

## PROPOSTA DE ENSAIO NÃO DESTRUTIVO PARA CONTROLE DE QUALIDADE DE CONCRETOS COM BASE NA FREQUÊNCIA RESSONANTE

ANDERSON NORBERTO SANTOS CERQUEIRA<sup>1</sup>, RODRIGO DE MELO LAMEIRAS<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mestrando, Pesquisador CAPES, UnB, Brasília-DF, anderson.norberto@hotmail.com;

<sup>2</sup>Doutor em Engenharia, Professor, PECC, ENC, UnB, Brasília-DF, rmlameiras@unb.br;

Apresentado no  
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC  
6 a 9 de outubro de 2025

**RESUMO:** Este trabalho propõe o estudo paramétrico, através da modelagem numérica, de um método de ensaio não destrutivo baseado na frequência ressonante para avaliar a evolução das propriedades mecânicas do concreto. A proposta visa definir as dimensões geométricas dos apoios do novo método a fim de superar limitações dos ensaios destrutivos tradicionais, como a necessidade de múltiplos corpos de prova e a discrepância entre as condições de cura dos corpos de prova e da estrutura real. A metodologia envolve o uso de um pilarete misto de PVC e concreto, com sistema de aquisição de dados de baixo custo, e otimização geométrica para garantir precisão nas leituras. Estudos teóricos e numéricos foram realizados para validar a viabilidade da proposta.

**PALAVRAS-CHAVE:** Modelagem, Frequência natural, Frequência ressonante, Elementos finitos.

### NON-DESTRUCTIVE TESTING PROPOSAL FOR CONCRETE QUALITY CONTROL BASED ON RESONANT FREQUENCY

**ABSTRACT:** This study presents a parametric investigation, conducted through numerical modeling, of a non-destructive testing method based on resonant frequency to monitor the evolution of the mechanical properties of concrete. The main objective is to define the geometric dimensions of the supports in order to overcome limitations inherent to conventional destructive tests, such as the requirement for multiple specimens and the discrepancies between the curing conditions of laboratory specimens and those of the actual structure. The proposed methodology employs a composite PVC–concrete column, combined with a low-cost data acquisition system and geometric optimization to enhance measurement accuracy. Both theoretical and numerical analyses were performed to assess and validate the feasibility of the proposed approach.

**KEYWORDS:** Modelling, Natural frequency, Ressonant Frequency, Finite element.

### INTRODUÇÃO

O controle de qualidade do concreto é essencial para garantir a segurança, durabilidade e desempenho das estruturas. A norma ABNT NBR 12655:2015 estabelece diretrizes para a produção e controle da qualidade do concreto. Tradicionalmente, a propriedade mais controlada é a resistência à compressão, sendo outras propriedades, como o módulo de elasticidade e a resistência à tração, estimadas ou medidas a partir da resistência à compressão do concreto.

A Associação Brasileira de Normas técnicas (ABNT) regulamentou ensaios destrutivos (NBR 8522:2021) e não destrutivos (NBR 8802:2019) para encontrar o módulo de elasticidade. Entretanto, os ensaios destrutivos apresentam limitações físicas, especialmente quando se deseja acompanhar a evolução das propriedades ao longo do tempo ou a determinação das propriedades no estado fresco. Ambos os ensaios citados exigem a produção de corpos de prova e não considera as condições reais de cura da estrutura, pois estes são mantidos em condições bem controladas e são curados em ambientes distintos, como tanques de água ou câmaras úmidas, deste modo, os resultados obtidos podem não refletir fielmente o comportamento do concreto na estrutura. No caso dos ensaios destrutivos ainda deve-se produzir um número de corpos de prova relativo às idades a serem estudadas, uma vez que

estas vão sendo rompidas no teste, deste modo, têm-se o acréscimo considerável de material e esforço para produzir estes resultados.

