XXXI ENCONTRO SOBRAC
SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA
Ouro Preto - MG 2026

Análise Dinâmica de Parede Alveolar de Concreto Impressa em 3D sob Cargas de Compressão

Moraes, G. P.[1]; Magalhaes, M. D. C.[2]; Silva, R. M.[3]

[1] Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil, giselemoraes107@gmail.com
[2] Departamento de Engenharia de Estruturas, UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil, max@dees.ufmg.br
[3] Departamento de Engenharia de Estruturas, UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil, roberto@dees.ufmg.br

Resumo

O principal objetivo deste artigo é examinar a variabilidade das funções FRFs (Funções de Resposta em Frequência), especificamente das frequências naturais de protótipo correspondente a uma parede de concreto impressa em 3D submetida a cargas axiais de compressão aplicadas estaticamente. Testes experimentais utilizando forças impulsivas, foram realizados de forma a se obter as funções de resposta em frequência. Um modelo numérico via Método dos Elementos Finitos foi desenvolvido. As frequências naturais obtidas experimentalmente foram comparadas com os valores obtidos pelo modelo numérico. Os testes experimentais foram realizados em seis etapas: a primeira etapa considerou o painel sem carga aplicada; já nas etapas subsequentes, cinco níveis de carregamento foram aplicados. Para cada etapa, testes dinâmicos foram realizados de forma a se obter as FRFs e frequências naturais. Pôde-se observar que com o aumento da carga de compressão, houve pequenas alterações nos valores das frequências naturais. A esbeltez e flexibilidade do painel podem ter tido influência direta nas propriedades dinâmicas do painel. Resultados importantes e significativos são apresentados com relação às FRFs, frequências naturais e cargas de compressão em painéis alveolares de concreto impressos em impressora 3D.

Palavras-chave: propriedades dinâmicas, painéis alveolares de concreto, impressão em 3D, elementos finitos.

Dynamic analysis of a hollow-core concrete panel printed in 3D under compression loads

Abstract

The main aim of this paper is to examine the variability of the Frequency Response Functions and corresponding natural frequencies of a 3D-printed hollow-core concrete panel to in-plane compression loads applied statically. First, experimental tests were performed using impulsive loads in order to obtain the frequency response functions. A numerical model using Finite Element Method (FEM) was also developed. The natural frequencies obtained by the model were compared to those obtained experimentally. Experimental tests were executed in six steps: in the first step no load was applied to the panel; subsequently, in-plane compressive loads were statically applied to a panel in five uniform steps. For each step, dynamic impact testing was performed. Peak amplitudes and natural frequencies were obtained. It was observed that the slenderness and the flexibility of the panel may have had some influence on its dynamic properties. Important results are presented for the effects of compression loads on FRF and natural frequencies of 3D-printed hollow-core concrete panels.

Keywords: dynamic properties, hollow-core concrete panels, 3D printing, finite elements.

1. Introdução

A indústria da construção civil, historicamente caracterizada por inovações conservadoras e forte dependência de métodos tradicionais, encontra na manufatura aditiva uma de suas maiores transformações tecnológicas das últimas décadas. A lógica da fabricação camada sobre camada migrou da escala de pequenos componentes para a de elementos estruturais, consolidando a Impressão 3D de Concreto como uma alternativa promissora. O processo baseia-se na extrusão contínua de um compósito cimentício, direcionada de forma automatizada por pórticos ou braços robóticos. Ao dispensar fôrmas, a tecnologia permite a execução de geometrias complexas, reduzindo o desperdício de material, o tempo de execução e a exposição a atividades de risco no canteiro de obras. A investigação do comportamento dinâmico de placas para cargas axiais atuantes no mesmo plano da placa tem sido estudada por vários pesquisadores [1-3]. Nestes trabalhos, imperfeições geométricas em placas retangulares sem tensões residuais foram consideradas. As frequências naturais foram medidas juntamente com as tensões e deflexões correspondentes. Observaram-se discrepâncias entre os resultados teóricos (modelos matemáticos) e experimentais. Demonstrou-se que com o crescimento de imperfeições geométricas iniciais devido ao aumento do carregamento, as tensões no plano da placa foram redistribuídas.

Em Magalhaes e Da Silva (2015), algumas propriedades de painéis compósitos de concreto e FRFs foram obtidas através de testes dinâmicos, estáticos (com aplicação de carga de compressão excêntrica), modelo analítico para placas com cargas excêntricas e modelo experimental. Um total de vinte painéis duplos usando placas de gesso ‘gypsum’ preenchidas com concreto foram utilizados para carregamento excêntrico (no plano dos painéis), ao invés de carga concêntrica, como no presente artigo. Foi apresentado modelo híbrido (modelo analítico utilizando modos de vibração obtidos numericamente). Os testes experimentais de impacto foram realizados no trabalho citado para se obter o amortecimento e frequências naturais para cada painel. Estas informações foram utilizadas em modelo analítico e numérico via FEM. Utilizando-se de um modelo híbrido, onde as frequências naturais e modos vibracionais obtidos experimentalmente foram introduzidos em equações analíticas de movimento para placas com curvaturas iniciais. Funções de Resposta em Frequência (FRFs) foram apresentadas comparando-se os valores obtidos experimentalmente com aqueles obtidos através dos modelos numéricos.

