

Comparação entre as técnicas de ultrassom e de excitação por impulso para determinação do módulo de elasticidade dinâmico do concreto

JOÃO VICTOR ROSA CRUZ - MESTRANDO - <https://orcid.org/0009-0002-1994-1903> (joaovrcruz@usp.br);

LARA GUIZI ANONI - DOUTORANDA - <https://orcid.org/0000-0001-5116-1507>;

LUANA MORAIS TEODORO - MESTRANDA - <https://orcid.org/0009-0001-0104-8087>;

PAULO MENDONÇA DE JESUS CUNHA - MESTRANDO - <https://orcid.org/0009-0004-6010-5899>;

GUSTAVO LOPES DA ROCHA - DOUTORANDO - <https://orcid.org/0000-0002-2413-0892>;

VLADIMIR GUILHERME HAACH - PROFESSOR - <https://orcid.org/0000-0002-9501-4450> – USP

RESUMO

ESTE TRABALHO EXPLORA A DIFERENÇA ENTRE AS TÉCNICAS DE ULTRASSOM E DE EXCITAÇÃO POR IMPULSO (MÉTODO DAS FREQUÊNCIAS NATURAIS) NA DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO DE AMOSTRAS DE CONCRETO. O ESTUDO FOI FUNDAMENTADO NA CONFEÇÃO DE SEIS TRAÇOS DIFERENTES DE CONCRETO, QUE FORAM SUBMETIDOS AOS ENSAIOS DINÂMICOS. OS PRINCIPAIS RESULTADOS DESTES ESTUDOS INDICAM QUE OS VALORES OBTIDOS PARA O MÓDULO PELO MÉTODO DA VELOCIDADE DO PULSO ULTRASSÔNICO (VPU) SÃO SIGNIFICATIVAMENTE SUPERIORES AOS OBSERVADOS PELA TÉCNICA DE EXCITAÇÃO POR IMPULSO (TEI), EXCETO PARA AS AMOSTRAS REFORÇADAS COM FIBRAS, NAS QUAIS FOI OBSERVADA UMA REDUÇÃO SIGNIFICATIVA NA VELOCIDADE DO PULSO ULTRASSÔNICO. ENSAIOS ESTÁTICOS TAMBÉM FORAM REALIZADOS OBJETIVANDO A OBTENÇÃO DO MÓDULO TANGENTE ESTÁTICO PARA FINS COMPARATIVOS. POR FIM, O TRABALHO APRESENTA A VALIDAÇÃO DE EQUAÇÕES DA LITERATURA QUE ESTIMAM O MÓDULO DINÂMICO A PARTIR DO ESTÁTICO, E REITERA QUE ESTE ÚLTIMO É CONSISTENTEMENTE MENOR QUE O DINÂMICO.

PALAVRAS-CHAVE: MÓDULO ELÁSTICO DINÂMICO, CONCRETO, VPU, ULTRASSOM, FREQUÊNCIAS NATURAIS.

1. INTRODUÇÃO

A capacidade de um sistema estrutural suportar carregamentos é fundamental para garantir seu desempenho. No caso de estruturas de concreto armado, essa capacidade é determinada durante a caracterização do material e monitorada por meio

de ensaios mecânicos. Em situações de carregamento, a tensão está diretamente associada à deformação por meio do módulo de elasticidade.

A depender do método de caracterização utilizado, o módulo de elasticidade pode ser classificado entre estático, determinado com o ensaio mecânico de aplicação de tensão associada a um deslocamento medido no corpo de prova, ou dinâmico, obtido indiretamente a partir de correlações entre ensaios não destrutivos e parâmetros do material (Thomaz, Miyaji e Possan, 2021). A obtenção do módulo dinâmico, devido às técnicas aplicadas, é significativamente mais rápida e facilitada, com procedimentos já padronizados nacionalmente, como apresenta a ABNT NBR 8522-2 (2021), e procedimentos consagrados na literatura, utilizados por Karaiskos *et al.* (2015). No entanto, de acordo com as particularidades de cada técnica para a obtenção do módulo de elasticidade dinâmico, os resultados podem sofrer variações significativas.

