

Modelo Físico Reduzido de CONTENÇÃO de Talude em Estacas Pranchas Metálicas em Solo granular - Estudo Teórico, Numérico e Experimental

Pablo Augusto dos Santos Rocha

Analista de Projetos, ArcelorMittal Projects, Belo Horizonte, Brasil, pablo.as.rocha@arcelormittal.com.br

Mariana Rosas Grandezzi Guerrero

Engenheira de Projetos, ArcelorMittal Projects, São Paulo, Brasil, mariana.grandezzi@arcelormittal.com.br

Luiz Augusto Ferreira Martins

Analista de Projetos, ArcelorMittal Projects, Belo Horizonte, Brasil, luiz.af.martins@arcelormittal.com.br

Denise Christie de Oliveira Capanema

Engenheira Civil Sênior, Vale S.A., Belo Horizonte, Brasil, denise_capanema@hotmail.com

Thiago Bomjardim Porto

Professor e pesquisador, PPGEMIN CEFET-MG, Curvelo, Brasil, thiago.porto@cefetmg.br

RESUMO: Este trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento geotécnico e estrutural de uma contenção com estacas do tipo pranchas metálicas em solo arenoso, utilizando uma abordagem integrada baseada em modelagem física reduzida, simulações numéricas e soluções teóricas-analíticas. Para isso, foi desenvolvido um modelo físico em escala reduzida, no qual uma cortina de estacas pranchas metálicas conformadas a frio foi instalada em uma caixa experimental preenchida com areia de parâmetros previamente definidos. A profundidade de embutimento das estacas foi dimensionada para garantir a estabilidade da contenção sob carregamento. Dois cenários foram testados para simular o rompimento por tombamento: aplicação de carga adicional no tardo e redução do confinamento lateral função do empuxo passivo, observando-se fissuras por tração e formação de cunha de ruptura. Em paralelo, a análise numérica pelo método GLE indicou fator de segurança igual a 1,00, validando tanto os ensaios experimentais quanto as soluções teóricas. Os resultados numéricos e experimentais mostraram-se coerentes, comprovando a viabilidade técnica do modelo adotado. Contudo, a não consideração do atrito lateral entre as estacas e as paredes da caixa pode ter elevado artificialmente a resistência observada, destacando a importância de atenção aos detalhes construtivos em modelos físicos. A integração dos métodos demonstrou-se eficiente para avaliar contenções desse tipo, fornecendo subsídios relevantes para projetos geotécnicos e reforçando a necessidade de validação cruzada entre teoria e prática.

PALAVRAS-CHAVE: Modelo Físico Reduzido, Estrutura de CONTENÇÃO, Análise de Estabilidade, Estacas pranchas Metálica, Estudo Experimental.

ABSTRACT: This study aimed to evaluate the geotechnical and structural behavior of a steel sheet piles wall retaining structure in sandy soil, using an integrated approach based on reduced physical modeling, numerical simulations, and theoretical-analytical solutions. For this purpose, a reduced-scale physical model was developed, in which a curtain of cold-formed steel sheet piles was installed in an experimental box filled with sand with previously defined parameters. The embedment depth of the piles was dimensioned to ensure the stability of the retaining structure under loading. Two scenarios were tested to simulate failure by overturning: the application of additional load on the back of the wall and the reduction of lateral confinement, with tensile cracks and the formation of a failure wedge being observed. In parallel, numerical analysis using the Generalized Limit Equilibrium (GLE) method indicated a safety factor of 1.00, validating both the experimental tests and the theoretical solutions. The numerical and experimental results were consistent, confirming the technical feasibility of the adopted model. However, not considering the lateral friction between the steel piles and the box walls may have artificially increased the observed resistance, highlighting the



2 0 2 5

importance of attention to constructive details in physical models. The integration of these methods proved effective in evaluating such retaining structures, providing relevant insights for geotechnical projects and reinforcing the need for cross-validation between theory and practice.

KEYWORDS: Reduced Physical Model, Retaining Structure, Stability Analysis, Steel Sheet Piles, Experimental Study.

