



# ESTUDO DE CASO: ENSAIO DINÂMICO NÃO DESTRUTIVO BASEADO NA RIGIDEZ DINÂMICA DE ANCORAGENS GEOTÉCNICAS

Emanuel Gomes Cândido Coelho

Discente de Mestrado, UFOP, Ouro Preto, Brasil, emanuel.coelho@aluno.ufop.edu.br

Lucas Deleon Ferreira

Professor, UFOP, Ouro Preto, Brasil, lucas@ufop.edu.br

Philippe Beno

Diretor, RINCENT, Recife, Brasil, diretor@rincent.com.br

Jean-Jacques Rincent

Presidente, RINCENT, Recife, Brasil, jacques.rincent@rincent.com

Thiago Bomjardim Porto

Professor, CEFET-MG, Montes Claros, Brasil, thiago.porto@cefetmg.br

**RESUMO:** Deslizamentos de encostas causam grandes danos materiais e humanos, muitas vezes agravados pela ocupação desordenada. Uma técnica comum de estabilização é a cortina atirantada, cujos tirantes exigem monitoramento anual. O método tradicional (ensaio estático) pode danificar a estrutura, destacando a necessidade de técnicas não destrutivas (END). Este estudo investigou uma END inovadora, baseada em ondas mecânicas geradas por um golpe de martelo manual, captadas pelo acelerômetro, permitindo avaliar o comprimento e a carga dos tirantes sem danificá-los. Aplicada em uma cortina atirantada no Rio Grande do Sul (273 tirantes, 40 anos de uso), a técnica revelou cargas variando entre 11,0 kN e 181,0 kN, com maior rigidez dinâmica nos tirantes da base (média de 536 MN/m). Dois ensaios estáticos foram usados para calibração do método. A abordagem mostrou-se rápida, econômica e segura, superando as limitações do ensaio tradicional. Conclui-se que a END por rigidez dinâmica é promissora para monitoramento contínuo, garantindo a segurança estrutural com menor invasividade.

**PALAVRAS-CHAVE:** Testes de integridade, Tirantes, Monitoramento, impedância mecânica.

**ABSTRACT:** Landslides cause significant material and human damage, often worsened by uncontrolled urban expansion. A common stabilization technique is the use of anchored retaining walls, whose tie rods require annual monitoring. Traditional methods (static load tests) may damage the structure, highlighting the need for non-destructive testing (NDT). This study investigated an innovative NDT technique based on mechanical waves generated by manual hammer strikes, captured by an accelerometer, allowing the evaluation of tie rod length and load without causing damage. Applied to an anchored wall in Rio Grande do Sul (273 tie rods, 40 years in service), the technique revealed load variations between 11.0 kN and 181.0 kN, with higher dynamic stiffness in the base tie rods (average of 536 MN/m). Two static load tests were used for method calibration. The approach proved fast, cost-effective, and safe, overcoming the limitations of conventional testing. The study concludes that dynamic stiffness-based NDT is a promising solution for continuous monitoring, ensuring structural safety with minimal invasiveness.

**KEYWORDS:** Palavras chaves em inglês seguindo as mesmas regras da versão em português



## 1 INTRODUÇÃO

Deslizamentos de terra estão entre os desastres naturais que mais causam perdas humanas e materiais no Brasil, e são frequentemente agravados pela ocupação desordenada de encostas urbanas e pela ausência de planejamento territorial (Milititsky, 2016; IBGE, 2019). Um estudo de Macedo e Sandre (2023) identificou que entre 1988 e 2022, esses eventos vitimaram, em média, 118 pessoas por ano – sendo a tragédia da Região Serrana do Rio de Janeiro, em 2011, um marco dramático com 969 mortes.

Diante dessa realidade, as cortinas atirantadas se destacam como soluções técnicas viáveis para estabilização de taludes, sobretudo em áreas urbanas. Essa tecnologia é considerada eficiente do ponto de vista técnico e econômico (PORTO; TORRES; GOMES, 2017), tendo como elemento principal o tirante (BENO e DANTAS, 2019; BENO et al., 2020; BENO e PEREIRA, 2021). De acordo com a NBR 5629 (2018), os tirantes podem ser classificados como provisórios ou permanentes, variando também quanto ao tipo – monobarra, fios ou cordoalhas.

