tirantes em longo prazo, existem métodos não destrutivos inovadores para avaliação da integridade. Por outro lado, para verificar a carga da ancoragem, devem ser realizados testes de carga, que são semidestrutivos, exceto quando há célula de carga de monitoramento instalada. Todas as normas consultadas recomendam instrumentação geotécnica. Análises numéricas paramétricas foram realizadas para orientar o posicionamento da instrumentação geotécnica. Com base na revisão bibliográfica e nos resultados das análises numéricas, foi proposto um programa de manutenção de longo prazo para cortinas atirantadas. Ressalta-se a necessidade de um programa de gestão de riscos. Adicionalmente, foi brevemente apresentado o estudo de caso do programa de manutenção e gerenciamento de riscos de 76 cortinas atirantadas, construídas em faixas de dutos mantidas pela TRANSPETRO.

PALAVRAS-CHAVE: Gestão de Riscos Geológico-Geotécnicos, Segurança de Dutos, Cortina Atirantada, Tirante, Monitoramento.

ABSTRACT: Brazil has a wide mesh of pipelines, of which more than 8,500 kilometers are operated by TRANSPETRO. Pipeline right-of-ways cross a variety of soil relief, than retaining structures for soil stabilization are frequently necessary. Anchored retaining walls are highlighted due to the high anchorage loads involved. In accordance to standards and recommended practices in general, anchored walls that are critically important must be subjected to a conservation and maintenance program during service life. In order to verify the long-term condition of ground anchors, there are innovative non-destructive methods for integrity assessment. On the other hand, in order to verify the anchor load, suitability load tests should be executed, which are semi-destructives, except when a monitoring load cell has been installed. All standards recommend geotechnical instrumentation. Parametric numerical analysis where performed for guiding instrument location. Based on bibliographic review and numerical analysis results, a long-term maintenance program for anchored walls was proposed. The necessity of a risk management program was highlighted. In addition, the case study of maintenance and risk management program for 76 anchored walls, constructed in pipeline right-of-ways of TRANSPETRO, was briefly presented.

KEYWORDS: Geohazard Management, Pipeline Security, Anchored Retaining Wall, Ground Anchor, Monitoring.

1 INTRODUÇÃO

Um dos tipos de estruturas mais importantes instaladas em faixas de dutos do Brasil é a cortina atirantada. Sua conservação e manutenção envolve recursos financeiros e de tempo consideráveis, sendo, portanto, importante estabelecer um programa de monitoramento geotécnico de longo prazo.

EOTA (2010) define as ancoragens como estruturas cuja ruptura causaria riscos à vida humana e/ ou consequências econômicas consideráveis. Para as estruturas construídas nas faixas de dutos, destaca-se o risco ao meio ambiente. É clara a importância de se garantir um desempenho adequado a este tipo de estrutura.

As normas ABNT (2009; 2018), FHWA (1998; 1999) e European Standard (1999; 2004) recomendam práticas de monitoramento de longo prazo, seja somente para as cortinas atirantadas críticas, seja para todas, incluindo inspeções de campo regulares, recuperação da proteção quanto à corrosão, monitoramento dos deslocamentos do solo, variações de cargas e nível e fluxo de água, e reprotensão dos tirantes em caso de necessidade.

Com base na revisão bibliográfica, verifica-se a importância de um programa de conservação e monitoramento de longo prazo para cortinas atirantadas de faixas de dutos. Para tanto, a principal medida é seguir as recomendações normativas. Além disso, consideram-se necessárias diversas ações como vistorias, inspeções, reparos, monitoramento, automatização e gestão sistematizada.

A fim de embasar a decisão quanto à locação dos instrumentos geotécnicos, foram realizados estudos numéricos utilizando-se o Método dos Elementos Finitos (MEF). O MEF também é útil para calibração de valores limites aceitáveis para as leituras de instrumentação, entretanto, este aspecto não foi abordado no presente trabalho.