1 INTRODUÇÃO

As contenções de solos são fundamentais em obras de infraestrutura urbana, portuária e ferroviária, onde se faz necessária a estabilização de taludes, escavações profundas e áreas sujeitas à erosão ou movimentações de terra. Entre as soluções tradicionais e versáteis destacam-se as estacas pranchas, empregadas há mais de um século em todo o mundo, com ampla evolução desde os modelos pioneiros de madeira – conhecidos como estacas Wakefield – até os atuais perfis de aço e concreto, que garantem maior desempenho estrutural e facilidade de execução. (ZONTA *et al.*, 2015; RAMALHO *et al.*, 2022).

No século XIX, surgiram os primeiros perfis I laminados de aço, e, por volta de 1890, as estacas Freistadt uniam peças em Z e tipo calha. Em 1895, foi criada na Grã-Bretanha a estaca tipo Universal, embora com desempenho limitado. Nos EUA, Gregson patenteou, em 1899, um novo modelo de conector, enquanto em 1904, Trygve Larssen, na Alemanha, desenvolveu estacas com formato ondulado, que se tornaram referência. Em 1910, a Lackawanna Steel Co. passou a fabricar estacas com conectores integrados. Logo depois, entre 1911 e 1912, surgiram os modelos Ransome e Terre Rouge em Luxemburgo. Em 1914, as estacas Larssen passaram a incorporar conectores na fabricação. A partir da década de 1970, houve um grande avanço na modernização e diversificação dos perfis, consolidando a indústria moderna de estacas pranchas, que hoje pode utilizar madeira, aço ou concreto, conforme as exigências estruturais e ambientais. (KRUGMANN; BOSCHUK; FANG, 1968; PILE BUCK MAGAZINE, 2016; ARCELORMITTAL SHEET PILING, 2025).

Apesar dos avanços, a compreensão do comportamento geotécnico dessas estruturas frente às condições reais de campo – especialmente em solos granulares, como a areia – ainda demanda investigação detalhada. Ensaio físicos em laboratório, aliados à modelagem numérica e a análises teóricas, têm se mostrado ferramentas essenciais para avaliar mecanismos de ruptura, estabilidade global e interação solo-estrutura. (SOUZA; MIRANDA; TONELLI, 2024).

Neste contexto, o presente estudo visa analisar o comportamento de uma contenção de estacas pranchas metálicas em solo arenoso, por meio de uma abordagem integrada: modelagem física reduzida, simulação numérica e comparação com soluções analíticas clássicas. A realização de um experimento laboratorial, associada ao uso de ferramentas computacionais, permite não só validar métodos de projeto, mas também identificar limitações e influências de detalhes construtivos que podem impactar o desempenho da estrutura. Assim, o trabalho contribui para o aprimoramento das práticas de dimensionamento e execução de contenções em obras geotécnicas, além de fomentar a formação técnica e acadêmica dos profissionais.

2 METODOLOGIA UTILIZADA NA PESQUISA

A pesquisa foi conduzida com base em uma abordagem integrada, envolvendo experimentação física em escala reduzida, modelagem numérica computacional e análise teórico-analítica. O objetivo foi promover a validação cruzada dos resultados e fornecer uma compreensão abrangente do comportamento geotécnico da contenção em estacas pranchas metálicas instalada em solo arenoso. A validação entre os modelos se limitou às condições de estabilidade do maciço, de modo a atestar o fator de segurança maior ou igual a 1,00 ($FS \geq 1$). No entanto, o modelo físico foi induzido a ruptura por meio de acréscimo de sobrecargas afim de avaliar as variáveis deslocamento, deformação e módulo de falha com o intuito de se discutir as condições que induziram a ruptura.

2.1 Modelagem física reduzida

O experimento físico foi realizado em laboratório, com a construção de uma caixa de ensaio composta por painéis de vidro e madeirite, reforçada superiormente por uma barra de aço. A caixa foi preenchida com



solo e foi utilizada telha metálica para configurar o paramento. Essa configuração permitiu a visualização do comportamento do solo e da estrutura durante o ensaio.