Gerscovich, Danziger e Saramago (2016) explicam que os tirantes são tensionados até uma carga de incorporação e fixados por placas e porcas na cortina. Palop, Ivanovic e Brennan (2013) reforçam que a transferência de tensões ao solo ou rocha é essencial ao funcionamento da ancoragem. No entanto, perdas de carga ao longo do tempo podem comprometer essa funcionalidade (LIAO, 2018; MACHADO e MENDES, 2018), sendo classificadas como imediatas, progressivas ou externas, conforme apontado por Porto (2015).

Estudo de Rincent (2023) evidenciou perdas médias de 5,5% ao ano em tirantes com mais de 30 anos de uso, reforçando a importância do monitoramento contínuo dessas estruturas. Apesar da NBR 15.575 (2024) prever vida útil de projeto (VUP) mínima de 50 anos para sistemas estruturais, a NBR 5629 (2018) limita-se a recomendar inspeções anuais e medidas corretivas em caso de anomalias, baseando-se majoritariamente em métodos destrutivos e estáticos – procedimentos que podem comprometer a integridade da estrutura e dificultam avaliações periódicas.

Como alternativa, os ensaios dinâmicos não destrutivos vêm ganhando destaque por permitirem a avaliação do desempenho de ancoragens sem a necessidade de intervenções invasivas. Essa técnica, baseada na análise da impedância mecânica, tem sido apontada como promissora por diversos autores (BENO e DANTAS, 2019; BENO et al., 2020; BENO e PEREIRA, 2021), oferecendo dados relevantes como comprimento livre, comprimento ancorado e carga de trabalho dos tirantes.

Assim, este trabalho tem como objetivo apresentar e discutir uma metodologia não destrutiva baseada em ensaios dinâmicos para avaliação de ancoragens, conforme desenvolvida por Rincent. A aplicação prática foi realizada em uma cortina atirantada situada na região Sudeste do Brasil, com o intuito de contribuir para o avanço técnico e normativo na área de contenções estruturais.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

A área de estudo comprehende uma estrutura de contenção por ancoragem situada no km 35+300 da RS-235, no município de Gramado, Rio Grande do Sul. Esta obra, executada nos primeiros anos da década de 1990, apresenta 160 metros lineares de extensão e atende a um desnível máximo de 10 metros. O sistema construtivo empregou tirantes ativos do tipo monobarra com 32 mm de diâmetro, complementados por um sistema de drenagem composto por drenos barbacãs (superficiais) e drenos sub-horizontais (profundos) para controle do fluxo d'água no maciço.

O perfil geotécnico local apresentou três camadas distintas: nos primeiros 3 metros encontrou-se material de aterro argiloso; entre 3 e 7 metros de profundidade predominaram solos siltosos com intercalações arenosas; enquanto a partir de 7 metros até a cota final de perfuração em 10,80 metros, identificou-se a presença de rocha basáltica. Esta configuração geológica influenciou diretamente na execução e desempenho das ancoragens.

Para avaliação dos tirantes, foram realizados dois ensaios de calibração, através de ensaios estáticos e dinâmicos. O ensaio dinâmico foi aplicado em 266 ancoragens das 273 projetadas, sendo que para cada tirante realizaram-se 6 golpes de martelo de impacto. O sistema de medição empregou geofone de alta sensibilidade, caixa de aquisição de dados digital e software especializado para análise espectral. As análises de comprimento dos tirantes foram processadas considerando velocidades de onda de 4.000 m/s e 4.500 m/s para comparação dos resultados.



Figura 1. Estrutura de contenção RS-235 KM35+300.

Fonte: Rincent BTP (2018).