Finalmente, ressalta-se a necessidade de um programa de conservação e monitoramento para embasar tomadas de decisões através de uma gestão de riscos e garantir a integridade destas estruturas. Este trabalho teve por objetivo apresentar uma revisão bibliográfica consolidada e um estudo numérico simplificado, que podem ser utilizados em conjunto para desenvolver o programa necessário.

1.1 Cortinas Atirantadas das Faixas de Dutos da PETROBRAS

As cortinas atirantadas das faixas de dutos da PETROBRAS são mantidas pela TRANSPETRO. Estão em geral instaladas em solos coluvionares ou residuais. São compostas por tirantes ancorados em solo ou rocha e têm em geral fundações profundas para a parede da face. Todos os tirantes são submetidos aos ensaios de recebimento durante sua instalação, seguindo os procedimentos da ABNT (2018).

As primeiras cortinas atirantadas das faixas mantidas pela TRANSPETRO foram construídas em meados de 1960. Atualmente, há 76 cortinas no total, sendo todas submetidas a um programa de conservação e manutenção de longo prazo baseado na NBR 5629 (ABNT, 2018). Eventos de ruptura envolvendo essas cortinas nunca ocorreram até a presente data, sendo muito provavelmente em função deste programa de manutenção.

A cortina mais antiga tem aproximadamente 60 anos, ou seja, menos que o tempo de vida útil indicado pela AASHTO (1996) e a FHWA (1999). Entretanto, inúmeras ações de manutenção foram necessárias dentro desse período, incluindo reforços de cortinas com tirantes adicionais.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente, foi sucintamente apresentado o caso das obras de cortinas atirantadas mantidas pela TRANSPETRO. Na sequência, foi feita uma revisão bibliográfica sobre cortinas atirantadas, incluindo especialmente normas nacionais, internacionais e continentais.

Para simular casos paramétricos de cortinas atirantadas, foram realizadas análises de estabilidade global, utilizando o Método do Equilíbrio Limite, e análises numéricas de tensão-deformação com uso do Método dos Elementos Finitos, fornecendo informações para auxiliar em um plano de locação de instrumentos de monitoramento geotécnico.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Recomendações Normativas

As normas FHWA (1998; 1999) informam que as cortinas atirantadas apresentaram bom desempenho nos últimos anos registrados, recomendando que o conhecimento e as boas práticas sejam mantidos.

De acordo com normas e procedimentos publicados em geral, cortinas atirantadas devem ser submetidas a programas de conservação e manutenção durante a vida útil (ABNT, 2009; ABNT, 2018; FHWA, 1998; 1999; European Standard, 1999; 2004). As recomendações de cada norma apresentam bastante similaridade entre si. Entretanto, observam-se variações principalmente quanto à frequência recomendada, por exemplo, para certa ação uma norma recomenda que seja periódica, já outra norma indica que seja executada apenas quando observado algum indício de campo. A seguir apresentam-se as principais recomendações:

- a) Elaborar o manual do proprietário da cortina, com diretrizes de manutenção, ou ainda o *Geotechnical Design Report*, com o registro de todos os dados, hipóteses, métodos de cálculo, resultados de verificação de segurança nos estados de limite último e de serviço e diretrizes de manutenção;
- b) Realizar inspeções periódicas de campo por especialista;
- c) Instalar instrumentação de campo para o monitoramento de carga de tirantes, cargas nas vigas de travamento, deslocamentos e condições das águas subterrâneas;
- d) Executar testes de carga para verificação da carga nos tirantes em longo prazo. As normas estrangeiras (FHWA, 1998; 1999; European Standard, 1999; 2004) recomendam que sejam executados apenas caso sejam detectadas anomalias através de inspeções de campo e/ou monitoramento;
- e) Executar reparos principalmente para recuperação das proteções contra corrosão.

3.3 Desempenho em Longo Prazo

As normas em geral (ABNT, 2009; 2018; FHWA, 1998; 1999; European Standard, 1999; 2004) recomendam o monitoramento geotécnico das obras, seja no período construtivo ou por um maior período após a construção. São recomendados em geral o uso de células de cargas nos tirantes, levantamentos óticos dos deslocamentos da parede da contenção, inclinômetros instalados no solo no tardo da cortina e monitoramento das condições das águas subterrâneas. Adicionalmente, a ABNT (2009) recomenda que os tirantes sejam submetidos a testes de carga periódicos.

