

Received:
January 26, 2025

Accepted:
January 29, 2025

Published:
January 29, 2025

A study on dynamic non-destructive testing of ground anchorages - dynamic stiffness method

Emanuel Gomes Cândido Coelho¹ , Lucas Deleon Ferreira¹ , Jean-Jacques Rincint² , Antônio Jorge de Lima Gomes^{3,4} , Armando Belato Pereira⁵ , Marcos Túlio Fernandes⁵ , Ticiane Schivitz Elacoste⁶ , Thiago Bomjardim Porto⁵ 

¹ Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil.

² RINCENT BTP Brasil, Recife, Brasil.

³ Université d'Evry-Val-d'Essonne, Evry, França.

⁴ Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Teófilo Otoni, Brasil.

⁵ Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Curvelo, Brasil.

⁶ Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, Brasil.

Email address

emanuel.coelho@aluno.ufop.edu.br (Emanuel G.C. Coelho) – Corresponding author.

lucas@ufop.edu.br (Lucas D. Ferreira)

jean-jacques.rincint@rincint.com (Jean-Jacques Rincint)

antoniojorge.delimagomes@univ-evry.fr (Antônio J.L. Gomes)

armandobelato@cefetmg.br (Armando B. Pereira)

marcofster@cefetmg.br (Marcos T. Fernandes)

ticiane_rg@hotmail.com (Ticiane S. Elacoste)

thiago.porto@cefetmg.br (Thiago B. Porto)

Abstract

This present paper analyzes an anchored retaining wall using a non-destructive dynamic test, which is based on the variation of the dynamic stiffness of the ground anchors, applied to a real case study. The main objective is to evaluate the applicability and particularities of the method to identify the structural integrity of the anchorages, including their free, total and anchored lengths, as well as their current working loads. The results indicated that the dynamic stiffness of the anchorages varied around $5.0E8$ N/m, while the working loads found were values between 74.6 kN and 107.9 kN. The analyses performed indicated that the dynamic stiffness of the anchorages did not present large variations along the anchored wall, proving that the determined lengths accurately reflect the real situation of the anchorages. In addition, a very isonomic distribution of forces was obtained, evidenced by the stiffness values obtained. The method stood out for its practicality in execution and analysis of results, consolidating itself as an effective and non-destructive tool for structural evaluation. Despite the general ease of the method, the study reinforces the need for technical experience in the interpretation of specific steps of the procedure, especially in cases with more complex structural behavior. The test proved to be a reliable solution for the continuous monitoring and diagnosis of containment systems, meeting the requirements of normative inspections and contributing to preventive maintenance. Thus, the work reinforces the potential of the method to ensure the safety, structural performance and longevity of anchored walls.

Keywords: Integrity tests, Mechanical impedance, Anchorage monitoring.

1. Introdução

No Brasil, os deslizamentos de terra estão entre os eventos que mais provocam danos materiais e perda de vida humana. Embora sejam fenômenos naturais, a ação humana frequentemente contribui para sua aceleração ou agravamento. Um dos

principais fatores responsáveis por esses processos é a ocupação desordenada de áreas de encosta, resultado de uma urbanização acelerada combinada à ausência de planejamento adequado (Nobre et al., 2011; Milititsky, 2016; IBGE, 2019)

Um estudo recente de Macedo e Sandre (2023) revelou que, entre 1988 e 2022, a média

anual de mortes por deslizamentos no Brasil foi de 118 vítimas. Entre os eventos analisados, destaca-se a tragédia que atingiu a Região Serrana do Rio de Janeiro, em 2011, deixando cerca de 969 vítimas fatais.

Uma das possíveis soluções da engenharia para essa demanda é a utilização de cortinas atirantadas. Segundo Porto, Torres e Gomes (2017), a técnica de cortinas atirantadas apresenta-se como uma solução eficaz, tanto do ponto de vista técnico quanto econômico, para obras que exigem controle rigoroso de pequenas deformações e grandes escavações. Diversos autores como Beno e Dantas (2019), Beno et al. (2020) e Beno e Pereira (2021) destacam que o principal componente da cortina atirantada é o tirante.

De forma geral, conforme a NBR 5629 (2018) os tirantes podem ser divididos em dois grupos: Tirantes provisórios (quando há previsão de uso de até dois anos) e tirantes permanentes (quando o tempo de uso é superior a dois anos). Além disso, há divisão também em relação ao tipo de tirante: monobarra e fios e cordoalhas. Conforme a Figura (1), o tirante é composto por diversas partes.

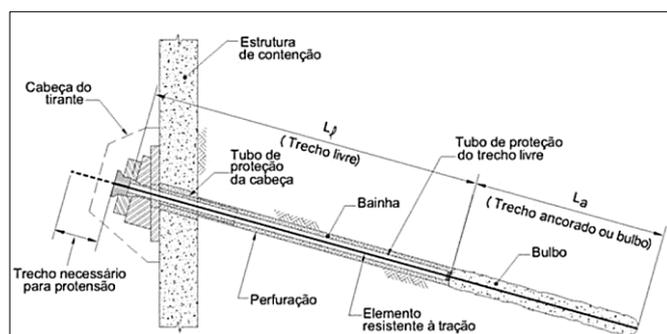


Figura 1 – Componentes de um tirante (Adaptado da NBR 5629, 2018).

Gerscovich, Danziger e Saramago (2016), ressaltam que os tirantes são tracionados, por macaco hidráulico, até uma carga definida em projeto, chamada de carga de incorporação, e fixados na parede de concreto por meio de um sistema de placas e porcas. Ademais, Palop, Ivanovic e Brennan (2013) afirmam que a transferência de tensões da estrutura para o terreno, seja solo ou rocha, é o mecanismo chave para o funcionamento das contenções, e que isso deve ser mantido durante toda a vida útil. Embora essa seja uma condição fundamental para a funcionalidade dos tirantes, eles estão sujeitos a perdas de carga de protensão, o que pode comprometer sua eficiência e gerar danos estruturais.