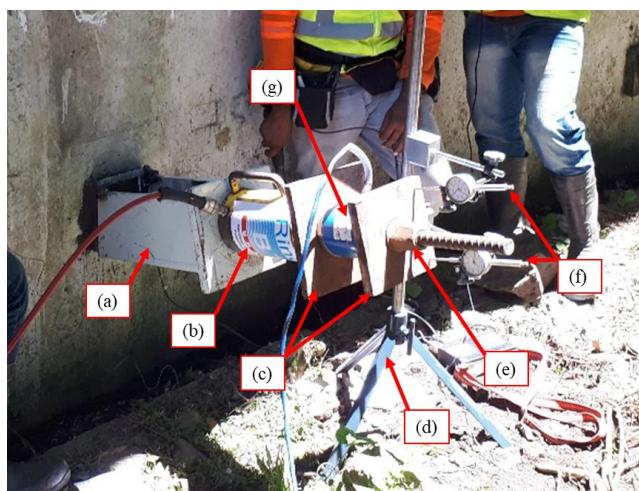


Figura 2. Equipamentos utilizados para os Ensaios Estáticos (a) Base para macaco; (b) Macaco hidráulico; (c) Placas de apoio; (d) Tripé para extensômetros; (e) Porca; (f) Extensômetros; (g) Dinamômetro.

Fonte: Rincent BTP (2018).

Os ensaios estáticos de prova de carga foram realizados em dois tirantes selecionados, seguindo um protocolo de carregamento em 5 estágios progressivos: 50 kN, 100 kN, 150 kN, 200 kN e 250 kN. Para cada estágio de carga, manteve-se a aplicação por período suficiente para estabilização dos deslocamentos, utilizando macaco hidráulico de capacidade adequada apoiado em base rígida. O sistema de medição incluiu extensômetros de precisão, dinamômetro calibrado e acessórios de apoio, permitindo o registro preciso da relação carga-deslocamento em cada etapa de carregamento.

Os ensaios dinâmicos e de calibração seguiram uma sequência simples e objetiva. Inicialmente, garantiu-se o acesso ao local e realizou-se a numeração dos painéis e tirantes. Em seguida, o concreto que recobria a cabeça dos tirantes foi removido para viabilizar as medições de diâmetro e inclinação. Após essa etapa, foram realizados os ensaios de calibração estática, que serviram como referência para comparação com os resultados obtidos nos ensaios dinâmicos.

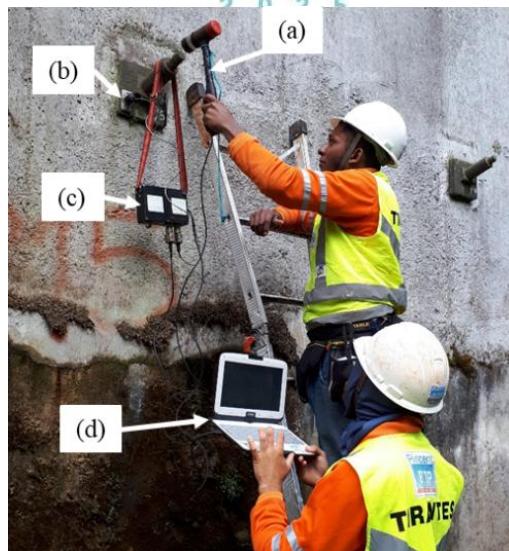


Figura 3. Equipamentos utilizados para os END (a) Martelo; (b) Geofone; (c) Caixa de aquisição; (d) Computador.

Fonte: Rincent BTP (2018).

Na fase seguinte, aplicou-se um impacto com martelo instrumentado no eixo do tirante, gerando vibração. A força do impacto foi registrada por um sensor acoplado ao martelo, enquanto a velocidade da onda foi captada por um sensor fixado na placa de apoio. Os dados foram processados em um computador, com análise da curva V/F em função da frequência.