2.2 Modelagem numérica

Para a modelagem numérica, utilizou-se o software Prosheet, uma ferramenta de fácil aplicação no dimensionamento de contenções em balanço e monoapoiadas (com apenas uma linha de tirantes), com base na teoria de Blum e no método de Equilíbrio Limite, calculando os empuxos segundo a teoria de Caquot-Kérisel — semelhante à de Coulomb, porém considerando uma superfície de ruptura curvilínea (EUROCODE 7, 2004; EUROCODE 7, 2007, ARCELORMITTAL SHEET PILING, 2025).

Foi verificada a estabilidade no software HYRCAN da seção analisada considerando os cenários com e sem paramento, para confrontar os dados obtidos no Prosheet. A estabilidade do maciço foi verificada pelo método de equilíbrio limite *General Limit Equilibrium* (GLE).

2.3. Análise teórico-analítica

Além da experimentação e modelagem numérica, foram realizadas análises teóricas clássicas de estabilidade de contenções, com base nos conceitos de empuxo ativo e passivo, utilizando os coeficientes de Rankine e Coulomb adaptados às condições do experimento. Os resultados analíticos foram confrontados com os obtidos nos ensaios físicos e simulações computacionais, buscando-se identificar convergências e possíveis divergências, bem como as razões para eventuais diferenças, tais como efeitos de escala e interação solo-estrutura.

Na análises teóricas clássicas foi aplicado o método de Rankine para definição dos coeficientes de empuxo passivo e ativo, pressão passiva e ativa e os empuxos passivos e ativos, conforme as Equações 1 a 6.

a) Coeficientes de empuxos:

$$K_p = \tan^2 \times (45^\circ + \phi/2) \quad (1)$$

$$K_a = \tan^2 \times (45^\circ - \phi/2) \quad (2)$$

b) Pressões:

$$\sigma'_p = \sigma'_v \times K_p + 2 \times c' \times K_p^{(1/2)} \quad (3)$$

$$\sigma'_a = \sigma'_v \times K_a + 2 \times c' \times K_a^{(1/2)} \quad (4)$$

c) Empuxos:

$$E_p = (\sigma'_p \times H)/2 \quad (5)$$

$$E_a = (\sigma'_a \times H)/2 \quad (6)$$

2.4. Síntese dos procedimentos

O fluxo metodológico adotado na pesquisa pode ser assim resumido:

1. Construção do modelo físico reduzido e definição dos parâmetros do solo e das estacas.
2. Execução dos ensaios físicos, com monitoramento e registro dos fenômenos observados.
3. Modelagem numérica do sistema experimental com o software Prosheet.
4. Realização de análises teóricas de estabilidade com o software HYRCAN.
5. Comparação crítica dos resultados e discussão das principais tendências, limitações e implicações práticas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para simular o maciço confinado e a cortina de estacas pranchas metálicas, foram utilizadas uma caixa contendo 3 faces e fundo de madeirite e uma face de vidro com aresta superior reforçada com barra metálica, e telhas metálicas cortadas em dimensões reduzidas (aproximadamente 50x50 cm), respectivamente conforme Figura 1.

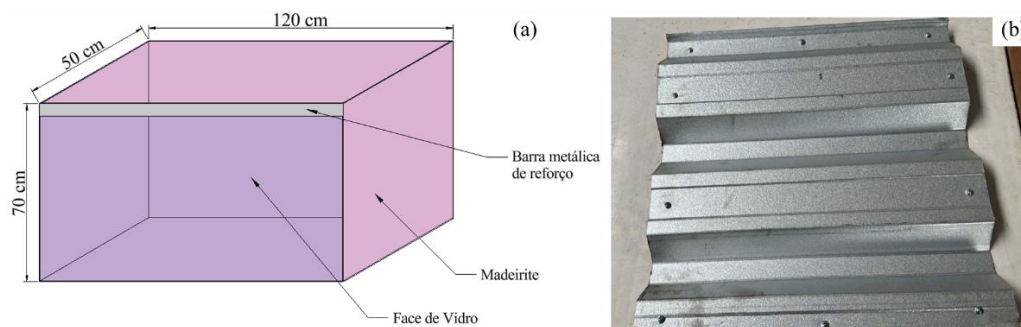


Figura 1. Caixa para confinamento do maciço (a) e telhas metálicas cortadas em dimensões reduzidas (b).