Pesquisadores e profissionais têm levantado questionamentos sobre o desempenho a longo prazo das ancoragens, considerando tanto sua durabilidade quanto as variações na carga de trabalho, seja por perda ou aumento. Essas oscilações em relação às cargas projetadas podem indicar um comportamento inesperado da estrutura ou, em casos mais críticos, sinalizar uma possível falha. (Liao, 2018; Machado e Mendes, 2018)

Porto (2015) ressaltou que o projeto de contenção deve contemplar a previsão das perdas de força de protensão. As perdas de protensão, conforme o autor, em estruturas de concreto protendido podem ser classificadas em três categorias principais: imediatas, progressivas e decorrentes de fatores externos. As perdas imediatas ocorrem logo após a aplicação do pré-esforço e incluem deformações iniciais do concreto, deslizamentos nos sistemas de ancoragem e perdas por atrito entre as armaduras e o concreto. Já as perdas progressivas são aquelas que se manifestam ao longo do tempo, sendo causadas pela fluência do concreto, retração volumétrica e redistribuição de tensões entre o concreto e as armaduras.

Por fim, perdas externas estão associadas a fatores ambientais ou geotécnicos, como movimentação de taludes ou deslocamentos de massas de solo que podem alterar as condições de protensão.

Um interessante estudo de Rincent (2023) demonstrou que em ensaios realizados em mais de 600 tirantes, a perda de carga após trinta anos representou uma média de 5,5% de perda de carga anual nas ancoragens. Desse modo, existe uma necessidade de que as ancoragens sejam monitoradas durante sua vida útil. Nesse ponto, resalta-se que a NBR 15.575 (2013), que estabelece critérios de desempenho para edificações habitacionais no Brasil, a Vida Útil de Projeto (VUP) mínima para sistemas estruturais é de 50 anos.

A norma NBR 5629 (2018), ainda que contemple o monitoramento das estruturas de contenção pós-construção, ela faz previsão apenas das inspeções periódicas (anualmente) e recomenda, caso seja identificada alguma patologia, a instalação de instrumentação, verificação de carga e demais procedimentos adicionais.

Nesse aspecto, a norma apresenta apenas metodologias estáticas e destrutivas para os ensaios em ancoragens, o que limita a adoção de técnicas mais modernas e menos invasivas. Os métodos

estáticos, além de serem demorados e onerosos, podem comprometer a integridade da estrutura ao exigir intervenções diretas e, muitas vezes, irreversíveis. Essa abordagem aumenta os custos com reparos e substituições e dificulta a realização de monitoramentos contínuos ou avaliações em tempo real, prejudicando a eficiência na detecção precoce de falhas ou variações no desempenho das ancoragens ao longo do tempo.

Em contrapartida, existe uma técnica disponível no mercado que permite monitorar e avaliar as ancoragens em qualquer momento ao longo de sua vida útil, sem causar risco de deterioração ou rompimento dos tirantes. Essa metodologia não destrutiva oferece maior eficiência e segurança, permitindo o acompanhamento contínuo do desempenho das ancoragens, além de reduzir custos operacionais e preservar a integridade da estrutura.

Segundo Beno e Dantas (2019), Beno et al. (2020) e Beno e Pereira (2021), uma técnica inovadora para a inspeção e verificação do estado dos tirantes é a aplicação de ensaios dinâmicos não destrutivos baseados na variação da impedância mecânica. Essencialmente, esse método utiliza a análise da resposta vibratória do elemento testado, permitindo uma avaliação precisa de seu comportamento estrutural sem comprometer sua integridade.

De maneira geral, o método é capaz de fornecer informações cruciais, como o comprimento livre, o comprimento ancorado e a carga de trabalho atual do tirante, permitindo uma avaliação detalhada e precisa do seu desempenho ao longo do tempo.

Nos últimos dez anos, importantes trabalhos foram desenvolvidos na predição de capacidade de carga de tirantes. A maioria deles baseia-se na pesquisa inédita de Porto (2015), com destaque aos trabalhos de Carvalho (2016), Porto e Silva (2016), Ferreira, Porto e Silva (2016), Porto, Torres e Gomes (2017), Vasconcelos, Pereira e Porto (2018), Gontijo (2020), Dias, Gomes e Porto (2021), Tavares *et al.* (2023), Oliveira (2023), Fernandes (2023), Porto *et al.* (2024), Fernandes *et al.* (2024), e Graça (2025). No entanto, até então, nenhum trabalho foi relacionado a ensaios não destrutivos para a previsão de capacidade de carga, sendo este, portanto, uma pesquisa inédita nacional, com vistas a contribuir com a normatização e avanços na área.

Dessa forma, o presente trabalho visa apresentar uma reflexão sobre a metodologia

inovadora desenvolvida por Rincen, explorando suas particularidades e aplicabilidade prática. Além disso, busca-se compartilhar as observações e análises realizadas em uma cortina atirantada localizada na região sudeste do Brasil. Ao abordar o tema sob uma perspectiva técnica e prática, esperamos contribuir para o avanço do conhecimento e para a consolidação de métodos não destrutivos na avaliação de estruturas de contenção.

2. Metodologia

2.1. Contexto normativo

Atualmente, a norma brasileira NBR 5629 (2018) estabelece diretrizes para projetos e ensaios estáticos de ancoragens em solo, fornecendo parâmetros técnicos para garantir a segurança e o desempenho adequado dos tirantes. No entanto, a norma não contempla a realização de ensaios dinâmicos não destrutivos, uma limitação que pode impactar a capacidade de monitoramento contínuo e avaliação preventiva das ancoragens ao longo de sua vida útil.

Assim, a inclusão de ensaios dinâmicos não destrutivos como prática complementar permitiria um monitoramento mais preciso e detalhado, proporcionando maior embasamento técnico para inspeções periódicas. Essa abordagem auxiliaria na detecção precoce de possíveis falhas ou danos, contribuindo para intervenções e manutenções mais eficazes e economicamente viáveis.

