



Ensaio Dinâmico de Impedância Mecânica ou Impulse Response Method em Cortinas Atirantadas localizadas na Serra do Mar, nas Proximidades do Município de Cubatão/SP.

Philippe Jean Nicolas Beno
Diretor, Rincent BTP Brasil, Recife, Brasil, diretor@rincent.com.br

Thiago Feliciano Guilhermino da Silva
Engenheiro Civil, Rincent BTP Brasil, Recife, Brasil, thiagofeliciano@rincent.com.br

RESUMO: Este artigo descreve uma metodologia dinâmica não destrutiva baseada na impedância mecânica ou Impulse Response Method (ACI 228.2R-13 e ASTM C1740-10) com análise frequencial utilizada para avaliar em profundidade as características dos tirantes na Estrutura de Contenção. Os ensaios ditos Dinâmicos foram realizados em duas cortinas localizadas na Serra do Mar, no município de Cubatão/SP, complementando um estudo que iniciou com a inspeção geral dos tirantes das estruturas de contenção para verificar as condições de funcionalidade, durabilidade e estabilidade. A aplicação em tirantes desse método foi desenvolvida na França onde tem sido empregada há quase 20 anos. A metodologia consiste em instrumentar a ancoragem do tirante com um sensor de velocidade e aplicar um impacto no elemento através de um martelo instrumentado com um sensor de força. Após vários impactos aplicados na ancoragem, as respostas vibratórias para cada tirante são registradas, a fim de estimar os comprimentos e cargas atuais em cada elemento. Os resultados obtidos foram satisfatórios, indicando forças entre 15,0 e 32,0 tf nos tirantes ensaiados, com comprimentos livres/totais conforme o esperado. Esta técnica não destrutiva de Ensaio ditos Dinâmicos permite avaliar em profundidade a integridade e a estabilidade das estruturas de contenção.

PALAVRAS-CHAVE: Impedância Mecânica, Cortina Atirantada, Ensaio Dinâmico.

ABSTRACT: This article describes a dynamic non-destructive methodology based on mechanical impedance or Impulse Response Method (ACI 228.2R-13 and ASTM C1740-10) including frequency analysis used to deeply evaluate the characteristics of anchors in Retaining Structures. The so-called Dynamic tests were carried out on two curtains located in the Serra do Mar, in the city of Cubatão/SP, complementing a study that began with the general inspection of the anchors of the retaining structures to verify their functionality, durability, and stability conditions. The application of this method in anchors was developed in France where it has been used for almost 20 years. The methodology consists of instrumenting the anchor plates with a velocity sensor and applying an impact on the element through an instrumented hammer equipped a force sensor. After several impacts applied to the anchorage, the vibrational responses for each anchor are recorded in order to estimate the current lengths and loads in each element. The results were satisfactory, indicating forces between 15.0 and 32.0 tf in the tested anchors, with free/total lengths as expected. This non-destructive Dynamic Testing technique allows a deeply assessment of the integrity and stability of retaining structures.

KEYWORDS: Mechanical Impedance, Anchored Curtain, Dynamic Testing.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



1 Introdução

A cortina atirantada desempenha um papel crucial na contenção dos esforços de empuxo do solo em taludes e paredes de escavação, evitando movimentações indesejadas e colapsos das encostas. O elemento central dessa estrutura é o tirante, cuja função primordial é aumentar a estabilidade do talude através de uma interação ativa com o solo.

No presente artigo, apresenta-se uma abordagem inovadora para inspecionar e avaliar em profundidade com análise frequencial dos tirantes, baseada em ensaios não-destrutivos que se utilizam do princípio da impedância mecânica (NFP 94-160-4) ou Impulse Response Method (ACI 228.2R-13 and ASTM C1740-10). Essa técnica consiste em analisar as características dos tirantes no seu ambiente de instalação, seguida por uma avaliação do seu comportamento mecânico e integridade estrutural. O objetivo principal desse método é obter informações confiáveis sobre os comprimentos (livres e totais) e a tensão atual dos elementos tracionados em cortinas atirantadas, desde que haja acesso adequado à cabeça de ancoragem. Além de ser um procedimento de execução rápida, o Ensaio Dinâmico Não-Destrutivo oferece resultados satisfatórios com uma excelente relação custo-benefício.

