*XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*
*XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens*
*24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF*
**DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.4/105**

# Proposta de Método Alternativo para o Dimensionamento de Cortinas Atirantadas com Análise das Deformações

Murillo Vinícius Bednarczuk
Graduando em Engenharia Civil, Solution IPD, Curitiba, Brasil, murillobednarczuk@ufpr.br

Lucas Oliveira de Moraes
Graduando em Engenheira Civil, Solution IPD, Curitiba, Brasil, Lucasmoraes@ufpr.br

Jacqueline Cristina Patzsch
Doutorando em Engenheira Civil, Solution IPD, Curitiba, Brasil, jacpatzsch@solution-ipd.com

João Paulo Santos Silva
Mestre em Engenharia Civil, Solution IPD, Curitiba, Brasil, joaopaulo@solution-ipd.com

Vítor Pereira Faro
Doutor em Engenharia Civil, Solution IPD, Curitiba, Brasil, vpfaro@ufpr.br

RESUMO: O dimensionamento de tirantes protendidos aplicados à estabilização de taludes por meio de cortinas atirantadas é frequentemente realizado pelo método tradicional, no qual os tirantes são representados como apoios fixos aplicados ao paramento da estrutura. Nesse procedimento, o paramento é idealizado como elemento rígido, anulando-se os deslocamentos horizontais induzidos pelo empuxo do solo e permitindo a realização de uma análise estrutural isostática. Embora amplamente empregado na prática de projeto, esse procedimento não contempla a deformabilidade dos elementos de reforço, tratando os tirantes como reações estáticas e desconsiderando sua rigidez axial. Este trabalho tem como objetivo comparar esse método tradicional a uma abordagem alternativa baseada na representação dos tirantes por molas equivalentes, utilizando o software FTOOL para representar cada tirante como um elemento elástico linear inclinado na direção de projeto. Nesse procedimento, a rigidez da mola é obtida a partir da relação entre a rigidez axial do tirante e seu comprimento livre, definindo um coeficiente de mola representativo do seu comportamento mecânico. Paralelamente, o comportamento do solo atuante sobre a fundação da cortina é representado por meio de molas horizontais distribuídas, em conformidade com o Método de Winkler, permitindo incorporar de forma integrada a deformabilidade do sistema solo–tirante–paramento. As análises foram conduzidas a partir de um estudo de caso de uma cortina atirantada com 6 m de altura e três linhas de tirantes, mantendo-se as condições geométricas, geotécnicas e de carregamento em ambos os modelos. Os resultados indicam que a consideração explícita da deformabilidade dos elementos de reforço altera significativamente a resposta estrutural da cortina, com impactos nos deslocamentos horizontais do paramento, na distribuição de momentos fletores e nas forças mobilizadas nos tirantes. A comparação entre os métodos evidencia as limitações da idealização por apoios rígidos e aponta o modelo de molas equivalentes como uma representação estrutural mais compatível com o comportamento mecânico esperado para cortinas atirantadas.

PALAVRAS-CHAVE: Cortinas Atirantadas, Interação Solo-Estrutura, Tirantes Protendidos, Modelagem por Molas, Método de Winkler.

ABSTRACT: The design of prestressed anchors applied to slope stabilization through anchored retaining walls is commonly performed using the traditional method, in which anchors are represented as fixed supports applied to the wall facing. In this procedure, the wall is idealized as a rigid element, suppressing horizontal displacements induced by soil earth pressures and allowing an isostatic structural analysis. Although widely adopted in engineering practice, this procedure does not account for the deformability of the reinforcement elements, treating anchors as static reactions and neglecting their axial stiffness. This study aims to compare