Além disso, a adoção dessa metodologia poderia aumentar a segurança estrutural, garantindo que problemas sejam identificados antes que comprometam a estabilidade da obra, reduzindo os custos de reparo e prolongando a durabilidade da estrutura.

Outrossim, no país, no âmbito de fundações, existe a NBR 13.208 (2007) que trata sobre a execução de ensaios dinâmicos em fundação. A norma, embora contemple ensaios dinâmicos, ela traz apenas referências de ensaios destrutivos.

A norma recomenda que sejam ensaiadas pelo menos 5% das estacas da obra, e no mínimo três ensaios, mas ressalta que isso pode variar de acordo com as condições geológicas-geotécnicas e de acordo com a variabilidade dos elementos de fundação. Além disso, de acordo com a NBR 6122 (ABNT, 2022), em aspectos gerais, as provas de cargas estáticas à compressão podem ser

substituídas por ensaios de carregamento dinâmico na proporção de 5 para 1.

Entretanto, embora não tenha valor de norma, há no país uma recomendação técnica sobre os ensaios *Pile Integrity Test* (PIT) da Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção (ABENDI) que trata de práticas recomendadas para ensaios de baixa deformação, a PRE-001 (2016).

Nesse contexto, vale fazer algumas ressalvas e explicar algumas terminologias usadas em normas estrangeiras. Os ensaios de baixa deformação (*low-strain testing*) são métodos que, apesar de utilizarem golpes de martelo na estaca, não provocam danos ao elemento, permitindo a avaliação de suas características sem comprometer sua integridade. Embora as definições de “ensaios de baixa deformação” e “ensaios não destrutivos” não sejam exatamente equivalentes, elas apresentam grande semelhança, pois ambas descrevem métodos de teste que não causam danos permanentes ao elemento avaliado. Em determinadas situações, esses termos podem ser utilizados como conceitos idênticos, dependendo do contexto e do objetivo do ensaio.

Por outro lado, os ensaios de alta deformação (*high-strain testing*) são ensaios capazes de gerar deformações permanentes no elemento testado, e, em alguns casos, podem ser confundidos com o termo “ensaios destrutivos”.

Existem algumas normas de outros países que trazem informações relacionadas aos ensaios de baixa deformação. Destacam-se nesse contexto, a norma ASTM D5882 (2016), ainda que não trate diretamente sobre tirantes, se aplica a fundação profunda, vertical ou inclinada, e a elementos estruturais longos independente do processo de instalação. A normativa determina duas metodologias básicas para o teste de integridade: *Pulse Echo Method* (PEM) e o *Transient Response Method* (TRM).

Ambos os métodos são similares, de baixa deformação, e sua principal diferença é durante a análise dos resultados. No primeiro método, método de eco de pulso, a velocidade é analisada em função do tempo e a medição da força não é obrigatória. Já no segundo, método da resposta transitória, a velocidade é analisada em função da frequência e a força de impacto é necessária que seja medida.

A norma francesa NF P 94-160-2 (1993), traz definições sobre parâmetros, características dos equipamentos, procedimentos de testes e específica os resultados a serem apresentados relativos aos

métodos de ensaios baseados na reflexão da onda de impacto causado por um martelo de mão. Desse modo, considerando as análises dos gráficos, é possível inferir que o método trazido pela norma é um método similar ao *Pulse Echo Method* (PEM), embora a norma não o cite expressamente.

Ademais, a NF P 94-160-4, se aplica à auscultação de uma estaca em concreto, armado ou não, de seção circular ou quadrada, inclinada ou não. E possui as mesmas limitações relativas à esbeltez e ao diâmetro. O método é baseado na variação da impedância da estaca, e seus resultados são analisados no gráfico de mobilidade em função da frequência.

Por fim, existem outras normas que focam mais em elementos de fundação, como a indiana IS 14.893 (2021), a chinesa JGJ 106 (2014) e australiana AS 2159 (2009).

2.2. Contexto histórico

O método proposto por Rincent (2023), é um método dinâmico não destrutivo, baseado na variação da impedância mecânica do tirante. De forma simples, ele consiste na aplicação de um golpe de martelo na cabeça do tirante gerando uma onda mecânica que percorre todo o comprimento da ancoragem.

A metodologia segue o princípio na Teoria da Equação da Onda, em suma, conforme Cintra et al. (2013) destacaram, é uma teoria que considera que o impacto do martelo gera uma onda de tensão descendente na estaca, fazendo com que as variações de área transversal, peso, específico ou resistência de atrito lateral, provoquem reflexões ascendentes das ondas de tensão, as quais podem ser avaliadas, durante o impacto, por sensores de força e velocidade.

Inicialmente, os sensores são capazes de identificar a força do impacto e a velocidade da onda gerada. Desse modo, os resultados seriam avaliados em função do tempo, similar ao método *Sonic-Echo*, também chamado de *Pulse-echo method* (PEM) proposto por Paquet (1968), para avaliação da integridade e comprimento de fundações profundas. Alguns autores também contribuíram para o método, como Steinbach e Vey (1975). Além desses estudos, vale ressaltar Rausche e Seitz (1983), que apresentaram os conceitos do *Pile Integrity Test* (PIT) amplamente difundido no Brasil.

Entretanto, o método de Rincent (2023) vai além disso. O método usa o princípio da Transformada de Fourier, que é capaz de decompor sinais complexos em suas componentes de frequência (Rincent, 2023). A partir daí, é possível analisar os resultados no campo da frequência, isto é, análise frequencial.

Um método que se baseia na análise frequencial bem conhecido é o *Impulse Response (Mobility)*, também chamado de *Transient Response Method (TRM)*. Ele foi proposto por Davis e Dunn (1974).