Essa tecnologia, cuja raiz provém das pesquisas realizadas nos anos 70, 80 e 90 na França e EUA, foi desenvolvida há quase 20 anos e já é amplamente utilizada na França, onde tem sido adotada por gestores portuários, empresas fornecedoras de energia e companhias de construção. Em comparação com o ensaio de arrancamento tradicional, o método dinâmico apresenta diversas vantagens significativas, como o baixo risco de ruptura e a sua viabilidade para tirantes localizados em áreas de difícil acesso ou mesmo submersos. Além disso, o teste de arrancamento convencional pode ser dispendioso em termos de tempo e materiais, e não permite a obtenção dos comprimentos dos elementos testados.

O objetivo deste trabalho consiste em apresentar a metodologia e as vantagens dos Ensaios Dinâmicos Não-Invasivos através de um estudo de caso concreto. O estudo foi realizado em duas cortinas atirantadas localizadas na região da Serra do Mar, no município de Cubatão/SP. Essa análise contribuirá para uma compreensão aprimorada dessa técnica inovadora, evidenciando seus benefícios e sua aplicabilidade no âmbito da geotecnia.

2 Estudo de Caso

Por meio de um levantamento detalhado das cortinas atirantadas, foi possível identificar diferentes cenários de risco, variando entre baixo risco e risco potencial.

Para documentar essas informações, foi elaborada uma tabela de classificação de riscos, conforme exemplificado a seguir. Essa tabela estabelece três níveis de risco: Iminente, Potencial e Baixo, além de determinar as prioridades com base na gravidade dos riscos identificados, priorizando as situações mais críticas. Com base nessa análise, foram realizadas intervenções específicas, incluindo o monitoramento das manifestações patológicas, a remoção da vegetação, a desobstrução dos sistemas de drenagem, o tratamento de trincas/fissuras e a restauração das cabeças de proteção.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



Tabela 1. Classificação dos riscos das cortinas atirantadas.

Risco	Descrição	Prioridade
Iminente	Recomenda-se uma intervenção imediata ou de curto prazo, devido ao potencial significativo de comprometimento da integridade estrutural.	1
Potencial	Recomenda-se uma intervenção programada a médio prazo, caso sejam detectados indícios relevantes durante o monitoramento, que demonstrem a evolução de processos comprometendo o ativo e, por consequência, a operação.	2
Baixo	No momento a integridade do ativo apresenta baixo risco potencial. No entanto, é importante monitorar a evolução do processo observada no monitoramento, pois no futuro pode indicar possíveis danos ao elemento.	3

No intuito de aplicar a metodologia de ensaio Dinâmico Não Destrutivo, visitas foram feitas aos locais das cortinas selecionadas para definir quais tirantes seriam submetidos aos ensaios de impedância mecânica, levando em consideração a facilidade de acesso aos tirantes e o nível de risco envolvido em cada cortina. As áreas escolhidas para os testes estão detalhadas na tabela 2.

Tabela 2. Cortinas atirantadas selecionadas para os testes de impedância mecânica.

Rodovia	Trecho	Problema	Risco	Prioridade	Recomendações
1	Serra	Movimentação no encontro / Drenagem Assoreada	Potencial	2	Monitoração / Desobstrução da drenagem
2	Serra	Infiltração nas cabeças de proteção / Drenagem obstruída	Potencial	2	Selagem das cabeças / Desobstrução da drenagem

Assim, ao longo do ano de 2018, foi planejado e executado Ensaio Dinâmico Não-Destrutivo em 12 tirantes do tipo Monobarra, com diâmetro de 32 mm, em um período de 1 dia. A tabela 3 fornece informações adicionais sobre o estudo de caso, enquanto as figuras 1 e 2 apresentam o layout das cortinas.

Tabela 3. Informações gerais das cortinas.

Rodovia	Extensão	Altura máxima	Painéis	Nº tirantes	Tipos de tirantes	Tirantes ensaiados
1	39 m	5 m	Moldados in loco	28	Fios, cordoalhas ou monobarra	13, 14, 15, 23, 24, 25
2	70 m	16 m	Viga+ concreto projetado	177	Monobarra	156, 157, 159, 162, 170, 171

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.