A solução exata para a análise de tensões devido vibração livre de placas retangulares (com duas bordas simplesmente apoiadas) foi apresentada por Kang e Shim (2004). Alternativamente, equações não lineares de vibrações de grande amplitude foram deduzidas para uma placa laminada em estado geral de tensões não uniformes [6], considerando os efeitos da deformação por cisalhamento transversal e da inércia rotacional. As funções de resposta em frequência mostraram-se sensíveis à amplitude de vibração e estado inicial de tensões. As frequências naturais lineares foram calculadas no trabalho citado considerando somente os termos lineares das equações diferenciais. O efeito da não-linearidade mostrou-se significativo em situações em que a tensão inicial era de compressão. Em outras palavras, a tensão inicial de compressão produziu um efeito de endurecimento (*hardening effect*) na razão de frequências (frequência não linear para frequência linear). Portanto, a razão de frequências (frequência não linear para frequência linear) aumentou à medida que as cargas de compressão aumentaram.

Em outra pesquisa bastante interessante, foi verificado pelos pesquisadores que a resposta de impacto audível de um componente trincado apresentou ruído diferente daquela correspondente a um componente não trincado. A frequência natural, a magnitude de pico e a taxa de amortecimento foram extraídas para cada um dos quatro modos dominantes considerados [7]. A instabilidade dinâmica de placas de compósito e o fenômeno da flambagem foram investigados quando cargas dinâmicas são aplicadas [8]. Observou-se que as regiões de instabilidade dependem da variação da carga no plano. As condições de contorno da placa influenciaram as regiões de instabilidade dinâmica.

A evolução da impressão em 3D de elementos estruturais tem sido marcada pelo desenvolvimento de equipamentos de grande porte, capazes de imprimir elementos estruturais em escala real [9]. Estudos em escala de painel completo ainda são escassos, restringindo-se a poucos trabalhos isolados sobre painéis de alvenaria ou painéis unidirecionais sob compressão axial [10-11]. De uma forma geral, tem-se observado que o aumento do intervalo de impressão de painéis em 3D leva à formação de juntas frias (*cold joints*), as quais atuam como planos de fraqueza que alteram a trajetória de propagação de fissuras, desviando-a precisamente no ponto da junta [12]. O uso de impressão 3D de elementos estruturais tem fomentado a industrialização do setor da construção civil ao viabilizar obras mais ágeis, sem fôrmas, com menor desperdício e menor dependência de mão de obra intensiva. Paralelamente, fornece parâmetros técnicos objetivos para engenheiros e projetistas na concepção de empreendimentos residenciais. Tem-se observado que ainda não existem trabalhos divulgados correlacionando as características e comportamento dinâmico de painéis de concreto alveolares (modelados em impressora 3D) com o aumento das tensões/cargas compressivas a que estão sujeitos.

2. Metodologia

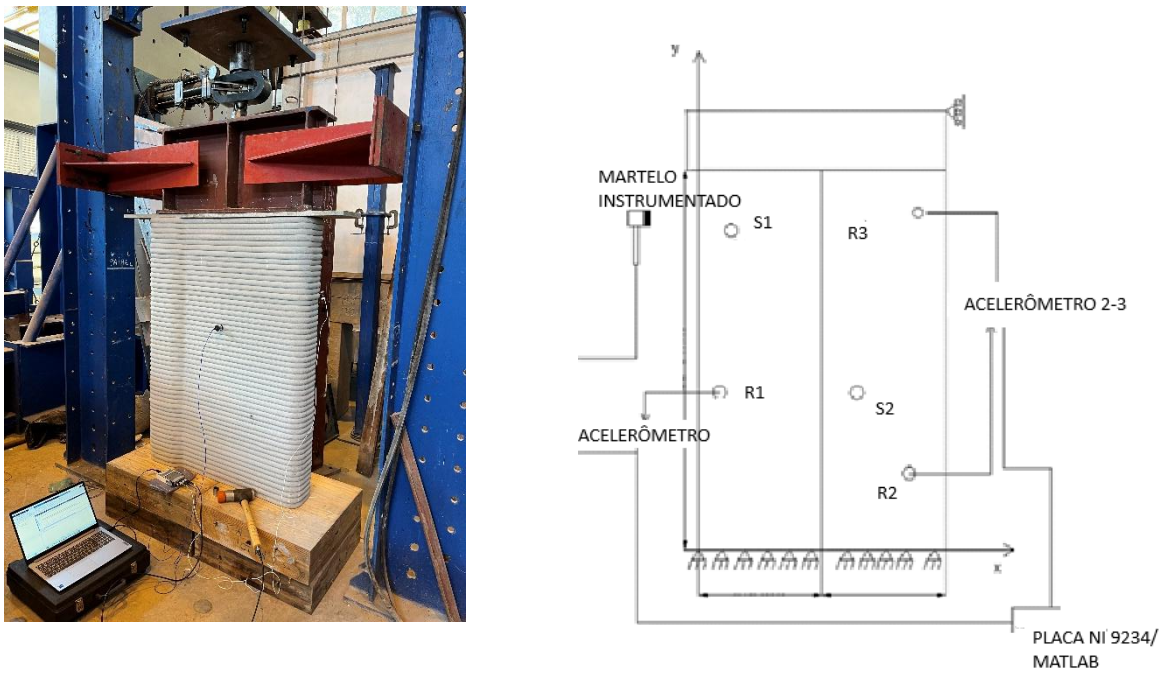
Neste trabalho, foram executados testes experimentais, conforme metodologia detalhada na Seção 2.1, e simulação numérica usando o Método dos Elementos Finitos (FEM do inglês *Finite Element Method*), conforme descrito na Seção 2.2. Por fim, os resultados obtidos em cada uma das metodologias são comparados a fim de se verificar se o modelo representa o comportamento real da estrutura.