this traditional method with an alternative approach based on the representation of anchors as equivalent springs, using the FTOOL software to model each anchor as a linear elastic element inclined along the design direction. In this procedure, the spring stiffness is obtained from the ratio between the axial stiffness of the anchor and its free length, defining a representative spring coefficient for the anchor mechanical behavior. In parallel, the soil acting at the foundation of the retaining wall is represented by distributed horizontal springs, consistent with the Winkler method, allowing the integrated consideration of the deformability of the soil–anchor–wall system. The analyses were conducted based on a case study of an anchored retaining wall with a total height of 6 m and three anchor rows, keeping the geometric, geotechnical, and loading conditions in both models. The results indicate that explicitly accounting for the deformability of the reinforcement elements significantly affects the structural response of the wall, with impacts on horizontal displacements of the facing, distribution of bending moments, and forces mobilized in the anchors. The comparison between methods highlights the limitations of the rigid support idealization and points to the equivalent spring model as a structural representation more consistent with the mechanical behavior expected for anchored retaining walls.

KEYWORDS: Anchored Retaining Walls, Soil–Structure Interaction, Prestressed Anchors, Spring Modeling, Winkler Method.

## 1 INTRODUÇÃO

Estruturas de contenção com tirantes protendidos são amplamente utilizadas na estabilização de escavações profundas e taludes, especialmente em ambientes urbanos onde restrições geométricas e construtivas demandam soluções estruturalmente eficientes. Entre essas soluções, destacam-se as cortinas atirantadas, nas quais os esforços provenientes do empuxo do solo são parcialmente transferidos para tirantes ancorados em regiões mais estáveis do maciço.

Na prática corrente de projeto, o dimensionamento estrutural dessas contenções é frequentemente conduzido por meio de idealizações simplificadas, nas quais os tirantes são representados como apoios equivalentes aplicados ao paramento da cortina. Essa abordagem permite reduzir o problema estrutural a uma análise estática relativamente simples, porém pode limitar a representação da interação entre solo e estrutura, especialmente no que se refere à deformabilidade do sistema de ancoragem. Estudos experimentais e numéricos indicam que a consideração da deformabilidade da estrutura e da interação solo–estrutura pode influenciar significativamente a distribuição de esforços e deslocamentos em cortinas atirantadas (Han et al., 2017).

Modelagens que incorporam explicitamente essa interação vem sendo discutidas na literatura geotécnica, incluindo abordagens nas quais o maciço de solo é representado por sistemas de molas equivalentes associados à hipótese de reação do método de Winkler. A adoção desse tipo de representação permite considerar a compatibilidade de deformações entre solo e estrutura, fornecendo uma descrição mais realista do comportamento do sistema de contenção (Pereira & Porto, 2020).

Nesse contexto, apresenta-se uma comparação entre o método tradicional de apoios equivalentes e uma abordagem alternativa baseada na representação dos tirantes por molas equivalentes. A análise é conduzida a partir de um estudo de caso de uma cortina atirantada, permitindo avaliar as diferenças entre as duas estratégias de modelagem quanto à distribuição de esforços e aos deslocamentos estruturais obtidos

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Cortinas Atirantadas

Cortinas atirantadas constituem um dos sistemas de contenção mais utilizados para estabilização de escavações profundas e taludes em áreas urbanas. Esse tipo de estrutura combina um elemento estrutural vertical, como parede diafragma, estacas justapostas ou paredes em concreto projetado, com tirantes protendidos ancorados em camadas mais resistentes do maciço de solo ou rocha. De acordo com Strom e Ebeling (2001), esse sistema permite mobilizar a resistência do maciço além da zona potencial de ruptura,

reduzindo os esforços atuantes na estrutura de contenção e possibilitando a execução de escavações profundas com controle adequado de deslocamentos.

O comportamento estrutural dessas cortinas resulta da interação entre três componentes principais: o paramento estrutural, o sistema de tirantes e o maciço de solo circundante, já o desempenho global da estrutura depende não apenas da capacidade resistente desses elementos, mas também da compatibilidade de deformações entre solo e estrutura, aspecto que influencia diretamente a distribuição de esforços ao longo da cortina.