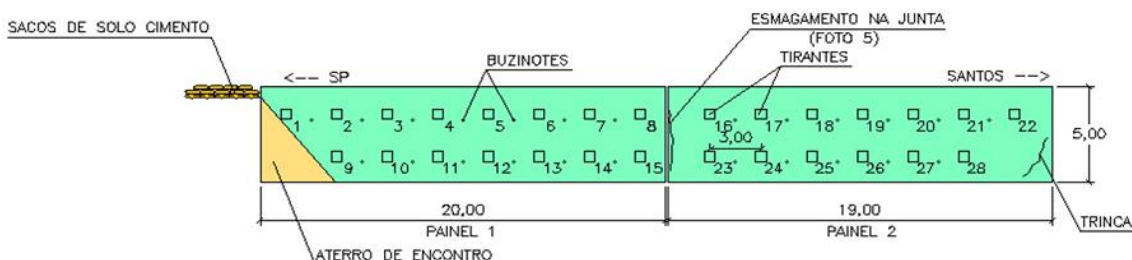


Figura 1. Layout da Cortina 1 (Rodovia 1).

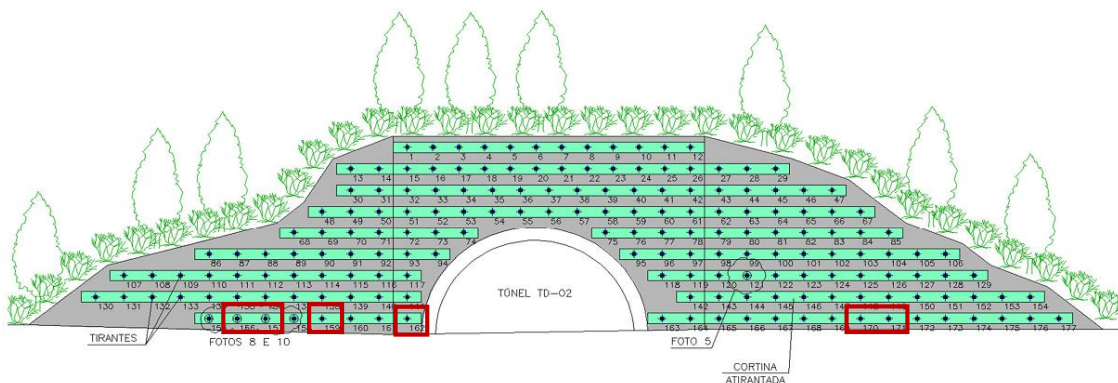


Figura 2. Layout da Cortina 2 (Rodovia 2).

3 Metodologia

3.1 Impedância Mecânica

3.1.1 Aquisição

Os ensaios efetuados são Dinâmicos Não-Destrutivos do tipo impedância mecânica. Ela é baseada na análise vibratória do tirante e consiste em:

- Colocar em vibração o tirante com um impacto provocado na placa de apoio e na monobarra, na direção de seu eixo. O impacto é obtido com um martelo equipado de um sensor de força;
- Registrar esse impacto F;
- Registrar também a vibração V do tirante sob efeito do impacto, com 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.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



Para cada tirante foram efetuadas 6 aquisições, no mínimo. A fim de atenuar os barulhos parasitos aleatórios e amplificar a resposta vibratória do tirante, cada aquisição acumula dois impactos. O posicionamento do sensor de velocidade e do impacto do golpe necessitam de duas áreas planas de aproximadamente 5 cm x 5 cm na placa de apoio. O sensor é colado na placa de apoio, na qual deve ter a superfície lisa e limpa. As figuras 3 e 4 ilustram a execução do teste.

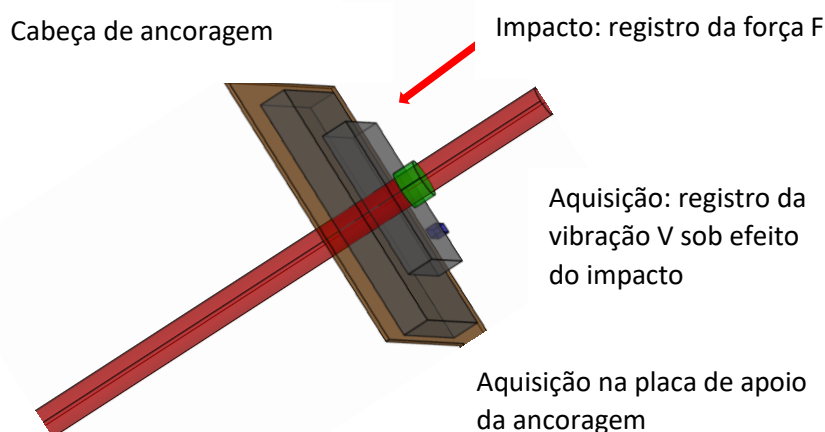


Figura 3. Esquema de realização do ensaio dinâmico não destrutivo.