2.1 Análise Dinâmica Experimental

Testes experimentais foram realizados em um painel de concreto impresso em 3D, de forma a se avaliar variações em termos das frequências naturais e funções de resposta em frequência. Os testes foram feitos utilizando ensaios de impacto. As Funções de Resposta em Frequência (FRF) foram medidas utilizando acelerômetros sísmicos. As frequências naturais obtidas através da identificação de picos existentes nas curvas FRF (*Peak-Picking Method*). Em seguida, os valores obtidos foram refinados utilizando-se o método LSRF (*Least Squares Rational Function*) [21].

Utilizou-se o software Matlab. A amostra de parede alveolar de concreto foi construída em impressora específica 3D e montada sobre pórtico de aço para ensaio dinâmico sobre aplicação de carga de compressão. (ver Figura 1). Considerou-se as bordas da parede perfeitamente rotuladas na parte superior e inferior. Os testes experimentais foram realizados para se obter as funções de resposta em frequência identificando as primeiras frequências naturais do protótipo. Os testes experimentais foram feitos em parede de concreto com as seguintes dimensões: 1.60m x 0,9m x 0,31m. Foi utilizado martelo instrumentado modelo PCB massa igual a 12.1 libras, faixa dinâmica de +/- 5.000 lbf e sensitividade igual a 1 mV/lbf. Da mesma forma, utilizou-se acelerômetros sísmicos PCB modelo 393B03, ICP, sensitividade 1V/g, e faixa operacional de frequência 0.5-2000Hz. Os acelerômetros foram calibrados utilizando calibrador de vibração portátil PCB modelo 699B02, para frequência de 159,2 Hz e aceleração de 1g. Utilizou-se placa NI 9234, com limite superior da banda passante aproximadamente plana corresponde a 0.45 da taxa de amostragem, ou seja, igual a 1800 Hz (filtro *antialiasing*). O filtro de entrada atenuou frequências muito baixas abaixo de aproximadamente 0.5 Hz.

A seção transversal da parede com suas dimensões é mostrada na Figura 2 abaixo. As propriedades do material consideradas neste estudo foram medidas [22]. Assim, a densidade específica obtida foi igual a 1.658 kg/m^3 e o Módulo de Elasticidade igual a 15.23 GPa. A espessura total da parede do protótipo é de aproximadamente 20 cm. A espessura de cada face de argamassa é de 5 cm e cavidade interna entre as faces igual a 10 cm. O coeficiente de Poisson considerado foi de 0.20.



a) b)

Figura 1: *Set-up* e montagem para realização dos testes experimentais. a) Foto da parede de concreto alveolar montado sobre pórtico para aplicação da carga de compressão e instrumentação para teste dinâmico; b) Representação esquemática mostrando os pontos de medição.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Pesquisa em Engenharia de Estruturas (LAEES). O painel de concreto foi testado na posição vertical em uma máquina de ensaios de compressão com capacidade de 900 kN. A condição de extremidade articulada foi fornecida em ambas as extremidades de apoio, e uma carga uniformemente distribuída ao longo da espessura do painel foi aplicada ao longo do eixo da parede. O alinhamento vertical da parede foi garantido por um prumo de face, e uma régua de nível foi utilizada para garantir o nivelamento adequado. O carregamento foi aumentado gradualmente em cinco estágios, até o valor máximo de 90 kN, ainda no regime elástico-linear. O carregamento foi aplicado no painel pressionando uma viga de aço rígida de seção em "I" na borda superior de usando um macaco hidráulico. Embora as etapas de carregamento tenham sido aplicadas manualmente, a taxa de carregamento pôde ser estimada e foi igual a aproximadamente 20 kN por minuto. Primeiro, as respostas ao impulso foram obtidas utilizando o procedimento de ensaio de impacto descrito a seguir. Ao impactar a amostra do painel com um martelo instrumentado, o analisador era acionado e começava a registrar o sinal de resposta no ponto de recepção, onde acelerômetros estavam fixados e conectados ao equipamento de aquisição (módulo de aquisição de dados da *National Instruments* modelo NI-9234). O sinal de entrada foi filtrado configurando convenientemente os parâmetros do canal.

O sinal s(t) medido no ponto de instalação de um acelerômetro é muitas vezes analisado no domínio da frequência utilizando-se- Transformadas de Fourier [14]. O objetivo principal assim é determinar as frequências naturais usando as funções de resposta em frequência (*FRFs*) definidas por

$$H_1(f) = \frac{S_{xy}(f)}{S_{xx}(f)} \tag{1-a}$$

e

$$H_2(f) = \frac{S_{yy}(f)}{S_{yx}(f)}, \tag{1-b}$$

em que $S_{xx}(f)$ e $S_{yy}(f)$ representam as funções de auto-espectro do sinal de entrada 'x' (função de densidade espectral) e saída 'y' respectivamente. $S_{xy}(f)$ representa a função densidade espectral cruzada entre o sinal de entrada 'x' e o sinal da resposta 'y'. $S_{xy}(f) = S^*_{yx}(f)$, onde o índice '*' representa 'complexo conjugado'.