As normas em geral recomendam que os estados limites de serviço da estrutura sejam definidos pelo projeto. De acordo com a European Standard (2004), caso os modelos de cálculo não sejam disponibilizados ou não sejam necessários, podem ser utilizadas como referência regras e formulações empíricas convencionais, que são geralmente conservadoras. Há referências para os deslocamentos esperados:

- Deslocamentos horizontais totais aproximados, em areias e argilas duras: média de 0,2% H e máximo de 0,5% H, onde H é a altura da parede (FHWA, 1999);
- Recalques totais máximos, aproximados: 0,2 a 0,3% H para solos granulares, 0,1 a 0,3% H para argilas duras e 1,0 a 2,0% H para argilas moles a médias (Becker et al., 2006).

Em termos de desempenho em longo prazo, movimentações da contenção e variações da carga de ancoragem dos tirantes são esperadas, desde que dentro dos limites aceitáveis (FHWA, 1998). Ressalta-se que o comportamento dos solos tropicais do Brasil pode ser muito diferente dos solos de países de clima temperado, principalmente para os solos argilosos.

Por fim, vale citar os métodos TDR – *Time Domain Reflectometry*, SW-TDR – *Surface Wave TDR*, e RIMT – *Reflectometric Impulse Measurement Technique*, detalhados por Mikos (2022), sendo ensaios não destrutivos de metodologias inovadoras, para medir dados de integridade dos tirantes. Como não permitem obter ou avaliar a magnitude da carga de ancoragem, é recomendado seu uso em conjunto com outros tipos de tecnologias, para complementação das informações.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Primeiramente foram apresentados os resultados dos estudos numéricos de cortinas atirantadas, simulando seis condições paramétricas. Com base nesses estudos e na pesquisa bibliográfica realizada, foi proposto um programa de manutenção para cortinas atirantadas.

4.1 Análises de Estabilidade e Numéricas

Foram realizados estudos paramétricos de estabilidade global e tensão-deformação para embasar a decisão sobre a localização do inclinômetro no monitoramento de cortinas atirantadas. São apresentados seis casos, considerando paredes de 12 m e 8 m de altura, com cargas de ancoragem de 350 kN e 200 kN, respectivamente. Os tirantes foram considerados a cada 2,5 m, tanto na vertical quanto na horizontal.

Os parâmetros de solo e materiais são apresentados na Tabela 1, sendo:

- γ = Peso específico natural do solo;
- c' = Coesão efetiva do solo;
- φ' = Ângulo de atrito efetivo do solo;
- E = Módulo de elasticidade do material;
- ν = Coeficiente de Poisson do material.

Os solos 1 a 4 correspondem ao solo no tardo da contenção, sendo consideradas areias argilosas ou argilo-siltosas típicas do Brasil, com parâmetros de resistência obtidos do METRÔ (1980). Para a camada inferior, foi adotado um solo residual com maior resistência. Para as estacas raiz, foram admitidos parâmetros equivalentes considerando o espaçamento. Os módulos de elasticidade foram obtidos com base na proposição de Teixeira e Godoy (1998), com base no valor médio do índice do ensaio SPT. Os parâmetros foram obtidos considerando o índice N_{72} , ou seja, o índice do ensaio SPT para eficiência na energia de 72%, típico utilizado no Brasil.

Tabela 1. Parâmetros de resistência e deformabilidade dos materiais.

	Tipo de solo/ material	Nome	N_{72}	γ	c'	φ'	E	ν
				(kN/m ³)	(kPa)	(°)	(MPa)	
Solo no tardo da contenção	Areia argilosa/ areia silto-argilosa	Soil 1	19 – 40	20	30	35	60	0.30
		Soil 2	9 – 18	19	20	32	30	0.30
		Soil 3	5 – 8	18	10	30	15	0.30
	Areia	Soil 4	0 – 4	17	0	28	6	0.30
Camada inferior	Solo residual	RS	>40	20	60	35	100	0.30
Parede	Concreto armado	Wall	-	25	Infinito	25	0.20	
Fundação	Estaca raiz de diâmetro = 40cm, a cada 1,5 m	Pile	-	21.5	(*)	6	0.28	

(*) A resistência do elemento de fundação foi desconsiderada nas análises.