Ademais, a relação entre o módulo dinâmico e estático também é de grande interesse, visto que esse último é utilizado como parâmetro principal de cálculo nos projetos. Dessa forma, se fazem necessários estudos para o estabelecimento de correlações adequadas, com investigação de parâmetros de variação que permitam a validação das equações utilizadas com maior precisão.

Diante deste cenário, duas técnicas são aplicadas neste estudo para determinação do módulo dinâmico do concreto: o método da Velocidade do Pulso Ultrassônico (VPU) e a Técnica de Excitação por Impulso (TEI). Os resultados de ambos os métodos em diferentes composições de concreto foram analisados comparativamente, a fim de observar a influência dos fenômenos envolvidos na realização de cada técnica. Espera-se que este trabalho contribua para maior entendimento das particularidades de cada uma das técnicas e auxilie na escolha do melhor método de ensaio de acordo às especificidades do concreto a ser estudado.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA: MÓDULO DE ELASTICIDADE

Segundo Mehta e Monteiro (2014), devido à não linearidade da curva tensão-deformação do concreto, o módulo pode ser calculado por três métodos: tangente, secante e cordal. Representando aproximadamente o módulo tangente inicial, o módulo dinâmico é de 20% a 40% maior que o estático (Mehta e Monteiro, 2014). Essa diferença ocorre, pois o concreto apresenta maior resistência em altas velocidades de carregamento, como no ensaio dinâmico, ao contrário do ensaio estático, realizado com velocidades menores.

A ABNT NBR 8522-1 (2021) apresenta uma equação que permite correlacionar o módulo estático ao dinâmico (Equação 1).

Da mesma forma, alguns trabalhos da literatura buscaram correlacionar esses dois módulos com equacionamentos mais robustos, como, por exemplo, a Equação 2, proposta por Carrazedo *et al.* (2018). Nessas equações, E_{Static} é o módulo tangente (GPa), E_{Dyn} é o módulo dinâmico (GPa) e ρ é a massa específica aparente do concreto (g/cm^3).

$$[1] \quad E_{Static} = \frac{0,4275 E_{Dyn}^{1,4}}{\rho}$$

$$[2] \quad E_{Dyn} = 12,304 + 0,813 E_{Static}$$

A obtenção do módulo dinâmico se dá por meio de ensaios não destrutivos, sendo entre os mais comuns o da VPU, preconizado pela ABNT NBR 8802 (2019), e o da TEI, descrito na ABNT NBR 8522-2 (2021). A seguir, uma breve discussão sobre a teoria dos métodos é apresentada.

2.1 Determinação do módulo dinâmico – VPU

No âmbito da engenharia civil, a aplicação de testes ultrassônicos é comumente centrada na avaliação da homogeneidade e detecção de falhas internas em estruturas. Contudo, sua utilização pode ser extrapolada para caracterização das propriedades elásticas de um material. O ensaio de ultrassom baseia-se na análise das variações nas velocidades de propagação de uma onda mecânica em um determinado meio.

A Equação 3 apresenta a formulação que correlaciona a velocidade de propagação de uma onda longitudinal (V_L) ao módulo dinâmico longitudinal (E_{Dyn}), ao coeficiente de Poisson (μ) e a massa específica do material (ρ_0).

$$[3] \quad V_L = \sqrt{\frac{E_{Dyn} \cdot (1 - \mu)}{\rho_0 \cdot (1 + \mu) \cdot (1 - 2\mu)}}$$

2.2 Determinação do módulo dinâmico – TEI

O ensaio pelo método da TEI consiste em perturbar o corpo de prova com um impulso manual ou mecânico. Esta ação promove vibrações longitudinais ou flexionais (para amostras cilíndricas), como pode ser visto na Figura 1. Nesse sentido,

a amplitude do sinal varia com o tempo, até o momento em que esta solicitação é amortecida. O sinal no domínio do tempo é capturado por meio de um microfone e é convertido para o espectro da frequência por meio da Transformada de Fourier, onde torna-se possível observar as frequências dos modos de vibração.