Na prática, as funções de resposta em frequência podem ser denominadas em função da resposta considerada. Por exemplo, se o sinal de saída for aceleração, velocidade ou deslocamento, as FRFs são Acelerância (*A(f)*), Mobilidade ($Y(f)$) e Receptância ($R(f)$) respectivamente. As equações correspondentes são

$$A(f) = \frac{A_{yx}(f)}{S_{xx}(f)}, \tag{2}$$

$$Y(f) = \frac{V_{yx}(f)}{S_{xx}(f)} \tag{3}$$

e

$$R(f) = \frac{D_{yx}(f)}{S_{xx}(f)}, \tag{4}$$

em que $A_{yx}(f)$ é a densidade espectral cruzada entre aceleração e força. $V_{yx}(f)$ representa a densidade espectral cruzada entre velocidade e força. $D_{yx}(f)$ é a densidade espectral cruzada entre deslocamento e força.

Já a estimativa da função de coerência entre os sinais de entrada e saída, que é uma medida do 'grau de linearidade' entre os sinais, pode ser definida como

$$\gamma^2_{xy}(f) = \frac{|S_{xy}(f)|^2}{S_{xx}(f)\, S_{yy}(f)}. \tag{5}$$

A faixa de frequência utilizada nas medições foi 0-500 Hz. A taxa de amostragem considerada nas medições foi igual a 8 vezes a frequência máxima, ou seja, 4.000 amostras/s. A duração de cada medição foi de 5s. Incrementos de frequência foram iguais a 0.2 Hz. Foram realizadas análises espectrais considerando janelas do tipo 'Hanning' e 'Retangular' para a resposta (sinais de aceleração) e força (impulsos gerados pelo martelo instrumentado) respectivamente. Janelas para FFT com tamanho igual a 1024 linhas. Media aproximadamente igual a 20. A fonte de excitação foi impulsiva, utilizando-se martelo instrumentado com duração da medição igual a cinco segundos. As velocidades foram determinadas integrando-se as acelerações medidas em cada 'linha de frequência'. Os picos correspondentes às frequências naturais foram identificados em cada curva da função Densidade Espectral de Potência e/ou FRFs. Os ensaios foram repetidos somente duas vezes.

2.2 Simulação Numérica Usando o Método dos Elementos Finitos (FEM)

Simulações numéricas foram feitas com base em um modelo de Elementos Finitos usando o software *Abaqus* [15]. O painel foi modelado para duas condições de contorno distintas: painel simplesmente apoiado e bi-engastado, de forma a obtermos maiores informações para comparação com o modelo real, cujas condições de contorno podem ter sofrido alterações devido à presença do macaco hidráulico e carga de compressão. Para o modelo numérico do painel, nenhuma carga de compressão foi considerada. Figuras 2a e 2b mostram a seção transversal o painel modelado e as condições de contorno aplicadas às duas extremidades do painel (rótulas fixas).

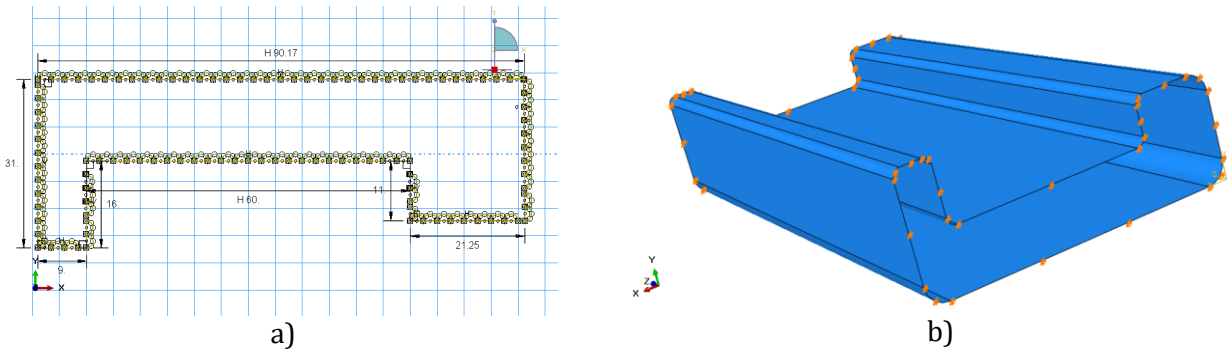


Figura 2: Modelo geométrico. a) Seção transversal do painel; b) Condições de contorno das duas extremidades: rótulas fixas.

Utilizou-se elementos de casca (‘Shell’) para o modelo (Figura 3) e o material considerado foi isotrópico como uma primeira aproximação. Como mencionado anteriormente, as seguintes propriedades do material foram medidas e consideradas neste estudo: densidade igual a 1.658 kg/m^3 e Módulo de Elasticidade igual a 15.23 GPa [22]. Os autores estão cientes que a compressão pode modificar o estado de micro-fissuração de maneira direcional, ou seja, pode modificar o módulo de elasticidade para diferentes direções e consequentemente não reproduzir de forma adequada o aumento ou diminuição das frequências naturais. Para o modelo numérico em 3D, a faixa de frequência considerada foi 0-300 Hz, de forma a otimizar o tempo de processamento computacional, uma vez que este tempo é proporcional ao intervalo de frequência considerado. A convergência foi verificada simplesmente comparando as variações das frequências naturais com a diminuição das dimensões da malha. Pôde-se observar que o tamanho de malha considerado ideal foi equivalente a aproximadamente 1/6 da metade do comprimento de onda para frequência limite de 300 Hz. Assim, foi considerada uma malha de quadriláteros (elementos finitos tipo ‘Shell’) com no máximo 5 cm de dimensão. As interfaces impressas não foram consideradas no modelo numérico.