## 2.2 Métodos Usuais para Análise

Na prática de projeto, a análise de cortinas atirantadas é frequentemente conduzida por meio de métodos simplificados baseados no equilíbrio de forças e momentos atuantes na estrutura. Nessa abordagem, os tirantes são geralmente representados como apoios ou reações concentradas aplicadas ao paramento da cortina. Segundo Strom e Ebeling (2001), essa idealização permite reduzir o problema estrutural a um sistema estaticamente determinado, facilitando o cálculo dos esforços internos na estrutura e o dimensionamento dos elementos estruturais, esse procedimento tem sido amplamente utilizado na prática profissional devido à sua simplicidade e à facilidade de aplicação em projetos de engenharia, entretanto, destaca-se que essa representação simplificada pode não capturar adequadamente certos aspectos do comportamento real da estrutura, especialmente aqueles associados à deformabilidade do sistema solo–estrutura.

## 2.3 Interação Solo–Estrutura e Mobilização dos Empuxos

O comportamento de cortinas atirantadas está diretamente associado à interação entre o maciço de solo e a estrutura de contenção. Durante as etapas de escavação e protensão dos tirantes, ocorrem redistribuições de tensões e deformações que influenciam tanto os esforços internos na cortina quanto os deslocamentos do sistema. De acordo com Strom e Ebeling (2001), os deslocamentos da parede desempenham papel fundamental na mobilização das pressões laterais do solo.

O estado de tensões laterais em maciços de solo é tradicionalmente descrito por teorias clássicas de empuxo desenvolvidas na mecânica dos solos. Entre as formulações de Coulumb e Rankine que relacionam as tensões horizontais às tensões verticais em função das propriedades de resistência do solo e das condições de deformação do maciço.

Essas teorias definem três estados principais de equilíbrio lateral: empuxo em repouso, empuxo ativo e empuxo passivo. O estado de repouso ocorre quando o maciço permanece sem deformações laterais significativas. O estado ativo é mobilizado quando a estrutura se desloca para longe do solo, reduzindo as tensões horizontais. Já o estado passivo ocorre quando a estrutura se desloca em direção ao maciço, aumentando as tensões laterais mobilizadas. A mobilização desses estados depende diretamente da magnitude dos deslocamentos da estrutura de contenção. Conforme discutido por Terzaghi, pequenas deformações da parede podem provocar redistribuições significativas das pressões laterais no solo. Em estruturas flexíveis, como cortinas atirantadas, a distribuição de empuxos ao longo da altura da contenção está, portanto, associada à interação entre o comportamento deformável da estrutura e a resposta do maciço de solo.

O estado de empuxo desenvolvido ao longo da contenção depende da magnitude e da direção das deformações estruturais, podendo variar entre diferentes condições de equilíbrio lateral do maciço. Pequenas deformações da estrutura podem resultar em redistribuições significativas das tensões laterais ao longo da altura da parede, influenciando a forma do diagrama de pressões atuantes. Dessa forma, o comportamento estrutural da cortina e a resposta do maciço não podem ser analisados de maneira completamente independente, sendo necessário considerar a compatibilidade de deformações entre solo e estrutura. Essa interação tem implicações diretas na interpretação das pressões laterais atuantes e na avaliação do desempenho da contenção ao longo das diferentes etapas construtivas.

### 2.4 Modelos de Reação do Solo

Uma forma amplamente utilizada para representar a deformabilidade do maciço em análises estruturais consiste na utilização de modelos de reação do solo baseados em molas equivalentes. Nesse tipo de abordagem, o solo é idealizado como um conjunto de molas independentes cuja reação é proporcional ao deslocamento da estrutura. Esse conceito é tradicionalmente associado ao método de Winkler, no qual a pressão de reação do solo é proporcional ao deslocamento local da estrutura. A constante de proporcionalidade é definida pelo coeficiente de reação do solo. Embora represente uma simplificação do comportamento real do maciço, essa abordagem é amplamente empregada em análises de estruturas de contenção devido à sua simplicidade e à possibilidade de incorporação em modelos estruturais relativamente simples.