As análises de estabilidade global de taludes foram realizadas utilizando o Método de Equilíbrio Limite, adotando o método de Morgenstern-Price. Foi utilizado o software SLOPE/W, do pacote GeoStudio (2022). Os valores de carga de ancoragem dos tirantes foram baseados em Ostermayer (1975) e Becker et al. (2006). As Figuras 1-a e 1-b mostram que os Fatores de Segurança (FS) foram próximos a 1,5, sendo satisfatório conforme a ABNT (2009) para os solos 2 e 3 no tardo da contenção, respectivamente para cortinas atirantadas com H=12 m e H=8 m, sendo H a altura total da cortina atirantada.

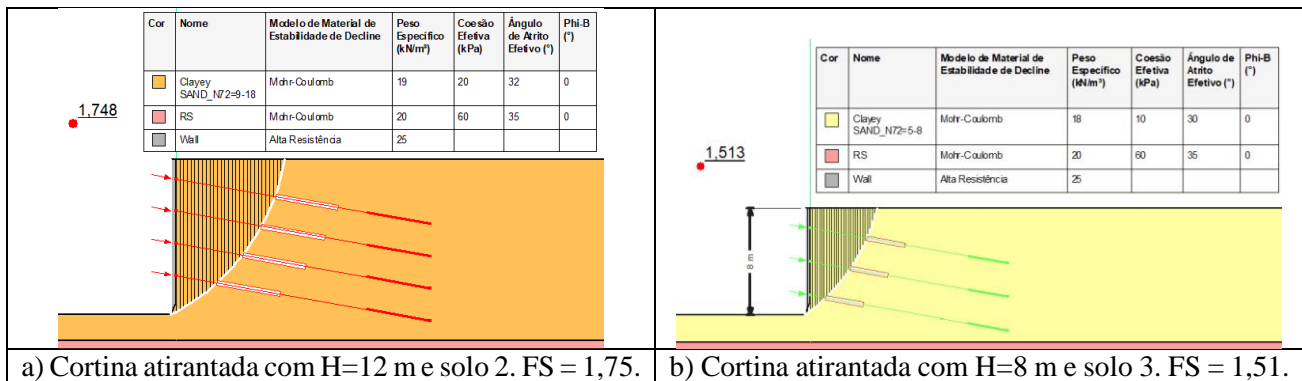


Figura 1. Análises de estabilidade global das cortinas atirantadas.

As análises MEF foram realizadas considerando modelo elástico, uma vez que o objetivo foi estimar deslocamentos em condições distantes da ruptura. Foi utilizado o software SIGMA/W, do pacote GeoStudio (2022). A construção foi considerada nas seguintes etapas: estado de tensão inicial, execução das estacas raiz, escavação, instalação e carga de cada nível de ancoragem e geometria final. A Figura 2 apresenta a malha deformada da geometria da Figura 1-a.

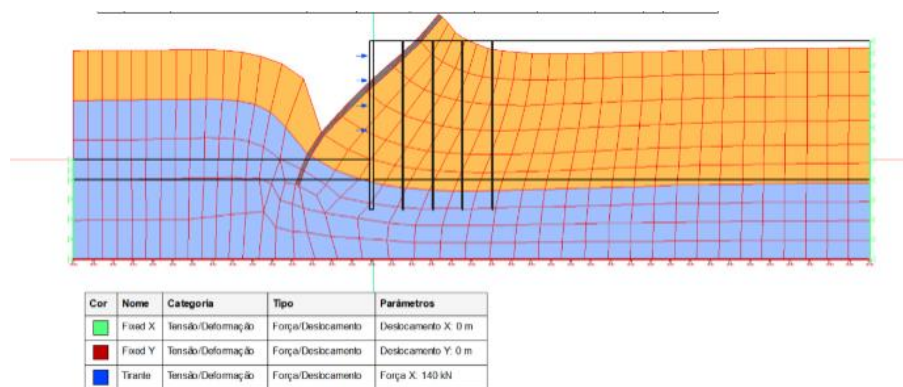


Figura 2. Análise MEF de cortina atirantada com 12 m de altura e solo 2. Malha deformada final (escala exagerada).

