



Aplicações avançadas do método das frequências naturais de vibração: Determinação do módulo de cisalhamento e coeficiente de Poisson dinâmicos em concretos de cimento Portland.

Advanced applications of the natural frequencies of vibration method: Determination of dynamic shear modulus and Poisson's ratio in Portland cement concrete.

Alessandra Lorenzetti de Castro (1); Henrique Alves (2); Paulo Helene (3); Pedro Bilesky (4); Ricardo Carrazedo (5); Rubens Curti (6)

(1) Professora Doutora do Departamento de Engenharia de Estruturas, EESC/USP; (2) Doutor, ATPCP Engenharia Física; (3) Professor Titular EPUSP, PhD Engenharia; (4) Mestre em Habitação; (5) Professor Associado do Departamento de Engenharia de Estruturas, EESC/USP; (6) Engenheiro Civil, ABCP.

Resumo

A norma ABNT NBR 8522 (2021) – Parte 2, recém aprovada, está limitada ao estabelecimento do método de ensaio para determinação do módulo de elasticidade dinâmico do concreto endurecido. Sabe-se, entretanto, que o método das frequências naturais de vibração também pode ser aplicado para a determinação do módulo de cisalhamento e do coeficiente de Poisson dinâmicos em corpos de prova prismáticos, que também são grandezas importantes utilizadas no dimensionamento de estruturas de concreto, especialmente para a verificação dos Estados Limites de Serviço. Assim, neste trabalho, são apresentados os resultados de ensaios de caracterização do módulo de elasticidade, do módulo de cisalhamento e do coeficiente de Poisson dinâmicos do concreto, bem como suas incertezas. Os ensaios foram realizados em corpos de prova prismáticos, com dimensões de 10 cm x 10 cm x 40 cm, moldados com um concreto conhecido. Os resultados obtidos a partir do ensaio dinâmico permitem afirmar que o método das frequências naturais de vibração também possibilita a determinação destas duas grandezas elásticas do concreto – módulo de cisalhamento e coeficiente de Poisson dinâmicos – com praticidade, rapidez, economia e baixa incerteza. Dessa forma, estudos visando a incorporação deste procedimento ao texto normativo, em sua próxima (futura) revisão, encontram-se em andamento.

Palavra-Chave: Coeficiente de Poisson, módulo de cisalhamento, módulo de elasticidade, módulo dinâmico, frequências naturais de vibração.

Abstract

The newly approved ABNT NBR 8522 (2021), Part 2, standard is limited to establishing the test method for determining the dynamic modulus of elasticity of hardened concrete. It is known, however, that the natural frequencies of vibration method may also be applied to determine the dynamic shear modulus and Poisson's coefficient in prismatic specimens, which are also important quantities used in the design of concrete structures, especially for the verification of Service Limit States. Thus, in this paper, the results of tests to characterize the dynamic modulus of elasticity, the shear modulus and the Poisson's coefficient are presented, as well as their uncertainties. The tests were carried out on prismatic specimens, with dimensions of 10 cm x 10 cm x 40 cm, cast with a known concrete mixture. The results obtained from the dynamic test allow to state that the natural frequencies of vibration method also enable the determination of the concrete dynamic shear modulus and Poisson's coefficient with practicality, speed, economy and low uncertainty. Thus, studies aiming at incorporating this procedure into the standard text, in its next (future) revision, are in progress.

Keyword: Poisson coefficient, shear modulus, elastic modulus, dynamic modulus, natural frequencies of vibration.



1 Introdução

A utilização da técnica das frequências naturais de vibração como ferramenta para determinação de propriedades dinâmicas do concreto é amplamente utilizada no exterior e cada vez mais no Brasil, principalmente após a sua incorporação na revisão da ABNT NBR 8522-2:2021 (2021), no âmbito do CB-18 da ABNT, assentada após a análise dos resultados de um vasto programa experimental, realizado em laboratórios e por pesquisadores brasileiros, onde se estabeleceram parâmetros seguros de correlação a partir dos resultados obtidos na determinação do módulo de elasticidade dinâmico do concreto, para a estimativa do módulo de elasticidade tangente inicial. Esse realinhamento da normalização brasileira existente às normas internacionais teve como objetivo principal a modernização do método de ensaio, com a promoção de uma alternativa ao procedimento estático tradicional, mais precisa, com alta reprodutibilidade, visando minimizar as controvérsias entre projetistas, construtoras, empresas de serviço de concretagem e laboratórios. A utilização dessa técnica tende a popularizar a medição do módulo de elasticidade dinâmico no contexto do controle tecnológico do concreto por ser um procedimento mais prático, de rápida execução, com uma confiabilidade reconhecidamente maior, realizado sem a necessidade de utilização de máquinas de ensaio, compressômetros ou relógios comparadores.