3.1.2 Curva V/F em Função da Frequência

A análise da curva é efetuada com os parâmetros de resposta em frequência e rigidez dinâmica.

Resposta em frequência:

O(s) regime(s) vibratório(s) dominante(s) conduz à determinação do comprimento total do tirante e do comprimento livre. Os diferentes picos ou cavidades sucessivas da curva são posicionados em frequência de acordo com as frequências próprias das vibrações. O comprimento correspondente será:

$$L = \frac{V}{2 \Delta f} \quad (1)$$

Onde, “ Δf ” é a diferença de frequência entre dois picos ou cavidades sucessivas, “L” é o comprimento e “V” é a velocidade de propagação das ondas no tirante.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.





Figura 4. Execução do ensaio (aquisição de dados).

Assim, a vibração da parte livre do tirante é obtida na curva picos ou cavidades sucessivas distantes de Δfl , ou seja o comprimento $Ll = V / 2 \Delta fl$. A vibração da totalidade do tirante é obtida na curva picos ou cavidades sucessivas distantes de Δft , ou seja o comprimento $Lt = V / 2 \Delta ft$ (figura 5).

O comprimento calculado deve ser comparado com o comprimento teórico do tirante. No caso de um tirante contínuo sem corte, os comprimentos calculados correspondem aos do tirante. No caso de um tirante seccionado, o comprimento calculado corresponde ao comprimento até o corte.

Rigidez Dinâmica:

A rigidez dinâmica (R), que é proporcional ao inverso da inclinação na origem da curva (figura 5), depende da inércia do sistema auscultado e do meio ao redor. No caso de um tirante, ela depende do tipo do tirante e de suas características, sua ancoragem, dos esforços aplicados e da estrutura geral. Esse parâmetro é ligado à rigidez estática, ou seja, à inclinação num ponto da curva esforço/deformação proveniente de um ensaio de tração direta. Portanto, a rigidez dinâmica é ligada ao esforço no tirante no momento do ensaio.

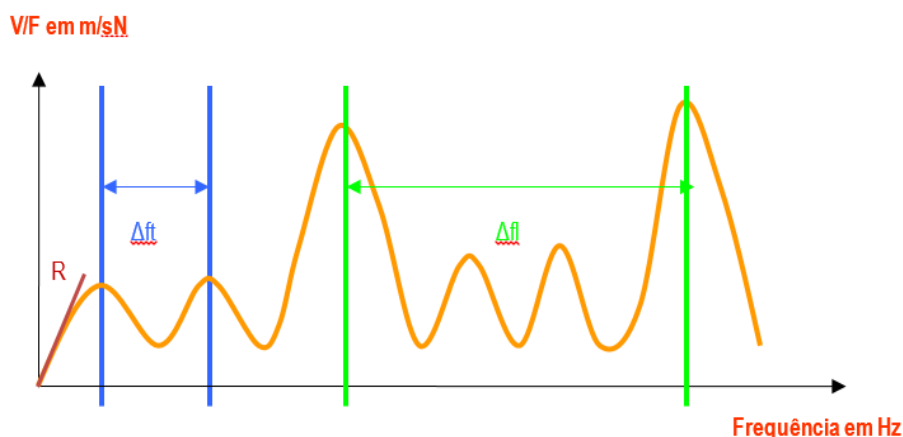


Figura 5. Análise da curva.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



Uma rigidez correta significa: ancoragem correta do tirante; ausência de corte; continuidade do tirante no seu comprimento. Uma rigidez fraca mostra um provável corte ou perda de tensão na ancoragem do tirante. Esse tipo de diagnóstico tem mostrado que as diferenças entre as rigidezes corretas e as rigidezes fracas estão em torno de um fator 10.