A caixa foi preenchida com areia seca, previamente caracterizada pelo fornecedor, representando um solo granular com parâmetros controlados. A profundidade de embutimento das estacas foi definida de acordo com as limitações físicas do modelo e com base nos critérios de estabilidade, mantendo proporção aproximada de 1,5 vezes a altura aparente do paramento. A caracterização da areia seca é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Caracterização geotécnica da areia fina seca.

Propriedades		Valor/ Faixa
Granulometria	-	0.05 mm a 0.2 mm
Massa específica dos grãos	G_s	2.65 g/cm ³
Grau de compactidade	CR	0,30 a 0.85
Peso específico natural	γ	1.8 g/cm ³
Peso específico seco	γ_d	1.60 a 1.83 g/cm ³
Índice de vazios	e	0.45 a 0.65
Porosidade	n	30% a 40%

A caixa foi preenchida de modo gradual, tanto na zona passiva quanto a zona ativa. As camadas da zona passiva e ativa foram preenchidas concomitantemente até a altura de 30 cm em relação ao fundo da caixa. Após inserção do paramento metálico, completou-se com areia a zona ativa até a altura de 50 cm. Ainda na zona passiva considerou uma geometria em declive com uma inclinação de aproximados 30°. As camadas foram sobrepostas sem controle de compactação do material, considerando a deposição natural do material. A Figura 2 apresenta o início do preenchimento da caixa e identificação dos marcos de monitoramento (a) e a etapa final de preenchimento (b).

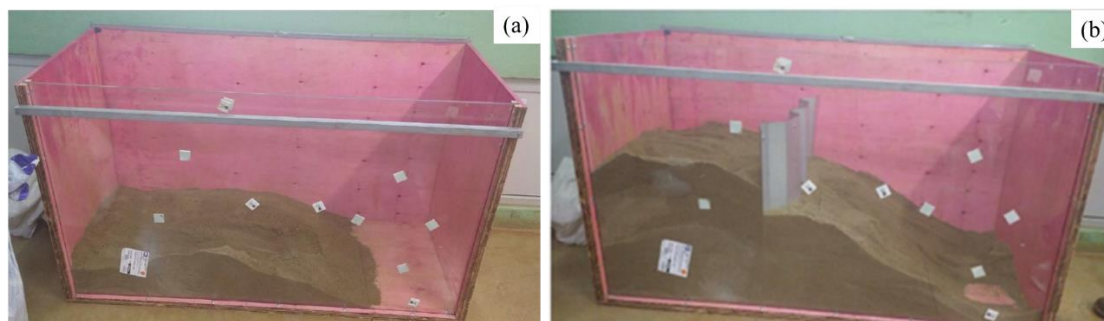


Figura 2. Início do preenchimento da caixa e identificação dos marcos de monitoramento (a) e a etapa final de preenchimento com a instalação das telhas metálicas(b).

Durante o ensaio, foram aplicadas cargas no tardo da contenção e testadas situações de diminuição do empuxo passivo, promovendo condições de ruptura por tombamento. Para simular as sobrecargas, com intuito de induzir a ruptura da seção, foram utilizados 3 blocos cerâmicos maciço com massa específica de 1800 kg/m^3 cada unidade, posicionadas equidistantes e próximas ao topo paramento. A sobrecarga induzida teve como valor aproximado de carga distribuída de $0,24 \text{ kN/m}$.

O comportamento da estrutura foi monitorado visualmente, registrando-se a formação de trincas por tração, deslocamentos e a configuração da cunha de ruptura. Todas as etapas foram documentadas por meio de fotografias, medições e anotações.