Assim, o método de ensaio dinâmico representa uma alternativa para os laboratórios atenderem uma crescente demanda do mercado em função das mudanças ocorridas no controle tecnológico do concreto, causada pelo aumento da sua resistência. Esse aumento de resistência à compressão foi alavancado pela evolução tecnológica verificada na produção do concreto. Esta evolução, ocorrida devido à melhora do conhecimento da seleção e produção de agregados e do avanço de tecnologia na indústria química de aditivos, somada ao desenvolvimento apresentado pela indústria produtora de cimento Portland, aliadas ainda ao aprimoramento dos estudos de dosagem, desenvolvidos pelas empresas de serviços de concretagem BILESKY *et al.*, (2017), permitiu que a cadeia produtiva da construção civil lançasse mão de concretos altamente competitivos, mais resistentes e duráveis. Isso causou mudanças significativas nos padrões construtivos e arquitetônicos, possibilitando a concepção de edifícios mais altos, vão livres maiores e seções transversais mais esbeltas, o que reduziu significativamente a inércia dos elementos estruturais, fato esse que aumentou as suas deformações MELO NETO e HELENE (2002). O conhecimento das deformações reais da estrutura de concreto e de outros parâmetros que expressem as condições dos estados limites de serviço passou então a ter uma importância muito maior para o dimensionamento das estruturas, o que levou os projetistas a passarem a especificar além da resistência à compressão do concreto desejada, também o seu módulo de elasticidade.

Comprometidos com a evolução de métodos de ensaios dinâmicos, voltados à medição de outras importantes grandezas aliadas ao conhecimento das deformações do concreto, já utilizados largamente em outros países e em outras áreas da engenharia, como a de materiais cerâmicos, refratários e metálicos, os autores apresentam neste trabalho resultados de um estudo experimental onde se utilizou a técnica das frequências naturais de vibração. Descreve-se aqui o método desenvolvido para medição simultânea do módulo



de elasticidade, do módulo de cisalhamento e do coeficiente de Poisson dinâmicos em corpos de prova prismáticos de concreto. Esse método é uma evolução do descrito na norma ASTM C 215-19 (2019) combinada com as equações e o algoritmo iterativo da norma ASTM E 1876-15 (2015). A evolução está na medição simultânea das frequências flexional e torcional visando aumentar a praticidade do ensaio. Para tanto, foi proposto e validado um novo conjunto de condições de contorno para o apoio, a excitação e a captura da resposta acústica do corpo de prova de concreto prismático, e também uma forma de se confirmar a correspondência entre os modos de vibração e as frequências detectadas.

Os ensaios foram realizados em corpos de prova prismáticos, com dimensões de 10 cm x 10 cm x 40 cm. Os resultados obtidos a partir do ensaio dinâmico permitem afirmar que o método das frequências naturais de vibração também possibilita a determinação destas duas grandezas elásticas do concreto, módulo de cisalhamento e coeficiente de Poisson dinâmicos, com praticidade, rapidez, economia e baixa incerteza.

É importante ressaltar que a correlação entre o módulo de cisalhamento estático e dinâmico, bem como entre o coeficiente de Poisson estático e dinâmico, não é bem estudada e estabelecida como para o módulo de elasticidade dinâmico e o módulo tangente inicial. Ainda assim, a determinação desses parâmetros dinâmicos pode ser útil para refinar análises por elementos finitos e estimular pesquisas e estudos de correlação com os correspondentes estáticos. Dessa forma, estudos visando a incorporação deste procedimento ao texto normativo, em sua próxima (futura) revisão, encontram-se em andamento.

2 A técnica das frequências naturais

2.1 Conceitos

Todo corpo rígido emite um som quando excitado com uma pancada leve ou impulso mecânico; tocar um sino e bater na madeira são exemplos triviais desse fenômeno. Pode-se facilmente perceber que o som emitido pelos objetos é altamente reproduzível: não importa o número de excitações, a resposta é sempre a mesma. Já nos primórdios da ciência descobriu-se que estes sons, ou respostas acústicas, são constituídos pelas frequências naturais de vibração do objeto, e estas determinadas univocamente pela geometria, dimensões e densidade aparente. Para geometrias regulares, como cilindros e prismas, as equações que correlacionam as frequências com as dimensões e a densidade aparente são analíticas, o que permite aplicações tecnológicas. Uma dessas aplicações é a técnica das frequências naturais de vibração para a medição dos módulos de elasticidade. Esta técnica consiste essencialmente em calcular os módulos de elasticidade de corpos de prova de geometria regulares a partir de suas dimensões, densidade e frequências de ressonância. As dimensões podem ser medidas com um paquímetro, a densidade aparente calculada com o auxílio de uma balança e as frequências de ressonância com arranjos experimentais e instrumentos de medição dedicados. Para a realização dos cálculos é recomendável a utilização de um software.

Os módulos obtidos pela técnica das frequências naturais de vibração são ditos “dinâmicos” e podem diferir dos medidos em condição quase-estática para materiais viscoelásticos e

não-lineares como o concreto. A correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico e o módulo de elasticidade tangente inicial para concreto é bem estabelecida, vide Anexo B da ABNT NBR 8522-1:2021 (2021). Os coeficientes de Poisson dinâmico e estático convergem com a cura do concreto, mas apresentam comportamento e valores muito diferentes para concretos jovens AHMED (2018).

Corpos de prova cilíndricos são facilmente excitáveis no modo de vibração flexional, que permite a determinação do módulo de elasticidade ou módulo de Young, como descrito na ABNT NBR 8522-2:2021 (2021). Por sua vez, corpos de prova prismáticos são excitáveis tanto no modo de vibração flexional quanto no torcional, o que permitem a determinação do módulo de elasticidade, do módulo de cisalhamento e do coeficiente de Poisson, conforme estabelecido na norma ASTM C 215-9 (2019). É importante notar que a associação entre as frequências e os modos de vibração exige mais cuidado nos corpos prismáticos por conta do maior número de frequências e harmônicas dessa geometria.

