



2025

Avaliação da rigidez do concreto com smartphones: Validação de um método não destrutivo por vibração transversal

Matheus Pereira Lima ^a; Andrés Batista Cheung ^b

^a Aluno de Graduação em Engenharia Civil, pereira.matheus@ufms.br

^b Professor Orientador, Doutor, andres.cheung@ufms.br

Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Av. Costa e Silva, s/nº | Bairro Universitário | 79070-900 | Campo Grande, MS, Brasil.

RESUMO

A determinação precisa do módulo de elasticidade (E_c) do concreto é crucial para a engenharia de estruturas, porém os métodos de ensaios padronizados são dispendiosos e restritos a ambientes laboratoriais. Este artigo propõe e valida uma metodologia não destrutiva e de baixo custo para a aferição do módulo de elasticidade dinâmico transversal ($E_{cd,vt}$) de uma viga de concreto armado, utilizando o acelerômetro de um smartphone. O método consiste em obter a frequência natural fundamental da viga por meio da análise de sua resposta à vibração livre, empregando a Transformada Rápida de Fourier (FFT), e, a partir dela, calcular o ($E_{cd,vt}$). Para a validação, os resultados foram comparados com o módulo estático (E_{ce}), determinado em corpos de provas cilíndricos sob compressão uniaxial, em idades de 3, 7, 14 e 28 dias. Embora tenha sido notada uma divergência nas magnitudes absolutas dos módulos, atribuída à diferença nos estados de tensão dos ensaios, a análise de regressão linear revelou uma correlação estatisticamente robusta entre os dois métodos, com um coeficiente de determinação (R^2) de 0,997. Esse elevado grau de correlação permitiu o desenvolvimento de uma equação de calibração empírica que válida a abordagem proposta como uma ferramenta prática e confiável para a caracterização expedita da rigidez do concreto. A metodologia demonstra o potencial de dispositivos móveis para o controle de qualidade do concreto em canteiros de obras, alinhando a pesquisa acadêmica com as necessidades da indústria da construção.

Palavras-chave: Módulo de elasticidade, Vibração transversal, Smartphone, Concreto armado, Ensaios não destrutivos (END), Acelerômetro, Frequência natural, Transformada Rápida de Fourier (FFT), Módulo de elasticidade dinâmico, Correlação estatística.

ABSTRACT

The accurate determination of the modulus of elasticity (E_c) of concrete is crucial for structural engineering, however standardized testing methods are dispendious and restricted to laboratory environments. This paper proposes and validates a non-destructive and low-cost methodology for the assessment of the dynamic transverse modulus of elasticity ($E_{cd,vt}$) of a reinforced concrete beam, utilizing a smartphone's accelerometer. The method consists of obtaining the beam's fundamental natural frequency by analyzing its free vibration response, employing the Fast Fourier Transform (FFT), and subsequently calculating the ($E_{cd,vt}$). For validation, the results were compared with the static modulus of elasticity (E_{ce}), determined from uniaxial compression tests on cylindrical specimens at ages of 3, 7, 14, and 28 days. Although a divergence in the absolute magnitudes of the moduli was noted, attributed to the different stress states of the tests, the linear regression analysis revealed a statistically robust correlation between the two methods, with a coefficient of determination (R^2) of 0,997. This high degree of correlation allowed for the development of an empirical calibration equation and validates the proposed approach as a practical and reliable tool for the expeditious characterization of concrete stiffness. The methodology demonstrates the potential of mobile devices for the quality control of concrete on construction sites, aligning academic research with the needs of the construction industry.

Keywords: Modulus of elasticity, Transverse vibration, Smartphone, Reinforced concrete, Non-destructive testing (NDT), Accelerometer, Natural frequency, Fast Fourier Transform (FFT), Dynamic modulus of elasticity, Statistical correlation.

1. INTRODUÇÃO

A otimização dos projetos de engenharia civil, aliada à necessidade de um melhor aproveitamento dos espaços urbanos juntamente com a demanda por soluções construtivas mais eficientes, tem redefinido a concepção e execução de estruturas em concreto armado. De acordo com Kalra e Mehmood (2018), o aumento na demanda por edifícios altos gerou um aumento na demanda por materiais de melhor desempenho e resistência.