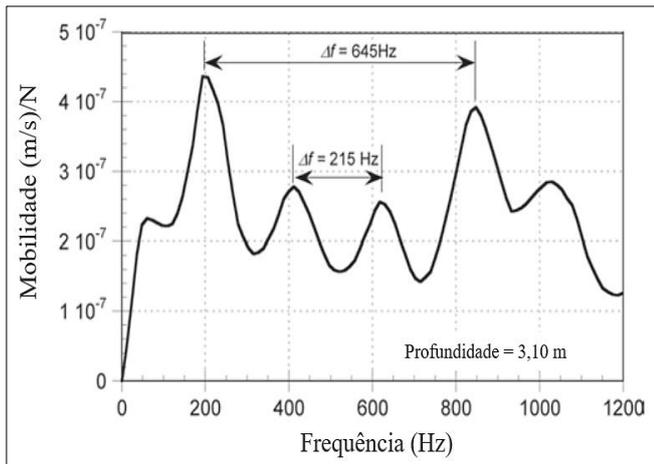


Figura 2 – Gráfico de mobilidade (ACI 228.2R, 2013).

A Figura (2), mostra o gráfico da mobilidade em função da frequência, muitas vezes chamado de gráfico V/F. resultado dos ensaios realizados.

De acordo com Rincent (2023), a mobilidade é definida como a admitância mecânica, sendo o inverso da impedância mecânica. A impedância mecânica representa a relação entre a força aplicada e a velocidade resultante de um carregamento dinâmico, expressa em unidades de (N/(m/s)). Em outras palavras, a impedância mecânica é uma medida da resistência ao movimento de uma estrutura quando submetida a uma determinada força periódica.

Por outro lado, a mobilidade corresponde à razão entre a velocidade e a força aplicada, ou seja, ((m/s)/N), sendo uma medida da facilidade com que o sistema se deforma diante de uma força imposta. Dessa forma, impedância e mobilidade são conceitos inversos e complementares.

O termo impedância mecânica é amplamente discutido na literatura, aparecendo em diversos trabalhos, como os de Mitaine e Rincent (2015), Beno e Dantas (2019), Beno et al. (2020), Silva e Faro (2020), Beno e Pereira (2021) e Silva e Faro (2023).

Rincent (2024) destacou que a mobilidade varia em função do diâmetro do elemento ensaiado. A Equação (1) apresenta essa característica.

$$V/F = \frac{1}{(\rho_b \times v \times A)} \quad (1)$$

Onde:

- ρ = densidade do concreto em $\frac{kg}{m^3}$;
- v = velocidade da onda em $\frac{m}{s}$;
- A = seção transversal em m^2 ;

Logo, percebe-se que quanto maior a seção transversal, menor será a mobilidade. O Método TRM, então, é capaz de fornecer o comprimento do elemento e sua integridade.

Ademais, o trecho inicial do gráfico mostrado na Figura (3), demonstra uma condição de encontrar a rigidez dinâmica do elemento.

Logo, através da Equação (2), é possível determinar o valor da rigidez dinâmica (Rd), através dos valores *a* e *b*, sendo uma relação de primeiro grau.

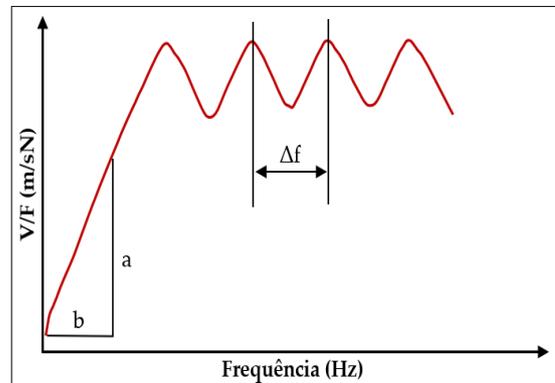


Figura 3 – Parâmetros *a* e *b* (Adaptado de Mitaine e Rincent, 2015).

$$Rd = \frac{2 \times \pi \times b}{a} \quad (2)$$

Onde:

- a* = variação da mobilidade $\frac{m/s}{N}$;
- b* = variação da frequência em Hz;

Rincent (2024) ressaltou que a rigidez pode variar para cada tirante, devido suas condições de ancoragem, como esforços aplicados, meio em que se está inserido, e da estrutura em geral. Em suma, uma rigidez correta significa uma ancoragem correta do tirante (ausência de corte e uma

continuidade ao longo de seu comprimento), já para uma rigidez fraca mostra provável ruptura do tirante ou perda de tensão da ancoragem.

Assim, o método de Rincent é capaz, além de identificar os comprimentos, de avaliar a integridade dos tirantes e de fornecer a carga de trabalho atual do tirante, através de correlações entre rigidez dinâmica e rigidez estática.

Ademais são usados dois valores de velocidade, 4.000 m/s e 4.500 m/s, pois são valores aceitáveis de propagação da onda em elementos de concreto. Para cada ensaio dinâmico, são necessários oito golpes de martelo, isto é, oito aquisições. Em geral, para encontrar a rigidez dinâmica são removidas as aquisições que apresentam os maiores e menores valores, e com as demais é feito o cálculo da média.

Já para os comprimentos livres e totais, analisa-se as oito aquisições (quatro para cada), e calcula-se a média dos valores encontrados.

Através do gráfico de mobilidade e das Equações (3) e (4), é possível determinar os comprimentos livres e totais.

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

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

Onde:

- Lt = comprimento total dos tirantes (m);
- Ll = comprimento livre dos tirantes (m);
- v = velocidade da onda (m/s);
- Δfl = variação livre da frequência (Hz);
- Δft = variação total da frequência (Hz);

Segundo Rincent (2024), existem três formas de se encontrar o valor da rigidez observada, valor de B:

- Quando possuir rigidez de um tirante com tensão baixa, próxima de zero, mas não totalmente relaxada;
- Através do gráfico “Carga x Deslocamento” gerado pelo ensaio estático;
- A rigidez quando o gráfico dinâmico apresenta comportamento específico.

Essa escolha da metodologia para determinar o valor B ressalta a importância de experiência do responsável, uma vez que o valor deve representar efetivamente a característica do tirante.

