

AVALIAÇÃO DO ACRÉSCIMO DE MASSA EM UM PÓRTICO METÁLICO, ATRAVÉS DO ESPECTRO DE FREQUENCIAS

Maíra Rolla Campos
Tharley Castro de Lima
Rodrigo Vieira Fonseca
Claudio José Martins

mairarc7@gmail.com

tharleycastro@gmail.com

rodrigovf2102@gmail.com

cjmartins@civil.cefetmg.br

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Av. Amazonas, 7675 - Nova Gameleira, Belo Horizonte, 30510-000, Minas Gerais, Brazil

Resumo. A investigação estrutural não-destrutiva baseada na Análise Modal Operacional consiste em uma técnica de determinação dos parâmetros modais (frequências naturais, modos de vibração e taxas de amortecimento) a partir do registro das acelerações em pontos localizados sobre uma estrutura. Essa técnica considera apenas as ações de operação como fonte de excitação, evitando, dessa forma, a interrupção ou paralisação da estrutura. Essa peculiaridade torna a técnica bastante atrativa na análise de estruturas civis. Este estudo tem por finalidade a obtenção dos parâmetros modais de um pórtico metálico localizado no laboratório de estruturas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), e, a partir desses, verificar alterações nas matrizes de densidade espectrais devido ao acréscimo de massa. Para atingir tal objetivo, foram realizados ensaios de campo no pórtico para obtenção dos dados dinâmicos com o auxílio de acelerômetros e uma modelagem computacional da estrutura, utilizando o método dos elementos finitos. Os dados obtidos em ambas atividades foram processados, utilizando a técnica de processamento de sinais e, posteriormente, analisados. Os resultados obtidos no experimento apresentaram diminuição da frequência natural, à medida que o acréscimo de massa aumentou, o que respeita integralmente a equação da frequência natural e, conseqüentemente, permite inferir que o resultado do estudo foi satisfatório. Além disso, os erros médios das frequências naturais medidos nos ensaios de campo, quando comparados ao modelo numérico, foram inferiores a 4,0%, o que indica que o modelo foi calibrado corretamente.

Palavras-chaves: Análise modal operacional, Calibração de modelo numérico, Densidades espectrais, Vibrações.

1 Introdução

Os elementos estruturais de aço possuem algumas características bastante valorizadas na construção civil, como, por exemplo, elevada resistência mecânica, boa ductilidade e rapidez de montagem em campo [1].

Na engenharia, os problemas estruturais tem suas causas atreladas a dois fatores principais: falhas do material e instabilidade estrutural. O primeiro problema pode ser facilmente previsto, considerando as condições de equilíbrio da estrutura, uma vez que a escolha do material depende de suas propriedades mecânicas. Já a instabilidade estrutural requer uma maior atenção, pois está relacionada à deformação da estrutura, dependendo intrinsecamente da geometria, das dimensões e de suas vinculações [2].

Para avaliar as condições estruturais de determinado objeto já construído, podem ser utilizados dados empíricos extraídos da própria estrutura. Dentre esses métodos de avaliação, existem os métodos classificados como não-destrutivos. A grande maioria desses métodos conseguem verificar pequenas porções da estrutura, uma vez que apresentam elevados custos para a medição de grandes áreas. Poucos métodos realizam a análise global do conjunto formado pela super, meso e infraestrutura. Dentre estes, os métodos baseados nas vibrações para detecção de danos têm alcançado posições de destaque, pois conseguem realizar medições em estruturas de grandes dimensões [3].

O uso de técnicas experimentais, baseadas no conhecimento das respostas dinâmicas de uma estrutura, visando a caracterização estrutural, monitoramento e identificação de danos, tem apresentado grandes avanços técnicos. Nas últimas décadas, os princípios de identificação do sistema e da estimação dos parâmetros modais de uma estrutura, forneceram novas ferramentas para auxiliar na compreensão e no controle das vibrações [4]. A análise operacional trata-se de um método que visa a obtenção dos parâmetros modais de um elemento (e consequentemente sua rigidez e massa) com base no comportamento dinâmico. Este tipo de análise vem sendo utilizada em larga escala tanto para auxiliar na solução de problemas envolvendo a dinâmica das estruturas, quanto em sistemas de monitoramento da integridade estrutural e detecção de danos [5].