Nesse contexto de complexidade crescente, o conhecimento amplo das propriedades mecânicas dos materiais construtivos, em específico do concreto, torna-se imprescindível. O comportamento das estruturas precisa ser previsto com acurácia a fim de garantir segurança, estabilidade e durabilidade.

Entretanto, há uma notável discrepância no entendimento do comportamento necessário do projeto e a realidade no comportamento do concreto. A ABNT 6118:2023 fornece equações empíricas para estimar o módulo de elasticidade, a qual correlaciona o módulo com a resistência característica à compressão (f_{ck}) e, em alguns casos no tipo do agregado. Contudo, para que o cálculo estrutural se aproxime do comportamento real, o conhecimento das propriedades de deformação do material é de fundamental importância (Melo e Helene, 2002).

É evidente a importância de se obter o valor do módulo de elasticidade do material, sendo assim, o que poderia ser tratado com aproximações toleráveis, devido a demanda atual exige um rigor analítico e experimental consideravelmente maior, aliado a necessidade de pesquisa contínua e atualização dos conhecimentos.

Em suma, o objetivo principal deste artigo é determinar o módulo de elasticidade dinâmico transversal ($E_{cd,vt}$), utilizando para tanto, os dados de coletados por um acelerômetro. Adicionalmente, os valores de $E_{cd,vt}$ obtidos por esta técnica não destrutiva serão comparados com os valores de módulo de elasticidade estático (E_{ce}) determinados através de ensaios laboratoriais convencionais.

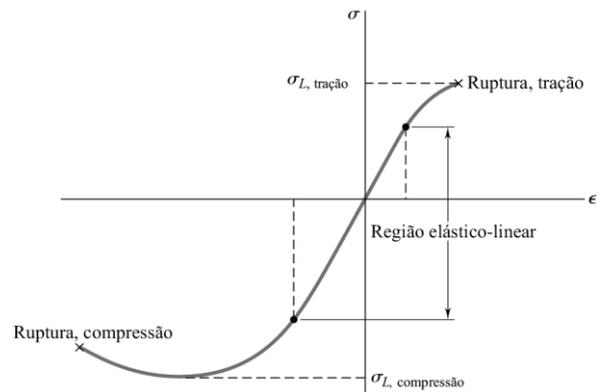
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade longitudinal (E_c), também conhecido como módulo de Young, é uma propriedade fundamental dos materiais que estabelece uma relação entre tensão e deformação, na qual observa a deformação do material quando submetido

a esforços de tração e compressão. A relação entre a tensão aplicada (σ) e a deformação específica resultante (ϵ) é classicamente representada pelo diagrama tensão-deformação, conforme ilustrado pela Figura 1.

Figura 1 – Diagrama tensão-deformação do concreto para tração e compressão



Fonte: Beer (2021)

Na região inicial do diagrama, a tensão é diretamente proporcional à deformação. Essa proporcionalidade é conhecida como Lei de Hooke ($\sigma = E \cdot \epsilon$), nomeada em homenagem a Robert Hooke (1635-1703).

No entanto, diferentemente de outros materiais dúcteis em seu regime elástico, o concreto pode exibir um comportamento tensão-deformação não linear. Essa não linearidade é uma consequência direta da sua natureza heterogênea e do desenvolvimento de microfissuras internas, à medida que a carga é aplicada. Dessa forma, a rigidez do concreto não é constante, mas varia com o nível de tensão e o histórico do carregamento.

O estudo das deformações do concreto permite obter o módulo de elasticidade estático (E_{ce}), e o módulo de elasticidade dinâmico (E_{cd}). Segundo Leal *et al.* (2020), “O módulo de elasticidade estático do concreto pode ser obtido com a análise da curva tensão-deformação através do ensaio prescrito na NBR 8522:2017”. Por outro lado, o módulo de elasticidade dinâmico é determinado pela vibração de um corpo de prova de concreto com a aplicação de uma tensão (Neville, 2016).