### 2.5 Rigidez dos Tirantes e Comportamento Estrutural

Além da resposta do solo, a rigidez axial dos tirantes também desempenha papel relevante no comportamento global de cortinas atirantadas. O sistema de ancoragem apresenta deformabilidade associada ao comprimento livre do tirante, ao módulo de elasticidade do aço e às características do trecho ancorado. De acordo com Strom e Ebeling (2001), a rigidez dos tirantes pode influenciar tanto os deslocamentos da cortina quanto a distribuição de esforços ao longo da estrutura.

Em modelos simplificados onde os tirantes são representados como apoios rígidos, essa deformabilidade não é explicitamente considerada. Modelagens que incorporam a rigidez dos tirantes por meio de elementos elásticos equivalentes permitem avaliar de forma mais consistente a interação entre os diferentes componentes do sistema de contenção, possibilitando análises estruturais que consideram simultaneamente a deformabilidade do solo e do sistema de ancoragem.

## 3 METODOLOGIA

### 3.1 Definição do Problema e Estudo de Caso

A comparação entre os métodos de dimensionamento foi realizada por meio da análise de um estudo de caso representativo de uma cortina atirantada submetida à ação de pressões laterais do solo. O objetivo da análise consiste em avaliar as diferenças entre duas idealizações estruturais distintas: (i) o método tradicional de apoios equivalentes e (ii) uma abordagem baseada na representação dos tirantes por molas equivalentes.

Em ambas as análises foram consideradas as mesmas condições geométricas, geotécnicas e de carregamento, de modo que as diferenças observadas estejam associadas exclusivamente à forma de modelagem dos tirantes.

A estrutura analisada corresponde a uma cortina atirantada com altura total de 6 m, estabilizada por 3 linhas de tirantes. Os tirantes foram espaçados verticalmente em 2 m e horizontalmente em 2 m. As análises estruturais foram realizadas com auxílio do software FTOOL, no qual a cortina foi modelada como um elemento estrutural plano submetido às pressões laterais do solo e às forças transmitidas pelos tirantes.

### 3.2 Condições de Contorno Adotadas

Com o objetivo de permitir uma comparação direta entre os modelos estruturais, foi adotado um perfil geotécnico simplificado formado apenas representado por um solo siltoso ao longo da profundidade da escavação, sem contato com nível d'água e uma sobrecarga de 20 kPa. Foram adotados os seguintes parâmetros geotécnicos: peso específico do solo $\gamma = 19{,}60$ kN/m³ e ângulo de atrito efetivo $\varphi' = 27°$.

O estado de tensões laterais no solo foi estimado a partir das teorias clássicas de empuxo desenvolvidas por Coulomb e Rankine (1857), considerando as condições de equilíbrio lateral do maciço no repouso. No modelo adotado, a cortina apresenta uma ficha de 8 m abaixo do nível de escavação, totalizando 14 m de elemento estrutural. O comportamento do solo ao longo da profundidade da estaca foi simulado por meio de molas horizontais baseadas no coeficiente de reação lateral do modelo de Winkler, adotando-se $k_h =$

8000 kN/m$^3$. Essa representação foi aplicada de forma idêntica em ambos os métodos, de modo a garantir que a comparação se concentre exclusivamente na influência da rigidez do sistema de ancoragem.

Além disso, na modelagem por molas equivalentes, considera-se a aplicação da carga de incorporação como uma força inicial aplicada no nó do tirante, garantindo que a mola não atue apenas de forma passiva, mas também como um elemento ativo. Dessa forma, o sistema já inicia o processo de equilíbrio com uma carga pré-existente, simulando com maior fidelidade o comportamento real de um tirante protendido em campo.

## 3.3 Modelagem Estrutural dos Tirantes

A cortina foi representada como um elemento estrutural vertical submetido às pressões laterais do solo ao longo da altura da escavação. O paramento da cortina foi modelado como uma barra contínua com rigidez equivalente correspondente à seção estrutural adotada. A seção considerada para a cortina possui espessura de 30 cm e módulo de elasticidade E = 30000 MPa, resultando em uma rigidez flexional aproximada de EI = 1,35 × 10$^5$ kN·m².

