

ESTUDO DA RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DE CORPOS DE PROVA DE CONCRETO EM DIFERENTES CLASSES DE RESISTÊNCIA

STUDY OF THE FREQUENCY RESPONSE OF CONCRETE SPECIMENS IN DIFFERENT STRENGTH CLASSES

ESTUDIO DE LA RESPUESTA EN FRECUENCIA DE MUESTRAS DE HORMIGÓN EN DIFERENTES CLASES DE RESISTENCIA

 <https://doi.org/10.56238/arev7n12-054>

Data de submissão: 05/11/2025

Data de publicação: 05/12/2025

Cássio Humberto Lima

Mestrado em Ciências

Instituição: Universidade Federal de Lavras (UFLA)

E-mail: cassiohlima7@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1234-302X>

RESUMO

O concreto, por ser um material compósito heterogêneo e sensível às proporções de seus constituintes, apresenta variações significativas em seu comportamento mecânico e dinâmico. Este estudo analisou o comportamento vibracional de corpos de prova de concreto com quatro classes de resistência à compressão (15, 20, 25 e 30 MPa) por meio de análise modal experimental e determinação das Funções de Resposta em Frequência (FRF). Para cada classe foram moldados 10 corpos de prova em formas de madeirite, utilizando cimento Portland CP II, areia quartzosa, brita granítica e água em proporções volumétricas específicas, seguidos de cura por 28 dias. A excitação impulsiva foi aplicada com martelo instrumentado, e as respostas de aceleração foram adquiridas em sistema de aquisição dedicado, na faixa de 0 a 2560 Hz, com avaliação da coerência entre excitação e resposta para validação das FRF. As curvas obtidas mostraram deslocamento sistemático dos picos de ressonância para frequências mais elevadas à medida que a resistência à compressão aumenta, além de respostas espectrais mais estáveis nas classes superiores, evidenciando a forte correlação entre rigidez dinâmica e resistência mecânica. A metodologia empregada confirmou o potencial da análise modal como técnica não destrutiva sensível para caracterização da resposta vibracional do concreto, fornecendo subsídios relevantes para aplicações em controle de qualidade e avaliação de estruturas sujeitas a ações dinâmicas.

Palavras-chave: Resposta em Frequência. Análise Modal Experimental. Concreto. Propriedades Dinâmicas. Classes de Resistência.

ABSTRACT

Concrete, being a heterogeneous composite material sensitive to the proportions of its constituents, exhibits significant variations in its mechanical and dynamic behavior. This study analyzed the vibrational behavior of concrete specimens with four compressive strength classes (15, 20, 25, and 30 MPa) through experimental modal analysis and determination of Frequency Response Functions (FRF). For each class, 10 specimens were molded in plywood forms using Portland cement CP II, quartz sand, granite aggregate, and water in specific volumetric proportions, followed by curing for 28 days. Impulsive excitation was applied with an instrumented hammer, and acceleration responses were acquired using a dedicated acquisition system in the 0 to 2560 Hz range, with evaluation of the

coherence between excitation and response for FRF validation. The curves obtained showed a systematic shift of resonance peaks to higher frequencies as compressive strength increases, in addition to more stable spectral responses in the higher classes, highlighting the strong correlation between dynamic stiffness and mechanical strength. The methodology employed confirmed the potential of modal analysis as a sensitive non-destructive technique for characterizing the vibrational response of concrete, providing relevant information for applications in quality control and evaluation of structures subjected to dynamic actions.

Keywords: Frequency Response. Experimental Modal Analysis. Concrete. Dynamic Properties. Strength Classes.

RESUMEN

El hormigón, al ser un material compuesto heterogéneo sensible a las proporciones de sus componentes, presenta variaciones significativas en su comportamiento mecánico y dinámico. Este estudio analizó el comportamiento vibracional de probetas de hormigón con cuatro clases de resistencia a la compresión (15, 20, 25 y 30 MPa) mediante análisis modal experimental y la determinación de las Funciones de Respuesta en Frecuencia (FRF). Para cada clase, se moldearon 10 probetas en encofrados de madera contrachapada utilizando cemento Portland CP II, arena de cuarzo, árido granítico y agua en proporciones volumétricas específicas, tras lo cual se dejó curar durante 28 días. Se aplicó excitación impulsiva con un martillo instrumentado y se adquirieron las respuestas de aceleración mediante un sistema de adquisición específico en el rango de 0 a 2560 Hz, evaluando la coherencia entre la excitación y la respuesta para la validación de la FRF. Las curvas obtenidas mostraron un desplazamiento sistemático de los picos de resonancia a frecuencias más altas a medida que aumenta la resistencia a la compresión, además de respuestas espectrales más estables en las clases más altas, lo que destaca la fuerte correlación entre la rigidez dinámica y la resistencia mecánica. La metodología empleada confirmó el potencial del análisis modal como técnica sensible y no destructiva para caracterizar la respuesta vibracional del hormigón, proporcionando información relevante para aplicaciones en el control de calidad y la evaluación de estructuras sometidas a acciones dinámicas.