Após o carregamento e remoção parcial da ficha de ancoragem, observou-se o início de falha por tombamento, conforme a Figura 3, na qual é possível observar os deslocamentos e a configuração da cunha de ruptura (a) bem como as fissuras e a trinca de tração (b), e a Figura 4, na qual são apresentadas medidas aproximadas no início do ensaio (a) e prestes a desmoronar (b).

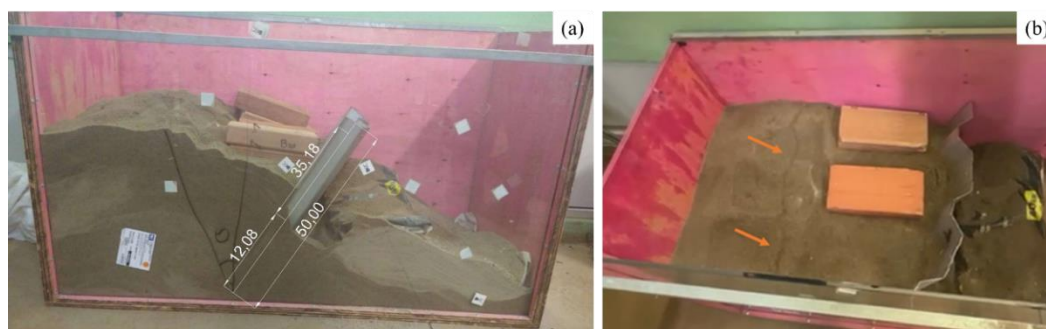


Figura 3. Momento de instabilização, evidenciando cunha de ruptura (a) e fissura por tração (b).

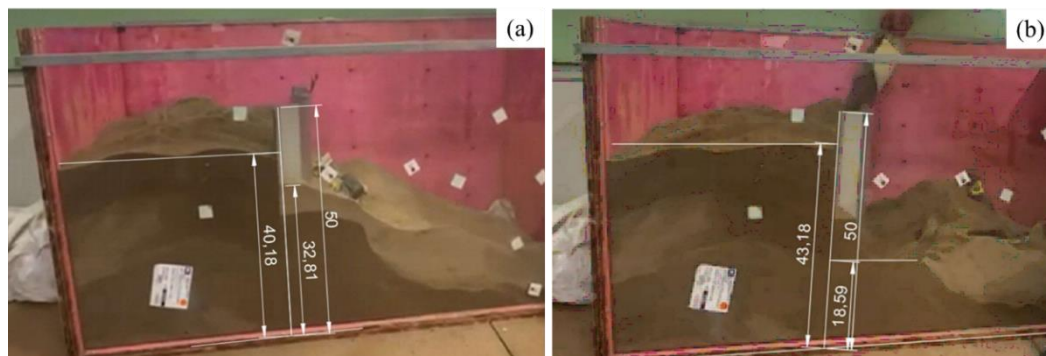


Figura 4. Medidas aproximadas no início do ensaio (a) e prestes a desmoronar (b).

O projeto utilizou parâmetros típicos de solo arenoso, com fator de segurança global ($FS \geq 1,00$) para a verificação da estabilidade, conforme recomendações normativas. Para a estacas pranchas metálicas, foi adotado perfil GU 6N ($f_y = 355 \text{ MPa}$, $h = 309 \text{ mm}$, $t_w = 6 \text{ mm}$, $t_f = 6 \text{ mm}$, $A_v = 1818 \text{ mm}^2$, $B = 700 \text{ mm}$), e os cálculos consideraram resistência ao cisalhamento, peso específico e demais propriedades relevantes ao projeto conforme as Figura 5 e 6 e Tabela 2.