Tendo em vista os conceitos abordados acima, o presente estudo tem como objetivo verificar a partir da leitura de vibrações o acréscimo de massa em um pórtico de aço localizado no laboratório de estruturas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET/MG) e o impacto gerado na matriz de densidade espectral, verificando, assim, a sensibilidade e eficiência do método.

Para atingir esse fim, foram avaliados os parâmetros modais (frequências naturais e amortecimentos) de um pórtico metálico considerando acréscimos de massa correspondentes a 6,69%, 13,37%, 20,06% e 26,74% da massa do pórtico (equivalentes a adição de 1, 2, 3 e 4 blocos de concreto com pesos médios de 10,0 kg, respectivamente). Foram comparados os resultados considerando duas fontes distintas de vibrações aleatórias: vibração impulsiva (impactos aleatórios com martelo de borracha) e de base (vibração que chega à base do pórtico devido fontes externas). Além disso, foi elaborado um modelo numérico baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF) para simular as alterações das frequências naturais e comparar com os valores obtidos experimentalmente.

2 Descrição dos ensaios

2.1 Objeto de estudo

O objeto de estudo escolhido para este trabalho trata-se de um pórtico metálico localizado no laboratório de estruturas do PPGEC do CEFET-MG. O pórtico é formado por elementos estruturais de aço, classificados pela *American Society for Testing and Material* (ASTM), como ASTM A36 (o Quadro 1 descreve as propriedades mecânicas do material). O pórtico é constituído por uma viga, dois pilares e dois elementos de apoio que sustentam

os pilares (denominados de barras inclinadas), sendo todos elementos ligados por solda entre si, conforme a Fig. 1 ilustra. Cabe destacar que durante a realização de todo o experimento o pórtico foi posicionado simplesmente apoiado no solo, sem nenhum elemento de fundação.



Figura 1. Pórtico metálico localizado no laboratório de estruturas do PPGECC do CEFET/MG

Quadro 1. Propriedades mecânicas dos materiais que compõe o pórtico

Aço	Módulo Elasticidade (GPa)	Coefficiente de Poisson	Resistência característica (MPa)	Peso específico (kN/m ³)	Resistência última (MPa)
ASTM A36	200	0.3	250	75	400

Todas as seções transversais desses elementos são classificados como perfis I laminados de abas inclinadas. A Fig. 2 representa a seção transversal, na qual X e Y representam os eixos horizontal e vertical, respectivamente, d representa a altura da seção, b_f e t_f representam, respectivamente a largura e espessura da mesa e, t_w representa a espessura da alma da seção. A Tabela 1 expõe os valores de espessura das seções transversais de cada perfil.

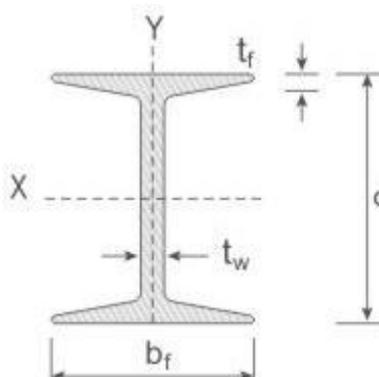


Figura 2. Seção transversal de um perfil I laminado

Tabela 1. Espessura dos perfis que formam o pórtico

Elementos	Espessura da Alma - t_w (mm)	Espessuras médias da Mesa - t_f (mm)	Largura da Seção - b_f (mm)	Altura da Seção - d (mm)
Viga	10,0	6,3	100	200
Pilares	10,0	6,3	100	200
Barras inclinadas	8,0	7,0	90	160

2.2 Instrumentação utilizada

Por questões de disponibilidade de equipamentos, foi utilizado apenas um conjunto de sistema de aquisição e acelerômetros triaxiais fabricados pela SYSCOM *Instruments*. O SYSCOM MR2002 é um equipamento dotado de um robusto sistema responsável pela aquisição e armazenagem dos sinais. Já o SYSCOM MS 2005+ trata-se de um conjunto de três acelerômetros dispostos de forma ortogonal. Esses dois equipamentos são integrados por meio da interface do software MR *communication*. A Fig.3 apresenta os equipamentos utilizados.



Figura 3. Equipamentos: (a) SYSCOM MR2002; (b) SYSCOM MR2005+; (c) interface do MR communication

2.3 Localização dos aparelhos na estrutura

Encontrar a localização ideal de um aparelho trata-se de um problema de otimização. Por isso, uma das formas para a localização do aparelho na estrutura é baseada no conhecimento prévio (a partir de simulações numéricas ou baseado em experiências anteriores) dos modos de vibração, o que evita o posicionamento dos sensores em nós modais, ou seja, pontos da estruturas que não irão vibrar em relação a determinados modos de vibração [6].