Por fim, os valores de rigidez dinâmica foram comparados com os de rigidez estática, permitindo a estimativa da carga de trabalho dos tirantes ensaiados. Com base nos dados obtidos, foram comparados os comprimentos livres e totais dos tirantes medidos em campo com os valores definidos em projeto. Além disso, as cargas de trabalho atuais, determinadas pelos ensaios dinâmicos, foram analisadas em relação às cargas originalmente projetadas, possibilitando uma avaliação do desempenho estrutural ao longo do tempo e da possível perda de carga por relaxação da protensão.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir da inspeção visual detalhada da estrutura, foi possível identificar diversas manifestações patológicas com potencial para comprometer sua estabilidade e o desempenho ao longo do tempo. Entre as anomalias constatadas, chamou atenção a presença de vegetação nas juntas de dilatação — indício de infiltrações prolongadas e de acúmulo de matéria orgânica nesses pontos. Também foram observados sinais recorrentes de umidade em diferentes áreas da estrutura, perceptíveis por meio de manchas, eflorescências e regiões com superfície constantemente úmida. Outro aspecto relevante foi o deslocamento de alguns painéis, o que pode estar associado a falhas no sistema de ancoragem ou em elementos de sustentação.

Adicionalmente, foram identificadas patologias específicas relacionadas aos tirantes, conforme detalhado no Quadro 1. As principais ocorrências incluem a ausência de tirantes em determinados pontos, além de falhas no posicionamento ou fixação das placas de ancoragem, como placas soltas ou parcialmente apoiadas sobre o concreto. Além das patologias previamente mencionadas, foram identificadas outras anomalias em sete tirantes, incluindo a ausência de elementos de ancoragem e a presença de placas soltas ou com fixação inadequada.



2 0 2 5

Quadro 1. Ocorrências encontradas.

Fonte: RINCENT BTP (2018).

Painel	Tirante	Ocorrência
10	T2	Tirante Inexistente
11	T13	Placa Solta
12	T9	Tirante Inexistente
12	T16	Placa Solta
13	T16	Placa Solta
14	T16	Placa parcialmente apoiada sobre o concreto
15	T20	Placa parcialmente apoiada sobre o concreto

Após a inspeção visual, foram realizados ensaios de calibração estáticos e dinâmicos em dois tirantes: T14 (painel 8) e T15 (painel 2), conforme ilustrado na Figura 2. Os ensaios estáticos apresentaram comportamento satisfatório, permitindo a determinação das cargas atuantes e da rigidez de cada tirante.

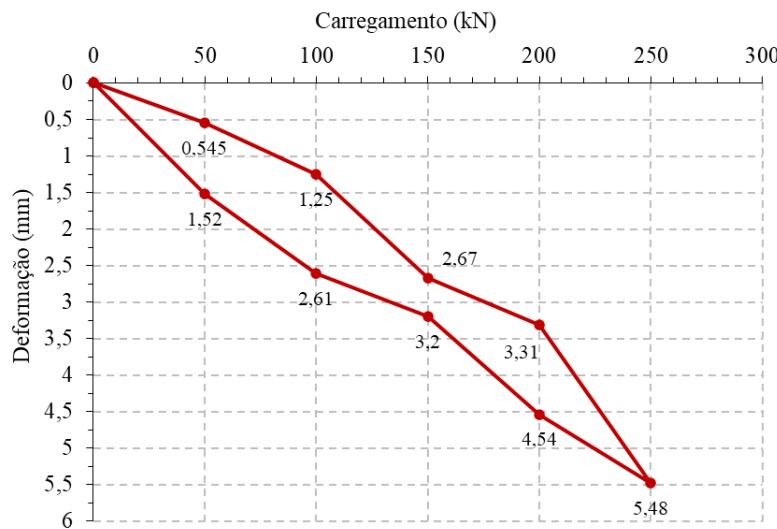


Figura 4. Ensaio Estático Tirante T15 painel 2.

Fonte: Adaptado de Rincent BTP (2018).