Para a determinação da frequência de um dado modo vibração é necessário apoiar o corpo de prova nas respectivas linhas nodais, aplicar a excitação e detectar a resposta acústica em um ponto de amplitude máxima de vibração. A excitação pode ser via impacto ou varredura de frequências. Posteriormente, é necessário processar a resposta acústica para a extração e identificação da frequência. Determinada a frequência, é possível calcular o módulo de elasticidade dinâmico considerando a massa e as dimensões do corpo de prova. Este procedimento é descrito na norma ASTM E 1876-15 (2015).

A localização das linhas nodais e o ponto ótimo para a excitação e captura da resposta acústica dependem do modo de vibração e da geometria. Na Figura 1 são ilustrados os modos de vibração flexional (correspondente a frequência f_f) e torcional (correspondente a frequência f_t) de um prisma a partir de uma simulação por elementos finitos. A amplitude está exagerada para facilitar a visualização. As regiões em cores frias apresentam baixa amplitude, e as em cores quentes, alta amplitude. As regiões em azul são as que vibram menos e correspondem às chamadas linhas nodais nas quais o corpo de prova pode ser apoiado com a menor interferência possível. É interessante notar que as linhas nas quais a amplitude de vibração é efetivamente nula ocorrem no interior do corpo de prova.

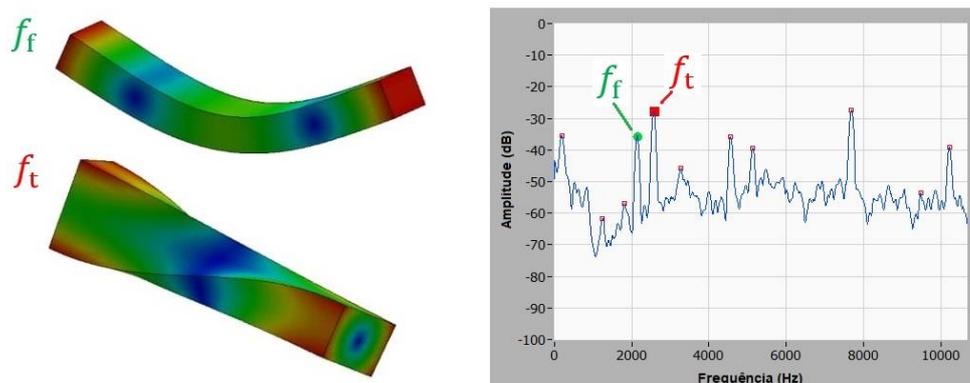


Figura 1 – Ilustração dos modos de vibração flexional (frequência f_f) e torcional (frequência f_t) e exemplo típico de um espectro de corpos de prova prismáticos de concreto. Na ilustração à esquerda, as regiões em cores frias apresentam baixa amplitude de vibração, e as em cores quentes, alta amplitude.

A linhas nodais do modo de vibração flexional fundamental de prismas ocorrem em $0,224 \cdot h$ das extremidades (sendo h a altura do corpo de prova), e as do modo torcional nos eixos principais, segundo a norma ASTM E 1876-15 (2015). Estas são as regiões externas do corpo de prova que apresentam a menor amplitude de vibração. Na Figura 2 são ilustradas as condições de contorno ideais para se apoiar, excitar e detectar a resposta acústica um corpo de prova prismático de concreto no modo de vibração flexional (à esquerda) e no modo de vibração torcional (à direita), de acordo com a norma ASTM C 215-19 (2019).

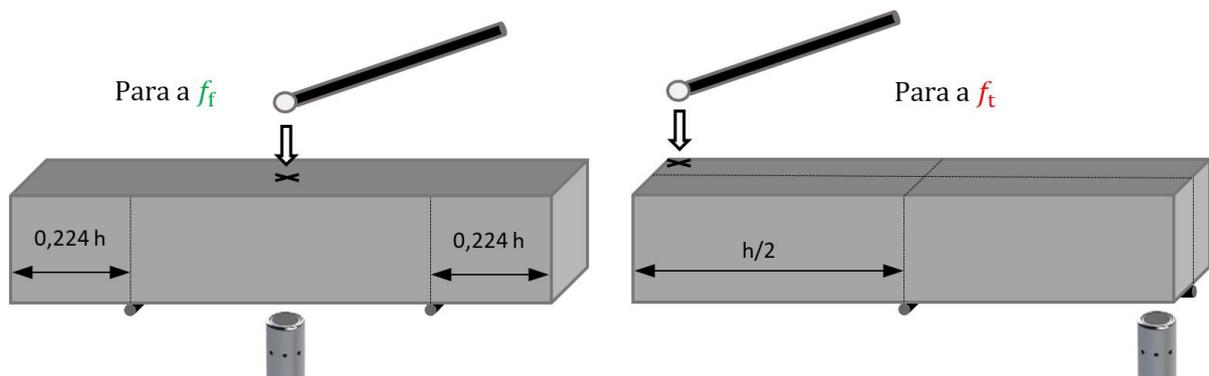


Figura 2 – Condições de contorno ideais para se apoiar, excitar e detectar a resposta acústica um corpo de prova prismático de concreto no modo de vibração flexional (à esquerda) e no modo de vibração torcional (à direita), de acordo com a norma ASTM C 215-19 (2019).