Destaca-se que durante a execução do ensaio de estático são realizados os ensaios dinâmicos, sendo possível, então, correlacionar a rigidez estática com a rigidez dinâmica. Além disso, o ensaio estático é capaz de fornecer a carga de trabalho do tirante, ao longo da incorporação de carga.

Outrossim, utilizando da Equação (5), chegamos ao valor do parâmetro A . Esse procedimento é feito para os dois tirantes inicialmente ensaiados, assim, determina-se o valor de A .

Em suma, Rincent (2023) determina que para correlação dos valores de rigidez, apenas dois ensaios de calibração são suficientes e que a Equação (5) é responsável por determinar o valor da carga de trabalho no tirante.

$$\sqrt{Rd} = T \times A + \sqrt{B} \quad (5)$$

Onde:

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

Por fim, temos a correlação Rd/Re , e o valor de A , e, ao realizar os ensaios de Rincent nos demais tirantes, temos o valor de Rd , tornando, então, possível encontrar o valor da carga de trabalho de cada tirante.

2. Materiais e métodos

2.1. Descrição geral da obra do estudo de caso

A obra estudada nesse trabalho é localizada na região sudeste do país, às margens de uma ferrovia interestadual. A Figura (4) traz a cortina que será analisada.

A cortina possui extensão de aproximadamente 97 m, com altura máxima de 2,20 m, a espessura da parede é de aproximadamente 30 cm e 21 tirantes distribuídos em uma linha de tirantes. As ancoragens são do tipo monobarra DYWIDAG, Ø32 mm. A cortina foi construída em meados dos anos 2000. Foram ensaiados 13 (treze) tirantes, seguindo a NBR 11682 (2009).



Figura 4 – Cortina atirantada em estudo (Rincent BTP, 2024).

2.2. Realização dos ensaios

O equipamento utilizado pode ser visto nas Figuras (5) e (6). O computador portátil adaptado (1) é responsável por consolidar os resultados e plotar os gráficos. A caixa de aquisição (2) é responsável por receber os dados dos sensores e encaminhá-los ao computador portátil. O martelo equipado com sensor de força (3) é responsável por gerar o impacto e seu sensor de registrá-lo. O sensor de velocidade (geofone/acelerômetro) (4) é responsável por registrar a velocidade da onda de impacto.



Figura 5 – Equipamentos necessários (a) Caixa de Aquisição; (b) Computador portátil; (c) Martelo com sensor de força; (d) acelerômetro.



Figura 6 – Disposição do equipamento e equipe durante ensaio.

O ensaio pode ser dividido em algumas etapas, sendo elas:

- Garantir acessibilidade ao local;
- Numerar os painéis e tirantes;
- Remover o concreto que protege a cabeça dos tirantes;
- Medir o diâmetro dos tirantes e a sua inclinação;
- Realizar ensaios de calibração;
- Gerar uma vibração do tirante com um impacto de martelo no eixo do tirante;
- Registrar a força (F) o impacto através de um sensor de força equipado no martelo;
- Registrar também a velocidade (V) da onda sob efeito do impacto, por meio de um sensor de velocidade posicionado na placa de apoio;
- Tratar matematicamente os sinais adquiridos, registrados em um computador portátil, e analisar a curva V/F resultado do ensaio em função da frequência;
- Correlacionar os valores de rigidez dinâmica e estática.



Figura 7 – Ensaio de Calibração.

A execução do ensaio de calibração, Figura (7), consiste na aplicação de uma carga de tração axial ao tirante, similarmente ao que acontece nos ensaios de qualificação e recebimento previstos na NBR 5629 (2018).

Entretanto, não há necessidade de atingir altos valores de protensão, apenas faixas iniciais, como no caso da cortina em análise, a carga máxima aplicada foi de 350 kN.

3. Resultados e discussão

Inicialmente, foi garantido o acesso à estrutura, os tirantes foram numerados e então foi removido o concreto que os envolve a cabeça de cada tirante. Devido a aspectos contratuais, alguns meses se passaram desde a remoção até a execução do teste. Assim, os tirantes começaram a apresentar desgaste por oxidação, Figura (8).



Figura 8 – Tirante com início de corrosão.

Embora os tirantes tenham apresentado sinais de oxidação superficiais, Figura (8), isso não afetou sua integridade.

Os ensaios de calibração foram executados nos tirantes T01 e T05. As Figura (9) e (10), demonstram o gráfico “Carga x Deslocamento” dos ensaios. Os ensaios demonstraram que a carga trabalho no T01 era cerca de 80 kN, Figura (9). Já o tirante T05 apresentou carga de trabalho de aproximadamente 110 kN, Figura (10).

Por se tratar de uma cortina de apenas uma linha de tirantes, é esperado que os valores de carga de trabalho sejam sempre próximos, sem muita variação entre eles.

Através da Tabela (1), é perceptível que os comprimentos não sofreram variações significativas para cada comprimento, sempre apresentando valores bem próximos considerando a análise de cada situação de velocidade.

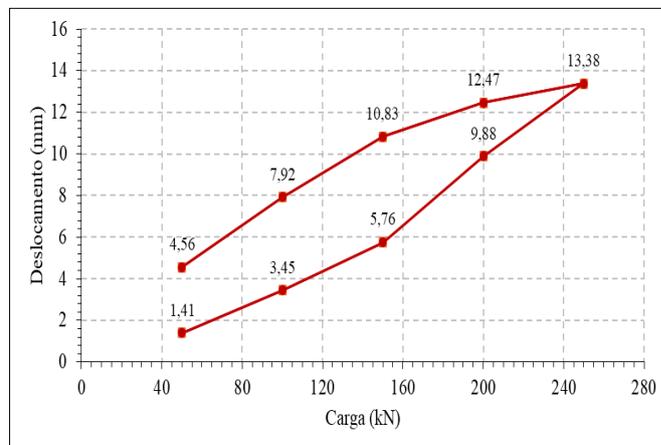


Figura 9 – Gráfico Carga x Deslocamento T01. (Adaptado de Rincent, 2024).