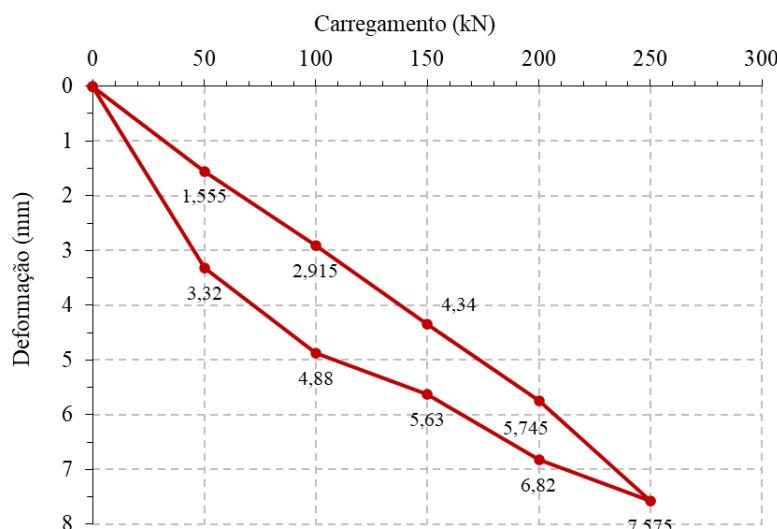


Figura 5. Ensaio Estático Tirante T14 painel 8.

Fonte: Adaptado de Rincent BTP (2018).



2025

Observou-se que o T15 sofreu menores deformações em relação ao T14, indicando maior rigidez. As cargas de trabalho determinadas foram de 130 kN para o T15 e 126 kN para o T14. Nos ensaios dinâmicos (END), as rigidezes dinâmicas obtidas foram de 1.418,50 MN/m para o T14 e 1.504,28 MN/m para o T15, cada valor foi calculado com base na média de três aquisições por segmento de comprimento através da Equação 1.

Segundo Rincet (2024), uma das maneiras possíveis de se determinar o valor da rigidez observada (B) consiste na análise da rigidez de um tirante submetido a uma tensão muito baixa, próxima de zero, porém ainda não completamente descarregada. A escolha da metodologia mais adequada para essa estimativa exige criteriosa avaliação por parte do profissional responsável, visto que o valor de B deve representar fielmente o comportamento mecânico do tirante em estudo. A partir dos ensaios de calibração e da Equação 2 é possível determinar o valor de A e B, 2805 e 2320 N/m respectivamente .

$$Rd = \frac{2 \times \pi \times f_m}{\left(\frac{V_0}{F_0}\right)} \quad (1)$$

Onde:

$Rd$  = Rigidez dinâmica (N/m);

$f_m$  = Variação de frequência;

$\frac{V_0}{F_0}$  = Variação da mobilidade.

$$\sqrt{Rd} = \frac{F_t}{10} \times A + \sqrt{B} \quad (2)$$

Onde:  $B$  = rigidez observada (N/m);  $T$  = Carga de trabalho (N);  $A$  = parâmetro adimensional;  $Rd$  = Rigidez dinâmica (N/m);