Com relação ao posicionamento dos acelerômetros na estrutura, foram definidos dois pontos. O primeiro ensaio foi realizado com os acelerômetros posicionados em uma das extremidades da viga da estrutura, enquanto que, no segundo ensaio, os sensores foram alocados no meio da viga do pórtico, conforme mostra a Fig.4. O primeiro ensaio foi denominado “P1” e o segundo “P2”.



Figura 4. Localização dos acelerômetros em cada ensaio

2.4 Tipos de excitação impostos à estrutura

Foram consideradas duas fontes de excitação distintas no pórtico. Em um primeiro momento, a estrutura foi submetida às vibrações de base (VB), isto é, as vibrações que o próprio ambiente produz (ondas pequenas geradas por veículos trafegando em vias próximas, por raízes de árvores movimentando devido ao vento, dentre outras), enquanto que, num segundo momento o pórtico foi submetido a vibrações impulsivas (VI), induzidas por meio perturbações causadas por pequenas marteladas aleatórias ao longo da estrutura, geradas com o auxílio de um martelo de borracha. Os ensaios considerando as vibrações de base foram representados pela letra “B”, ao passo que os ensaios de vibração impulsivas foram representados pela letra “I”.

2.5 Quantidade e local da massa acrescentada

A posição definida para o acréscimo de massa foi em uma das extremidades do pórtico, em cima de um dos pilares. O que justifica essa escolha é o fato de que esses acréscimos de massas adicionais geram menos impacto na matriz de densidades espectrais do pórtico, pois trata-se de uma localização que tem menor influência sobre as propriedades dinâmicas quando comparado a massas acrescentados no meio da viga, por exemplo.

Foi estabelecido que seriam acrescentados 4 blocos de concreto gradualmente no pórtico, nas dimensões de 14x19x29cm, pesando em média 10,0 kg cada, conforme a Fig.5. Dessa forma, os ensaios realizados considerando apenas o peso próprio do pórtico foram representados por “0”, os ensaios considerando um bloco no pórtico foram representados pelo número “1” e, assim por diante, até os ensaios com os 4 blocos acrescentados no pórtico que foram representados pelo número “4”.



Figura 5. Blocos de concreto utilizados no ensaio

2.6 Duração dos ensaios e taxa de amostragem

A taxa de amostragem define os limites máximos da banda de frequência que podem ser utilizadas para a análise de um sinal. Este parâmetro mede o número de amostra de dados adquiridos por unidade de tempo. Assim sendo, se uma amostra de dados foi executada a uma taxa de f_s , o limite superior da banda de frequência pode ser dado pela frequência de Nyquist, isto é $(f_s/2)$ e todas as informações sobre a estrutura além desta frequência não podem ser determinadas [6].

Cada ensaio foi realizado durante 4 minutos e 15 segundos (255 segundos) com os acelerômetros calibrados com uma taxa de aquisição de dados de 300Hz, o que permite captar frequências de até 150Hz de acordo com a frequência de Nyquist. A sequência de execução dos ensaios, considerando as letras e o número que representavam cada ensaio foi: VB0, VI0, VB1, VII, VB2, VI2, VB3, VI3, VB4 e VI4. Como cada ensaio foi executado considerando dois pontos da estrutura (P1 e P2), ao todo foram realizados 20 ensaios diferentes, conforme a Fig. 6 ilustra.