3.2 Ensaio de Calibração

Para o ensaio de Calibração, é feito simultaneamente ensaio a tração e ensaios dinâmicos em diferentes estágios de carga aplicada. A carga no tirante é aplicada utilizando um conjunto de bomba e macaco hidráulico vazado com capacidade para 60 toneladas, exercendo pressão contra a parede da cortina. As leituras das cargas aplicadas são obtidas por meio de célula de carga, enquanto os deslocamentos do tirante são medidos com precisão através de 02 (dois) relógios comparadores, cada um com curso de 50,00 mm e precisão de 0,01 mm. O resultado final é representado na curva carga x deslocamento (figura 6).

Pelo menos dois ensaios de calibração foram realizados por cortina, a fim de determinar a relação entre a rigidez dinâmica e os esforços nos tirantes. Em cada estágio de carregamento, um ensaio dinâmico não-destrutivo é conduzido simultaneamente ao ensaio de tração (figura 7), a fim de ligar a rigidez dinâmica ao esforço aplicado. Essa abordagem nos permite correlacionar a rigidez dinâmica com o esforço aplicado, o que, por sua vez, nos fornece informações precisas sobre os esforços atuantes nos demais tirantes.

Com a aplicação dessa metodologia, obtém-se uma compreensão abrangente do comportamento dos tirantes e das forças que atuam sobre eles. Esses dados são essenciais para o correto dimensionamento e análise da estabilidade da cortina.

Carga x Deslocamento

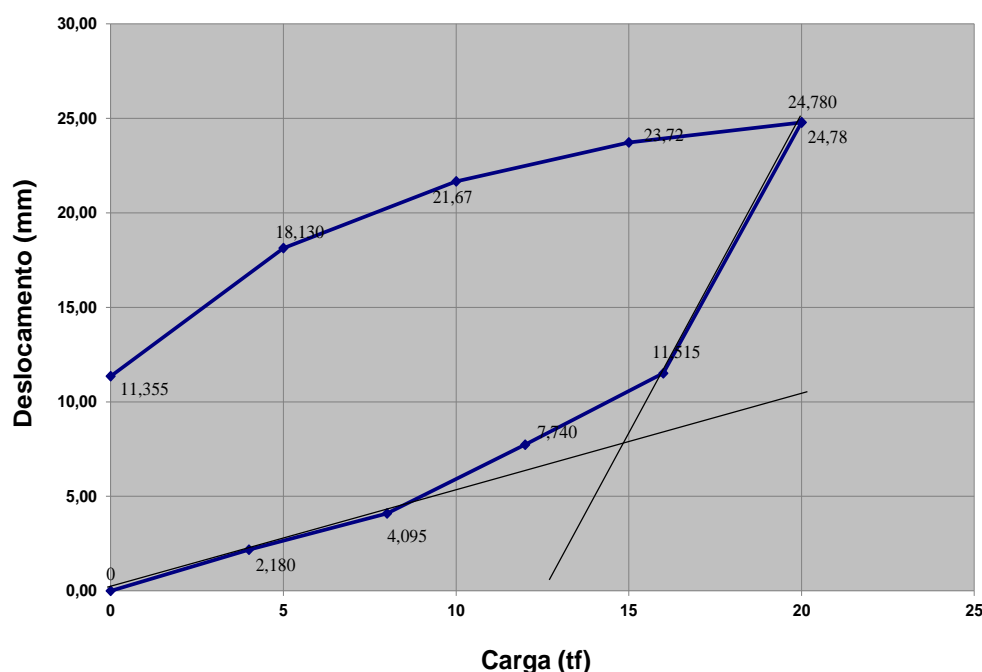


Figura 6. Resultado do ensaio de Calibração.

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.





Figura 7. Realização do ensaio a Tração e dinâmico para Calibração.

4 Processamento de Dados e Análise de Resultados

O processamento das informações tem início *in loco*, mediante avaliação de cada aquisição, com o intuito de checar se os sinais de força e de velocidade estão adequados e sem interferências (figura 8). A próxima etapa consiste na análise dos parâmetros de comprimentos e rigidez (figura 9), conforme explicado no item 3.1.2, das 6 curvas registradas para cada tirante ensaiado.