Palabras clave: Respuesta en Frecuencia. Análisis Modal Experimental. Hormigón. Propiedades Dinámicas. Clases de Resistencia.

1 INTRODUÇÃO

O concreto é um dos materiais estruturais mais utilizados no mundo devido à sua versatilidade, durabilidade e facilidade de moldagem. Sua aplicação é amplamente disseminada em obras de infraestrutura, edificações, pavimentação e elementos pré-moldados. Entretanto, por ser um material compósito heterogêneo, sua resposta mecânica e dinâmica depende diretamente da composição, da proporção dos agregados, da qualidade da pasta cimentícia e do processo de cura (SEGALIN et al., 2020). Entre suas propriedades fundamentais, a resistência à compressão é a mais empregada para classificação e dimensionamento estrutural, servindo como referência para o desempenho global do material (NEGRI et al., 2024). No entanto, propriedades relativas ao comportamento dinâmico, como frequências naturais, modos de vibração e amortecimento, também exercem papel significativo em situações onde o concreto está sujeito a ações dinâmicas, como tráfego, vento, vibrações industriais e impactos.

A análise modal experimental (AME) é uma técnica consolidada para a caracterização das propriedades dinâmicas de materiais e sistemas estruturais. Ela permite determinar frequências naturais, modos de vibração e fatores de amortecimento a partir de dados obtidos por meio de excitação mecânica e resposta medida por sensores apropriados (Rosa et al., 2016). A Função Resposta em Frequência (FRF), que relaciona a resposta estrutural a uma excitação aplicada, constitui uma das principais ferramentas na identificação dessas propriedades. Para materiais cimentícios, a FRF tem sido usada para avaliar a integridade estrutural, identificar danos, investigar diferenciações de rigidez e compreender como variações na composição do concreto influenciam seu comportamento dinâmico (MAGALHÃES et al., 2024).

A heterogeneidade do concreto implica que pequenas alterações na proporção dos agregados, conteúdo de água, tipo de cimento ou aditivos podem modificar significativamente sua rigidez global, refletindo diretamente na resposta vibracional. Estudos mostram que concretos de menor resistência apresentam menores frequências naturais devido à sua menor rigidez, enquanto concretos de maior resistência tendem a exibir modos de vibração em faixas mais elevadas (ALMEIDA et al., 2012). Essa relação entre resistência mecânica e comportamento dinâmico é fundamental, sobretudo em técnicas não destrutivas, onde a resposta em frequência permite inferir propriedades internas sem causar danos ao material.

Além disso, a aplicação de métodos dinâmicos para avaliação de materiais cimentícios tem ganhado relevância no contexto do *Structural Health Monitoring* (SHM). Técnicas baseadas em análise modal permitem identificar variações sutis na estrutura interna dos materiais, podendo detectar danos precoces, microfissuração ou degradação progressiva (HU et al., 2018). Dentro desse escopo, o

estudo das FRFs de corpos de prova com diferentes classes de resistência fornece subsídios importantes para compreender como as propriedades dinâmicas são afetadas por variações no processo de dosagem e como tais informações podem ser utilizadas no monitoramento de elementos estruturais reais.

A utilização de ensaios dinâmicos também é incentivada pela sua natureza não destrutiva e pela alta sensibilidade às variações de rigidez. Enquanto ensaios destrutivos avaliam propriedades finais do material, como resistência à compressão, a análise modal permite observar alterações desde os estados iniciais de dano, tornando-se uma técnica promissora para acompanhamento ao longo da vida útil da estrutura. Assim, compreender como diferentes classes de resistência respondem em termos dinâmicos contribui não apenas para fins acadêmicos, mas para aplicações práticas em controle tecnológico, inspeções estruturais e desenvolvimento de concretos com desempenho dinâmico específico.