2.2 Equações e algoritmo

Na técnica das frequências naturais de vibração o módulo de elasticidade de prismas retangulares é determinado a partir da frequência de ressonância fundamental do modo de vibração flexional (f_f) empregando as Equações 1 e 2, o módulo de cisalhamento é determinado a partir da frequência de ressonância fundamental do modo de vibração torcional (f_t) empregando as Equações 3 e 4, e o coeficiente de Poisson calculado a partir do módulo de elasticidade e do módulo de cisalhamento empregando a Equação 5 PICKETT (1945), ASTM E 1876-15 (2015). Contudo, os cálculos não são diretos porque estes três parâmetros possuem somente dois graus de liberdade, sendo necessário um processo iterativo até que os resultados converjam.

$$E = 0,9465 \left(\frac{m f_f^2}{w} \right) \left(\frac{h^3}{t^3} \right) T \cdot 10^{-9} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

E = Módulo de elasticidade dinâmico (GPa);

m = Massa do corpo de prova (g);

w = Largura do corpo de prova (mm);

f_f = Frequência de ressonância fundamental flexional (Hz);
 h = Altura do corpo de prova (mm);
 t = Espessura do corpo de prova (mm);
 T = Fator de correção (adimensional).

$$T = 1 + 6,585(1 + 0,0752\mu + 0,8109\mu^2) \left(\frac{t}{h}\right)^2 - 0,868 \left(\frac{t}{h}\right)^4 - \left[\frac{8,340(1 + 0,2023\mu + 2,173\mu^2) \left(\frac{t}{h}\right)^4}{1,000 + 6,338(1 + 0,1408\mu + 1,536\mu^2) \left(\frac{t}{L}\right)^2} \right] \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

μ = Coeficiente de Poisson (adimensional).

$$G = \frac{4 h m f_t^2}{w t} R \cdot 10^{-9} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

G = Módulo de cisalhamento dinâmico (GPa);

f_t = Frequência de ressonância fundamental torcional (Hz);

R = Fator de correção (adimensional).

$$R = \left[\frac{1 + \left(\frac{w}{t}\right)^2}{4 - 2,521 \left(\frac{t}{w}\right) \left(1 - \frac{1,991}{e^{\frac{\pi w}{t}} + 1}\right)} \right] \left[1 + \frac{0,00851w^2}{h^2} \right] - 0,060 \left(\frac{nw}{h}\right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{w}{t} - 1\right)^2 \quad (\text{Equação 4})$$

$$\mu = \frac{E}{2G} - 1 \quad (\text{Equação 5})$$

Analisando as Equações 2 a 5 percebe-se que é necessário conhecer o módulo de elasticidade para calcular o coeficiente de Poisson, e também que o coeficiente de Poisson é levado em consideração no fator de correção do módulo de elasticidade. A solução indicada pela norma ASTM E 1876-15 (2015) para essa dependência mútua é a aplicação do algoritmo iterativo ilustrado na Figura 3. Neste algoritmo, após a determinação das dimensões, da massa e das frequências f_f e f_t , é realizado o cálculo do módulo de elasticidade empregando o valor arbitrário de 0,25 para o coeficiente de Poisson. Na

sequência, o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson são recalculados repetidamente até que a diferença percentual entre duas interações seja menor que 2%, o que indica a coerência e estabilidade dos resultados.

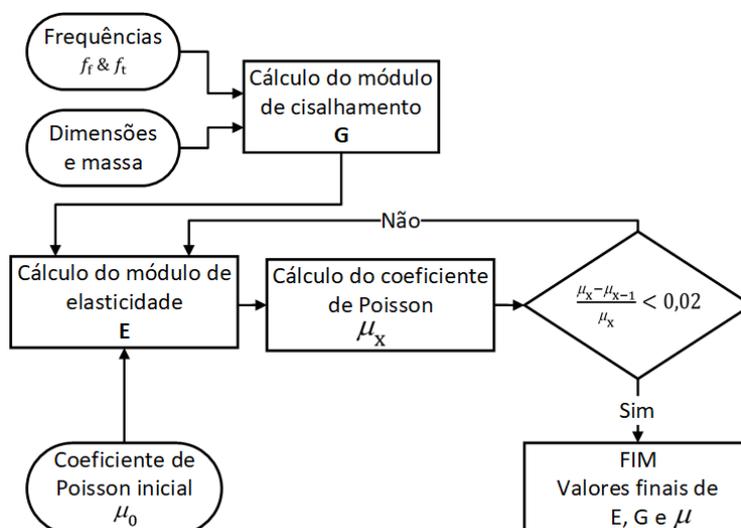


Figura 3 – Fluxograma do algoritmo para a determinação iterativa do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson. Adaptado da norma ASTM E 1876-15 (2015).

O módulo de elasticidade não é muito sensível à variação do coeficiente de Poisson por esse ser levado em consideração somente no coeficiente de correção T. Porém, o coeficiente de Poisson é muito sensível à variação do módulo de elasticidade.