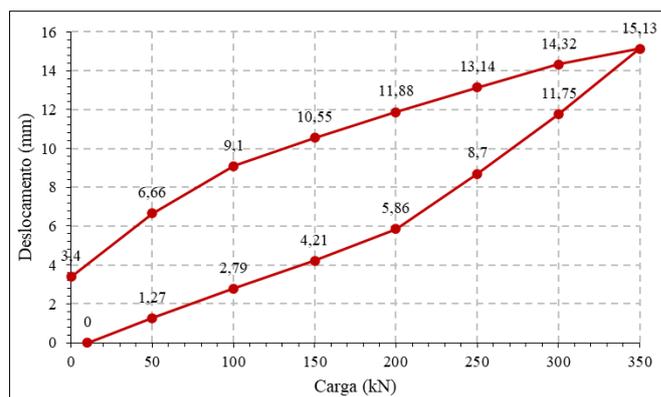


Figura 10 – Gráfico Carga x Deslocamento T05. (Adaptado de Rincent, 2024).

Através da Tabela (1), é perceptível que os comprimentos não sofreram variações significativas para cada comprimento, sempre apresentando valores bem próximos considerando a análise de cada situação de velocidade.

Percebe-se também, que os comprimentos totais e a rigidez pouco variaram para cada aquisição.

Não obstante, por meio do gráfico da Figura (11), é possível determinar que a variação da frequência para cálculo do comprimento total é aproximadamente 100 Hz. E ainda, que a rigidez dinâmica encontrada na aquisição A do T01, na faixa de 0 a 50 Hz, conforme aproximação representada na Figura (12), é de 4,51E8 N/m.

Tabela 1 – Comprimentos livres e totais e Rigidez Dinâmica do T01. (Adaptado de Rincent, 2024).

Tirante	Aquisição	Comprimento Livre (m)		Comprimento Total (m)		Rigidez Dinâmica (MN/m)
		4.000 m/s	4.500 m/s	4.000 m/s	4.500 m/s	
T01	A	-	-	19,9	22,3	4,51
	B	-	-	17,6	19,8	3,55
	C	-	-	18,8	21,2	4,7
	D	-	-	17,6	19,8	4,69
	E	7,3	8,2	-	-	4,78
	F	6,4	7,2	-	-	4,7
	G	6,8	7,6	-	-	4,75
	H	7	7,9	-	-	4,79
Média		6,9	7,7	18,5	20,8	4,69

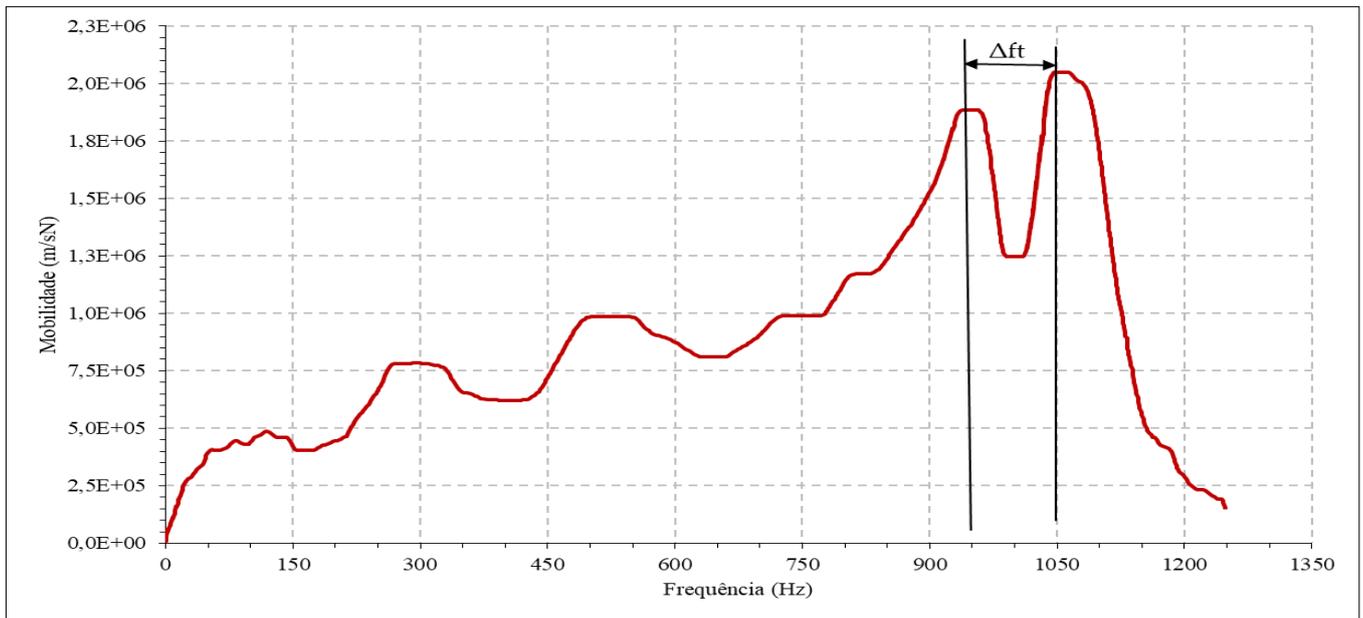


Figura 11 – Gráfico de mobilidade T01 aquisição A. (Adaptado de Rincent, 2024).

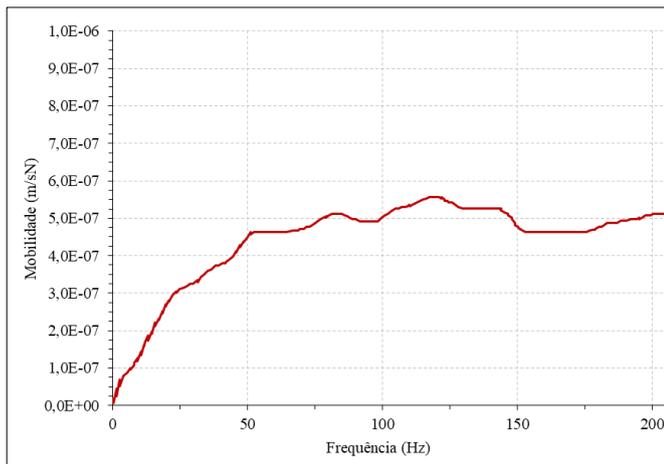


Figura 12 – Gráfico de mobilidade T01 aquisição A (Adaptado de Rincent, 2024).