No contexto experimental, a obtenção da FRF a partir de excitação impulsiva apresenta vantagens significativas, como simplicidade operacional, rapidez de execução e boa repetibilidade para corpos de prova de pequeno porte. Aliado a isso, o avanço de ferramentas computacionais, como MATLAB facilita o processamento, visualização e interpretação dos dados vibracionais. A geração de gráficos tridimensionais (frequência × magnitude × amostra) permite identificar padrões consistentes entre classes de resistência, facilitando a visualização de diferenças típicas de rigidez e comportamento dinâmico.

Diante desse cenário, torna-se relevante compreender como diferentes classes de resistência influenciam a resposta em frequência do concreto. A análise sistemática dessas respostas fornece informações valiosas sobre a relação entre propriedades mecânicas e vibracionais, permitindo uma caracterização mais abrangente do material. Assim, este estudo contribui para o entendimento do comportamento dinâmico do concreto em função de sua resistência, oferecendo uma abordagem experimental robusta que pode servir de base para pesquisas futuras em engenharia estrutural, monitoramento de integridade e métodos não destrutivos aplicados a materiais cimentícios.

2 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo foi estruturada para permitir a caracterização dinâmica de corpos de prova de concreto com diferentes classes de resistência à compressão, utilizando métodos experimentais de análise modal e processamento computacional dos sinais obtidos. O procedimento abrangeu desde a moldagem e cura das amostras até a aquisição dos dados por excitação impulsiva e

a análise da FRF. As etapas foram executadas de forma padronizada para garantir reprodutibilidade e comparabilidade entre as classes.

2.1 MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

A produção dos corpos de prova seguiu um protocolo rigoroso de moldagem e controle de materiais, com o objetivo de garantir repetibilidade experimental e reduzir variáveis externas que pudessem influenciar o comportamento dinâmico. As amostras foram moldadas em formas de madeirite previamente lixadas, limpas e recobertas com desmoldante comercial (Vedacit®), assegurando condições adequadas de acabamento superficial e facilitando o processo de desforma.

Foram fabricados corpos de prova pertencentes às quatro classes de resistência convencionalmente utilizadas em obras de concreto estrutural: 15 MPa, 20 MPa, 25 MPa e 30 MPa, totalizando 10 corpos de prova para cada classe, o que fornece base estatística suficiente para análise de comportamento dinâmico.

O concreto foi preparado utilizando cimento Portland composto CP II, da marca CAUÊ®, cuja composição química, disponibilizada pelo fabricante e apresentada na Tabela 1, é constituída essencialmente por silicato tricálcico, silicato dicálcico, aluminatos e ferro-aluminatos de cálcio, gesso e adições minerais normalizadas. Essa caracterização é fundamental, pois a mineralogia do cimento está diretamente relacionada aos processos de hidratação, ao desenvolvimento de rigidez e, consequentemente, às propriedades vibracionais do material.

TABELA 1 - Composição química do cimento Portland da classe CPII empregado nas amostras

Componente	Faixa de concentração (%)
Silicato tricálcico	20-70
Silicato dicálcico	10-60
Ferro-aluminato de cálcio	5-15
Sulfato de cálcio	2-8
Aluminato tricálcico	1-15
Carbonato de cálcio	0-10
Óxido de magnésio (livre)	0-6
Óxido de cálcio (livre)	0-3

Fonte: Do autor (2025)

As proporções volumétricas de cimento, areia quartzosa, brita granítica e água foram definidas conforme a Tabela 2, ajustadas para atender às classes de resistência previstas. A homogeneização dos materiais foi realizada manualmente em recipiente rígido de 0,001 m³, iniciando-se pela mistura dos componentes secos, seguida da adição gradual de água para obtenção de uma consistência adequada à moldagem.

TABELA 2 - Proporções dos componentes do concreto para classes de resistência à compressão equivalentes a 15, 20, 25 e 30MPa

Classe de Resistência (MPa)	Cimento (m^3)	Areia (m^3)	Brita (m^3)	Água (m^3)
15 MPa	0,0010	0,0025	0,0040	0,0020
20 MPa	0,0010	0,0028	0,0035	0,0023
25 MPa	0,0015	0,0023	0,0025	0,0020
30 MPa	0,0015	0,0020	0,0020	0,0020

Fonte: Do autor (2025)

Após a mistura, o concreto foi colocado nas formas em duas camadas sucessivas, cada qual submetida a 12 golpes de adensamento com haste metálica, conforme recomendação clássica para eliminação de bolhas e obtenção de boa densidade. As dimensões finais dos corpos de prova foram padronizadas em $0,03\text{ m} \times 0,06\text{ m} \times 0,40\text{ m}$, o que reduz variabilidades no momento de inércia e assegura comparabilidade entre amostras.