2.3 Medição simultânea das frequências f_t e f_t

Os autores têm se dedicado ao emprego e à evolução da técnica das frequências naturais deste 2008. Ao longo destes 14 anos, percebeu-se que nos ensaios para a determinação da frequência flexional de prismas empregando as condições de contorno da imagem à direita da Figura 2 era comum o pico da frequência correspondente ao modo flexional aparecer com baixa amplitude quando a excitação não era aplicada exatamente na linha central do corpo de prova. O contrário também acontecia, isto é, era comum um corpo de prova apoiado nas linhas nodais do modo torcional (imagem à esquerda da Figura 2) apresentar um pico de baixa amplitude correspondente ao modo de vibração flexional quando a excitação e a captação da resposta acústica estavam ligeiramente desalinhadas do centro do corpo de prova. Em função disso, surgiu a curiosidade de se buscar uma condição de contorno híbrida, que possibilitasse a excitação e a captação simultânea das frequências flexional e torcional. Após tentativas experimentais guiadas pela amplitude de vibração relativa obtida via simulações por elementos finitos (imagem à direita da Figura 1), foram definidas as condições de contorno ilustradas à esquerda na Figura 4.

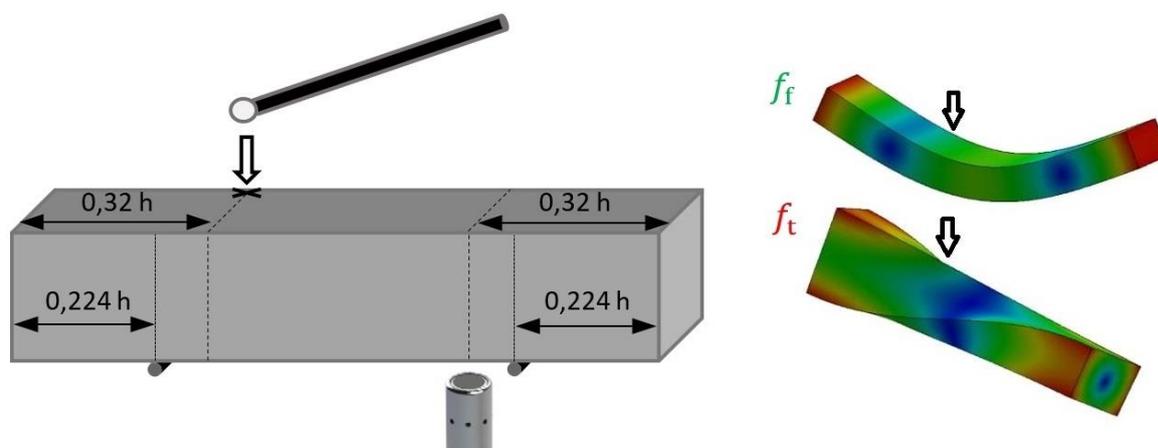


Figura 4 - Condições de contorno desenvolvidas para a excitação simultânea dos modos de vibração flexional e torcional. O corpo de prova é apoiado nas linhas nodais do modo flexional (0,224.h) e a excitação e captura da resposta acústica na lateral em 0,32.h onde a amplitude de vibração dos dois modos de vibração são semelhantes (regiões indicadas com setas na imagem à direita).

Estas condições de contorno híbridas possibilitam que o corpo de prova vibre livremente no modo flexional, porém não são ótimas para o modo torcional que tende a ser amortecido. É sabido da literatura que a alteração da posição do apoio é determinante para o amortecimento da vibração WACHTMAN (1958), e que esse amortecimento adicional causa uma ligeira redução da frequência de vibração. Entretanto, para corpos prismáticos de concreto apoiados em suporte de fios, a alteração de frequência que se observa é da ordem da incerteza de medição da frequência e pode ser desprezada. Neste trabalho, a frequência torcional dos corpos de prova de concreto foram caracterizadas tanto com as condições de contorno preconizadas pela norma ASTM C 215-19 (2019) quanto nas condições híbridas mostradas na Figura 4, e comparadas com a incerteza de medição, conforme apresentado no item 4 Resultados.

2.4 Identificação das frequências

A excitação simultânea das frequências flexional e torcional com as condições de contorno híbridas descritas anteriormente e ilustradas na Figura 4 apresenta uma desvantagem importante: ela torna desafiadora a correta identificação das frequências com os respectivos modos de vibração, ao passo que nas condições de contorno tradicionais sugeridas pela norma ASTM C 215-19 (2019) o pico da frequência do modo favorecido é dominante, como mostrado no exemplo da Figura 5. Nas condições híbridas ocorrem mais de uma frequência com amplitudes significativas e semelhantes, como mostrado no exemplo da Figura 6. A curva cinza no gráfico da Figura 6 é o espectro da Figura 5 inserido para facilitar a comparação. Pode-se notar que o pico do modo torcional já estava presente, mas com amplitude baixa.

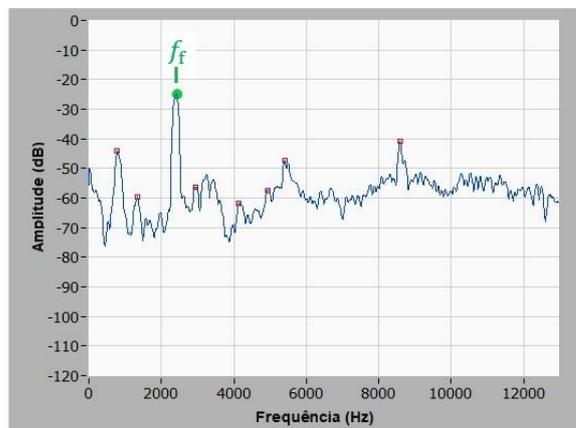


Figura 5 - Exemplo com as condições de contorno ótimas para o modo flexional: o pico correspondente à frequência flexional se destaca claramente, mesmo em escala logarítmica, facilitando a identificação.