Segundo a ABNT NBR 8522-2 (2021), o módulo de elasticidade dinâmico de amostras com geometria cilíndrica relaciona-se com a frequência flexional obedecendo a Equação 4.

$$[4] \quad E_{Dyn} = 1,6067 \cdot \frac{h^3 \cdot m \cdot f_f^2}{d^4} \cdot T \cdot 10^{-9}$$

Onde E_{Dyn} (GPa) é o módulo de elasticidade dinâmico medido no ensaio da TEI flexional, h é a altura do corpo de prova (mm), d é o diâmetro do corpo de prova (mm), m é a massa do corpo de prova (g), f_f é a frequência de ressonância flexional (Hz) e T é o fator de correção para o modo de vibração flexional, que varia em função da razão h/d . Para este último parâmetro, a norma apresenta uma tabela de valores.

3. TRAÇOS DE CONCRETO

Para diversificar a comparação entre os módulos dinâmicos obtidos pelos métodos VPU e TEI, foram utilizados traços de concretos não convencionais, incluindo quatro misturas ecoeficientes e duas de alto desempenho com fibras. As misturas ecoeficientes substituem 10%, 20% ou 30% do volume de cimento por adições minerais: sílica ativa (SA), metacaulim (MC), ou combinações entre ambos e com fíler calcário (SAMC e SAMCFC). Os traços com fibras (F1 e F2) incorporam fibras de aço (13 mm de comprimento, 0,2 mm de diâmetro) em 1,5% do volume de cimento, com fibras de polipropileno em 0,4% no F1 e 0,6% no F2.

Utilizou-se o cimento CPV ARI, agregados locais (areia natural de quartzo e brita basáltica de 9,5 mm)

e adições minerais com massa específica de 2,2 g/cm^3 a 2,7 g/cm^3 e partículas entre 1,4 μm e 15,9 μm . Utilizou-se também aditivo superplastificante (SP) à base de policarboxilatos e água da rede local.

4. MÉTODOS

Os métodos para determinar o módulo dinâmico pelos métodos da VPU e da TEI foram aplicados nos corpos de prova antes do ensaio para o módulo estático. Este último foi realizado em uma prensa hidráulica, utilizando extensômetros para medir as deformações.

Os corpos de prova (cilindros de 5 x 10 cm^3) tiveram massa e medidas aferidas previamente e foram ensaiados nas mesmas condições de idade, temperatura e saturação de superfície seca, conforme a ABNT NBR 8522-2 (2021). Para comparação das médias, utilizou-se o teste t de Student com nível de confiança p de 0,05.

4.1 Módulo dinâmico - VPU

O método da VPU foi realizado por meio da técnica de transmissão direta através do equipamento Pundit Lab+ da Proceq®. Utilizou-se gel acoplante para promover uma distribuição adequada das ondas. A Figura 2a apresenta o esquema do ensaio.

A frequência de propagação das ondas longitudinais adotada foi de 250 kHz. O tempo de propagação da onda do transdutor emissor ao receptor é obtido con-

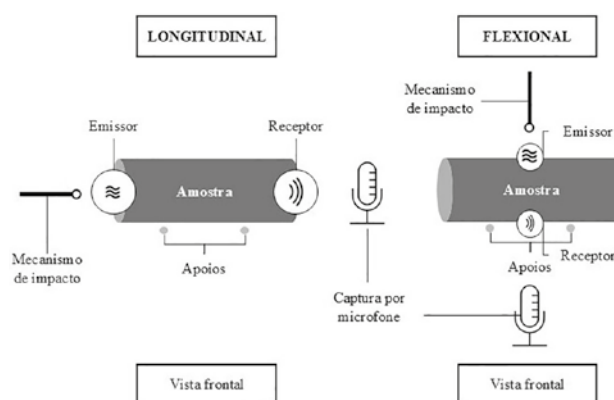


FIGURA 1
MODOS DE APLICAÇÃO DE IMPACTO NO ENSAIO DINÂMICO POR MEIO DA TEI

FONTE: AUTORES (2024)