O processo de cura foi conduzido em ambiente protegido durante 28 dias, respeitando os critérios convencionais para estabilização da resistência mecânica. Após esse período, os corpos de prova foram desmoldados, identificados e inspecionados visualmente para confirmação da integridade física.

2.2 CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL E INSTRUMENTAÇÃO

A caracterização dinâmica foi realizada por meio de análise modal experimental com excitação impulsiva, uma técnica amplamente utilizada para identificação das propriedades vibracionais de sistemas com geometria simples e materiais heterogêneos. Para minimizar interferências de apoio e permitir que a amostra vibrasse livremente, cada corpo de prova foi suspenso por fios de nylon fixados próximos às extremidades — configuração equivalente às condições de contorno “quase livres” (*free-free*), frequentemente empregada para determinação de frequências naturais em elementos de ensaio.

A excitação mecânica foi realizada com martelo instrumentado PCB *Piezotronics* modelo 086C03, equipado com ponteira metálica (sensibilidade 2,417 mV/N). A resposta vibratória foi medida por um acelerômetro piezoelétrico PCB *Piezotronics* modelo 352C33, com sensibilidade de 98,5 mV/g, fixado a 0,06 m da extremidade para captação eficiente de modos longitudinais e flexionais.

A escolha da posição de excitação (0,06 m da extremidade) e da posição do acelerômetro foi definida de forma a maximizar a energia transferida ao sistema e permitir a identificação clara dos picos de ressonância, reduzindo efeitos nodais que poderiam prejudicar a leitura de determinados modos. Para cada corpo de prova, foram realizados cinco impactos sucessivos, permitindo que a média dos sinais reduzisse ruídos aleatórios e aumentasse a robustez dos espectros obtidos. Entre cada impacto, aguardou-se o amortecimento total da vibração, evitando sobreposição de transientes.

2.3 AQUISIÇÃO DOS SINAIS E PROCESSAMENTO DIGITAL

O registro dos sinais de excitação e resposta foi realizado por um sistema de aquisição *National Instruments* (NI) composto por: chassi NI cDAQ-9174, módulos de aquisição dinâmicos NI 9234 (8 canais) e software LabVIEW, com a biblioteca *Sound and Vibration*.

O sistema foi configurado para aquisição do sinal no intervalo de 0–2560 Hz, com resolução espectral de 0,5 Hz, valor suficiente para identificar modos dominantes e caracterizar a dinâmica de elementos de pequeno porte.

Durante os ensaios, a coerência entre os sinais de força e aceleração foi analisada continuamente. Ensaios com coerência inferior a 0,95 foram descartados e repetidos, garantindo a confiabilidade dos espectros e a representatividade das FRF. A determinação das FRFs foi realizada diretamente no *LabVIEW* por meio da razão entre os espectros de Fourier da resposta e da excitação. Os dados processados foram exportados para análise complementar e organização gráfica.

2.4 DETERMINAÇÃO E ANÁLISE DAS FUNÇÕES DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA (FRF)

A identificação das FRF constituiu a etapa central da caracterização dinâmica dos corpos de prova, permitindo quantificar a relação entre a força aplicada e a resposta vibratória resultante. A FRF foi obtida diretamente a partir dos sinais adquiridos pelo sistema de instrumentação, empregando a razão espectral entre a Transformada Rápida de Fourier (FFT) da aceleração e a FFT da força de impacto, procedimento amplamente consolidado na literatura de análise modal experimental.

A configuração *free-free*, obtida pela suspensão dos corpos de prova por fios de nylon, proporcionou condições de contorno praticamente livres, eliminando restrições rígidas que poderiam mascarar ou deslocar as frequências naturais intrínsecas do material. Essa condição favorece a excitação de um espectro amplo de modos vibratórios, permitindo que a FRF revele tanto modos longitudinais quanto flexionais, dependendo da intensidade e do local do impacto.