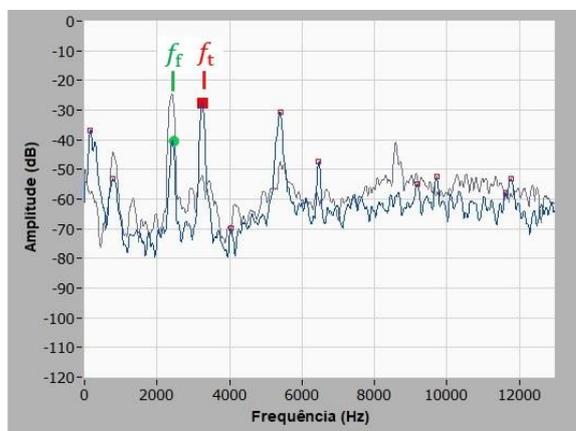


Figura 6 - Exemplo com as condições de contorno híbridas para os modos flexional e torcional: o pico de maior amplitude passa a ser o torcional com uma amplitude muito próxima a de um harmônico do modo flexional, dificultando a identificação.

A metodologia encontrada para contornar esta dificuldade foi combinar um teste rápido para destacar a frequência do modo flexional com a estimativa do padrão do espectro de frequências. Para destacar a frequência flexional, basta mover o captador acústico e a excitação para o centro do corpo de prova como ilustrado nas Figuras 2 e 5 à esquerda. Para estimar o padrão, basta resolver as Equações 1 e 2 com valores estimados para os módulos de elasticidade e as dimensões nominais do corpo de prova ou utilizar o estimador de frequências do Software Sonelastic.

Na Figura 7 é mostrada a interface do estimador de frequências com destaque para as posições relativas das frequências; a flexional e a torcional estão próximas, sendo a flexional apresentada em primeiro lugar seguida da torcional. Este padrão permanece estável desde que a razão de aspecto do corpo de prova se mantenha constante, não importando as dimensões e o módulo de elasticidade.

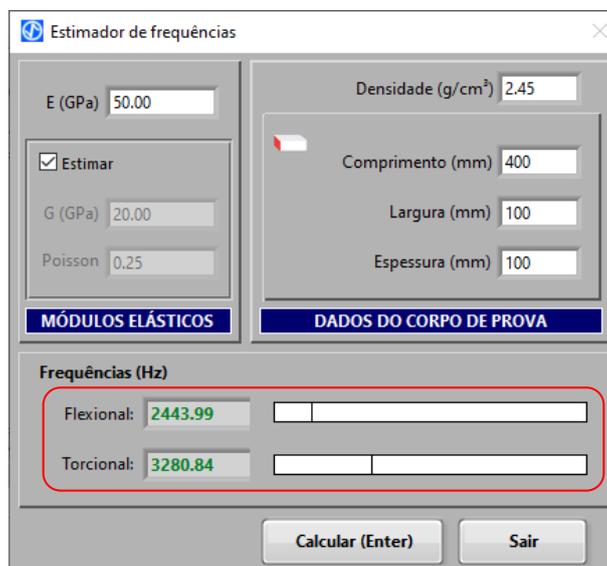


Figura 7 - Estimador de frequências e posições relativas do Software Sonelastic.

Identificada a frequência flexional e conhecida a posição relativa da frequência torcional, não restam dúvidas para a seleção. Com a prática, aprende-se o padrão para determinada proporção e a identificação se torna intuitiva para o operador. Ademais, a escolha incorreta das frequências leva a valores absurdos e até mesmo negativos para os módulos e o coeficiente de Poisson.

Para que a frequência flexional seja a primeira e a torcional a segunda no padrão do espectro de frequências, e não haja o risco de sobreposição, recomenda-se que o corpo de prova tenha secção quadrada e a razão entre a altura e as arestas seja maior ou igual a 3.

2.5 Aparato experimental

Para a realização dos ensaios foi empregado um Sistema Sonelastic para concreto (Figura 8) composto pelo Software Sonelastic 5.0, um suporte ajustável para barras e cilindros SA-BC, um captador acústico CA-DP, um pulsador manual médio PMM, um módulo USB de aquisição de sinais ADAC e um computador DELL Inspiron 15 3000. O sistema foi calibrado para a medição de frequência com rastreabilidade à Rede Brasileira de Calibração e ao Sistema Internacional. O suporte SA-BC é capaz de caracterizar corpos de prova cilíndricos e prismáticos com até 30 kg e com altura entre 100 e 450 mm. O captador acústico CA-DP e o ADAC são capazes de detectar e digitalizar respostas acústicas na faixa de frequência de 20 Hz a 22,5 kHz. O pulsador manual médio é capaz de excitar os corpos de prova de concreto sem emitir uma resposta acústica própria que possa interferir ou ser confundida com a do corpo de prova. O software Sonelastic é capaz de realizar os cálculos para a determinação do módulo de cisalhamento com um coeficiente de Poisson estimado, como indicado pela ABNT NBR 8522-2:2021 (2021), e também é capaz de calcular simultaneamente o módulo de elasticidade, o módulo de cisalhamento e o coeficiente de Poisson pelo método interativo da norma ASTM E 1876-15 (2015) de corpos de prova

prismáticos. Adicionalmente, o software Sonelastic inclui um módulo para a estimativa das frequências e posições relativas.