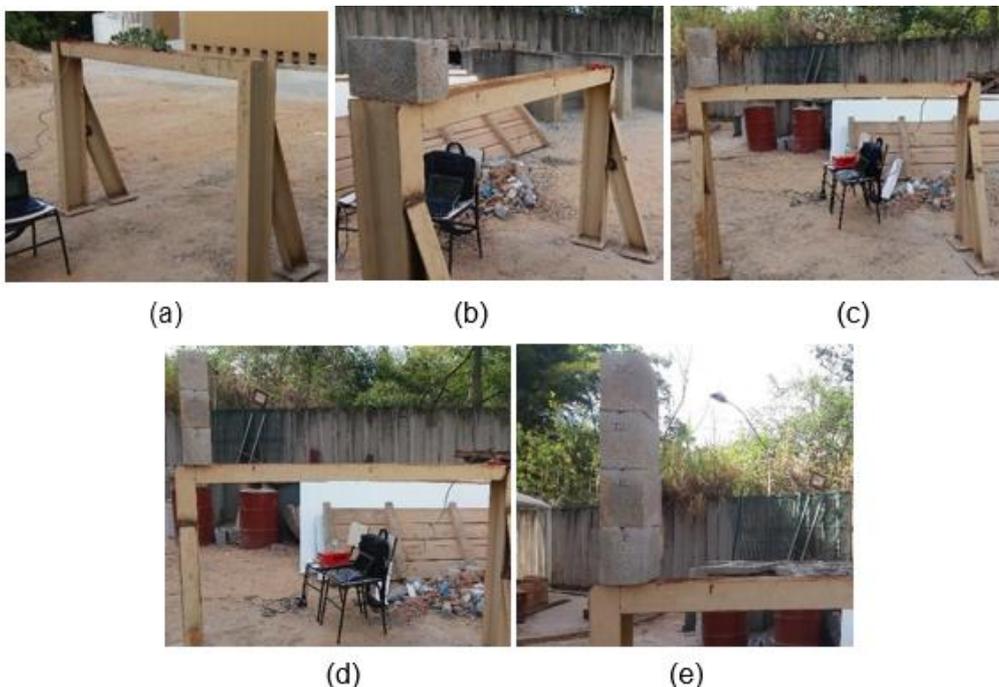


Figura 6. Ensaios no ponto P1: (a) ensaio VB0/VI0; (b) ensaio VB1/VII; (c) ensaio VB2/VI2; (d) ensaio VB3/VI3; (e) ensaio VB4/VI4

O processamento dos dados coletados ocorreu com o auxílio de software de programação, desenvolvido de maneira própria no CEFET-MG, que utiliza a linguagem Fortran. Durante o pré-processamento dos dados foram executadas a decimação do sinal, a remoção de tendências e a normalização do sinal, proporcionando assim melhorias na sua qualidade.

A etapa seguinte foi responsável pelo processamento dos sinais propriamente dito, visando a formação da matriz de densidade espectral levando em conta o teorema da amostragem, obtendo-se as matrizes de correlações e densidade espectral pelo método de Welch.

Posteriormente, ocorreu a decomposição em valores singulares da matriz de densidade espectral. Esta etapa foi responsável pela obtenção dos parâmetros modais. A obtenção dos valores singulares ocorreu através da condensação dos dados, que rotaciona, translada e normaliza os dados dispostos em relação aos eixos cartesianos, redirecionando estes dados na direção do espaço vetorial formado pelos modos de vibração. E, por último, foram selecionados os valores singulares mais representativos.

3 Elaboração do modelo numérico

Com o intuito de verificação dos dados coletados durante o ensaio, foi realizado um modelo numérico da estrutura baseado no método dos elementos finitos (MEF), utilizando o software SAP 2000. Foram executadas as simulações dos ensaios de campo no modelo, acrescentando massas pontuais nos locais onde foram posicionados os blocos de concreto sobre o pórtico. O Quadro 2 apresenta os parâmetros utilizados para a elaboração do modelo enquanto a Fig.7 ilustra o modelo computacional do pórtico.

Inicialmente, para as vinculações do modelo com a base, isto é, o solo, foram consideradas rigidez nula à rotação e infinita à translação, configurando, dessa maneira um apoio simples. Em seguida foi realizada a calibração do modelo com relação ao primeiro modo de vibração. Dessa forma, as rigidezes relacionadas à translação foram calibradas em 10.000 kN/m. Já as rigidezes relacionadas à rotação foram calibradas em 50 kNm/rad.