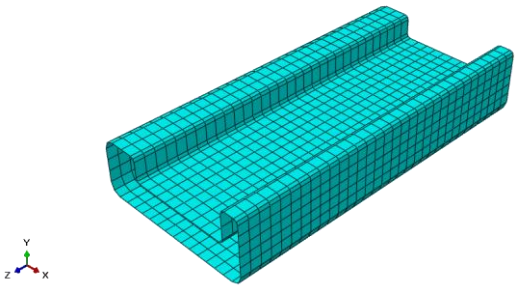
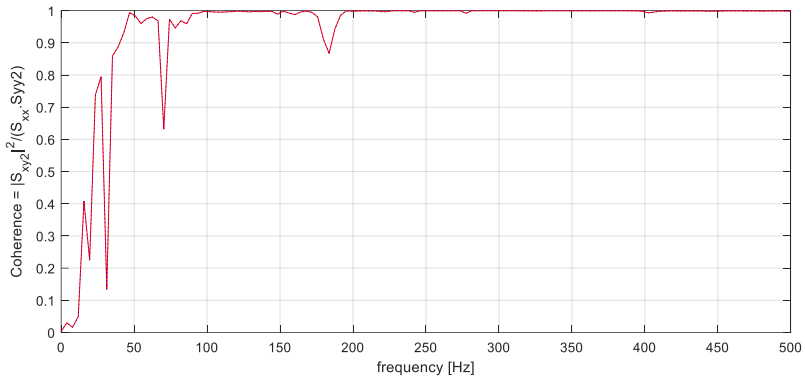


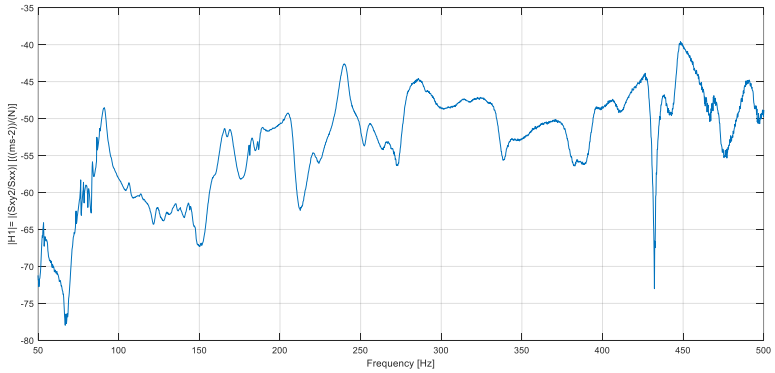
Figura 3: Malha considerada para o modelo: elemento de casca (*Abaqus*, Shell S4R).

3. Resultados e discussões

Neste trabalho foi realizada uma análise dinâmica de painel de concreto sujeito às cargas estáticas de compressão. As frequências naturais sofreram pequenas alterações, provavelmente devido à mudança na rigidez efetiva da parede devido à aplicação de cargas de compressão em cinco etapas. Provavelmente as condições de contorno da parede podem ter sofrido também pequenas alterações durante o teste experimental. A Figura 4 abaixo apresenta um dos resultados para a função de resposta em frequência H_1 e função de coerência correspondente [11-13] obtidas experimentalmente para o painel sem carregamento.



a)



b)

Figura 4: Resultado de teste experimental para o painel alveolar de concreto sem carregamento. a) Função de Coerência; b) Amplitude da Função de resposta em frequência H_1.

Figura 5 abaixo apresenta as funções FRFs obtidas experimentalmente através de ensaio dinâmico para resposta impulsiva da parede alveolar. O ensaio foi realizado para 5 níveis de carga de compressão aplicadas axialmente ao eixo do painel. As curvas apresentam uma tendência crescente no valor médio da resposta à medida que a faixa de frequência aumenta. No entanto, não é possível observar diretamente pela Figura um padrão definido.