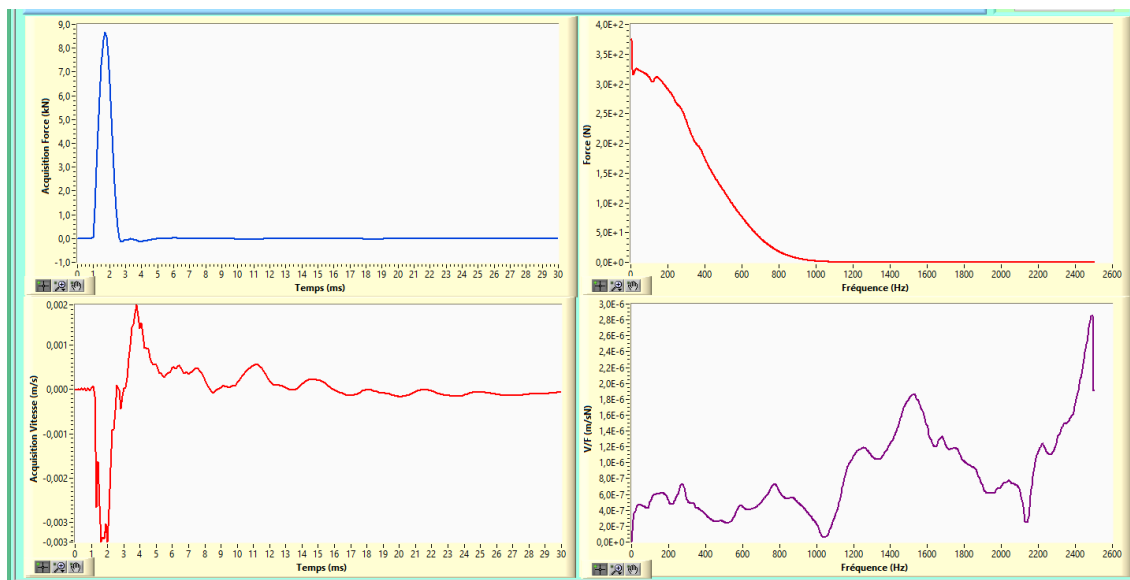


Figura 8. Gráfico padrão dos sinais dos sensores de força e velocidade, extraído durante o ensaio.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



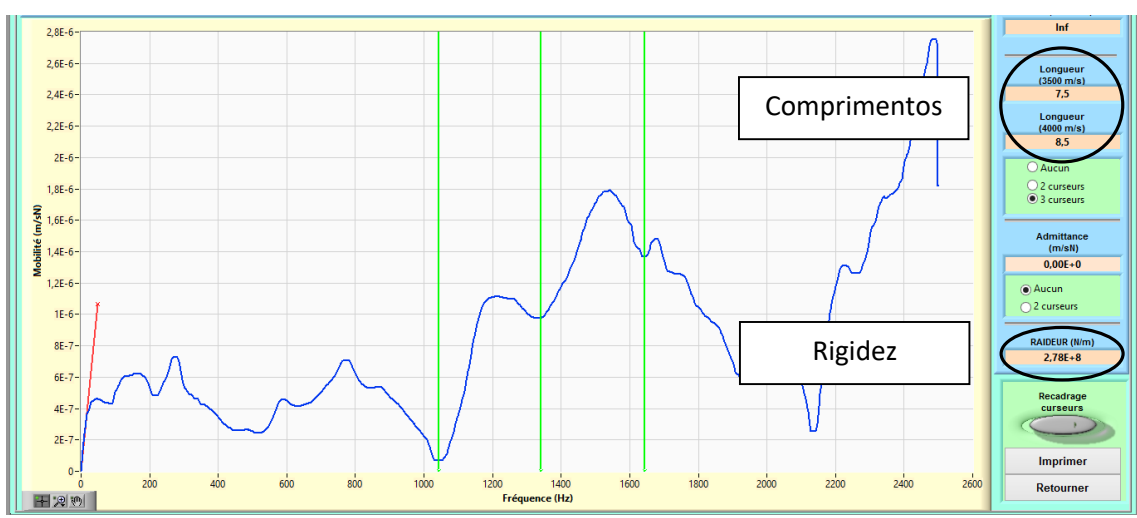


Figura 9. Curva resultado do ensaio, após análise.