Quadro 2. Especificações do modelo numérico

Aço		ASTM A36
Altura do pórtico (m)		1,38
Largura do pórtico (m)		1,95
Peso do pórtico (kg)		149,78
Espessura do perfil (mm)	Mesa das barras inclinadas	7,0
	Alma das barras inclinadas	8,0
	Mesa dos pilares e das vigas	6,3
	Alma dos pilares e das vigas	10,0
Altura da seção (mm)		200,0
Largura da seção (mm)		100,0
Elementos quadrangulares de casca fina modelando os perfis		1466
Elementos de ligação (vinculações)		8
Graus de liberdade		9834

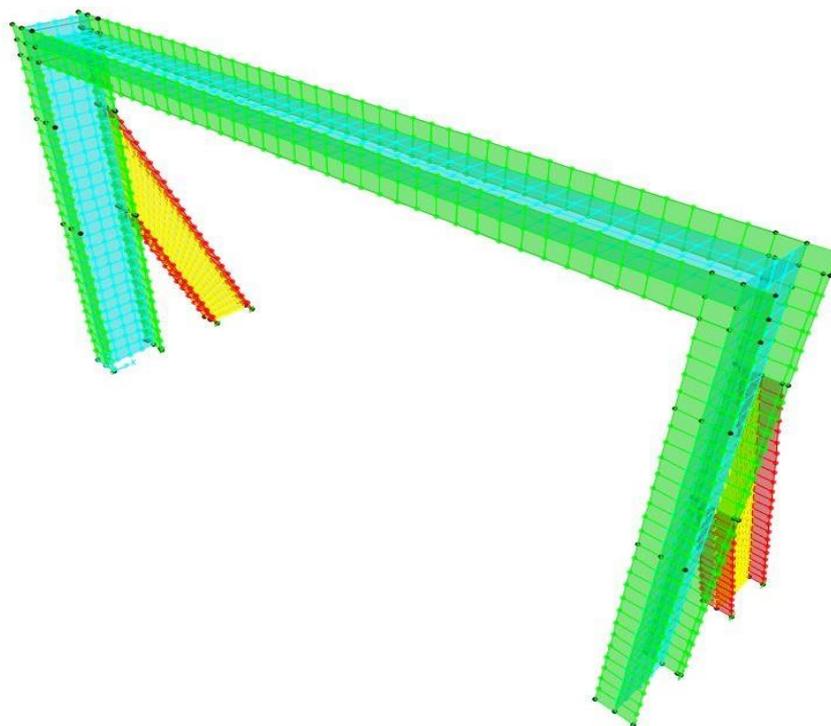


Figura 7. Modelo Numérico

4 Análise de dados e resultados

Os resultados do modelo numérico foram obtidos via análise da simulação do acréscimo de massa no modelo no software SAP2000. Foram simulados os 3 primeiros modos de vibração de cada ensaio, juntamente com os respectivos modos de vibração e os valores das frequências naturais (os amortecimentos não são apresentados pois estes só podem ser identificados por ensaios em campo ou laboratório). O primeiro modo de vibração de cada ensaio foi uma flexão na direção longitudinal, já o segundo modo foi uma flexão na direção transversal, e, por fim, o último modo de vibração de cada ensaio foi caracterizado por uma torção pura. A Tabela 2 apresenta os valores das frequências naturais extraídas do modelo numérico.

Para os ensaios experimentais em campo, as principais informações extraídas do processamento dos dados foram as frequências naturais. As frequências naturais podem ser identificadas como os maiores picos da série de dados. Dessa maneira, foram identificados os valores das 3 primeiras frequências naturais relacionadas aos 3 primeiros modos de vibração, analisando os 3 primeiros picos dos gráficos. Estas informações estão apresentadas na Tabela 3, cujos dados estão relacionadas aos ensaios de VI e na Tabela 4, cujos dados estão relacionados aos ensaios de VB.

4.1 Resultados

4.1.1 Resultados via modelo numérico

Tabela 2. Valores absolutos de frequências naturais do pórtico - Modelo numérico

Ensaio	Massa adicional (kg)	Massa adicional em relação a massa do pórtico (%)	1ª Frequência Natural (Hz)	2ª Frequência Natural (Hz)	3ª Frequência Natural (Hz)
M0	0	0,00%	11,475	24,788	33,01
M1	10	6,69%	10,847	22,857	30,697
M2	20	13,37%	10,302	20,943	29,479
M3	30	20,06%	9,835	19,313	29,289
M4	40	26,74%	9,426	17,968	29,024

4.1.2 Resultados via ensaio de Vibrações de Impacto

Tabela 3. Valores absolutos de frequências naturais do pórtico - Vibrações de impacto

Ensaio	Massa adicional (kg)	Massa adicional em relação a massa do pórtico (%)	1ª Frequência Natural (Hz)	2ª Frequência Natural (Hz)	3ª Frequência Natural (Hz)
VI0	0	0,00%	11,4258	15,8203	27,6855
VI1	10	6,69%	10,9863	14,7949	27,2461
VI2	20	13,37%	10,6934	13,916	27,0996
VI3	30	20,06%	10,1074	13,4766	26,3672
VI4	40	26,74%	9,375	11,2793	26,2207