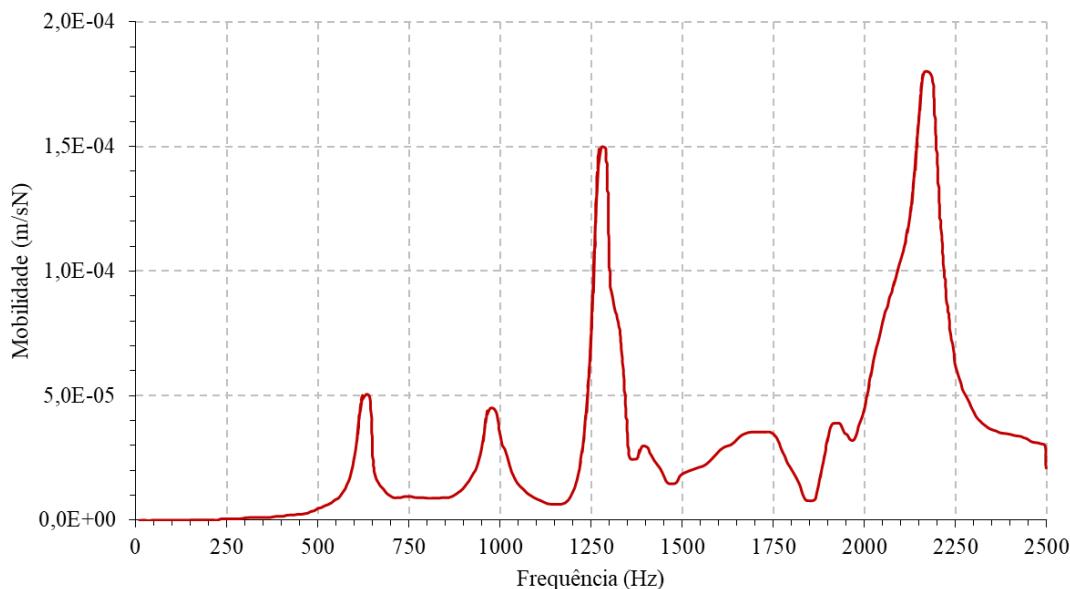


Figura 6. Curva V/F (T14-Painel 8-Aquisição B).

Fonte: RINCENT BTP (2018)

A Figura 6 apresenta a curva de mobilidade referente à aquisição B, obtida nos ensaios realizados no tirante T14, localizado no painel 8. Observa-se um regime vibratório bem definido, com espaçamento entre picos de frequência da ordem de 180 Hz.



2 0 2 5

Aplicando-se a Equação 3, obteve-se uma variação de frequência para o comprimento livre de aproximadamente 444 Hz, resultando em valores de 4,54 m para uma velocidade de 4.000 m/s e 5,10 m para 4.500 m/s. Quando comparados aos valores de projeto — 5,0 m para o comprimento livre e 12,0 m para o comprimento total —, os resultados mostram boa aproximação, indicando coerência entre os dados medidos e as dimensões previstas. Além disso, ao aplicar a Equação 4 para o cálculo do comprimento total, foram encontrados valores de 11,10 m e 12,50 m para velocidades de 4.000 m/s e 4.500 m/s, respectivamente.

$$Ll = \frac{V}{2 \times \Delta fl} \quad (3)$$

$$Lt = \frac{V}{2 \times \Delta ft} \quad (4)$$

Onde:  $Lt$  = comprimento total do tirantes (m);  $Ll$  = comprimento livre do tirantes (m);  $v$  = velocidade da onda (m/s);  $\Delta fl$  = variação livre da frequência (Hz);  $\Delta ft$  = variação total da frequência (Hz);

Na Figura 7 é apresentado o mapa de cargas, em quilonewtons (kN), obtido a partir dos ensaios realizados conforme metodologia proposta por Rincent. A numeração dos tirantes foi organizada segundo a disposição vertical — de cima para baixo — e horizontal — da esquerda para a direita — em cada painel, garantindo uniformidade na identificação e interpretação dos dados. Observa-se, por exemplo, que no painel 4 o tirante T1 apresentou carga de 60 kN, enquanto o tirante T5, pertencente ao mesmo painel, registrou 33 kN.

PAINEL 1				PAINEL 2				PAINEL 3				PAINEL 4				PAINEL 5				PAINEL 6			
29	25	20	35	50	68	48	60	72	79	68	65	60	61	61	55	76	71	64	54	51	35	51	51
64	47	23	22	50	47	63	42	65	63	63	49	33	70	66	63	59	46	55	64	30	29	20	36
	60	75	84	86	93	101	91	91	67	78	88	78	83	77	75	67	98	86	78	85	72	58	74
	93	112	160	141	130	124	106	137	127	110	131	58	78	100	110	108	94	106	123	139	102	117	
PAINEL 7				PAINEL 8				PAINEL 9				PAINEL 10				PAINEL 11				PAINEL 12			
69	76	58	62	74	64	41	50	89	73	81	76	64	0	83	70	70	43	83	80	52	69	60	61
26	26	29	27	66	50	29	27	33	31	28	40	23	32	16	23	39	36	24	36	15	27	21	14
77	92	85	87	60	78	73	58	88	91	73	77	67	68	62	66	46	59	43	68	0	50	50	65
76	111	118	116	48	126	74	97	133	126	143	123	167	126	171	145	24	36	62	70	72	11	76	11
PAINEL 13				PAINEL 14				PAINEL 15				PAINEL 16											
80	88	75	69	59	59	68	62	70	74	56	73	54	58	59	12	30	45						
38	40	36	36	23	15	23	19	18	21	21	22	23	25	18	19	37	66						
46	46	34	33	29	43	37	34	27	19	23	33	31	15	33	55	50							
27	62	59	0	5	83	94	77	75	67	48	32	47	5	57	83								
58	120	80	120	123	147	125	141	147	156	137	160	146	181	105									

Figura 7. Mapa de Carga  
Fonte: Adaptado de Rincent BTP (2018).