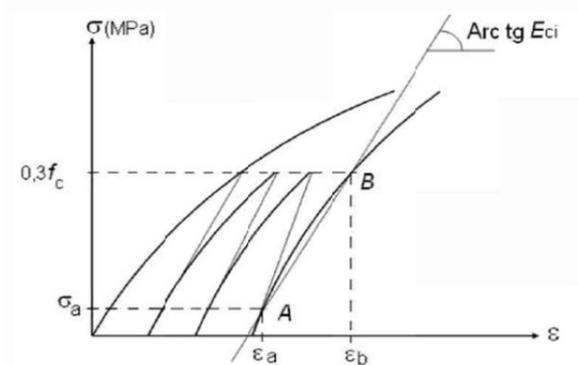
2.2. Módulo de elasticidade estático (E_{ce})

Devido à não linearidade no diagrama tensão-deformação, o módulo de elasticidade estático (E_{ce}) pode ser obtido por meio de diferentes definições, todas baseadas em ensaios com corpos de prova submetidos a carregamento “lento”. A denominação “estático” refere-se à natureza do ensaio, e esta distinção é relevante justamente porque o módulo

também pode ser estimado por ensaios e dinâmicos não destrutivos, nos quais a propriedade do concreto é inferida pela propagação de ondas ultrassônicas no seu interior (Leal *et al.*, 2020).

Módulo tangente inicial (E_{ci}): Representa a rigidez do material em níveis de tensão baixos, correspondendo à inclinação da tangente à curva tensão-deformação em sua origem. De forma prática, a NBR 8522-1 (ABNT, 2021) define seu cálculo como o módulo cordal (secante) entre a tensão inicial baixa (0,5 MPa) e uma tensão correspondente a 30% da resistência à compressão do concreto (f_c).

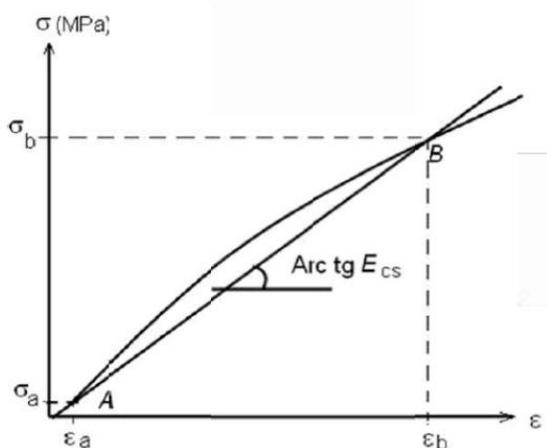
Figura 2 – Representação do módulo de elasticidade tangente inicial (E_{ci})



Fonte: NBR 8522-1 (ABNT, 2021)

Módulo secante (E_{cs}): Módulo determinado pela reta que une dois pontos da curva tensão-deformação. Usualmente, um desses dois pontos pode ser a origem (ou 0,5 MPa) e o outro corresponde a uma porcentagem específica da tensão de ruptura do concreto, como por exemplo, 40% de f_c .

Figura 3 – Representação do módulo de elasticidade secante (E_{cs})



Fonte: NBR 8522-1 (ABNT, 2021)

2.3. Módulo de elasticidade dinâmico (E_{cd})

O módulo de elasticidade dinâmico (E_{cd}) é determinado por ensaios não destrutivos, como o método das frequências naturais de vibração por impacto, que será abordado neste artigo. Geralmente, E_{cd} tende a apresentar valores superiores aos estáticos, pois é medido com cargas iguais a zero. De acordo com Mehta e Monteiro (2008), devido à deformação ser pequena e praticamente instantânea, o módulo dinâmico se aproxima do módulo tangente inicial, que é obtido pela tangente da curva tensão-deformação na origem.

A determinação do módulo de elasticidade dinâmico (E_{cd}) por meio das frequências naturais de vibração é uma técnica consolidada e padronizada, sendo seu procedimento regido pela norma ABNT NBR 8522-2 (ABNT, 2021).

No entanto, a aplicação deste método padrão apresenta desafios significativos que limitam sua utilização em larga escala, especialmente no contexto de canteiros de obras, visto que os ensaios normatizados ocorrem em condições controladas de laboratório. A instrumentação típica envolve o uso de sensores, como acelerômetros robustos, de um sistema de excitação para induzir a vibração em corpos de prova e um sistema de aquisição de dados (DAQ) robusto para processar os sinais. Consequentemente, o aparato para a execução do ensaio se torna um sistema complexo e de alto custo, o que inviabiliza sua aplicação para verificações ágeis e rotineiras em um ambiente de construção.