4.1.3 Resultados via ensaio de Vibrações de Base

Tabela 4. Valores absolutos de frequências naturais do pórtico - Vibrações de base

Ensaio	Massa adicional (kg)	Massa adicional em relação a massa do pórtico (%)	1ª Frequência Natural (Hz)	2ª Frequência Natural (Hz)	3ª Frequência Natural (Hz)
VB0	0	0,00%	11,4258	15,6738	29,1504
VB1	10	6,69%	11,1328	14,7949	27,3926
VB2	20	13,37%	10,6934	14,0625	26,3672
VB3	30	20,06%	10,1074	13,4766	26,3672
VB4	40	26,74%	9,375	11,2793	26,5137

4.2 Análise dos dados

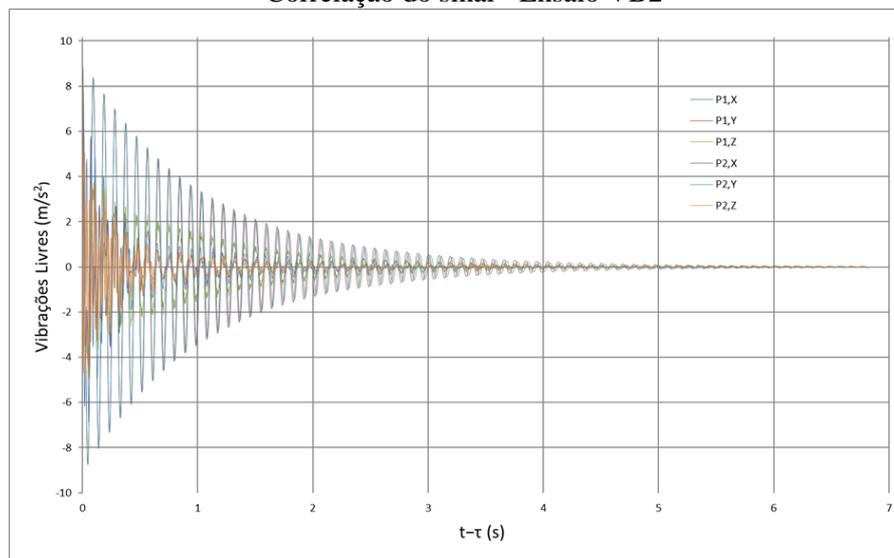
4.2.1 Funções de correlação e densidades espectrais

Os gráficos obtidos a partir do processamento de sinais para as funções de correlação do sinal permitem afirmar que em todos os ensaios executados o tempo utilizado para a aquisição dos dados (255s) foi suficiente para captar a resposta típica de vibração livre (oscilação com tendência a amplitude nula ao longo do tempo) para as funções de correlação de sinais aleatórios.

Tal afirmativa é possível pois o formato do gráfico de autocorrelação do sinal trata-se de uma função senoidal amortecida. No caso de todos os experimentos executados, a função acontece ininterruptamente até a assíntota alcançar valores bem próximos do eixo X. Caso os gráficos apontassem valores altos na região final, seria indicativo que o tempo de aquisição não foi suficiente e desta forma as densidades espectrais apresentariam valores distorcidos

Em relação às densidades espectrais observa-se que os espectros apresentam picos de energia aproximadamente nas mesmas frequências, quando comparamos ensaios com a mesma massa acrescentada. Cabe ressaltar que as amplitudes das funções de correlação e densidades espectrais são próximas pois foram normalizadas em relação aos valores RMS (*Root Mean Square*) e Energia total, respectivamente. Obviamente, as amplitudes relacionadas aos ensaios com impacto do martelo são significativamente maiores que as amplitudes dos ensaios com vibração de base.

Gráfico 1. Exemplo do gráfico que representa as funções de correlação. Média Correlação do sinal - Ensaio VB2



4.2.2 Frequências naturais

A partir da análise das tabelas acima foi possível verificar a diminuição das frequências naturais do pórtico à medida que fossem acrescentadas massa adicional. Este resultado se baseia na consolidação da equação abaixo, onde k representa a rigidez e m a massa da estrutura:

$$w = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Dessa forma, respeitando esta equação, se a massa de uma estrutura for elevada, a frequência natural desta irá diminuir. Esta premissa foi atendida integralmente no modelo numérico e praticamente em todos os ensaios de campo realizados, já que houve uma diminuição progressiva nas frequências naturais à medida que massas adicionais foram acrescentadas no pórtico.