Os tirantes foram distribuídos em três linhas ao longo da altura da cortina (superior, intermediário e inferior), sendo definidos a partir de suas características geométricas, mecânicas e de instalação. Os tirantes superior e intermediário possuem diâmetro de 25 mm (área de 490,874 mm²), com comprimentos livres de 15 m e 10 m, respectivamente, enquanto o tirante inferior possui diâmetro de 32 mm (área de 804,248 mm²) e comprimento livre de 5 m, sendo todos considerados inclinados a 20° em relação à horizontal e submetidos a tensões de trabalho de 210 MPa nas linhas superior e intermediário e de 280 MPa na linha inferior, refletindo suas diferentes capacidades resistentes.

### *3.3.1 Método Tradicional*

No método tradicional, os tirantes foram representados como apoios aplicados ao paramento da cortina, assumindo-se que os deslocamentos horizontais da estrutura são anulados nos pontos de ancoragem. As forças nos tirantes foram obtidas a partir do equilíbrio estrutural do sistema.

### *3.3.2 Método das Molas Equivalentes*

Na abordagem alternativa, os tirantes foram representados como molas elásticas inclinadas na direção de projeto. A rigidez dessas molas foi definida a partir da rigidez axial do tirante, obtida por:

$$k = \frac{EA}{L} \tag{1}$$

em que E corresponde ao módulo de elasticidade do aço (210 GPa), A à área da seção transversal do tirante e L ao comprimento livre do tirante.

## 3.4 Parâmetros Avaliados

A comparação entre os dois modelos foi realizada a partir da análise dos deslocamentos horizontais do paramento da cortina, da distribuição de momentos fletores ao longo da estrutura e das forças mobilizadas nos tirantes. Esses resultados foram analisados de forma comparativa com o objetivo de avaliar a influência da consideração explícita da rigidez dos tirantes no comportamento estrutural da cortina atirantada.

# 4 RESULTADOS

Os resultados obtidos foram avaliados a partir da comparação entre os deslocamentos horizontais da cortina, os diagramas de momentos fletores ao longo do paramento e as forças mobilizadas nos tirantes.

### 4.1 Deslocamentos Horizontais

Os deslocamentos horizontais obtidos nos dois modelos apresentam diferenças significativas associadas à forma de representação da rigidez do sistema de ancoragem.

Os resultados obtidos indicam diferenças no padrão de deslocamentos horizontais da cortina ao longo da altura da estrutura. A deformada obtida pelo método tradicional apresenta interrupções nos níveis de tirantes, uma vez que esses pontos são representados como restrições de deslocamento no modelo estrutural. Como consequência, os deslocamentos horizontais tornam-se nulos nesses pontos, produzindo uma deformação segmentada da cortina.

Quando a rigidez axial dos tirantes é considerada por meio de molas equivalentes, observa-se uma deformação mais contínua ao longo do paramento. Nessa condição, deslocamentos horizontais também ocorrem nas regiões correspondentes aos níveis de ancoragem, refletindo a deformabilidade do sistema de tirantes e a mobilização progressiva das forças de tração.

O deslocamento horizontal máximo obtido foi de aproximadamente 0,29 mm no modelo tradicional, localizado na região do topo da cortina, enquanto no modelo com molas equivalentes o deslocamento máximo foi de aproximadamente 0,91 mm, ocorrendo próximo a linha do terceiro tirante, conforme observado na Figura 1.