Em contrapartida, a tecnologia de sensores MEMS, como a presente em smartphones, surge como uma alternativa de bom custo-benefício, cujos sinais podem ser facilmente adquiridos (Rossi *et al.*, 2023).

2.4. Importância de obter o valor do módulo de elasticidade

A precisão na estimativa do módulo de elasticidade é fundamental para um dimensionamento estrutural seguro. Um valor incorreto pode conduzir a um cenário de superdimensionamento, que consequentemente implica custos não previstos, mas também pode direcionar para um subdimensionamento, no qual não é possível prever com exatidão o comportamento da estrutura sob carga. Segundo Vasconcelos e Giammusso (2009), “os maiores transtornos que ocorrem em estruturas são causados pela não consideração das deformações e dos deslocamentos corretos nas primeiras idades do concreto”.

Dentre as consequências de uma estimativa incorreta, temos:

Fissuração excessiva: O módulo de elasticidade do concreto obtido sendo inferior ao valor real, a estrutura será mais flexível que o previsto.

Deformações inadmissíveis: Flechas em vigas e lajes, quando acentuadas, implicam em deslocamentos excessivos que comprometem o estado limite de serviço da estrutura.

2.5. O Acelerômetro

O acelerômetro é um sensor eletromecânico projetado para medir a aceleração, que correspondente a taxa de variação da velocidade de um objeto em relação ao tempo. Em sua operação, o acelerômetro converte forças mecânicas, resultantes de movimentos translacionais, impactos, oscilações, vibrações ou da gravidade, em sinais elétricos que podem ser quantificados.

Em sua essência, o acelerômetro contém uma massa interna sensível ao movimento que está montada sob um sistema elástico. Dessa forma, quando o corpo onde está localizado o sensor acelera ou se movimenta, a inércia da massa interna gera um deslocamento que é convertido em sinal. Segundo Karanth e Shetty (2023), “o sensor obtém o valor da aceleração utilizando a Segunda Lei de Newton e detectando a força inercial do bloco de massa durante a operação de aceleração.” Dentre os principais tipos temos:

Piezoeletrônicos: utiliza cristais que, ao serem submetidos à deformação mecânica produzem carga elétrica.

Capacitivos: consiste em placas condutoras móveis, nas quais a capacitância muda com o deslocamento da massa interna.

MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems): são os sensores que utilizam tecnologias de micro fabricação para integrar componentes mecânicos e eletrônicos. Os MEMS estão presentes nos dispositivos móveis como smartphones, smartwatches, tablets, e foi o acelerômetro utilizado neste artigo.

Os sensores do MEMS presentes em smartphones tem a capacidade de medir acelerações em até três eixos (x, y e z), com taxas de amostragem que variam de acordo com o modelo e do aplicativo utilizado. Grouios *et al.* (2023) relatam que os dados de aceleração coletados por smartphone tem uma grande confiabilidade ao serem comparados com acelerômetros padrão-ouro, que são reconhecidos por sua alta precisão.

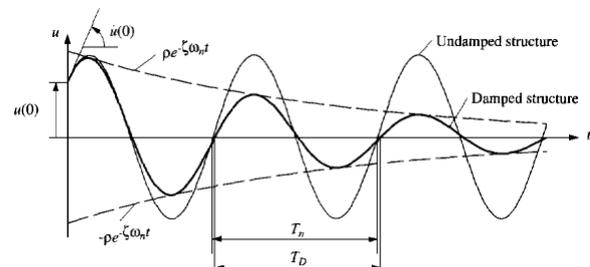
Ademais, “um acelerômetro de um smartphone pode registrar vibrações estruturais que podem ser utilizadas no monitoramento da saúde de sistemas estruturais (SHM - *Structural Health Monitoring*)” (Sarmadi *et al.*, 2023).

A disseminação de smartphones equipados com sensores MEMS tem aberto novas perspectivas para o monitoramento de estruturas de forma acessível e prática. Di Matteo *et al.* (2022), demonstraram que os dados provenientes da aceleração de um smartphone concordaram satisfatoriamente com os de um acelerômetro piezoeletrico na identificação das frequências naturais de pontes.