Após a repetição desses passos para todos os tirantes, chegou-se aos resultados apresentados na Tabela (2). Os valores de rigidez dinâmica e de carga de trabalho encontrados foram homogêneos, sem muita variação.

Tabela 2 – Resultados (Adaptado de Rincent, 2024).

Tirante	<i>Ll</i>	<i>Lt</i>	<i>Ll</i>	<i>Lt</i>	Rd (N/m) E8	T (kN)
	4.000 m/s	4.500 m/s	4.000 m/s	4.500 m/s		
T01	6,9	18,5	7,7	20,8	4,7	80
T03	6,7	20	7,6	22,5	5,1	83,7
T05	5,6	19	6,3	21,4	8,1	107,9
T07	6,6	21,2	7,4	23,8	6,2	93,5
T08	8,8	17,7	9,9	19,9	6,8	98,3
T09	7,5	19,8	8,4	22,3	5,6	88,2
T11	8,2	18,8	9,2	21,2	5,8	90,3
T13	8,6	19,2	9,6	21,6	4,8	81,2
T14	8,3	21	9,3	23,7	4,5	78,6
T15	7,4	17,9	8,3	20,1	4,6	79,5
T17	7,3	18,2	8,2	20,4	4,5	78,5
T19	7	22,3	7,8	25,1	5	83,2
T21	6,7	17,8	7,6	20	4,1	74,6

Partindo da Equação (5), chegamos na Equação (6), que representa a correlação aplicada, e através dela que foram determinadas as cargas de trabalho.

$$\sqrt{Rd} = T \times 0,2438 + 2154 \quad (6)$$

4. Considerações Finais

O método dinâmico não destrutivo para avaliação de ancoragens se demonstrou capaz de identificar os comprimentos livres e totais, bem como a carga de trabalho da cortina estudada. O estudo reforçou a simplicidade de execução do ensaio, embora também tenha reforçado que a interpretação dos ensaios nem sempre seja simples.

O método baseado na rigidez dinâmica se mostrou capaz de ser uma alternativa inovadora em relação aos ensaios *Impulse response (PIT)* e *Sonic-echo*, atualmente usados para fundações profundas em sua grande maioria. Seu diferencial é a análise da rigidez dinâmica do tirante que permite determinar a carga de trabalho.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à RINCENT BTP e a VALE S/A pelos dados fornecidos para o desenvolvimento do presente trabalho.

Referências

ABENDI – Associação Brasileira de Ensaio não destrutivos e Inspeção, 2016. *Práticas recomendadas PRE-01: Execução e Diagnóstico de Ensaio de Integridade de Estaca com Baixa Deformação*. São Paulo.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2007. *NBR 13208: Estacas - Ensaio de carregamento dinâmico*. Rio de Janeiro.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009. *NBR 11682: Estabilidade de encostas*. Rio de Janeiro.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2018. *NBR 5629: Tirantes ancorados no terreno – projeto e execução*. Rio de Janeiro.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022. *NBR 6122: Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2024. *NBR 15575-1: Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais*. Rio de Janeiro.

AFNOR – Association Française de Normalisation, 1994. *NF-P94-160-4 Sols. Reconnaissance et essais. Auscultation d'un élément de fondation. Partie 4. Méthode par impédance*. France.

AS – Australian Standard, 2009. *AS 2159: Piling - Design and Installation. Standards Australia*, Sydney, Austrália.

ASTM – Sociedade Americana de Testes e Materiais, 2017. *D5882: Standard Test Method for Low Strain Impact Integrity Testing of Deep Foundations*. ASTM International, West Conshohocken, PA.

Beno, P.J.N., and Dantas, P.D.U., 2019. Ensaio de impedância mecânica em 7 cortinas atirantadas próximas ao município de Gramado/RS. In: *9º Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia*, 9. SEFE, São Paulo, SP.

Beno, P.J.N., Dantas, P.D.U. Rossi, B. M. C. Filho and P.R.M., 2020. Ensaio Não Destrutivos de Impedância Mecânica em Cortinas Atirantadas localizadas na Serra do Mar, nas Proximidades do Município de Cubatão/SP. In: *XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG)*, 20. São Paulo, SP. <http://dx.doi.org/10.4322/cobramseg.2022.0529>

Beno, P.J.N. and Pereira, A.P.G., 2021. Ensaio dinâmico não destrutivo de impedância mecânica em estruturas de contenção de uma encosta localizada no Rio de Janeiro/RJ. In: *VIII Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas (COBRAE)*, 8. Porto de Galinhas, PE.

Carvalho, L.A., 2016. *Estudo da capacidade de carga de ancoragens protendidas e reinjetáveis em maciços geotécnicos*. Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto.

Davis, A. G. and Dunn, C. S., 1974. *A From Theory to Field Experience with the Non Destructive Vibration Testing of Piles*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 57(4), pp 571-593, Part 2. <https://doi.org/10.1680/iicep.1974.3895>

Dias, M.V.L., Gomes, R.C. and Porto, T.B., 2021. Estudo do dimensionamento do bulbo ancorado de tirantes através da análise de ensaios de recebimento. *Geotecnia (Lisboa)*, (151), pp.89-104. <https://doi.org/10.24849/j.geot.2021.151.06>