Desta forma é possível determinar, em média, os comprimentos livres/totais e a rigidez dos 12 elementos. De posse dos valores de rigidez, obtidos pelos ensaios de calibração, define-se a equação padrão de cada cortina a partir da fórmula geral:

$$\sqrt{R} = a \times T + b \quad (2)$$

Onde, “R” é a rigidez média, “T” a tensão do tirante, “a” e “b” são coeficientes estabelecidos a partir dos valores conhecidos de R e T. Para facilitar a definição dessa formulação é importante executar pelo menos 2 ensaios de calibração por cortina. Com a os coeficientes (a e b) fixados, a equação viabiliza a estimativa da força atual de cada tirante testado.

Segundo Beno (2013), a improbabilidade nos resultados quanto ao comprimento do tirante está principalmente relacionada à velocidade de propagação das ondas no tirante, que pode variar cerca de 10% em relação ao valor da velocidade e, conseqüentemente, para os valores estimados de comprimento. Sobre o esforço do tirante, a incerteza incidente é de 10% mediante a realização de ensaios de calibração, que são absolutamente necessários. A detecção de um tirante rompido é 100% precisa.

Os resultados obtidos indicaram que os tirantes estavam íntegros e sem cortes, a análise da rigidez e cálculos de esforço resultaram nos valores a seguir:

Tabela 4. Tensões e Comprimentos obtidos nos tirantes.

Tirantes	13	14	15	23	24	25	156	157	159	162	170	171
Tensão (tf)	26	24	23	24	23	25	32	19	18	45*	25	15
Comp. Livre (m)	13	13	12	13	13	13	12	11	11	13	13	12
Comp. Total (m)	19	19	21	18	19	17	18	17	17	21	18	19

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.



* O esforço nesse tirante está sobre estimado, devido a posição particular deste elemento na cortina. Na prática são necessários dados adicionais, como avaliação de tirantes vizinhos na mesma parede de concreto para determinar melhor a tensão do T162.

Os resultados obtidos foram satisfatórios pois indicaram tensões entre 15,0 e 32,0 tf nos tirantes ensaiados, com comprimentos livres/totais conforme o esperado. No tocante aos comprimentos, os resultados indicaram que os tirantes analisados estavam íntegros e sem cortes.

5 Conclusão

Após uma análise cuidadosa das cortinas, foram identificadas diversas patologias, que estão detalhadas na tabela 2. Essas anomalias foram detectadas por meio de inspeção visual, resultando em uma avaliação principalmente qualitativa do sistema de estabilização das encostas. Para complementar esse primeiro processo de avaliação, foi realizado o Ensaio Dinâmico Não-Destrutivo baseado na impedância mecânica, o qual forneceu informações quantitativas sobre os tirantes selecionados. Essas informações incluem os comprimentos livres/totais dos tirantes e a força atual.

Além do evidente benefício de se obter informação técnica para cada elemento testado, os Ensaio Dinâmicos Não-Destrutivos demonstraram outras vantagens significativas neste estudo de caso, tais como: Eliminação do risco de ruptura durante a aplicação da tensão e ausência de fragilização dos materiais, que podem ocorrer em testes de arrancamento; Possibilidade de controle futuro de todos os tirantes; Redução significativa do prazo para realização do teste, que foi concluído em apenas 1 dia, melhor relação benefício-custo; Obtenção dos comprimentos livres e totais de cada tirante; Cálculo da carga atuante nos tirantes no momento do ensaio que permite realizar uma retro-análise da estabilidade da contenção, caso existirem todos os dados geotécnicos do maciço; Mapeamento abrangente das cargas dos tirantes que permite o acompanhamento das tensões ao longo do tempo e identificação da perda de carga com relação a vida útil da cortina.

Esse mapeamento, em conjunto com a inspeção visual, torna-se uma ferramenta essencial para a investigação estrutural das cortinas. Com base nessas informações, é possível realizar intervenções direcionadas nessas áreas, buscando mitigar os riscos identificados.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Rincent Laboratoires pela presteza e apoio na realização deste artigo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

American Concrete Institute (2013). ACI 228.2R-13. Report on Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures. Detroit.

Beno, P. J. N.; Wolney, D. (2013) Método não-destrutivo de verificação dos tirantes. Fundações e Obras Geotécnicas, Rudder, ed. 33 (3), p. 86-89.

Norma ASTM C1740 (2010). Standard Practice For Evaluating The Condition Of Concrete Plates Using The Impulse-Response Method. West Conshohocken. PA.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.