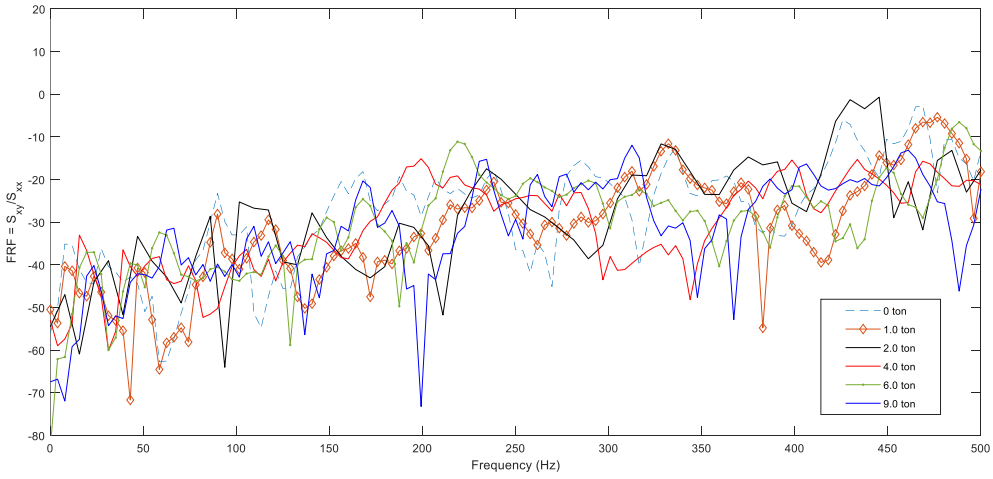


Figura 5: Variação das funções FRFs (Mobilidade) com a aplicação de cargas de compressão.

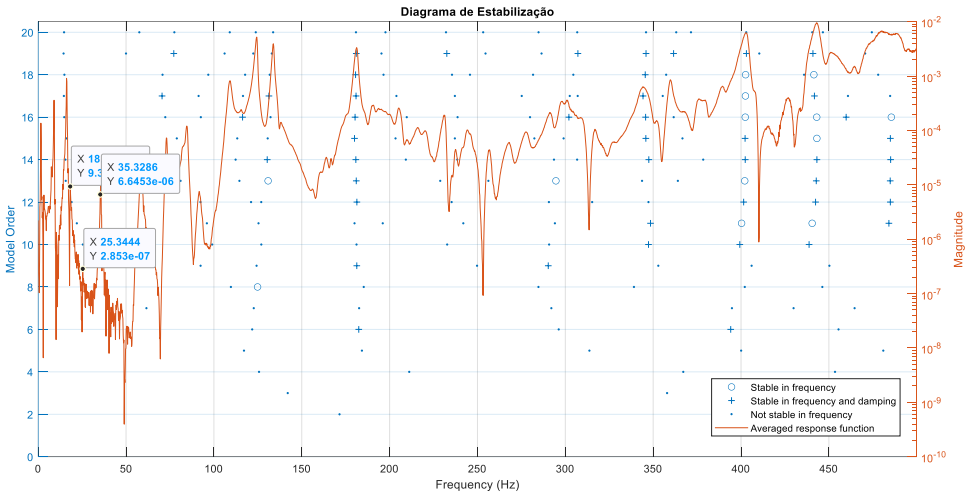


Figura 6: Identificação das frequências naturais usando diagrama de estabilização.

Tabela 1: Frequências naturais identificadas para diferentes estágios de carregamento: Sem carga (config. 0); Carga de 10 kN (config. 1); Carga de 20 kN (config.2); Carga de 40 kN (config.3); Carga de 60 kN (config. 4); Carga de 90 kN (config.5).

F_n	Config.0 (Hz)	Config.1 (Hz)	Config.2 (Hz)	Config.3 (Hz)	Config.4 (Hz)	Config.5 (Hz)
1	16.3	16.3	16.1	15.63	16.3	16.1
2	25.3	23.44	24.1	23.6	24.0	24.9
3	35.3	35.3	35.4	35.7	35.5	36.1
4	59.1	59.3	58.1	58.7	58.9	58.7
5	63.5	63.6	63.4	62.9	63.5	65.8
6	72.8	72.9	72.8	71.5	72.9	72.9
7	80.1	80.1	80.3	81.9	81.9	82.2
8	84.9	85.1	84.5	84.1	84.2	84.7
9	92.5	92.1	92.0	91.9	91.7	91.8
10	108.3	108.5	108.7	109.3	109.6	106.2

A Figura 7 abaixo apresenta a variação das frequências naturais correspondentes aos primeiros 10 modos de vibração do painel de concreto obtidos experimentalmente e apresentados na Tabela 1. Pode-se observar que os primeiros modos de vibração apresentam uma variação muito pequena para todos os estágios de carregamento. (<= 4%). A partir do sexto modo de vibração, pode-se observar variações irrelevantes para carregamento de 20 kN. A partir deste valor de carregamento, observa-se também uma certa constância, mesmo para os modos mais elevados. Acredita-se que há uma certa ‘acomodação’ das

camadas de concreto e possivelmente um ‘fechamento’ das microfissuras pré-existentes indicando essa variação, ou seja, um pequeno aumento na rigidez dinâmica efetiva da parede.

A Figura 8 abaixo apresenta a configuração dos dois primeiros modos de vibração da parede usando modelo numérico (FEM). Pode-se observar no Quadro 1 abaixo que na comparação dos resultados numérico (parede bi-apoiada) e experimental, considerando o primeiro e segundo modo de vibração, foram encontradas variações máximas de 9% (primeiro modo) e 3% (segundo modo). Somente foi possível confirmar a correspondência entre modos numéricos e experimentais para o primeiro e segundo modo de vibração. Será necessário ajustes no modelo numérico e ensaios experimentais adicionais para se fazer com mais precisão uma correlação adequada entre os modos numéricos e experimentais de ordem superior. De fato, para frequências mais altas, há de se considerar com maior detalhamento a influência das condições de contorno, heterogeneidade dos materiais, entre outros fatores, já que quanto menor o comprimento de onda, maior a influência destes fatores.

Acredita-se que ajustes serão necessários no modelo numérico, de forma a torná-lo mais representativo.