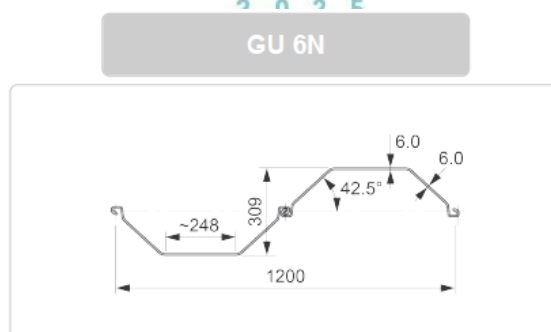
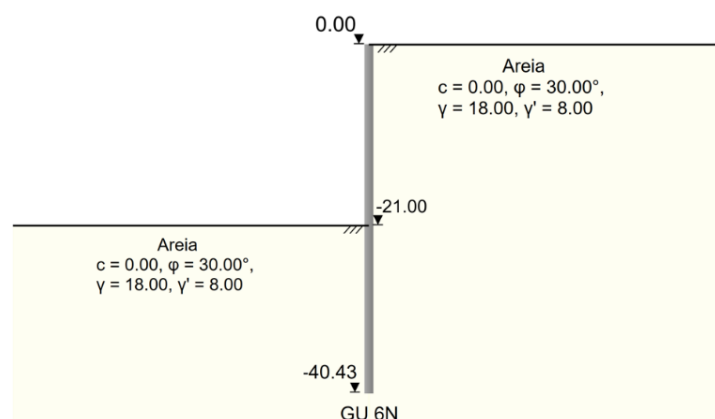


Figura 5. Perfil GU 6N (ARCELORMITTAL SHEET PILING, 2025).

Tabela 2. Principais parâmetros definidos para a areia e as estacas.

Parâmetro	Valor
Solo	Areia seca
Peso específico (γ)	18 kN/m ³
Ângulo de atrito (ϕ)	30°
Coesão (c)	0 kPa
Altura livre (aparente)	21 cm
Comprimento embutido (ficha)	19 cm
Material da estaca	Telha metálica

Figura 5. Modelo numérico representando a seção transversal das estacas pranchas metálicas GU 6N em solo arenoso, com indicação dos parâmetros geotécnicos adotados: coesão (c), ângulo de atrito interno (ϕ), peso específico (γ) e peso específico submerso (γ').

Para verificação da estabilidade do modelo numérico, foram inseridos os dados relacionados a geometria da seção, parâmetros do solo e as características físicas da areia. Os cálculos dos coeficientes de empuxo passivo e ativo são determinados automaticamente, podendo assumir valores com base no peso específico natural e/ou na coesão. A Tabela 3 apresenta os dados inseridos e os calculados automaticamente

Tabela 3. Dados inseridos e calculados no Prosheet.

	Tipo de solo	Peso específico	Peso específico submerso	Coesão	Ângulo de atrito	Coeficiente de empuxo ativo	Coeficiente de empuxo passivo
		(γ) (kN/m ³)	(γ') (kN/m ³)	(c) (kN/m ²)	(ϕ) (°)	(K_a) -	(K_p) -
Em frente do paramento	Areia	18	8	0	30	-	3.000
Atrás do paramento	Areia	18	8	0	30	0.333	3.000

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O modelo físico permitiu observar o comportamento do sistema de contenção sob carregamento, evidenciando a formação de trincas por tração e o desenvolvimento da cunha de ruptura típica de falha por tombamento. O ensaio indicou estabilidade compatível com as previsões teóricas até a remoção parcial do embutimento, momento em que se iniciou o processo de falha. Os valores estimados de deslocamentos são apresentados para cada modelo.

Na modelagem numérica, o método GLE e o Prosheet indicaram fator de segurança igual a 1,00 para o caso de ruptura, validando os resultados experimentais e teóricos. Em condição sem contenção, o FS calculado foi 0,915, comprovando a necessidade da estrutura para garantir estabilidade ao talude, conforme as Figuras 11 e 12.