TABELA 1

TRAÇOS UNITÁRIOS EM MASSA

Traço	c (kg/m ³)	Cim.	SA	MC	FC	PQ	Areia	Brita	Água	SP
SA	393	1	0,084	—	—	—	2,491	2,201	0,445	0,007
MC	394	1	—	0,102	—	—	2,500	2,195	0,444	0,007
SA-MC	338	1	0,095	0,115	—	—	2,805	2,479	0,509	0,011
SA-MC-FC	308	1	0,107	0,133	0,127	—	3,201	2,831	0,571	0,013
F1 e F2	757,2	1	0,25	v	—	0,5	1,1	—	0,21	0,09

C = CONSUMO DE CIMENTO; PQ = PÓ DE QUARTZO.

forme Figura 2b. Conhecido o tempo de propagação Δt e a distância entre os transdutores ΔS , a velocidade do pulso ultrassônico é calculada através da Equação 5. Com base nos valores das velocidades das ondas longitudinais, densidade do concreto e do coeficiente de Poisson (0,25), calcula-se o módulo dinâmico de acordo com a Equação 3.

$$[5] \quad v = \frac{\Delta S}{\Delta t}$$

4.2 Módulo dinâmico – TEI

Os diferentes traços de concreto utilizados neste trabalho foram testados um a um por meio da TEI com o sistema Sonelastic®. A configuração do ensaio foi feita conforme a Figura 3a, sendo as amostras apoiadas sobre fios de aço a 0,224 h de suas extremidades. Com o sinal obtido no domínio da frequência, obtém-se a frequência flexional (Figura 3b). Por fim, o módulo de elasticidade é calculado para cada um dos traços de concreto de acordo com a Equação 4.

5. RESULTADOS

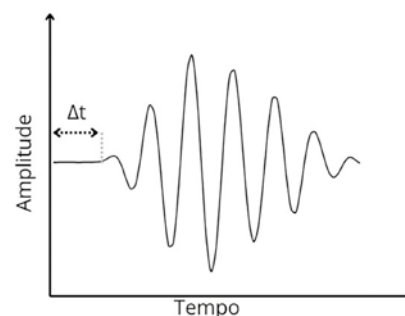
Abaixo são apresentados os resultados de módulos dinâmicos obtidos por meio do ensaio de VPU e TEI, além dos módulos estáticos.

5.1 Comparação entre os resultados: VPU e TEI

Os resultados obtidos para cada um dos 4 CPs de cada traço são apresentados na Figura 4a. Apesar de serem métodos de ensaio com velocidades de carregamento semelhantes, ou seja, ambos ob-

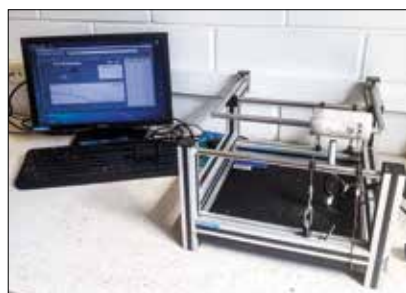
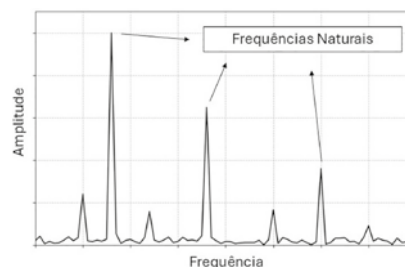
têm informações do concreto a partir de perturbações de alta velocidade, observa-se uma diferença nos resultados do módulo dinâmico obtido por meio da VPU e da

TEI. A configuração apresentada na Figura 4a facilita a visualização dessas diferenças. Para comparar as médias entre todos os traços, foi aplicado o teste t de Student.