As Figuras 3-a e 3-b mostram os deslocamentos horizontais obtidos respectivamente para as geometrias das Figuras 2-a e 2-b. São mostrados os perfis de deslocamentos horizontais obtidos em distâncias da parede de 0 m; 0,25H; 0,5H; 0,75H e 1,0H, onde H é a altura total da parede da cortina atirantada. De acordo com a Figura 3:

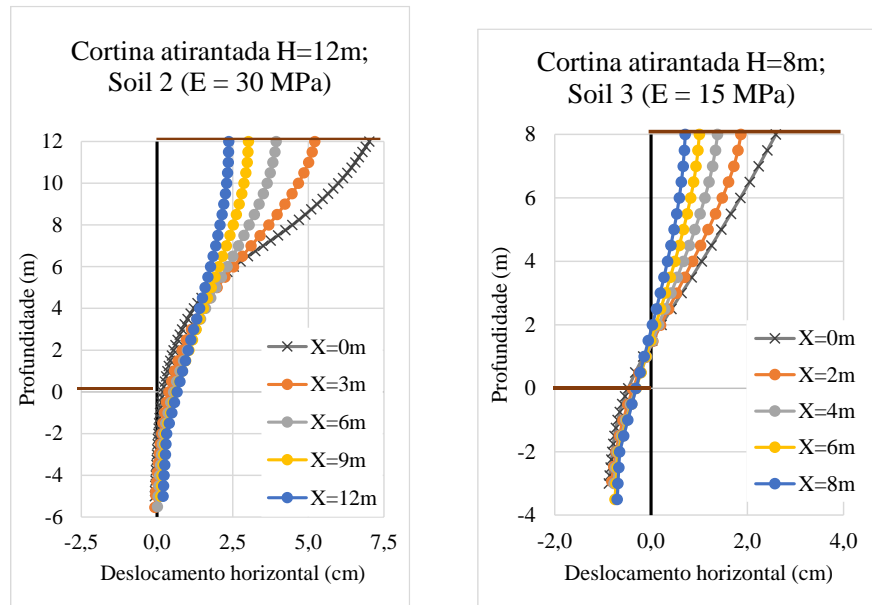
- Os deslocamentos horizontais máximos medidos em uma distância da parede de até 0,25 H foram de 70 a 80% dos medidos ao longo da parede;
- Os deslocamentos horizontais máximos medidos em uma distância da parede entre 0,25 e 0,50 H foram de 50 a 80% das medidas ao longo da parede;
- Em distâncias acima de 0,50 H, os deslocamentos horizontais podem não ser representativos dos deslocamentos horizontais máximos em geral.

Com base nos resultados da Figura 3, indica-se uma distância de até 0,25 H, em relação à parede da contenção, para a instalação de inclinômetros no solo no tardo da contenção. Considerando esta distância, as análises numéricas realizadas apresentaram resultados consistentes em comparação com as recomendações da FHWA (1999), sendo:

- Para cortinas atirantadas com nível de estabilidade adequado, os deslocamentos horizontais máximos obtidos foram iguais a 5 e 2 cm, respectivamente para paredes ancoradas com 12 m e 8 m de altura. Estes valores correspondem a 50 a 90% do valor máximo e até duas vezes o valor médio, indicados pela FHWA (1999);
- Para cortinas atirantadas com Fator de Segurança elevado quanto à estabilidade global, os

deslocamentos horizontais obtidos foram inferiores a 50% do valor máximo indicado pela FHWA (1999);

- Para cortinas atirantadas com Fator de Segurança baixo quanto à estabilidade global, os deslocamentos horizontais máximos obtidos foram superiores ao valor máximo indicado pela FHWA (1999).



a) Geometria da Figura 1-a.

b) Geometria da Figura 1-b.