No entanto, ao analisar os dados referentes a 3ª frequência natural do ensaio de vibração de base (Tabela 4), essa relação não foi atendida como se esperava, tendo a frequência natural permanecido constante e até mesmo aumentado após o acréscimo de massas adicionais. Uma das justificativas para isso pode ser o fato de o software de processamento de dados não ter sido capaz de eliminar todos os ruídos do ensaio de campo, e, conseqüentemente, estes ruídos impactaram nos resultados obtidos.

Também é importante salientar que a diferença entre os valores obtidos no modelo e nos ensaios de campo foi relativamente pequena. Ao analisar os resultados obtidos para a 1ª frequência natural o erro entre os valores do experimento foi inferior a 4%. Essa informação evidencia que o modelo foi calibrado adequadamente, configurando validade ao modelo numérico. A Tabela 5 e a Tabela 6 apresentam as informações discutidas nas considerações acima.

Tabela 5. Erros relativos dos ensaios comparados ao modelo numérico - Vibrações de Impacto

Ensaio	Massa adicional (kg)	Massa adicional (%)	1ª Frequência Natural (Hz)
VI0	0	0,00%	-0,43%
VI1	10	6,69%	1,28%
VI2	20	13,37%	3,80%
VI3	30	20,06%	2,77%
VI4	40	26,74%	-0,54%

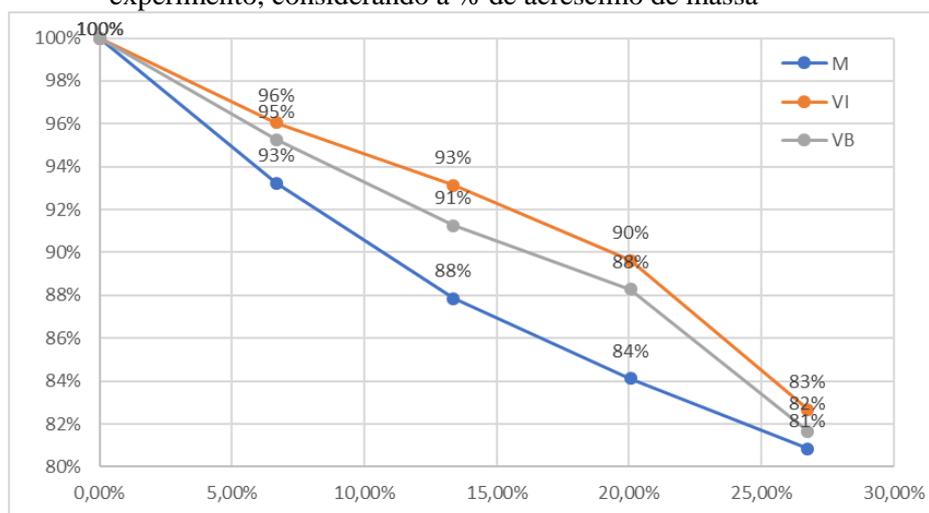
Tabela 6. Erros relativos dos ensaios comparados ao modelo numérico - Vibrações de Base

Ensaio	Massa adicional (kg)	Massa adicional (%)	1ª Frequência Natural (Hz)
VB0	0	0,00%	-0,43%
VB1	10	6,69%	2,63%
VB2	20	13,37%	3,80%
VB3	30	20,06%	2,77%
VB4	40	26,74%	-0,54%

O Gráfico 2 apresenta a média dos mesmos valores relativos de frequência naturais comparados ao acréscimo de massa no modelo numérico (M), no ensaio de vibração de impacto (VI) e no ensaio de vibração de base (VB). Esse gráfico mostra a tendência de diminuição das frequências naturais, conforme os valores de massa adicional aumentaram. De modo geral, com um acréscimo de aproximadamente 26% da massa do pórtico, a frequência natural de vibração do pórtico nos três tipos de experimento diminuiu aproximadamente 18%.