**A****B****FIGURA 2**

ENSAIO VPU (A), E OBTENÇÃO DO TEMPO DE CHEGADA DA ONDA ULTRASSÔNICA (B)

FONTE: AUTORES (2024)

**A****B****FIGURA 3**

TEI (A) E FREQUÊNCIAS NATURAIS OBTIDAS NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA (B)

FONTE: AUTORES (2024)

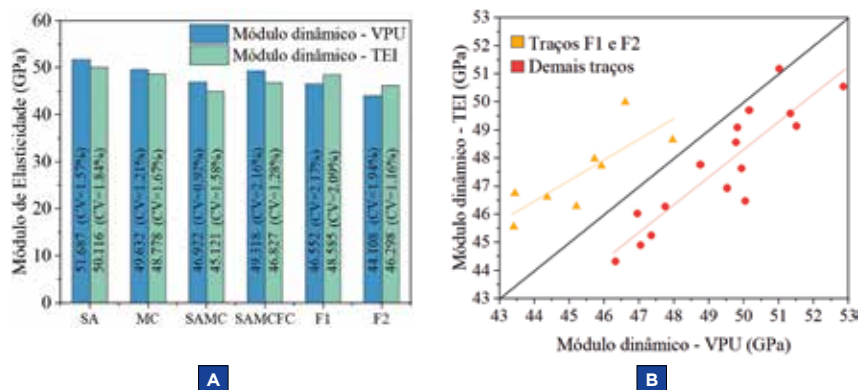


FIGURA 4
RESULTADOS DE MÓDULO DINÂMICO OBTIDOS POR MEIO DA VPU E DA TEI

FONTE: AUTORES (2024)

Os resultados indicaram uma diferença significativa entre todas as médias dos módulos obtidos pelos dois métodos ($t > t_{crit}$).

Nos traços SA, MC, SAMC e SAMCFC, o módulo dinâmico obtido pela VPU é significativamente maior do que o obtido pela TEI. Já, nos traços F1 e F2, o módulo dinâmico medido pela TEI é significativamente maior do que o obtido pela VPU. A Figura 4b apresenta os resultados para todos os corpos de prova ensaiados, destacando o padrão distinto observado em F1 e F2 em relação aos demais traços.

A diferença no módulo dinâmico obtido pela VPU em relação à TEI para os concretos sem fibra pode ser explicada pela natureza dos ensaios. O método VPU avalia as propriedades de propagação da onda em uma linha reta entre os transdutores, o que faz com que a velocidade calculada reflita as características da linha central do corpo de prova, uma região geralmente mais bem adensada e menos heterogênea. Por outro lado, a TEI mede a frequência de vibração de todo o corpo de prova, resultando em propriedades que representam uma média de diferentes regiões do material, devido à sua natureza heterogênea. Assim, o módulo de elasticidade obtido pela TEI tende a ser menor do que o medido pela propagação da onda na linha central do corpo de prova.

Outro fator relevante é o uso de gel acoplador nos ensaios de VPU, o que contribui para a amplificação da velocidade do pulso ultrassônico. Caso o

ensaio fosse realizado com transdutores pontuais, que dispensam o uso de gel, os resultados poderiam ser mais baixos.

A observação de que o módulo dinâmico medido pela TEI foi maior do que pela VPU em concretos com fibras levantou a hipótese de que a presença de fibras reduz a velocidade de propagação do pulso ultrassônico. Dal Bosco, Lorenzi e Silva Filho (2020) verificaram que a velocidade da onda diminuiu em concretos com fibras de polipropileno, mas aumenta em concretos com fibras de aço quando a adição de fibras não ultrapassa 1%. Já no trabalho de Silva e Bonfim (2019), a velocidade reduziu tanto em concretos com fibras de polipropileno quanto de aço.

Embora a velocidade de propagação

ultrassônica no aço seja maior do que no concreto, o que teoricamente aumentaria a velocidade global, acredita-se que a disposição aleatória das fibras na mistura tenha gerado reflexões e dispersão excessivas da onda. Isso pode ter reduzido a amplitude da onda que se propaga em linha reta entre os transdutores, dificultando sua captura no sinal e aumentando o tempo de chegada, conforme ilustrado na Figura 2b.