2.6. Vibração transversal

A vibração transversal refere-se ao movimento oscilatório de um elemento estrutural em uma direção perpendicular ao seu eixo longitudinal (Figura 4). Quando um elemento estrutural, como uma viga, é excitado por um impacto e deixado vibrar livremente, ele tenderá a oscilar em frequências específicas, conhecidas como frequências naturais de vibração, onde cada frequência está relacionada a um modo de vibração.

Figura 4 – Representação da curva da frequência natural sob efeitos de dissipação de energia



Fonte: Chopra (1995)

A frequência natural, identificada a partir da resposta à vibração transversal de elementos de concreto, constitui um dado experimental fundamental. Essa relação permite determinar o módulo de elasticidade se outras propriedades e a frequência forem conhecidas. Como exemplo, Lazzare e Cheung (2024) concluíram que, em estacas em concreto protendido é possível estimar o valor do módulo de elasticidade estático através da análise da vibração transversal e obtiveram valores de coeficiente de determinação de $R^2 = 0,8$.

Adicionalmente, outros fatores podem interferir na frequência natural, pois este é um parâmetro sensível às suas propriedades físicas, como massa e rigidez. Alterações na rigidez, causadas por danos ou variações no módulo de elasticidade, refletem-se em

mudanças na frequência natural do material (Karanth e Shetty, 2023).

Para se obterem os valores da frequência natural de um material analisado por um acelerômetro, a Transformada Rápida de Fourier (FFT) se apresenta como uma ferramenta computacional fundamental e amplamente empregada. A FFT é uma técnica matemática que permite converter uma função no domínio do tempo (por exemplo, os registros de aceleração) para o domínio da frequência, viabilizando a identificação dos picos que correspondem às frequências naturais.

É importante destacar que a FFT é um método otimizado para o cálculo da Transformada Discreta de Fourier (DFT). A DFT, por sua vez, é uma adaptação da Transformada de Fourier (FT) para a análise da sequência de dados discretos e de duração finita, dessa maneira, é a forma utilizada para sinais digitais provenientes de sensores e sistemas de aquisição de dados. A respeito a utilização da FFT, Gandelli *et al.* (2024) a utilizaram para processar os dados de aceleração proveniente da excitação de uma viga biapoiada protendida e obtiveram resultados conclusivos, onde o método mostrou-se eficaz ao permitir a obtenção de um espectro com um pico de frequência bem definido, possibilitando a identificação precisa da frequência natural fundamental do material.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Metodologia experimental

O elemento estrutural analisado neste artigo constitui-se em uma viga de concreto, armada internamente com uma treliça. Contudo, para a realização dos ensaios de vibração livre a viga foi disposta em uma configuração biapoiada, na qual está sob dois blocos de concreto estáveis, localizados próximos às extremidades da viga. Sobre cada bloco, foi disposta uma cantoneira metálica em formato triangular, com a sua aba horizontal trabalhando como uma superfície de contato direto (tipo faca) com a face inferior da viga. Nesse contexto, a cantoneira funciona como um provedor de uma superfície de contato mais regular com a viga, fornecendo mais estabilidade e regularidade, reduzindo conseqüentemente a geração de ruídos por atrito que podem ocorrer durante a oscilação da viga.

Para o cálculo de $E_{cd,vt}$ a partir da frequência natural de vibração, adota-se a formulação matemática cuja dedução foi apresentada por Takazono e Cheung (2018), conforme a aplicação por Lazzare e Cheung (2024) no seu estudo com estacas de concreto.

Dessa forma, a equação utilizada para o cálculo de $E_{cd,vt}$ é expresso pela eq. (1):

Equação 1 – Cálculo de $E_{cd,vt}$

$$E_{cd,vt} = \frac{f^2 \cdot W \cdot L^3}{2,4674 \cdot I \cdot g} \quad \text{eq. (1)}$$

Na qual:

f é a frequência natural (Hz)

W é o peso da viga (N)

L é o vão (m)

I é o momento de inércia (m^4)

g é a aceleração gravitacional ($9,81 \frac{m}{s^2}$)

3.2. Concepção da viga

A viga de concreto (Figura 5), armada internamente com uma estrutura de aço tipo treliça (Figura 6), foi concebida com um duplo objetivo: servir como corpo de prova para a determinação de seu módulo de elasticidade e , posteriormente, ser reutilizada. Com o intuito de aliar a pesquisa acadêmica à prática, a viga foi confeccionada em um ambiente real de construção, no canteiro de um edifício residencial localizado na cidade de Campo Grande - MS. Dessa forma, o elemento cumprirá seus objetivos inicialmente traçados, servir como corpo de prova para a investigação não destrutiva do módulo de elasticidade e , após a conclusão dos ensaios ser reaproveitada como verga ou contraverga no edifício.