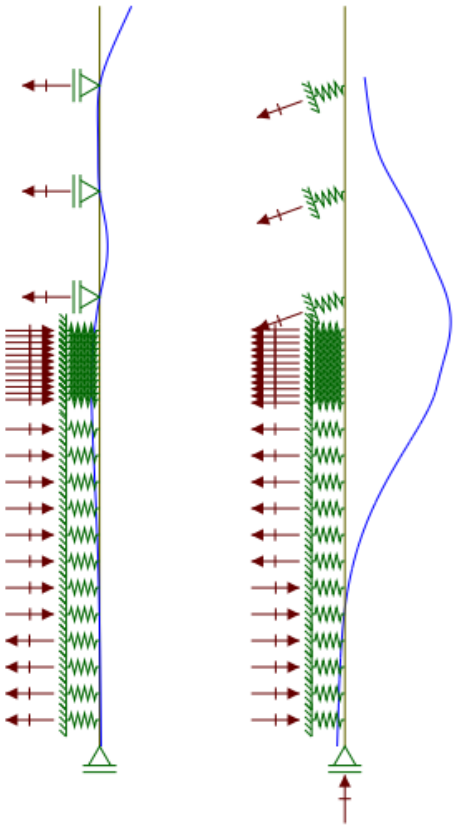



Figura 1. Representação dos Deslocamentos do Paramento para a) Modelo Tradicional e b) Modelo com Molas Equivalentes.

### 4.2 Distribuição de Momentos Fletores

A forma dos diagramas de momentos fletores também se mostrou sensível à idealização estrutural adotada para os tirantes. A presença de apoios rígidos nos níveis de ancoragem produz reduções significativas de momento nessas regiões e concentrações de esforço entre os pontos de apoio, resultando em um diagrama com variações mais abruptas ao longo da altura da cortina.

Por outro lado, a consideração da deformabilidade dos tirantes conduz a uma redistribuição mais gradual dos esforços estruturais. O diagrama de momentos passa a apresentar variações mais suaves ao longo do paramento, refletindo a compatibilidade de deformações entre a cortina e o sistema de ancoragem.

O momento fletor máximo obtido na análise foi de aproximadamente 29,1 kN·m para o modelo tradicional e de 41,6 kN·m para o modelo com molas equivalentes, localizado aproximadamente na região de 1,50 m ao longo da altura da estrutura, conforme apresentado na Figura 2. Essa variação no momento é devida uma redistribuição dos esforços devido à interação solo-estrutura considerada. Além disso, o método tradicional representa uma condição idealizada e não os deslocamentos reais que ocorrem.

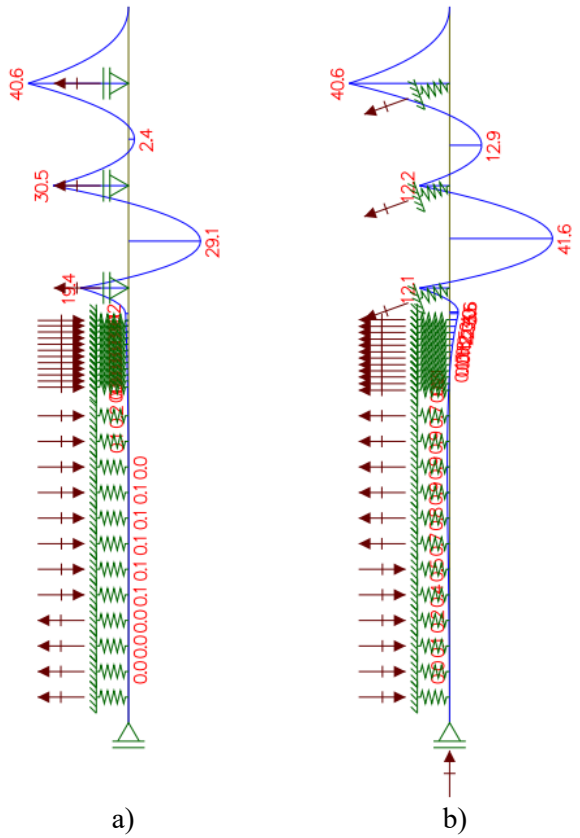



Figura 2. Representação dos Momentos Fletores do Paramento em kN m para a) Modelo Tradicional e b) Modelo com Molas Equivalentes.

### 4.3 Forças Mobilizadas nos Tirantes

Diferenças também foram observadas nas forças mobilizadas nos tirantes ao longo da cortina. No modelo tradicional, os valores correspondem diretamente às reações estruturais associadas aos apoios que representam os tirantes, sendo determinados a partir das condições de equilíbrio da estrutura.