Figura 8 – Sistema Sonelastic para corpos de prova cilíndricos e prismáticos de concreto.

3 Metodologia de medição passo a passo

A seguir é descrita a metodologia de medição passo a passo para a determinação simultânea do módulo de elasticidade, módulo de cisalhamento e coeficiente de Poisson dinâmicos pela técnica das frequências naturais de vibração empregando condições de contorno híbridas para os modos flexional e torcional.

3.1 Passo 1 - Medição e pesagem do corpo de prova

Sugere-se que as dimensões sejam determinadas pela média de três pontos e calculado o desvio padrão e a incerteza considerando-se a precisão do instrumento de medição. Os três pontos podem ser o meio e os extremos das respectivas dimensões. O instrumento de medição recomendado é um paquímetro com resolução de 0,02 mm; na ausência de um paquímetro, pode-se utilizar uma escala de aço com resolução de 0,5 mm. Para a determinação da massa, pode-se empregar uma balança com resolução de pelo menos 10 g. Na Figura 9 é apresentada a tela de entrada de dados do software Sonelastic, sendo a informação da incerteza importante para que seja propagada nos cálculos dos resultados.

Nome CP-6-Flex Massa (g) 9782.600 ± 0.100

L (mm) 399.17 ± 0.33 Σ

W (mm) 99.97 ± 1.04 Σ

T (mm) 100.80 ± 0.22 Σ

$\rho = 2.43 \text{ g/cm}^3$

0,224 x L = 89.41 mm 0,320 x L = 127.73 mm 0,552 x L = 220.34 mm

DADOS DO CORPO DE PROVA

Figura 9 – Tela de entrada do software Sonelastic para as dimensões, massa e respectivas incertezas.

3.2 Passo 2 - Marcação do corpo de prova

Recomenda-se a marcação do corpo de prova para facilitar o correto posicionamento no suporte e a excitação e captura da resposta acústica. Empregando um lápis, um esquadro e uma escala de aço, trace duas linhas na frente do corpo de prova espaçadas de 0,224.h da extremidade, e duas linhas no topo e na frente espaçadas de 0,32.h das extremidades, como ilustrado nas Figuras 4 e 10. Marque um “x” no centro da face superior. A tela de entrada de dados do software Sonelastic (Figura 9) realiza o cálculo das distâncias 0,224.h e 0,32.h automaticamente. O corpo de prova será apoiado na posição 0,224.h e a excitação aplicada realizada no “x” e na lateral nas linhas correspondentes a 0,32.h.



Figura 10 – Marcação do corpo de prova para facilitar o posicionamento, a excitação e a captura da resposta acústica.

3.3 Passo 3 - Posicionamento do corpo de prova no suporte

Apoie e nivele o corpo de prova no suporte como mostrado na Figura 5. Os cabos de aços devem estar alinhados com a marcação da posição 0,224.h.

3.5 Passo 5 - Excitação e identificação das frequências

Estando o corpo de prova apoiado no suporte, posicione o captador como mostrado na Figura 5 e aplique a excitação no “x” marcado no centro do corpo de prova. A frequência que se destacar é a do modo flexional (vide espectro da Figura 5). Na sequência, altere a posição do captador acústico e da excitação para o canto do corpo de prova nas linhas em 0,32.h como mostrado na Figura 6. Repita a seleção da frequência flexional já encontrada anteriormente e empregue o estimador de frequências (Figura 7) para identificar a frequência torcional (vide gráfico da Figura 6).

3.6 Passo 6 - Cálculos

Realize os cálculos e propague a incerteza de acordo com as Equações 1 a 5 e empregando o algoritmo mostrado na Figura 3. Para tanto, pode ser empregada a aba de cálculo do Software Sonelastic mostrada na Figura 11.

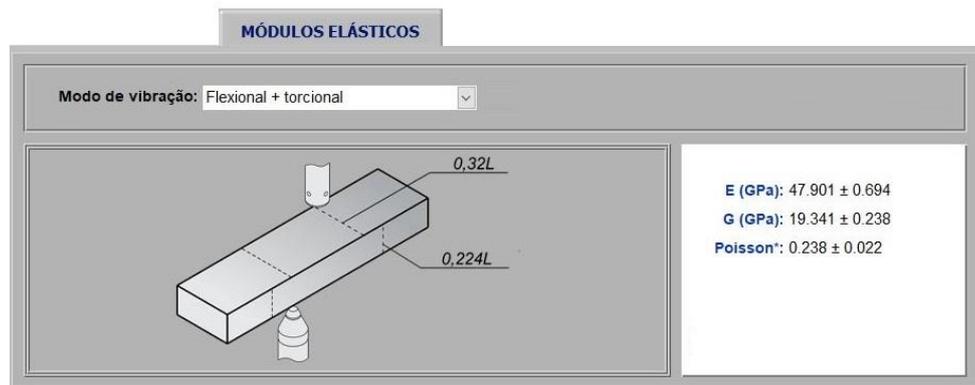


Figura 11 - Aba de cálculo do Software Sonelastic.