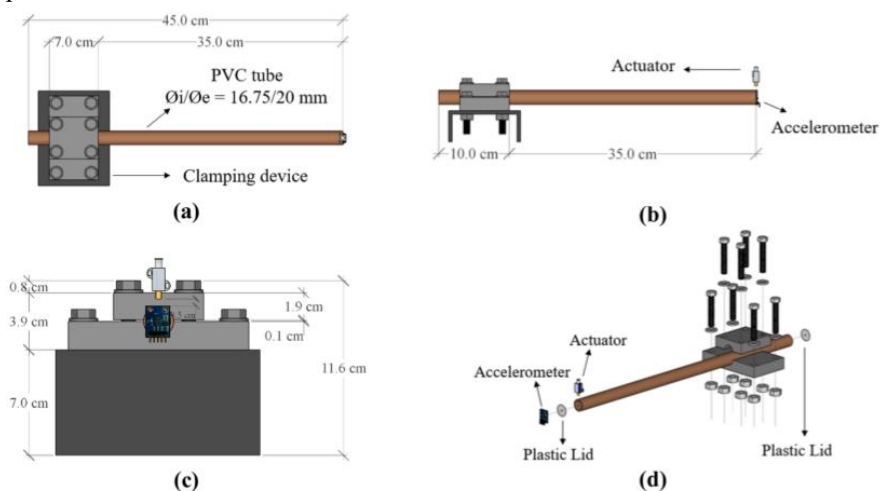
O método explorado neste trabalho permite suprir tais limitações, a técnica EMM-ARM tem sido amplamente utilizada para determinar a evolução do módulo de elasticidade de pastas e argamassas desde as primeiríssimas idades, no entanto seu uso em concreto está muito limitado e carece das adaptações das novas técnicas já implementadas no sistema para estudo das pastas, como o uso do impulso mecânico como forma de excitação da peça, afim de eliminar os ruídos brancos do ambiente e tornar mais clara a leitura da frequência do material estudado. Devido esta alteração o método passou a ser chamado EMM-IRM e se mostra como alternativa promissora, uma vez que diminui a dependência do operador do sistema e conseqüentemente, erros no ensaio. (ARAGHI *et al.*, 2024; RIBEIRO, 2019)

Este trabalho propõe a determinação da geometria de um novo apoio para o ensaio EMM-IRM para acompanhar a evolução do módulo de elasticidade do concreto e sua resistência à compressão. Isso será feito através do estudo paramétrico utilizando um modelo computacional desenvolvido num software computacional baseado no método dos elementos finitos.

### MÉTODOS BASEADOS NA FREQUÊNCIA RESSONANTE: EMM-ARM e EMM-IRM

Diversos métodos têm sido desenvolvidos para estudar as propriedades elásticas em materiais cimentícios, aos quais pode-se citar o Sonelastic que adapta com primor o ensaio normatizado para determinação do módulo de elasticidade dinâmico em concreto na ASTM C215 e permite através das equações de equilíbrio dinâmico deduzir analiticamente o módulo de elasticidade uma vez conhecida as frequências de vibração do corpo. O ensaio se baseia na excitação por impulso ou por ressonância forçada de um corpo de prova na condição livre-livre e a captação da resposta através de acelerômetros, *strain gages* e microfones. Este ensaio demanda um corpo de prova endurecido e desmoldado, fatores não limitantes para o EMM-ARM, capaz de obter dados desde o processo de hidratação, com o material fresco e de maneira não-destrutiva. Sua primeira publicação foi feita por Azenha *et al.* (2010) e ao longo da última década o EMM-ARM foi sucessivamente aprimorado, recebendo um setup de baixo custo e um atuador automático para excitação, desenvolvidos por Ribeiro (2019) e Araghi *et al.* (2024), respectivamente. Com o uso de um impulso mecânico alterou-se o nome para EMM-IRM e foi possível obter maior clareza na leitura da frequência, uma vez que a aceleração devido ao impacto se tornou mais preponderante em relação às dos ruídos do ambiente. A Figura 1 demonstra a mais recente proposição do ensaio para uso em pastas de cimento. É possível notar o setup do sistema engastado-livre em diferentes vistas. (ARAGHI *et al.*, 2024)

Figura 1 – Setup do sistema EMM-IRM



Fonte: Araghi *et al.* (2024)

Na versão do ensaio desenvolvido na Universidade de Brasília, o hardware é composto por 5 elementos: o acelerômetro ADXL335-GY61, o Raspberry Pi, o conversor analógico-digital (ADC), os solenoides e o relay de 4 canais, os mesmos propostos por Araghi *et al.* (2024). O acelerômetro faz leitura nas 3 direções ortogonais de até 50Hz e deve ser posicionado na extremidade livre, o atuador é programado para funcionar de forma automática com capacidade de aplicação de 5kN no intervalo de 0,02s. O relay de 4 canais faz o intermédio entre o atuador e o Raspberry Pi, permitindo-o controlar o solenoide em perfeita sincronia. Já o ADC é responsável por converter os dados analógicos, produtos do acelerômetro, em dados digitais acessíveis à leitura pelo Raspberry Pi, o cerne do hardware, capaz de controlar todo o sistema com o mínimo de interação humana.