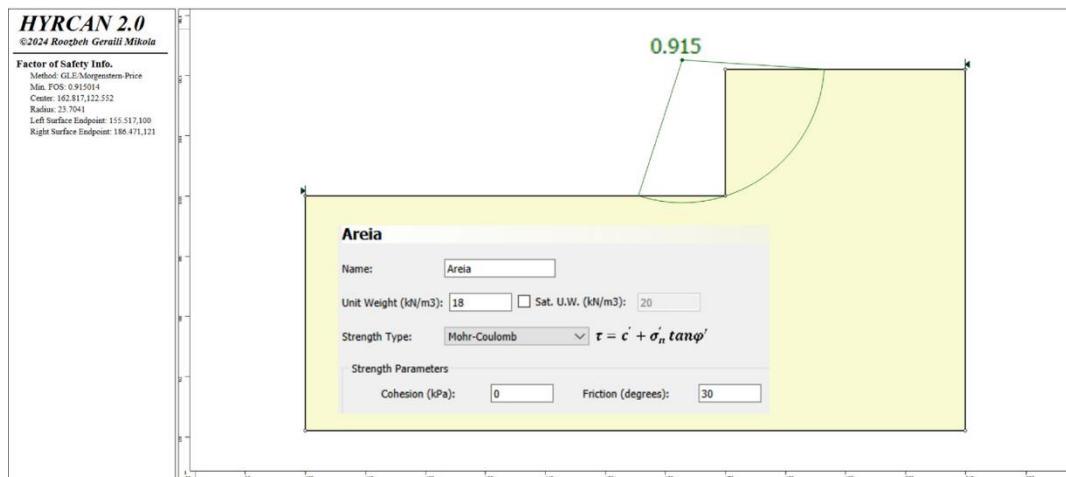


Figura 11. Verificação do fator de segurança geotécnico (FS) para o talude em solo arenoso sem estrutura de contenção, obtido por modelagem numérica (FS = 0,915).

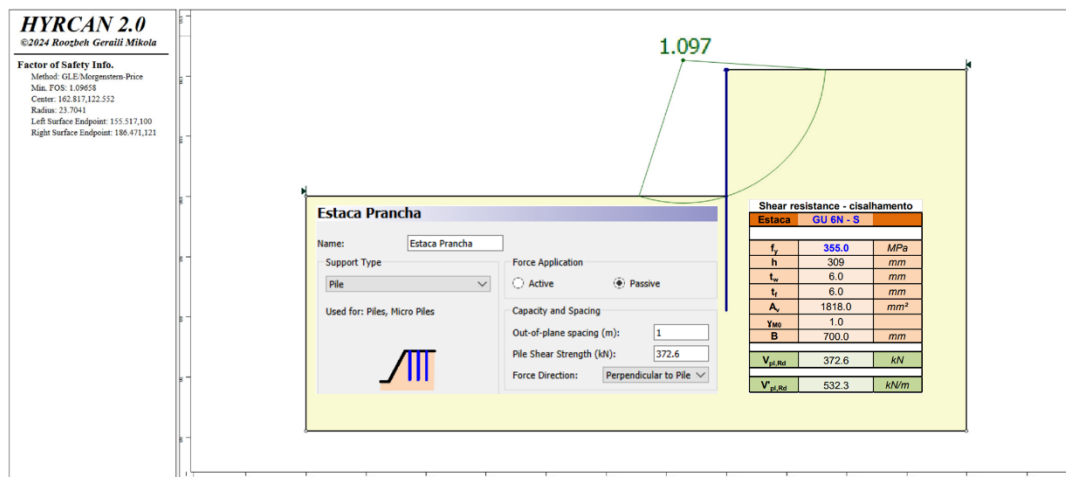


Figura 12. Verificação do fator de segurança geotécnico (FS) para o talude em solo arenoso com contenção em estacas pranchas metálicas do tipo GU 6N, indicando o aumento da estabilidade do sistema (FS = 1,097).

Cabe ressaltar que o atrito lateral entre as estacas metálicas e as paredes da caixa de ensaio não foi considerado adequadamente no modelo físico, podendo resultar em superestimação da resistência do sistema. Tal observação reforça a importância do rigor construtivo e da representatividade dos ensaios físicos.

Os modelos e análises confrontados apresentaram resultados satisfatórios quanto à estabilidade da estrutura. No entanto, é crucial entendermos que somente a verificação da estabilidade não garante a segurança do projeto. Logo, é necessário em verificações reais de projeto, que seja realizado o estudo das tensões atuantes sobre a seção da contenção definida. Tal verificação, permite avaliar a capacidade de suporte do material utilizado no paramento a longo prazo e sob efeitos adversos, inclusive da agressividade ambiental.