O dimensionamento do corpo de prova levou em consideração os tamanhos necessários para servir ao edifício e as especificações técnicas do sensor a ser utilizado. O dispositivo empregado para a coleta dos dados de aceleração foi um smartphone da marca Apple, modelo iPhone 11 com uma frequência de amostragem máxima de 100 Hz.

De acordo com o teorema de amostragem de Nyquist, a frequência máxima de um sinal que pode ser medida com precisão é metade da frequência de amostragem, o que, nesse caso, corresponde a 50 Hz. Assim, para assegurar a validade das medições e evitar o erro de *aliasing* (subsamostragem), as dimensões da viga foram projetadas de modo que a sua frequência natural de vibração se situasse confortavelmente abaixo dos 50 Hz.

Em suma, na metodologia deste artigo, os dados de aceleração registrados pelo smartphone ao longo do tempo durante a vibração de uma viga de concreto armado biapoiada, serão exportados e processados.

Para converter esses dados do domínio do tempo para o domínio da frequência, será aplicada a FFT, no qual, o espectro da frequência resultante permitirá a identificação da frequência natural fundamental da viga, que se manifestará como um pico de amplitude significativa, conforme a metodologia utilizada em estudos de vibração estrutural.

Dados do corpo de prova:

$$b_{\text{médio}} = 18,67 \text{ cm}$$

$$h_{\text{médio}} = 10,25 \text{ cm}$$

$$l_{\text{total}} = 240 \text{ cm}$$

Figura 5 – Corpo de prova



Fonte: Autor

Figura 6 – Armadura



Fonte: Autor

3.3. Procedimentos experimentais

O princípio experimental deste artigo baseia-se na comparação entre um método não destrutivo e um ensaio de caracterização de material padronizado com o objetivo de avaliar a evolução do módulo de elasticidade do concreto ao longo do tempo, nas idades de 3, 7, 14 e 28 dias.

3.3.1. Ensaio dinâmico não destrutivo ($E_{cd,vt}$)

Para a obtenção do módulo de elasticidade dinâmico transversal ($E_{cd,vt}$), o smartphone foi posicionado sobre o eixo longitudinal da viga, exatamente no meio do seu vão, pois dessa forma é possível captar a máxima amplitude da vibração transversal.

A fim de induzir a vibração, aplicou-se manualmente um deslocamento inicial na viga, pressionando-a para baixo e liberando-a em seguida, de modo que a oscilasse livremente. Os dados de aceleração resultantes da vibração transversal foram coletados com o auxílio do aplicativo Phybbox, nas idades de 3, 7, 14 e 28 dias. Esse ensaio foi realizado com duas repetições, sendo utilizado os dados que resultaram o melhor espectro de frequência (menor interferência de ruídos).

3.3.2. Ensaio estático de referência (E_{ce})

O módulo de elasticidade estático (E_{ce}), valor a ser comparado, foi determinado experimentalmente seguindo o procedimento prescrito pela norma ABNT NBR 8522 – 1 (ABNT, 2021).

Esse ensaio padrão consiste na aplicação de um carregamento de compressão uniaxial em corpos de prova cilíndricos em uma prensa universal, moldados com o mesmo concreto utilizado na viga. Durante o ensaio, as deformações longitudinais são medidas diretamente no corpo de prova por meio de um compressômetro independente, conforme ilustrado na Figura 7.