O software desenvolvido em Python proposto por Araghi *et al.* (2024) tem a intenção de ser intuitivo e de fácil manuseio. Ao iniciar, a primeira tarefa do software é ler o arquivo indicado pelo usuário onde está descrito a quantidade de canais utilizados no experimento, o tempo de duração de cada aquisição, o intervalo entre cada leitura, o tempo total de duração do ensaio, o diâmetro interno do tubo de amostra, o comprimento total e o vão livre em balanço, o tempo passado desde a mistura da amostra até a primeira leitura e a massa total do tubo cheio. Uma vez processado estes dados, o atuador é acionado e aplica carga no intervalo de 0,02s e o acelerômetro faz a leitura da aceleração da amostra, convertida pelo ADC que salva os dados como um vetor instantaneamente. O conjunto de vetores é então salvo em um arquivo de texto e posteriormente, através do procedimento Welch (KOH; GAMES, 1974), se calcula o espectro de potência de densidade (PSD), que ao ser analisado demonstra a frequência da amostra. Então o software calcula a rigidez da viga mista (EI) utilizando os dados geométricos fornecidos na entrada e a frequência natural, uma vez que a inércia e o módulo de elasticidade do tubo vazio são conhecidos, encontra-se o módulo de elasticidade da amostra e o software salva a informação no arquivo de texto respectivo da leitura. O cálculo utiliza a Equação 1, apresentada por Avitabile (2017) para condição de viga engastada-livre, onde  $E$  é o módulo de elasticidade a ser encontrado,  $I$  é o momento de inércia do elemento estudado,  $f$  é a frequência natural encontrada,  $L$  o comprimento do elemento e  $M$  a massa do mesmo:

$$EI = \frac{4}{3}\pi^2 f^2 L^3 M \quad \text{Equação 1}$$

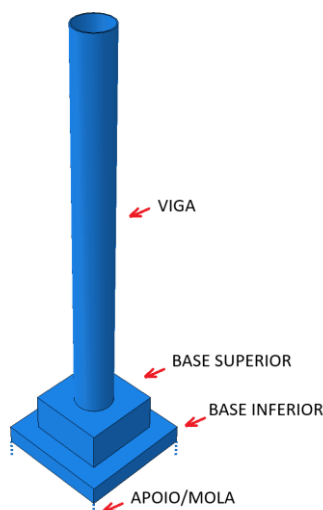
## MATERIAL E MÉTODOS

Esta etapa consiste no desenvolvimento do sistema com a condição de contorno engastada-livre, tal como proposto por Araghi *et al.* (2024). No entanto, por se tratar de um estudo em concreto, será necessário rever os parâmetros geométricos do ensaio. Devido ao uso de agregados maiores, deve-se aumentar o diâmetro da amostra para 10 cm e, por conta disso, aumentar o vão da viga em balanço para obter a esbeltez necessária para realização do teste dinâmico, pois espera-se frequências inferiores a 50 Hz, por conta da limitação do acelerômetro utilizado no sistema de aquisição. Para obter assertividade na determinação das medidas, deve-se fazer uma modelagem computacional para estimar o comprimento ideal da viga mista e então estudar as medidas do apoio metálico, verificar sua capacidade de conferir estabilidade para o sistema e impedir o tombamento. Devido ao peso do corpo de prova, será necessário realizar o ensaio com o corpo de prova na vertical e aplicar o impulso horizontalmente na ponta da viga.

Para realizar este estudo paramétrico utilizou-se o software baseado no método dos elementos finitos, Abaqus, devido seu reconhecimento internacional e capacidade avançada de simulação, e utilizou-se 3 parâmetros: o comprimento livre da viga em balanço, a altura da base maior e a altura da base menor, conforme a Figura 2. Considerou-se na modelagem que o apoio metálico possuiria duas partes: a base inferior com 30 × 30 cm e a base superior com 20 × 20 cm com uma abertura de 10 cm de diâmetro centralizada para receber o tubo PVC de mesmo diâmetro, apesar de dimensões distintas as bases trabalham juntas. Considerou-se para o aço o módulo de elasticidade de 200 GPa, densidade de 7850 kg/m<sup>3</sup> e Poisson de 0,3, enquanto para PVC o módulo de elasticidade de 3 GPa, densidade de 1410 kg/m<sup>3</sup> e Poisson de 0,4. A altura da base inferior, da base superior e o comprimento livre da viga serão as variáveis do estudo paramétrico. Sob a base inferior considerou-se molas não lineares com

resistência baixa à tração e alta à compressão para simular o solo seu comportamento sobre o solo e permitir rotação em caso de instabilidade do sistema.

Figura 2 – Sistema modelado no Abaqus



Fonte: Autoria própria

Os resultados obtidos a partir da modelagem permitirão avaliar a frequência natural do sistema à medida em que se alterava cada uma das três variáveis: o comprimento livre da viga, altura da base superior e altura da base inferior do apoio metálico. Fez-se a comparação da frequência encontrada no modelo com a frequência esperada analiticamente através da Equação 1 e encontrou-se o erro relativo. Vale ressaltar que a equação assume que existe um engaste perfeito e o modelo numérico foi feito com molas para representar de forma realista a instabilidade que o apoio pode conferir à viga.