Os sinais adquiridos foram previamente filtrados e inspecionados quanto à coerência espectral, parâmetro que expressa a qualidade da relação entre excitação e resposta. Apenas FRFs provenientes de impactos com valores de coerência próximos de 1,0 foram consideradas válidas, assegurando que o espectro representasse de maneira fidedigna o comportamento dinâmico da amostra. Impactos com coerência reduzida, potencialmente associados a ruídos ambientais, escorregamento de fixação ou excitações fora do eixo, foram automaticamente descartados e repetidos.

Uma vez validadas, as FRFs exibiram picos de magnitude bem definidos, associados às frequências naturais dominantes de cada corpo de prova. Esses picos representam condições de ressonância, nas quais a energia introduzida pelo impacto coincide com frequências de vibração

próprias do elemento de concreto. A clareza desses picos, observada mesmo nas classes de menor resistência, reflete a combinação adequada entre instrumentação, repetição dos ensaios e uniformidade geométrica dos corpos de prova.

Além da identificação direta das frequências naturais, a FRF permitiu observar características complementares do comportamento vibratório, como:

- amplitude relativa das respostas, associada à capacidade de dissipação e rigidez do sistema;
- separação espectral entre classes, indicando diferenças de rigidez global induzidas pela variação da resistência mecânica;
- presença de modos secundários, que surgem com mais intensidade em materiais menos rígidos;
- estabilidade dos picos entre repetições, evidenciando reproduzibilidade e sensibilidade da metodologia.

O uso de cinco impactos consecutivos e posterior média espectral foi fundamental para eliminar irregularidades pontuais e destacar apenas as componentes dinâmicas sistemáticas. Esse procedimento resultou em curvas espetrais suaves, com relação sinal-ruído elevada e excelente definição das regiões de ressonância.

As FRFs consolidadas demonstraram, de maneira inequívoca, que as classes de concreto exibem assinaturas vibracionais distintas. Concretos de maior resistência mostraram deslocamento dos picos principais para faixas superiores de frequência, refletindo maior rigidez dinâmica, enquanto concretos de menor resistência apresentaram picos mais baixos e, em geral, maior número de modos dentro da faixa analisada.

Em síntese, o processo de determinação das FRFs adotado neste estudo:

- garantiu alta precisão na identificação das frequências naturais,
- apresentou robustez frente às variabilidades intrínsecas do material,
- permitiu comparação direta entre classes,
- e forneceu bases sólidas para a interpretação das diferenças vibracionais entre os tipos de concreto analisados.

O resultado final é um conjunto de FRFs estáveis, consistentes e adequadas para análises comparativas entre classes de resistência, condição essencial para os objetivos deste estudo.