- Fernandes, M.T., 2023. *Confiabilidade e previsão de comportamento de ancoragens reinjetáveis e protendidas em solos*. Doutorado. Universidade Federal de Viçosa.
- Fernandes, M.T., Pitanga, H.N., Ferraz, R.L. and Porto, T.B., 2024. Semi-empirical Model for Predicting the Bearing Capacity of Reinjectable and Prestressed Anchors. *Geotechnical and Geological Engineering*, 42, pp. 7699–7712.
<http://dx.doi.org/10.1007/s10706-024-02946-7>
- Ferreira, D.C., Porto, T.B. and Silva, C.R., 2016. Estruturas ancoradas e suas aplicações na geotecnia. In: *48º Congresso Brasileiro de Geologia*, Porto Alegre. Anais do 48º Congresso Brasileiro de Geologia - As geotecnologias e o século XXI. Porto Alegre: ABGE.
- Gerscovich, D.M.S., Danziger, B.R. and Saramago, R., 2016. *Contenções: teoria e aplicações em obras*. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos.
- Gontijo, G.M., 2020. *Reavaliação geotécnica das ancoragens de uma estrutura de contenção com patologias diversas*. Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto.
- Graça, T.M.O., 2025. *Retroanálise da capacidade de carga de tirantes ancorados em solos residuais de Gnaiss utilizando um modelo elastoplástico*. Mestrado. Universidade Federal do Paraná.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística., 2019. *Suscetibilidade a deslizamentos do Brasil: primeira aproximação*. Rio de Janeiro: IBGE
- IS – Indian Standard, 2021. *IS 14.893: Código de Práticas para Ensaio Não Destrutivos de Fundações Profundas*. Bureau of Indian Standards, Nova Délí, Índia.
- JGJ – Chinese National Standard, 2014. *JGJ 106: Código Técnico para Testes de Estacas de Fundação de Edifícios*. Academia Chinesa de Pesquisa em Edifícios, Pequim, China.
- Liao, J., 2018. *Ground anchors corrosion - the beginning of the end*. MATEC Web Conf., 195. <http://dx.doi.org/10.1051/mateconf/201819503001>
- Macedo, E.S. and Sandre, L.H., 2022. *Mortes por deslizamentos no Brasil: 1988 a 2022*. Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, 12(1), pp.110-117.
- Machado, A.X. and 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), pp. 64-78. <https://doi.org/10.21041/ra.v8i1.200>
- Milititsky, J., 2016. *Grandes escavações em perímetro urbano*. São Paulo: Oficina de Textos.
- Nobre, C.A., Young, A.F., Orsini, J.A.M., Saldiva, P.H.N., Nobre, A.D., Ogura, A.T., Thomaz, O., Valverde, M., Párraga, G.O.O., Silveira, G.C.M., Silveira, A.C. and Rodrigues, G.O., 2011. Vulnerabilidades das megacidades brasileiras às mudanças climáticas: Região Metropolitana de São Paulo. In: R. S. da Motta, ed. *Mudança do clima no Brasil: aspectos econômicos, sociais e regulatórios*. Brasília: Ipea. pp. 234-260.
- Oliveira, T.C.F., 2023. *Desempenho geotécnico de cortinas atirantadas executadas em Cascavel-PR*. Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto.
- Palop, K., Ivanovic, A. and Brennan, A.J., 2013. *Centrifuge modeling of the nondestructive testing of soil anchorages*. *Journal of Geotechnical and geoenvironmental engineering*, 139, pp. 880-891.
- Paquet, J., 1968. *Etude Vibratoire des Pieux en Béton: Réponse Harmonique [Vibration study of concrete piles: Harmonic response]*. Ann. Inst. Tech. Batiment (Paris, France), 21st Year, 245, pp.789-803.
- Porto, T.B. and Silva, T.E., 2016. Contribuição ao estudo geotécnico de ancoragens reinjetáveis e protendidas - estudo de caso das obras de expansão do metrô de São Paulo. In: *48º Congresso Brasileiro de Geologia*. As geotecnologias e o século XXI. Porto Alegre: ABGE.
- Porto, T.B., 2015. *Ancoragens em solos - Comportamento geotécnico e metodologia via web para previsão e controle*. Doutorado. Universidade Federal de Ouro Preto.
- Porto, T.B., Rosa, D.L., Porto, D.S.G.F. and Marques, M.E.S., 2024. *Comportamento de*

ancoragens reinjetáveis e protendidas em solos. Contribuciones a las Ciencias Sociales, 17(3), pp.1-23. <http://dx.doi.org/10.55905/revconv.17n.3-097>

Porto, T.B., Torres, A.C.A. and Gomes, R.C., 2017. *Behavior of Reinjectable and Prestressed Anchors in Soil Masses: Construction Case Study in Congonhas - Brazil*. Soils and Rocks, 40(2), pp.177-186. <https://doi.org/10.28927/SR.402177>

Rausche, F. and Seitz, J., 1983. *Integrity Testing of Shafts and Caissons*. Proceedings of Symposium 6, G.G. Goble (Ed.), ASCE Spring Convention, Philadelphia, Pennsylvania, pp. 192-207.

Rincent, J.-J., 2005. *Método e dispositivo para determinar a tensão de tração exercida sobre um elemento selado*. European Patent Office, EP 1 761 750 B1.

Rincent, J.-J., 2023. *Ensaaios não destrutivos: Análise Vibratória – Aplicações em Tirantes-Força*. São Paulo: RG Editores.

Rincent, J.-J., 2024. *Ground Anchors: Tension Force – Vibratory Analysis*. Singapura: Springer Singapura. <https://doi.org/10.1007/978-981-97-4414-5>

Steinbach, J. and Vey, E., 1975. *Caisson evaluation by stress wave propagation method*. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 101(4). <https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0000161>

Tavares, T.H.B.C., Porto, T.B., Mendes, E.M.A.M. and Ferreira, B.P., 2023. *Clustering-Based Fuzzy Model for Predicting Anchor Bearing Capacity*. International Journal of Geomechanics, 23(10). <http://dx.doi.org/10.1061/IJGNAI.GMENG-6961>

Vasconcelos, L.A.C., Pereira, J.A. and Porto, T.B., 2018. *Anchored Structures: State of Art in Brazil and in the World*. International Journal of Science and Engineering Investigations, 7, pp.61-70.