4 Resultados e discussões

Foram caracterizados seis corpos de prova prismáticos de 10 cm x 10 cm x 40 cm com a mesma idade e moldados com um concreto de média resistência à compressão. A frequência torcional foi medida com as condições de contorno ideais para o modo torcional e com as condições de contorno híbridas sugeridas nesse trabalho. Os resultados estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Frequência torcional medida com as condições de contorno ideais para o modo torcional e com as condições de contorno híbridas.

| Corpo de prova | Com as condições de contorno ideais | Com as condições de contorno híbridas |
|------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| CP-01 | 3236,3 Hz | 3239,8 Hz |
| CP-02 | 3223,5 Hz | 3221,4 Hz |
| CP-03 | 3204,8 Hz | 3196,3 Hz |
| CP-04 | 3238,3 Hz | 3242,3 Hz |
| CP-05 | 3148,5 Hz | 3146,7 Hz |
| CP-06 | 3247,3 Hz | 3241,7 Hz |
| Média | 3216,4 Hz | 3214,7 Hz |
| Diferença | -1,7 Hz / -0,05% | |

Como esperado, na média houve uma queda na frequência para as condições híbridas devido ao maior amortecimento da vibração pelos fios do suporte. Entretanto, essa queda foi baixa, de apenas -0,05%, o que é uma ordem de grandeza menor do que a incerteza típica do ensaio para corpos de prova retificados. Em termos absolutos, a diferença média foi de -1,7 Hz, aproximadamente um terço da incerteza de medição do sistema que é de 5 Hz para a faixa de frequência dos corpos de prova (até 5 kHz).

A Tabela 2 apresenta o módulo de elasticidade, o módulo de cisalhamento e o coeficiente de Poisson dinâmicos obtidos empregando as condições de contorno híbridas, a metodologia sugerida e o Sistema Sonelastic.

Tabela 2 – Resultados das propriedades elásticas medidas com as condições de contorno híbridas.

| Corpo de prova | E (GPa) | G (GPa) | μ (ad.) |
|----------------|--------------|--------------|-------------|
| CP-01 | 47,37 ± 2,06 | 19,21 ± 0,71 | 0,23 ± 0,07 |
| CP-02 | 45,71 ± 1,99 | 19,06 ± 0,70 | 0,20 ± 0,07 |
| CP-03 | 44,93 ± 1,95 | 18,84 ± 0,70 | 0,19 ± 0,07 |
| CP-04 | 45,83 ± 1,99 | 19,24 ± 0,71 | 0,19 ± 0,07 |
| CP-05 | 43,65 ± 1,90 | 18,19 ± 0,67 | 0,20 ± 0,07 |
| CP-06 | 47,68 ± 2,07 | 19,35 ± 0,71 | 0,23 ± 0,07 |
| Média | 45,86 | 18,98 | 0,20 |

O desvio padrão percentual do módulo de elasticidade e do módulo de cisalhamento foi de aproximadamente 2,2%, e do coeficiente de Poisson de aproximadamente 9%, o que confirma a maior precisão da metodologia proposta quando comparada a do método estático.

5 Considerações finais

A metodologia e as condições de contorno híbridas sugeridas possibilitam a caracterização simultânea do módulo de elasticidade, do módulo de cisalhamento e do coeficiente de Poisson dinâmico do concreto sem comprometer a precisão da metodologia tradicional, ao passo que reduz o tempo e simplifica a medição. Espera-se com esse avanço facilitar estudos de correlação entre o módulo de cisalhamento e o coeficiente de Poisson estáticos e dinâmicos.

6 Referências

ABNT NBR 8522-2:2021, Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação - Parte 2: Módulo de elasticidade dinâmico pelo método das frequências naturais de vibração.

AHMED, Lamis. "Dynamic Measurements for Determining Poisson's Ratio of Young Concrete" Nordic Concrete Research, vol.58, no.1, 2018, pp.95-106. <https://doi.org/10.2478/ncr-2018-0006>

ASTM C215-19, Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens; designation: C215-19. ASTM International, 2019.



ASTM E1876-15, Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration; designation: E1876-15. ASTM International, 2015.

BILESKY, P., SANTOS, R., PACHECO, J., HELENE, P. Módulo de elasticidade estático versus módulo de elasticidade dinâmico. ANAIS DO 59º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2017 – 59CBC2017. ISSN 2175-8182. Outubro / novembro 2017. 13 p.

NETO, A. A. M.; HELENE, P. Módulo de elasticidade: dosagem e avaliação de modelos de previsão do módulo de elasticidade de concretos. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 44º, 2002, Belo Horizonte - MG, Anais, IBRACON.

PICKETT, G. Equations for Computing Elastic Constants from Flexional and Torsional Resonant Frequencies of Vibration of Prisms and Cylinders. Bulletin 7 – Research Laboratory of the Portland Cement Association; reprint from the Am. Soc. Test. Mater., v. 45, p. 846-865, 1945. Proceedings.

WACHTMAN, J.B.J.; TEFFT, W.E. Effect of Suspension Position on Apparent Values of Internal Friction Determined by Forster's Method. Review of Scientific Instruments. v. 29, n. 6, p. 517-520, 1958.