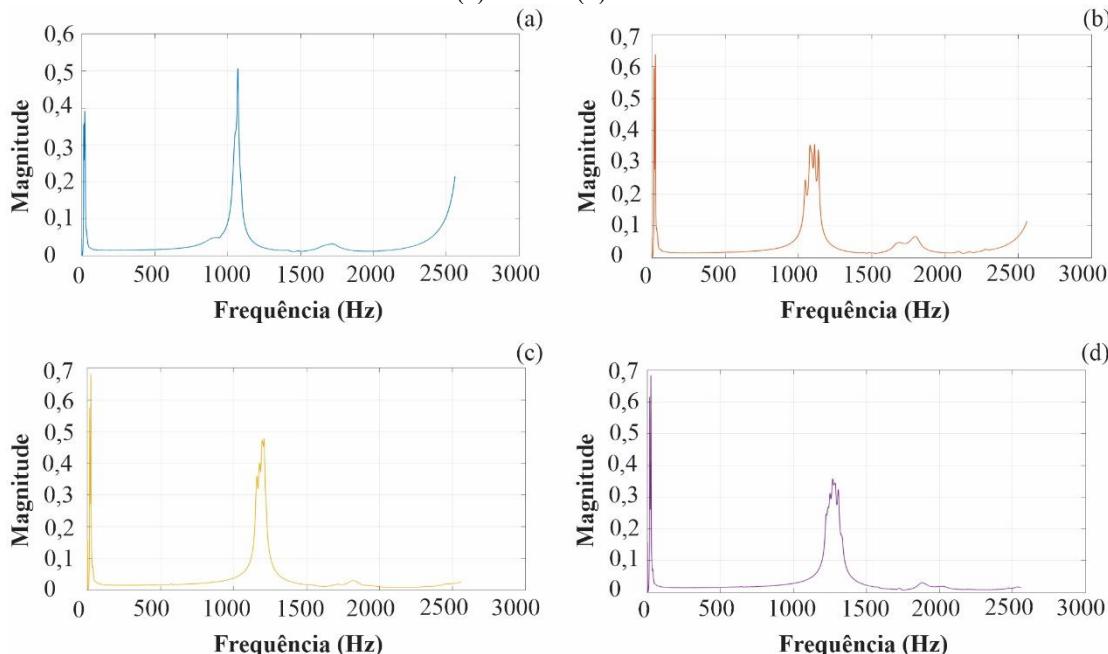
3 RESULTADOS E DISCUSÃO

A análise modal realizada por meio de excitação impulsiva permitiu obter as Funções de Resposta em Frequência (FRF) dos corpos de prova de concreto referentes às quatro classes de resistência estudadas (15, 20, 25 e 30 MPa). As FRFs extraídas refletem diretamente o comportamento

vibracional de cada amostra e possibilitam a identificação das frequências naturais predominantes. Como o procedimento experimental foi padronizado para todos os corpos de prova, as diferenças observadas nas frequências naturais podem ser atribuídas às propriedades intrínsecas de cada classe de concreto.

A partir da média dos sinais obtidos em cinco impactos consecutivos, foi possível reduzir eventuais flutuações pontuais e garantir estabilidade estatística aos resultados. Esse procedimento assegurou que as curvas de FRF representassem fielmente o comportamento dinâmico das amostras, destacando as frequências de ressonância de forma nítida e consistente. Os gráficos de frequência por magnitude, apresentado na Figura 1, exibem as curvas das quatro classes de concreto, evidenciando diferenças claras entre os materiais.

FIGURA 1 - Gráficos de frequência por magnitude das respostas dinâmicas dos corpos de prova: (a) 15MPa (b) 20MPa (c) 25MPa (d) 30MPa



Fonte: Do autor (2025)

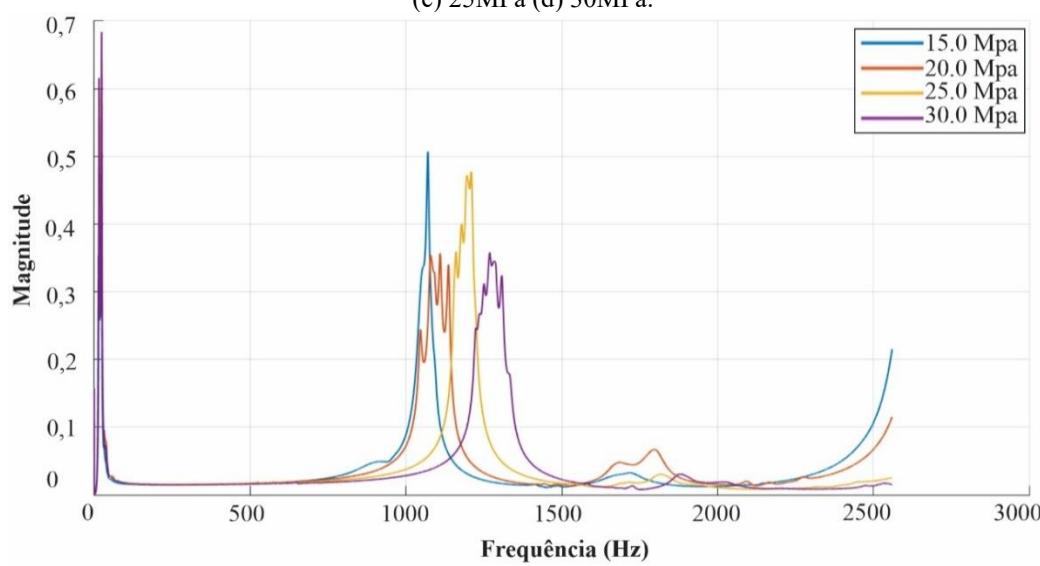
Nas amostras de 15 MPa (Figura 1a), observa-se a presença de dois picos bem definidos, um em torno de 1.000 Hz e outro próximo de 1.500 Hz, ambos com magnitudes elevadas, indicando menor rigidez e maior mobilidade dinâmica. À medida que a classe de resistência aumenta, as FRFs passam a apresentar picos deslocados para frequências mais altas e, de forma geral, com maior nitidez e menor dispersão espectral. Os concretos de 20 MPa (Figura 1b) e 25 MPa (Figura 1c) mostram esse deslocamento progressivo, com o primeiro pico permanecendo em faixas mais baixas, mas o pico principal migrando para regiões mais altas da faixa analisada. No concreto de 30 MPa (Figura 1d), essa tendência fica ainda mais evidente, com o pico dominante concentrado em região de frequência

mais elevada em comparação ao concreto de 15 MPa. Esse comportamento confirma a relação direta entre rigidez do material e aumento da resistência à compressão, refletida no deslocamento ascendente das frequências naturais.