Figura 7 – Corpo de prova cilíndrico em compressômetro independente



Fonte: Autor

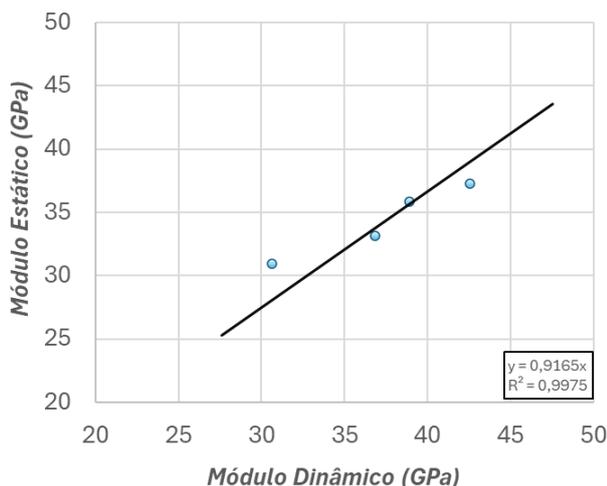
contexto, é plausível dizer que a resposta vibracional à flexão influenciada pela armadura treliçada e pelo comportamento do concreto na zona tracionada, pode apresentar um desvio no valor da rigidez medida sob compressão pura em um corpo de prova.

Portanto, a principal conclusão a ser extraída não é que o ensaio na viga é impreciso, mas que ele mede uma propriedade de rigidez específica que não é numericamente idêntica à compressão estática. Diante disso, torna-se relevante investigar a existência de uma correlação estatística entre os dois valores de E_{ce} e $E_{cd,vt}$. Se uma correlação consistente for estabelecida, é possível desenvolver um modelo de regressão que relacione matematicamente essas duas grandezas.

4.5. Análise da Correlação entre os Módulos de Elasticidade.

A avaliação quantitativa da correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico ($E_{cd,vt}$), obtido por meio da técnica da vibração, e o módulo estático de referência (E_{ce}), foi realizada por meio de uma regressão linear. Os pares de resultados obtidos para cada idade foram plotados em um gráfico de dispersão (Figura 9). Esta abordagem gráfica permite uma análise visual da tendência, da linearidade e da consistência da relação entre as duas variáveis, o que serve como base para a subsequente análise estatística.

Figura 9 – Valores de módulo de elasticidade estático x módulo dinâmico.



Fonte: Autor

A análise de regressão linear dos dados experimentais, ilustrada na Figura 9, evidencia uma acentuada associação linear positiva entre os módulos. O ajuste de uma linha de tendência aos pontos resultou em um coeficiente de determinação (R^2) de 0,997. Este valor, por estar próximo de 1,0,

indica um alto grau de previsibilidade entre os dois métodos, sugerindo que 99,75% da variabilidade do módulo estático pode ser estatisticamente explicada pela variância do módulo dinâmico.

Ademais, a regressão linear dos dados experimentais forneceu a seguinte equação:

$$E_{ce} \text{ (GPa)} = 0,9165 \cdot E_{cd,vt} \text{ (GPa)} \quad \text{eq. (2)}$$

Esta equação permite estimar o módulo de elasticidade estático a partir do valor do módulo dinâmico de forma expedita.

5. CONCLUSÕES

Este artigo investigou a viabilidade de uma metodologia não destrutiva para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico em vigas de concreto armado. O objetivo principal foi validar uma técnica prática por meio da comparação com o módulo de elasticidade estático, obtido via ensaios laboratoriais padronizados.

A abordagem experimental demonstrou ser eficaz, permitindo o acompanhamento da rigidez do concreto nas idades de 3, 7, 14 e 28 dias. Entretanto, embora tenha se observado um aumento progressivo em ambos os módulos com o tempo, os resultados apontaram uma divergência na magnitude absoluta entre as duas medidas, com o módulo dinâmico apresentando-se inferior ao estático na maioria das idades. Conclui-se que essa diferença se deve, principalmente, à divergência entre os métodos de ensaios empregados, a vibração de flexão para o método dinâmico e a compressão axial para o estático.

Um fato apresentado por esse estudo foi a forte correlação estatística entre as duas metodologias. A análise de regressão linear resultou em um coeficiente de determinação (R^2) de 0,997, indicando uma robusta associação linear com uma alta previsibilidade entre os módulos. Sendo assim, os resultados validam a técnica com smartphone como uma ferramenta consistente e confiável para a caracterização da rigidez do concreto. Adicionalmente, foi estabelecida uma equação de calibração empírica que permite estimar o módulo estático a partir do valor dinâmico medido.