Figura 3. Análises MEF das cortinas atirantadas. Perfis de deslocamentos horizontais ao longo da parede da cortina atirantada e ao longo de perfis de solo localizados a uma distância de $x = 0,25H$; $0,5H$; $0,75H$ e $1,0H$ da parede, onde H é a altura total da parede da cortina.

Em relação aos deslocamentos verticais, Becker et al (2006) indicaram um limite de 2,4 cm e 1,6 cm, respectivamente, para paredes ancoradas com 12 m e 8 m de altura. Porém, as análises numéricas resultaram em deslocamentos verticais de cerca de 0,1 cm ou 0,2 cm para todos os casos realizados, muito menores do que o estimado pela bibliografia, o que pode estar associado a dois fatores: a análise do MEF utilizando modelo elástico não é representativa para deslocamentos verticais, e/ou os deslocamentos verticais não são a medida mais indicada para monitoramento de contenções.

Finalmente, com base nos resultados do modelo numérico, são apresentadas algumas propostas para o plano de monitoramento para cortinas atirantadas:

- É importante realizar o monitoramento dos deslocamentos horizontais e verticais do solo e no topo da cortina;
- Os inclinômetros devem ser instalados numa distância horizontal de até $0,25 H$ da parede, onde H é a altura total da parede da cortina atirantada;
- Devem ser estabelecidos limites de alerta e intervenção para o monitoramento dos deslocamentos. Para estimativas iniciais, podem ser usados valores de bibliografia como os da FHWA (1999).

4.2 Programa de Conservação para Cortinas Atirantadas Proposto

Em condições reais, os recursos financeiros, ou mesmo temporais, são em geral limitados, sendo importante implementar a gestão de riscos para a conservação e manutenção de cortinas atirantadas.

Para implementar o sistema de gestão com foco na gestão de riscos, recomenda-se iniciar pela definição de um sistema de classificação e elaborar a ordenação de todas as cortinas atirantadas por ordem de criticidade. Deverão então ser definidas as ações prioritárias, por um comitê de especialistas, para alocação de recursos. Este processo deve ser contínuo.

Com base na revisão bibliográfica e nos resultados da análise numérica, a seguir propõe-se um conjunto

de práticas para compor o programa de manutenção de tirantes, que devem ser aplicados durante toda a vida útil:

- Vistorias periódicas de campo realizadas por profissional treinado e inspeções periódicas de campo realizadas por especialista;
- Limpeza periódicas de dispositivos de drenagem, incluindo drenos horizontais profundos;
- Reparos sempre que necessários da proteção contra corrosão, pintura e cabeças quebradas;
- Monitoramento através de instrumentação geotécnica com uso de inclinômetros, piezômetros, pinos refletivos ou similares e células de cargas nos tirantes;
 - Para os inclinômetros, sugere-se sua instalação em uma distância horizontal de até $0,25 H$ da face da contenção, onde H é a altura da contenção.
- Avaliação periódica de patologias com métodos não destrutivos, como hidrojetamento e ensaios do SW-TDR e RIMT;
- Programação de procedimentos para atendimento de todas as recomendações das normas brasileiras vigentes. Vale ressaltar que, caso sejam previstas atividades semidestrutivas ou destrutivas, é necessário prever um plano de contingência e garantir a completa recuperação da cortina após as atividades;
- Executar reforço estrutural sempre que necessário;
- Sistematização da programação e do controle das ações.

Finalmente, a idade das cortinas atirantadas não foi discutida, mas considera-se importante avaliar a sua influência para o sistema de classificação que alimentará a gestão de riscos destas estruturas. Ressalta-se que, no caso das obras das cortinas da TRANSPETRO, observa-se um aumento de vida útil das estruturas associado à implementação do programa de conservação, manutenção e monitoramento.