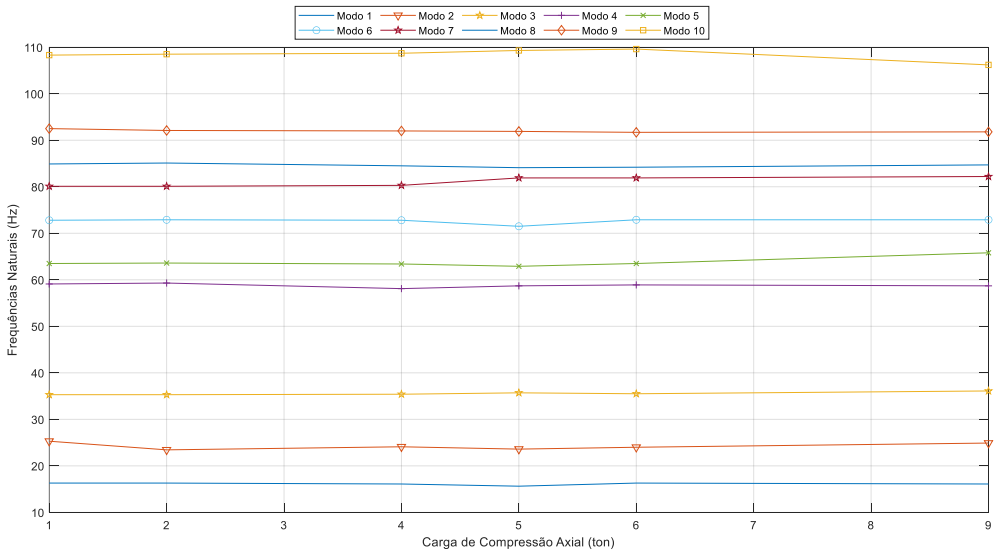


Figura 7: Variação das frequências naturais de cada modo de vibração com a aplicação de cargas de compressão no painel.

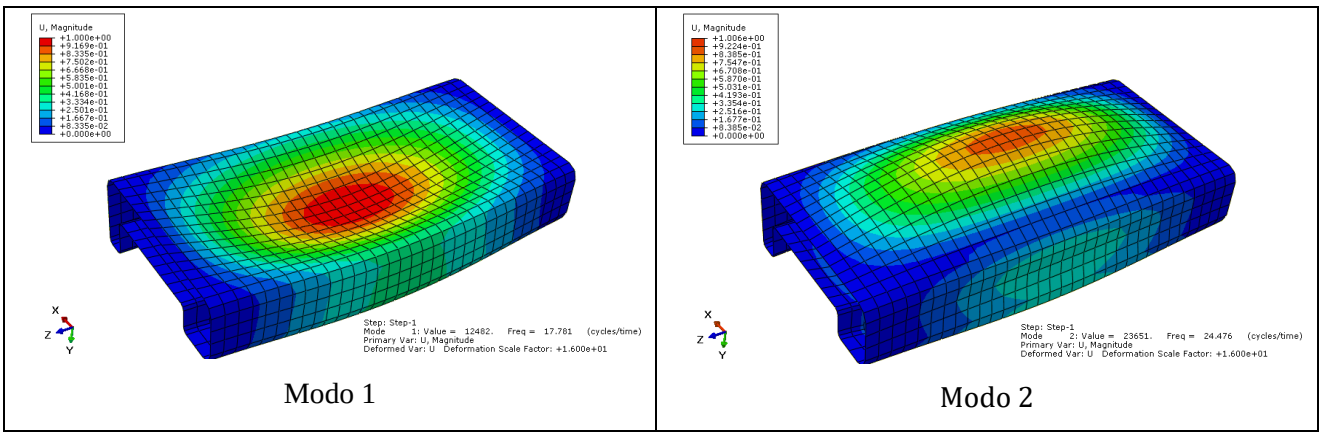


Figura 8: Modos de Vibração da Parede Alveolar bi-apoiada.

Quadro 1: Frequências naturais: Comparação dos valores experimentais e numéricos

Modos de vibração	Ensaio Experimenal (Hz)	Modelo Numérico (FEM) Apoio Rotulado (Hz)	Modelo Numérico (FEM) Apoio bi-engastado (Hz)
1	16.3	17.8	18.7
2	25.3	24.5	25.2

4. Conclusões

Modos mais altos geralmente exibem maiores diferenças e discrepâncias em seus valores comparando modelo numérico e valores medidos, uma vez que são mais sensíveis às deformações locais. No entanto, neste estudo, pôde-se observar uma forte correlação entre os valores das frequências medidas e os valores obtidos pelo modelo numérico (FEM) somente para os dois primeiros modos de vibração. Uma investigação mais criteriosa deve ser feita com relação à correspondência entre os modos superiores e frequências naturais obtidas experimentalmente e via modelo numérico. Assim, o modelo numérico atual não reproduziu satisfatoriamente a maior parte das frequências medidas. Não é possível afirmar categoricamente que há relação entre os efeitos de fissuração e rigidez modal efetiva. Nesta primeira etapa deste estudo, ou seja, para aplicação de baixas cargas de compressão, algumas frequências naturais tiveram um aumento de no máximo 4% com o carregamento. Uma hipótese passível de se considerar é que este fato ocorreu devido ao fechamento dos poros do concreto e/ou micro-fissuras, aumentando consequentemente o contato entre as camadas de concreto. Outra possível razão, pode ser atribuída às condições reais de apoio, por exemplo, ligações *semi-rígidas* modeladas como rígidas [16-18], mudanças nas condições de contato inclusive considerando as interfaces impressas. Já para outros modos de vibração, houve redução no valor das frequências naturais, possivelmente devido alteração das condições de contorno.