Importante ressaltar que devido o limite de 50 Hz do acelerômetro foi feito o cálculo analítico do caso de maior rigidez do sistema para inferir um limite mínimo para o comprimento livre da viga: quando o tubo estiver cheio de concreto endurecido

Serão utilizadas medidas fixas de 100 cm para o comprimento livre do tubo (110 cm total), 5 cm para a altura da base inferior e 10 cm para a base superior. A primeira variável a ser estudada será o comprimento livre da viga, variando-a de 80cm a 110cm e mantendo fixa as outras medidas. Para a segunda variável, será utilizada a altura da base inferior variando entre os valores 1cm e 15cm e, por fim, a terceira variável, a altura da base superior, irá variar de 1cm a 15cm. Os valores utilizados na modelagem foram discretizados na Tabela 1.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tabela 1 - Estudo Paramétrico - Abaqus

Estudo Paramétrico - Abaqus						
Variável	Comprimento livre	Altura Base inferior	Altura Base superior	Frequência numérica	Frequência analítica	Erro relativo
	cm	cm	cm	Hz	Hz	%
1	80	5	10	24,374	26,86	9
	90	5	10	21,726	21,23	-2
	100	5	10	19,078	17,19	-11
	110	5	10	16,631	14,21	-17
2	100	1	10	11,622	17,19	32
	100	5	10	19,209	17,19	-12

	100	10	10	19,178	17,19	-12
	100	15	10	19,230	17,19	-12
	109	5	1	11,622	14,47	20
3	105	5	5	18,364	15,59	-18
	100	5	10	18,797	17,19	-9
	95	5	15	19,729	19,05	-4

A partir do limite 50 Hz, utilizando a Equação 1, encontrou-se que com 70 cm de comprimento livre com tubo preenchido com concreto C90 a frequência analítica é de 47,29 Hz, deste modo o estudo da variável 1 se inicia a partir de 80 cm. Nota-se que ao aumentar o comprimento livre da viga as frequências numérica e analítica reduzem pois o sistema se torna menos rígido e suscetível à vibração.

Ao analisar a segunda variável nota-se que a primeira amostra possui frequência numérica muito menor que a analítica e as demais variam pouco entre si, deste modo o erro relativo se mantém praticamente constante. Acredita-se que a primeira amostra demonstra a instabilidade provocada por uma base muito esbelta, uma vez que há pouco peso agindo contra o tombamento. A baixa variação se dá pela baixa sensibilidade na garantia do engaste.

De forma análoga à variável anterior, a primeira amostra da terceira variável também sugere instabilidade no sistema, desta vez possivelmente provocada pela pouca área de contato entre a viga e o apoio. A frequência numérica cresce à medida que a altura do apoio aumenta, o que se justifica pelo aumento do peso do apoio como força estabilizadora contra o movimento de tombamento.

## CONCLUSÃO

A modelagem numérica desenvolvida no presente trabalho demonstrou que o sistema composto pela viga engastada-livre apresenta comportamento estrutural coerente com os princípios da análise pelo método dos elementos finitos. Os resultados evidenciaram que o apoio se mostrou adequado para garantir o engaste na viga mantendo os limites de frequência necessária para leitura pelo acelerômetro. O ensaio será realizado com os valores que conferem o menor erro relativo: comprimento livre de viga de 90cm, com a base inferior em 5cm e a base superior com 15cm. Portanto, pode-se afirmar que o estudo contribui para o avanço das análises numéricas para vigas aplicadas no EMM-IRM e servirá na confecção dos novos apoios, posterior validação do método e servir de base para comparações futuras.

## AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio concedido ao primeiro autor por meio da bolsa de pesquisa durante o curso de mestrado, fundamental para o desenvolvimento deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- ARAGHI, Amir. RIBEIRO, Renan Rocha; RUSSO, Thomas; GRANJA, José; AZENHA, Miguel; LAMEIRAS, Rodrigo de Melo. New impulse-based test method for early-age elastic modulus measurement in cementitious materials. **Case Studies in Construction Materials**, [s. l.], v. 21, n. August, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03971>
- AVITABILE, Peter. **Modal Testing: A Practitioner's Guide**. [S. l.: s. n.], 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/9781119222989>
- AZENHA, Miguel. MAGALHÃES, Filipe; FARIA, Rui; CUNHA, Álvaro. Measurement of concrete E-modulus evolution since casting: A novel method based on ambient vibration. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 40, n. 7, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.02.014>
- KOHR, Richard L.; GAMES, Paul A. Robustness of the analysis of variance, the welch procedure and a box procedure to heterogeneous variances. **Journal of Experimental Education**, [s. l.], v. 43, n. 1, 1974. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00220973.1974.10806305>
- RIBEIRO, Renan Rocha. Desenvolvimento de um sistema para monitoramento do módulo de elasticidade de materiais cimentícios desde as primeiras idades. [s. l.], p. 228, 2019.