5.2 Comparação entre resultados de módulo dinâmico e estático

O comparativo dos resultados de módulo dinâmico obtidos por meio da VPU e da TEI com o módulo estático dos concretos é apresentado na Figura 5. Os valores de módulo dinâmico são superiores aos do módulo estático, conforme esperado teoricamente. Em média, os valores de módulo dinâmico obtidos pela VPU são 10% maiores que os do módulo estático, enquanto os valores obtidos pela TEI são, em média, 8% superiores ao módulo estático. Dado que já foi observada uma diferença significativa entre os traços com e sem fibras, é pertinente verificar essa relação de forma separada.

Nos traços de concreto sem fibra, os valores de módulo dinâmico obtidos pela VPU são, em média, 7,7% maiores que os valores do módulo estático, enquanto os obtidos pela TEI são, em média, 4% superiores ao módulo estático. Para os concretos com fibras (F1 e F2), os módulos

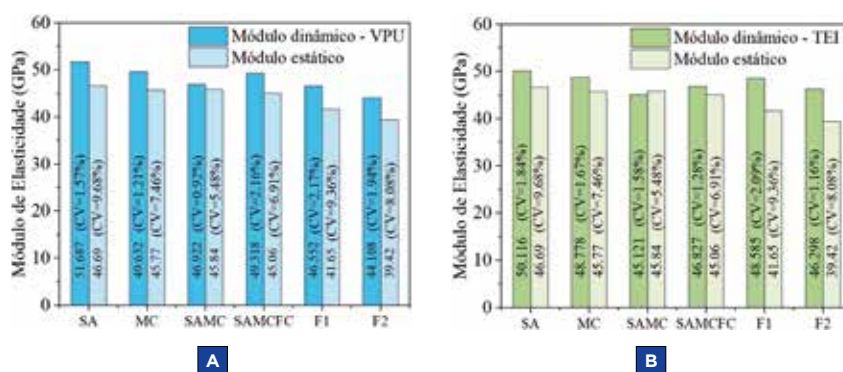


FIGURA 5
RESULTADOS DE MÓDULO DINÂMICO OBTIDOS POR MEIO DA VPU (A) E DA TEI (B) COMPARADOS AO MÓDULO ESTÁTICO

FONTE: AUTORES (2024)

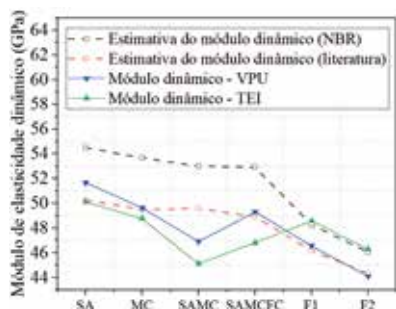


FIGURA 6

ESTIMATIVA DE MÓDULO DINÂMICO POR MEIO DE EQUAÇÕES DA NORMA BRASILEIRA E DA LITERATURA EM COMPARAÇÃO AOS MÓDULOS OBTIDOS POR MEIO DA VPU E TEI

FONTE: AUTORES (2024)

dinâmicos medidos pela VPU foram aproximadamente 11,5% maiores que os estáticos, e os obtidos pela TEI foram mais de 17% superiores ao módulo estático. Esses resultados mostram a variabilidade da correlação entre os módulos estático e dinâmico, que pode ser influenciada tanto pela metodologia de ensaio quanto pela composição do traço.

Apesar dessa variabilidade, ao estimar os valores de módulos dinâmicos a partir dos módulos estáticos utilizando a equação proposta pela norma brasileira (Equação 1) e pela literatura (Equação 2), verifica-se que os valores calculados pela equação da literatura são próximos aos obtidos pelo método da VPU, com a maior diferença sendo de 5,35%

(Figura 6). Por outro lado, a estimativa de módulo dinâmico pela norma brasileira apresentou valores consistentemente superestimados, com diferenças que chegaram a quase 15% em relação aos resultados da TEI.