Outro aspecto relevante identificado nas FRFs obtidas é a variação no número e na definição dos modos vibratórios ao longo da faixa analisada. O concreto de 15 MPa apresenta resposta mais “espalhada”, com múltiplas ondulações antes e depois dos picos principais, evidenciando maior flexibilidade e presença de vários modos de menor energia. Nas classes mais altas, especialmente 25 MPa e 30 MPa, as curvas tornam-se mais concentradas e limpas, com menor quantidade de picos secundários e modos distribuídos predominantemente em faixas superiores. Isso sugere que, além de aumentar a rigidez global, o incremento da resistência reduz a excitação de modos inferiores, resultando em comportamento vibracional mais rígido e espectros mais estáveis. Esses padrões corroboram a influência direta da resistência mecânica na dinâmica do concreto.

A sobreposição das curvas em um único gráfico, apresentada na Figura 2, permite visualizar de forma direta a separação espectral entre as classes de resistência. Observa-se um deslocamento progressivo dos picos principais para regiões de frequência mais elevadas à medida que a resistência aumenta, além de uma redução nas ondulações secundárias e maior definição dos picos nas classes superiores. Essa visualização integrada evidencia, de maneira clara, a correlação entre rigidez dinâmica e resistência à compressão, reforçando a consistência dos resultados obtidos.

FIGURA 2 - Gráficos de frequência por magnitude das respostas dinâmicas dos corpos de prova: (a) 15MPa (b) 20MPa (c) 25MPa (d) 30MPa.



Fonte: Do autor (2025)

A tendência observada neste estudo está alinhada com achados recentes da literatura em análise modal aplicada a materiais cimentícios. Pesquisas como a de Silva et al. (2025) demonstram que variações na composição do concreto, seja na matriz cimentícia, seja nos agregados ou aditivos, resultam em diferenças expressivas nas frequências naturais e no amortecimento. Esses estudos reforçam que o comportamento vibracional é altamente sensível à rigidez global da amostra, correspondendo ao que foi observado nos corpos de prova ensaiados neste trabalho.

Outros autores também destacam o potencial da análise modal para caracterização dinâmica de elementos estruturais de concreto. Beskyroun et al., (2020), por exemplo, aplicaram técnicas semelhantes para avaliar o comportamento dinâmico de um edifício de concreto armado, verificando que a identificação de frequências naturais é capaz de evidenciar diferenças relacionadas a variações geométricas, de rigidez ou presença de danos. Esses trabalhos corroboram o uso da resposta em frequência como ferramenta confiável para investigar o desempenho dinâmico de sistemas cimentícios.

A análise modal também tem sido utilizada para identificar alterações estruturais sutis, mesmo em elementos aparentemente íntegros. Estudos recentes, como os de Sartori et al. (2024), mostram que pequenas modificações no estado da estrutura, como fissuração inicial ou alterações nas condições de contorno, podem resultar em mudanças detectáveis nas frequências naturais ou nas formas modais. Esses achados reforçam a sensibilidade do método, o que também pode ser observado neste trabalho, onde diferenças modestas entre classes de resistência foram suficientes para gerar curvas de FRF bem distintas.

Os resultados obtidos demonstram o potencial da análise modal para diferenciar concretos com propriedades mecânicas distintas. A separação clara entre as classes, observada a partir das FRFs, sugere que os parâmetros dinâmicos podem servir como indicadores confiáveis da rigidez e, consequentemente, da resistência mecânica dos corpos de prova. Esse comportamento reforça a aplicabilidade dos ensaios dinâmicos como alternativa não destrutiva para caracterização do concreto.

Em síntese, os resultados mostram que:

- concretos de menor resistência apresentam frequências naturais mais baixas e maior número de modos na faixa analisada;
- concretos mais resistentes exibem resposta concentrada em frequências mais altas, refletindo maior rigidez;
- as curvas de FRF permitem distinção clara e visual entre as classes estudadas;
- a análise modal se mostra adequada e sensível para avaliar propriedades mecânicas do concreto sem ensaios destrutivos.