Portanto, o objetivo do estudo foi atingido ao demonstrar que a análise de vibração com smartphones constitui uma alternativa promissora para a avaliação expedita das propriedades do concreto, com notável potencial para aplicações em

controle de qualidade no canteiro de obras. Reconhece-se, contudo, as limitações do estudo, como o emprego de um único corpo de prova. Dessa forma, sugere-se para trabalhos futuros, a ampliação da amostragem aliada à análise de diferentes traços de concreto e a comparação com ensaios estáticos de flexão, a fim de eliminar a variável do tipo de solicitação.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522-1: Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação - Parte 1: Módulos estáticos à compressão**. Rio de Janeiro, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522-2: Concreto endurecido – Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação – Parte 2: Módulo de elasticidade dinâmico pelo método das frequências naturais de vibração**. Rio de Janeiro, 2021.
- BEER, F. P.; JOHNSTON, E. R.; DEWOLF, J. T.; MAZUREK, D. F. **Resistência dos materiais**. 8. ed. Porto Alegre: AMGH Editora, 2021.
- CHOPRA, A. K. **Dynamics of structures**. 1. ed. Prentice Hall, 1995.
- DI MATTEO, A.; FIANDACA, D.; PIRROTTA, A. Smartphone-based bridge monitoring through vehicle-bridge interaction: analysis and experimental assessment. **Journal of Civil Structural Health Monitoring**, v. 12, p. 1329-1342, 2022.
- GANDELLI, E.; ROSSINI, G.; MANTELLI, S. G.; MINELLI, F. Damage detection of prestressed concrete beams affected by shear and flexure cracks through vibration monitoring. **Engineering Structures**, v. 304, p. 117572, 2024.
- GROUIOS, G.; ZIAGKAS, E.; LOUKOVITIS, A.; CHATZINIKOLAOU, K.; KOIDOU, E. Accelerometers in Our Pocket: Does Smartphone Accelerometer Technology Provide Accurate Data?. **Sensors**, v. 23, n. 1, p. 192, 2023.
- KALRA, M.; MEHMOOD, G. A Review paper on the Effect of different types of coarse aggregate on Concrete. In: **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 431, n. 7, p. 072018, 2018.
- KARANTH, P.; SHETTY, V. Free vibration analysis of reinforced concrete beam using sensor. **Materials Today: Proceedings**, v. 88, p. 35-39, 2023.
- LAZZARE, L. F.; CHEUNG, A. B. Avaliação do módulo de elasticidade de estacas de concreto utilizando a técnica de vibração transversal por meio de Smartphones. **Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil)**, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2024.
- LEAL, C. E. F.; PARSEKIAN, G. A.; FERREIRA, F. G. S.; CHRISTOFORO, A. L. Comparação entre módulos de deformação de concretos nacionais produzidos com agregados graúdos de diferentes origens mineralógicas. **Revista Matéria**, v. 25, n. 4, 2020.
- MELO NETO, A. A. de; HELENE, P. R. L. **Módulo de Elasticidade: Dosagem e Avaliação de Modelos de Previsão do Módulo de Elasticidade de Concretos**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 44., 2002, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: IBRACON, 2002.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.
- ROSSI, A.; BOCCHETTA, G.; BOTTA, F.; SCORZA, A. Accuracy Characterization of a MEMS Accelerometer for Vibration Monitoring in a Rotating Framework. **Applied Sciences**, v. 13, n. 8, p. 5070, 2023.
- SARMADI, H.; ENTEZAMI, A.; YUEN, K. V.; BEHKAMAL, B. Review on smartphone sensing technology for structural health monitoring. **Measurement**, v. 223, p. 113716, 2023.
- TAKAZONO, J. G.; CHEUNG, A. B. Utilização de Smartphone para Classificação Mecânica do Pinus pelo Método de vibração Transversal. In: **XVI Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira (EBRAMEM)**. São Carlos, SP, 2018.
- VASCONCELOS, A. C.; GIAMMUSO, S. E. **O misterioso módulo de elasticidade**. TQS Docs, fev. 2009.