Destaca-se que, apesar das diferenças observadas entre os módulos para traços com e sem fibras, os maiores erros percentuais entre os valores estimados e os medidos não ocorreram em F1 e F2. Pelo contrário, observa-se grande proximidade entre os resultados obtidos de módulo dinâmico pela TEI e a estimativa da norma brasileira e entre os resultados obtidos pela VPU e a estimativa pela equação proposta por Carrazedo *et al.* (2018).

6. CONCLUSÕES

As principais conclusões obtidas com o desenvolvimento deste trabalho foram:

- ▶ O módulo dinâmico obtido pela VPU foi superior, possivelmente devido à diferença na forma como cada técnica avalia o material: a VPU considera a propagação da onda em uma linha central, enquanto a TEI mede a vibração global, resultando em um módulo médio geralmente menor;
- ▶ Nos concretos com fibras de aço e polipropileno, os módulos obtidos pela TEI foram maiores, sugerindo que as fibras, especialmente as de polipropileno, podem reduzir a velocidade da onda ultrassônica. A disposição aleatória das fibras pode

causar reflexões e dispersões, aumentando o tempo de chegada e influenciando os resultados da VPU;

- ▶ Os valores de módulo dinâmico foram significativamente maiores que os estáticos, com até 17% de diferença para os concretos com fibras;
- ▶ As equações da literatura para a estimativa do módulo dinâmico a partir do estático foram mais precisas que as da norma, especialmente quando comparando os resultados da técnica da VPU.

Recomenda-se, para estudos futuros, investigar o impacto do acoplamento dos transdutores nos ensaios de VPU, dada sua influência nos resultados. Também seria relevante analisar como a vibração global medida pela TEI afeta estruturas maiores, como vigas e pilares, especialmente em geometrias complexas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro fornecido pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processo nº 2023/17255-3, pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e pelo CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - 303002/2021-2). As opiniões, hipóteses e conclusões ou recomendações expressas neste material são de responsabilidade dos autores e não necessariamente refletem a visão da FAPESP, CAPES ou CNPq. ©

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CARRAZEDO, R.; HAACH, V. G.; MONFRINATO, E. F.; PERISSIN, D. A. M.; CHAIM, J. P. Mechanical Characterization of Concrete by Impact Acoustics Tests. *Journal Of Materials In Civil Engineering*, v. 30, n. 4, abr. 2018. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002231](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002231).
- [2] DAL BOSCO, V. I.; LORENZI, A.; SILVA FILHO, L. C. P. Análise Comparativa Entre Concreto Convencional E Reforçado Com Fibras Através De Ensaio Ultrassônicos. *Congresso Brasileiro de Patologia das Construções*, [S.L.], p. 121-129, 2020. Associação Brasileira de Patologia das Construções. <http://dx.doi.org/10.4322/cbpat.2020.012>.
- [3] KARAIKOS, G. *et al.* Monitoring of concrete structures using the ultrasonic pulse velocity method. *Smart Materials and Structures*, v. 24, n. 11, p. 113001, 2015.
- [4] MEHTA, P.; MONTEIRO, P. *Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais*. 2014. 978-85-98576-21-3.
- [5] NEVILLE, A. M. *Properties of Concrete*. 5th ed. Harlow: Pearson Education Limited, 2011. ISBN 978-0-273-75580-7.
- [6] SILVA, R. R. C.; BONFIM, L. H. S. Análise Do Comportamento Mecânico De Concreto Com Diferentes Tipos De Adição De Fibras Através Da Propagação De Onda De Ultrassom. *Exatas & Engenharia*, [S.L.], v. 9, n. 25, 13 set. 2019. Institutos Superiores de Ensino do Censa. <http://dx.doi.org/10.25242/885x92520191748>.
- [7] THOMAZ, W. de A.; MIYAJI, D. Y.; POSSAN, E. Comparative study of dynamic and static Young's modulus of concrete containing basaltic aggregates. *Case Studies in Construction Materials*, v. 15, e00645, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00645>.