Quando os tirantes são representados por molas equivalentes, as forças resultam da deformação desses elementos elásticos, sendo mobilizadas progressivamente à medida que ocorrem deslocamentos da cortina. Dessa forma, a magnitude das forças passa a depender da rigidez axial do sistema de ancoragem e da compatibilidade de deformações entre os elementos estruturais.

As forças mobilizadas nos tirantes foram de aproximadamente 141,7 kN, 179,7 kN e 179,6 kN no modelo tradicional, respectivamente. No modelo com molas equivalentes, as forças resultam da soma da carga de incorporação aplicada inicialmente com a parcela adicional mobilizada pela deformação do sistema. Assim, os valores totais obtidos foram de 150,5 kN, 185,6 kN e 191,3 kN para os tirantes, respectivamente. Observa-se que, nesses casos, 150 kN, 180 kN e 170 kN correspondem às cargas de incorporação adotadas, enquanto a

diferença até o valor total representa a mobilização adicional decorrente da interação entre a deformabilidade dos tirantes e os deslocamentos da cortina.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou uma comparação entre o método tradicional de dimensionamento de cortinas atirantadas, no qual os tirantes são representados como apoios equivalentes, e uma abordagem alternativa baseada na representação desses elementos por molas equivalentes, incorporando sua rigidez axial na análise estrutural.

Os resultados obtidos indicam que a forma de idealização dos tirantes influencia diretamente a resposta estrutural da cortina. A representação por apoios rígidos produz restrições de deslocamento nos níveis de ancoragem e diagramas de momentos com variações mais abruptas. Por outro lado, a modelagem por molas permite considerar a deformabilidade do sistema de ancoragem, resultando em deslocamentos distribuídos ao longo do paramento, em uma redistribuição mais gradual dos esforços estruturais e na possibilidade de estimar de forma mais consistente as cargas de incorporação dos tirantes, permitindo ajustar o nível de pré-tensionamento para que o comportamento da estrutura se aproxime das hipóteses adotadas.

De forma geral, a consideração explícita da rigidez dos tirantes conduz a uma representação estrutural mais compatível com o comportamento mecânico esperado para cortinas atirantadas, evidenciando a influência da interação entre o paramento e o sistema de ancoragem na mobilização dos esforços e deslocamentos da estrutura.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Solution IPD pelo apoio técnico e institucional, bem como pela disponibilização de ambiente profissional que possibilitou o desenvolvimento das análises apresentadas neste trabalho. Agradecemos também à Universidade Federal do Paraná (UFPR) pelo suporte científico que contribuíram para a realização deste estudo.

Este trabalho contou com o apoio de ferramentas de inteligência artificial no auxílio à revisão textual e aprimoramento da redação. Ressalta-se, entretanto, que todas as decisões técnicas, análises realizadas e interpretações apresentadas são de inteira responsabilidade dos autores.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Coulomb, C. A. (1776) *Essai sur une application des règles de maximis et minimis a quelques problèmes de statique relatifs à l'architecture*. Memoires de Mathematique de l'Academie Royale de Science, Paris.

Han, J. Y., Zhao, W., Chen, Y., Jia, P. J., Guan, Y. P. (2017) *Design Analysis and Observed Performance of a Tieback Anchored Pile Wall in Sand*. Mathematical Problems in Engineering, v. 2017, p. 1-23.

Pereira, A. B., Porto, T. B. (2020) *Soil-structure interaction applied to anchored retaining walls*. International Journal of Geoscience, Engineering and Technology, v. 1.

Rankine, W. J. M. (1857) *On the Stability of Loose Earth*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, v. 147, p. 9-27.

Strom, R. W., Ebeling, R. M. (2001) *State of the practice in the design of tall, stiff, and flexible tieback retaining walls*. U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg.

Terzaghi, K. (1943) *Theoretical Soil Mechanics*. Wiley, New York.

Winkler, E. (1867) *Die Lehre von der Elasticität und Festigkeit*. H. Dominicus, Prague.