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O ensaio dinâmico não destrutivo baseado na rigidez dinâmica aplicado às ancoragens mostrou-se eficiente na determinação dos comprimentos livre e total, além da estimativa da carga de trabalho da cortina analisada. A pesquisa evidenciou que, apesar da execução do método ser relativamente simples, a análise e interpretação dos resultados exigem conhecimento técnico e atenção aos detalhes.



A técnica apresentou-se como uma alternativa promissora aos métodos tradicionalmente utilizados em fundações profundas, como o *Sonic Echo e o Impulse Response*. Seu principal diferencial está na possibilidade de estimar a carga de trabalho a partir da análise da rigidez do tirante, ampliando as aplicações do método para além do controle de integridade física.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à RINCENT BTP pelos dados fornecidos para o desenvolvimento do presente trabalho, a Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) pelo fomento à pesquisa, e disponibilização de infraestrutura para a realização deste trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2018). NBR 5629. *Tirantes ancorados no terreno – projeto e execução*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2024). NBR 15575-1. *Edificações habitacionais — Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais*. Rio de Janeiro.
- Beno, P.J.N., e Dantas, P.D.U. (2019). Ensaios de impedância mecânica em 7 cortinas atirantadas próximas ao município de Gramado/RS. In: Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia - SEFE 9, São Paulo, SP.
- Beno, P.J.N., e Dantas, P.D.U. Rossi, B. M. C. Filho, P. R. M. 2020. Ensaios Não Destrutivos de Impedância Mecânica em Cortinas Atirantadas localizadas na Serra do Mar, nas Proximidades do Município de Cubatão/SP. XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, COBRAMSEG São Paulo, SP.
- Beno, P.J.N., e Pereira, A.P.G. 2021. Ensaios dinâmicos não destrutivos de impedância mecânica em estruturas de contenção de uma encosta localizada no Rio de Janeiro/RJ. VIII Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas, COBRAE, Porto de Galinhas, PE.
- Gerscovich, D.M.S., Danziger, B.R., e Saramago, R. (2016). *Contenções: teoria e aplicações em obras*, 2. ed., Oficina de Textos, São Paulo, BR, 320 p.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2019). *Suscetibilidade a deslizamentos do Brasil: primeira aproximação*. Rio de Janeiro.
- Liao, J. (2018) Ground anchors corrosion - the beginning of the end. *MATEC Web Conf.*, 195.
- Macedo, E. S., Sandre, L. H. (2022). Mortes por deslizamentos no Brasil: 1988 a 2022. *Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental*, 20 (1), p.110-117.
- Machado, A. X.; Mendes, L. C. (2018). Verificação de carga em cortinas ancoradas localizadas em áreas de risco geotécnico na cidade do Rio de Janeiro. *Revista ALCONPAT*, 8 (1), p. 64-78.
- Milititsky, J., (2016). *Grandes escavações em perímetro urbano*. Oficina de Textos, São Paulo, BR, 144 p.
- Palop, K.; Ivanovic, A.; Brennan, A. J. (2013). Centrifuge modeling of the nondestructive testing of soil anchorages. *Journal of Geotechnical and geoenvironmental engineering*, 139, p. 880-891.
- Porto, T.B., Torres, A.C.A., e Gomes, R.C. (2017). Behaviour of reinjectable and prestresses anchors in soil masses: construction case study in Congonhas – Brazil. *Soil and Rocks*, 40 (2), p. 177-186.
- Rincent, J. J. (2023). *Ensaios não destrutivos: Análise Vibratória – Aplicações em Tirantes-Força*. RG Editores, São Paulo, BR, 168 p.
- Rincent, J. J., (2024). *Ground Anchors: Tension Force – Vibratory Analysis*. Springer Singapura, Singapura, 158 p.