5 CONCLUSÕES

O artigo apresentou recomendações de normas nacionais, internacionais e continentais em geral e uma revisão bibliográfica sobre manutenção em longo prazo de cortinas atirantadas, especialmente para aquelas instaladas em faixas de dutos.

Foram apresentados resultados do modelo numérico conduzido para orientar o plano de manutenção proposto, quanto à instalação dos inclinômetros, sugerindo-se sua locação na distância horizontal de até $0,25xH$ atrás da parede da contenção, onde H é sua altura.

Com base na pesquisa bibliográfica e nos estudos realizados, foram propostas diretrizes para um programa de conservação e monitoramento de cortinas atirantadas, com foco na gestão de riscos, atingindo o objetivo principal do trabalho.

A TRANSPETRO possui um programa de manutenção específico para as 76 cortinas atirantadas construídas nas faixas de dutos, associado a uma gestão de riscos. O programa envolve atividades rotineiras de inspeção, limpeza e manutenção, incluindo reparos frequentes da integridade das estruturas, monitoramento de deslocamentos e cargas, testes de carga em tirantes e reforço estrutural de algumas cortinas. Ressalta-se a importância dos programas de manutenção, que permitem uma gestão efetiva, de forma a garantir o bom estado de conservação em longo prazo.

Por fim, ressalta-se a importância do programa de manutenção de cortinas atirantadas para o aumento de sua vida útil, o que foi observado no caso das obras das 76 cortinas mantidas pela TRANSPETRO, havendo estruturas da década de 1960.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a todos os responsáveis pelas inspeções de campo e monitoramento das cortinas atirantadas da TRANSPETRO.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (2009). NBR 11682. *Estabilidade de encostas*. Rio de Janeiro, Brasil.
- ABNT (2018). NBR 5629. *Tirantes ancorados no terreno – Projeto e execução*. Rio de Janeiro, Brasil.
- AASHTO (1996). *Standard Specifications for Highway Bridges*. Washington, EUA.
- BECKER, D. E.; MOORE, I. D.; LAFLEUR, J. (Ed.) (2006). *Canadian Foundation Engineering Manual*. Surrey, BC, Canadá: Canadian Geotechnical Society. 4a ed.
- EOTA (2010). TR 029. *Technical Report – Design of Bounded Anchors*. Bruxelas, Bélgica.
- European Standard (1999). EN 1537. *Execution of special geotechnical work – Ground anchors*. Bruxelas, Bélgica: European Committee for Standardization.
- European Standard (2004). EN 1997-1. *Eurocode 7: Geotechnical design - Part 1: General rules*. Bruxelas, Bélgica: European Committee for Standardization.
- FHWA (1998). FHWA-RD-97-130. *Design Manual for Permanent Ground Anchor Walls*. McLean, Virgínia, EUA.
- FHWA (1999). FHWA-IF-99-015. *Geotechnical Engineering Circular n° 4 – Ground anchors and anchored systems*. Washington, EUA.
- GEOSTUDIO (2022). SLOPE/W e SIGMA/W. Disponível em: <https://www.seequent.com/pt-br/produtos-e-solucoes/geostudio>. Acesso em: 11/03/2024.
- METRÔ – COMPANHIA DO METROPOLITANO DE SÃO PAULO (1980). NC-03. *Normas técnicas complementares*. São Paulo, Brasil, 1980. Vol. II.
- MIKOS, A. N. (2022) *Aplicação de métodos não destrutivos para avaliação da integridade de solo grampeado e cortina atirantada*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, área de concentração em Geotecnia, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná/ UFPR, 268 p.
- OSTERMAYER, H. (1975). Construction, carrying behavior and creep characteristics of ground anchors. Conf. on Diaphragm Walls and Anchorages, Londres, Inglaterra. *Proceedings...* Institution of Civil Engineers, pp. 141-151.
- TEIXEIRA, A. H.; GODOY, N. S. (1998). Análise, Projeto e Execução de Fundações Rasas. In: HACHICH, W. C. et al. *Fundações: Teoria e Prática*. 2a ed. São Paulo: PINI/ ABMS/ ABEF. Cap. 7.