No mais, para que se possa aprimorar o modelo físico reduzido aos modelos numéricos, é necessário que haja instrumentos para aferição de deslocamentos, deformações e outros mais. Também, se faz necessário o uso de sistema de aplicação de carga vertical, para que possam ser monitorados as possíveis cargas de pico e o instante da ruptura.

5 CONCLUSÕES

A combinação entre ensaios experimentais, modelagem numérica e análises teóricas mostrou-se eficaz para a avaliação de contenções em estacas pranchas metálicas em solos arenosos. Os resultados demonstraram boa concordância entre as diferentes abordagens, oferecendo subsídios confiáveis para projetos reais e destacando a importância da validação cruzada. A atenção aos detalhes construtivos dos modelos físicos é fundamental para a fidelidade dos resultados, especialmente no que se refere à interação solo-estrutura.

Ao se definir a intenção de utilizar modelos físicos reduzidos é fundamental, definir quais os demais modelos numéricos e/ou analíticos poderão ser adotados para que não haja erros de compatibilidade e má interpretação dos resultados. Por fim, os modelos físicos reduzidos nos permitem avaliar em escala reduzida o comportamento de estruturas de grande porte, que só poderiam ser avaliadas em condições de projeto executado.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), Campus Curvelo, pelo suporte estrutural e disponibilização dos laboratórios para a realização dos experimentos. Agradecem também à ArcelorMittal Projects pelo apoio técnico e fornecimento de materiais essenciais ao desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ArcelorMittal Sheet Piling (2025). *Steel Foundations Solutions: General Catalogue 2025*. ArcelorMittal Commercial RPS S.à r.l, Luxembourg, ed. 02.2025, 72p.
- Eurocode 7 (2004) - *Geotechnical design - Part 1: General rules*. British Standard, London, England.
- Eurocode 7 (2007) - *Geotechnical design - Part 2: Ground investigation and testing*. British Standard, London.
- Krugmann, P. K.; Boschuk, J. Jr.; and Fang, H. Y. (1968). *Annotated bibliography on steel sheet pile structures*, March 1967. Fritz Laboratory Reports. Lehigh University Bethlehem, Pennsylvania, paper 365, 70p.
- PileBuck Magazine (2016). *Chapter One: Overview of Sheet Piling (Sheet Pile Design by Pile Buck)* In: SHEET PILING 101: DIFFERENT SHAPES, PRODUCTION TYPES AND PROJECT APPLICATIONS. THE INTERNATIONAL DEEP FOUNDATIONS AND MARINE CONSTRUCTION MAGAZINE. MAR/APR 2016, VOLUME 32, ISSUE 2, p.66-94.
- Ramalho, A. S.; Furman, J.; Vieira, K. T. P.; Luz, C. C.; Brum, L. P. (2022). Análise de Cravabilidade de Estacas-Prancha Metálicas: Estudo de Caso em Solo da Formação Guabirotuba. In: XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG 2022, Campinas. *Anais eletrônicos...*, Galoá, 2022.
- Souza, T. R.; Miranda, T. C.; Tonelli, P. F. (2024). Análise Numérica de Contenção em Estacas pranchas Metálicas de Cais de Porto. In: XXI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG, 24 a 27 de setembro de 2024 – Balneário Camboriú/SC. *Anais eletrônicos [...]*, Projecta, 2024.
- Zonta, J. T.; Moro, R. C.; Ramalho, A. S.; Luz, C. C.; Ratton, E.; Franco, E. J.; Nadal, C. A.; Ratton, P. (2015). Projeto de uma trincheira utilizando estacas metálicas. In: 9º Congresso Brasileiro de Rodovias & Concessões e BRASVIAS, 2015, Brasília. *Anais [...]*, 9º CBR&C e BRASVIAS, Brasília, 2015. Disponível em: https://itti.org.br/wp-content/uploads/2014/08/images_Artigos_certos_Projeto%20de%20uma%20trincheira%20-%20Zonta.pdf. Acesso em: 12 de Junho de 2025.