Esses resultados validam a eficácia da metodologia empregada e reforçam o potencial do estudo para aplicações futuras relacionadas tanto ao monitoramento estrutural quanto ao controle tecnológico de materiais cimentícios.

4 CONCLUSÃO

A análise modal experimental realizada neste estudo permitiu caracterizar de forma consistente o comportamento dinâmico de corpos de prova de concreto pertencentes a quatro classes distintas de resistência à compressão. A partir das FRF, foi possível identificar claramente as frequências naturais de cada amostra e compreender como essas respostas se modificam em função da rigidez e das propriedades mecânicas associadas à classe de resistência.

Os resultados demonstraram que concretos de menor resistência, como os de 15 MPa, apresentam frequências naturais situadas em faixas inferiores e maior sensibilidade a variações espectrais, refletindo rigidez estrutural reduzida. Com o aumento da resistência à compressão, observou-se um deslocamento sistemático dos picos principais para regiões de frequência mais elevadas, acompanhado de curvas de FRF mais estáveis e bem definidas, comportamento típico de materiais com maior rigidez dinâmica. Essa tendência foi verificada de maneira consistente entre as classes, evidenciando a capacidade da análise modal em distinguir concretos com diferentes níveis de resistência.

A metodologia adotada, englobando produção padronizada dos corpos de prova, cura controlada, excitação impulsiva e processamento criterioso das FRFs, mostrou-se eficiente e reproduzível, permitindo identificar diferenças sutis no comportamento vibracional das amostras. Além de ser um método não destrutivo, a análise modal mostrou-se uma abordagem sensível e tecnicamente adequada para avaliar propriedades relacionadas à rigidez do concreto, podendo complementar ensaios tradicionais utilizados em controle tecnológico.

Conclui-se, portanto, que a análise modal experimental é uma ferramenta robusta para caracterização dinâmica do concreto, possibilitando a diferenciação entre classes de resistência por meio da identificação de suas frequências naturais e da forma das suas respostas espectrais. Os resultados obtidos reforçam o potencial dessa técnica para aplicações em controle de qualidade, monitoramento estrutural e estudos avançados sobre desempenho dinâmico de materiais cimentícios.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Silvio Martins de et al. Análise do módulo de elasticidade estático e dinâmico do concreto de cimento Portland através de ensaios de compressão simples e de frequência ressonante. [S.I.], 2012.

BESKHYROUN, Sherif et al. Dynamic behaviour of a 13-story reinforced concrete building under ambient vibration, forced vibration, and earthquake excitation. *Journal of Building Engineering*, Amsterdam, v. 28, p. 101066, mar. 2020.

HU, Wei-Hua et al. Structural health monitoring of a prestressed concrete bridge based on statistical pattern recognition of continuous dynamic measurements over 14 years. *Sensors*, Basel, v. 18, n. 12, p. 4117, dez. 2018.

MAGALHÃES, M.; et al., Investigação experimental da resposta dinâmica de vigas caixão de aço-concreto para diferentes configurações de fabricação. *Tecnológica*, Recife (local usual da revista, caso queira ajustar), v. 33, n. 1, p. 1–?, jan./jun. 2024.

NEGRI, Robison; STEIL, Tatiane Luiza; NEGRI, Doglas. Ensaios não destrutivos de ultrassom e esclerometria para estimar a resistência à compressão do concreto. *Matéria*, Rio de Janeiro, v. 29, n. 2, p. e20240056, abr. 2024.

ROSA, Roberto Canedo; et al., Redução de vibração em uma viga bi-apoiada com neutralizador dinâmico de vibrações instalado. *Revista Tecnia*, São Paulo (ou local da revista, se desejar especificar), v. 1, n. 1, p. 133–148, 2016.

SARTORTI, Artur Lenz et al. Dynamic behavior of lightweight concrete solid slabs with EPS beads. *Matéria*, Rio de Janeiro, v. 29, p. e20240029, 2024.

SEGALIN, Leonardo Zampieri et al. Efeito do modo de resfriamento na resistência do concreto após exposição a altas temperaturas. *Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas*, Londrina, v. 41, n. 1, p. 13–20, jan./jun. 2020.

SILVA, Mikael Milam da; et al., Ensaios não destrutivos aplicados ao concreto reforçado com fibras de aço: correlações com as propriedades mecânicas. *Revista Principia*, João Pessoa (local usual da revista), v. 62, 2025.