Em suma, a próxima etapa desta pesquisa deve considerar não somente a verificação da repetibilidade dos resultados experimentais, mas também considerar modelos numéricos mais detalhados e representativos para modos de vibração superiores. Desta forma, será possível compará-los com os dados experimentais para frequências superiores. Pretende-se considerar por exemplo, modelos constitutivos anisotrópicos de forma a representar com mais precisão a evolução da rigidez em função do estado de tensão e fissuração.

Referências

1. MAMOU-MANI A., LE MOYNE S., FRELAT J., BESNAINOU C., OLLIVIER F. Effect of prestresses on natural frequencies of a buckled wooden plate: a numerical and experimental investigation, *Proceedings of the International Conference on Noise and Vibration Engineering (ISMA)*, 2007

2. ILANKO S., TILLMAN S.C. The natural frequencies of in-plane stressed rectangular plates, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 98, p. 25–34, 1985.

3. KIELB R.E., HAN L.S., Vibration and buckling of rectangular plates under in-plane hydrostatic loading, *Journal of Sound and Vibration*, 70, p. 543–555, 1980.

4. MAGALHAES, M. D. C. and DA SILVA, R. M. Dynamic Properties of Concrete Composite Panels under Eccentric Compression Loading Tests. *Archives of Acoustics*, Vol. 40, No. 2, p. 169–181, 2015

5. KANG J.H., SHIM H.J. Exact solutions for the free vibrations of rectangular plates having in-plane moments acting on two opposite simply-supported edges, *Journal of Sound and Vibration*, p. 933–948, 2004.

6. CHEN C.S., CHENG W.S., CHIEN R.D., DONG J.L. Large amplitude vibration of an initially stressed ply laminated plates. *Applied Acoustics*, v. 63. p. 939-956, 2002.

7. HILMERSON C., HESS D.P., DALLAS W., OSTAPENKO S., Crack detection on single-crystalline silicon wafers using impact testing, *Applied Acoustics*, p. 755–760, 2008.

8. RAMACHANDRA L.S., PANDA S.K., Dynamic instability of composite plates subjected to non-uniform in-plane loads, *Journal of Sound and Vibration*, p. 53–65, 2012.

9. BUSWELL, R. A. LEAL DE SILVA, W. R., JONES, S. Z., DIRRENBERGER, J. 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. *Cement and Concrete Research*, v. 112, p. 37-49, 2018.

10. COELHO, J., PACHECO, J. N., MARQUES, A. I., GOMES, J. P. Potencial de betão produzido por impressão 3D para aplicações estruturais: ensaio de paredes. *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*, 2024.

11. SILVEIRA, M. V. G., WAGNER, J. S., KHANVERDI, M., DAS, S. Structural performance of large-scale 3D-printed walls subjected to axial compression load. *Canadian Journal of Civil Engineering*, v. 51, n. 8, p. 919-933, 2024.

12. GLOTZ, T.; RASEHORN, I. J.; PETRYNA, Y. Mechanical behavior of hardened printed concrete and the effect of cold joints: An experimental investigation. *Materials*, v. 17, n. 24, p. 6304, 2024.

13. FAHY, F. J. *Sound and structural vibration.* 1nd Ed. Academic Press, UK, 1985.

14. CREMER L., HECKL M., UNGAR E.E. *Structure-borne Sound.* 2nd Ed. Berlin: Springer-Verlag, 1988.

15. ABAQUS/CAE – *User's Manual v6.7*.

16. Blevins R.D. *Formulas for natural frequency and mode shape*, 1979

17. CHIN-TEH.S., WHITNEY, J. M. Theory for the dynamic response of laminated plates. *AIAA Journal*, v. 11(2). p. 178, 2012.

18. SANDOVAL C., ROCA P. Study of the influence of different parameters on the buckling behaviour of masonry panels, *Construction and Building Materials,* 35, 1, p. 888–899, 2012.

19. HE, L.; LI, H.; CHOW, W. T.; ZENG, B.; QIAN, Y. Increasing the interlayer strength of 3D printed concrete with tooth-like interface: an experimental and theoretical investigation. *Materials & Design*, v. 223, p. 1-17, 2022.

20. MAROSZEK, M.; HAGER, I.; MRÓZ, K.; SITARZ, M.; HEBDA, M. Anisotropy of Mechanical Properties of 3D-Printed Materials: Influence of Application Time of Subsequent Layers. *Materials*, v. 18, n. 16, p. 3845-3870, 2025.

21. RICHARDSON, M. H; FORMENT, D. L. Parameter Estimation From Frequency Response Measurements Using Rational Fraction Polynomials. *Proceeding of the First International Modal Analysis Conference* (IMAC I), Orlando, Florida, U.S.A., p. 167-181, 1982.

22. MORAES, G. P. Desempenho De Painéis Alveolares De Concreto Impressas Em 3d Em Escala Real: Avaliação Experimental Frente À ABNT NBR 15575-4:2021 *Projeto De Dissertação*, 2026