Um aspecto importante a ser levado em consideração é a sensibilidade da técnica, haja vista que acréscimo de massa da ordem 6% da massa total do pórtico já influi diretamente no valor das frequências naturais que caíram em todos os experimentos na mesma ordem de grandeza, alcançando a ordem de aproximadamente 95% do valor frequência natural do pórtico sem nenhuma massa adicional. Ressalta-se também que este resultado adquire maior significância se levarmos em conta a posição da massa, que se encontra diretamente sobre um dos pilares. Esta localização influencia em menor grau as propriedades dinâmicas se comparado, por exemplo, a massas acrescentadas no meio do vão horizontal.

Gráfico 2. Média dos valores relativos das 3 primeiras frequências naturais de cada experimento, considerando a % de acréscimo de massa



4.2.3 Taxa de amortecimento

Alguns estudos apontam que não é possível a obtenção de dados confiáveis sobre a relação da taxa de amortecimento com danos estruturais. Apesar deste fato, optou-se pela elaboração das tabelas e dos respectivos gráficos, que relacionam acréscimos percentuais de massa e taxas de amortecimentos, apenas com o intuito de complementar o presente estudo. Os Gráficos 3 e 4 foram elaborados para servir de embasamento para possíveis trabalhos futuros.

Tabela 7. Taxa de amortecimento - Vibrações de Impacto

Ensaio	Massa adicional (kg)	Massa adicional (%)	1ª Taxa de amortecimento (%)	2ª Taxa de amortecimento (%)	3ª Taxa de amortecimento (%)
VI0	0	0,00%	1,38%	3,09%	2,36%
VI1	10	6,69%	1,52%	2,77%	1,54%
VI2	20	13,37%	1,47%	2,78%	2,14%
VI3	30	20,06%	1,24%	3,05%	1,86%
VI4	40	26,74%	1,66%	2,46%	1,77%

Tabela 8. Taxa de amortecimento - Vibrações de Base

Ensaio	Massa adicional (kg)	Massa adicional (%)	1ª Taxa de amortecimento (%)	2ª Taxa de amortecimento (%)	3ª Taxa de amortecimento (%)
VB0	0	0,00%	1,39%	2,87%	0,53%
VB1	10	6,69%	1,42%	2,86%	1,53%
VB2	20	13,37%	1,50%	2,84%	1,23%
VB3	30	20,06%	1,25%	3,01%	0,86%
VB4	40	26,74%	1,69%	2,51%	0,74%

Gráfico 3. Taxa de amortecimento x acréscimo de massa – Vibrações de Impacto

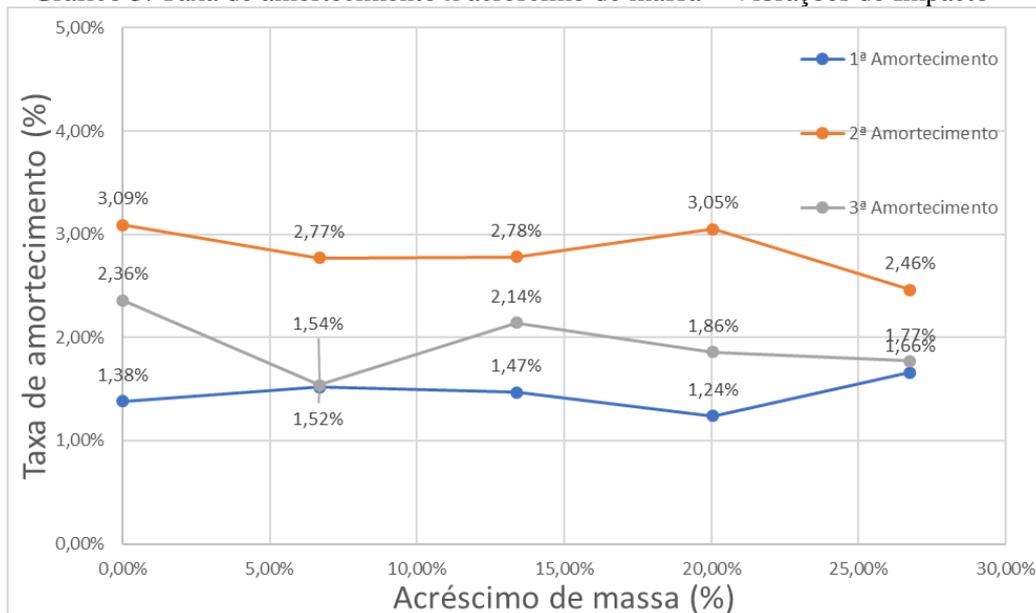
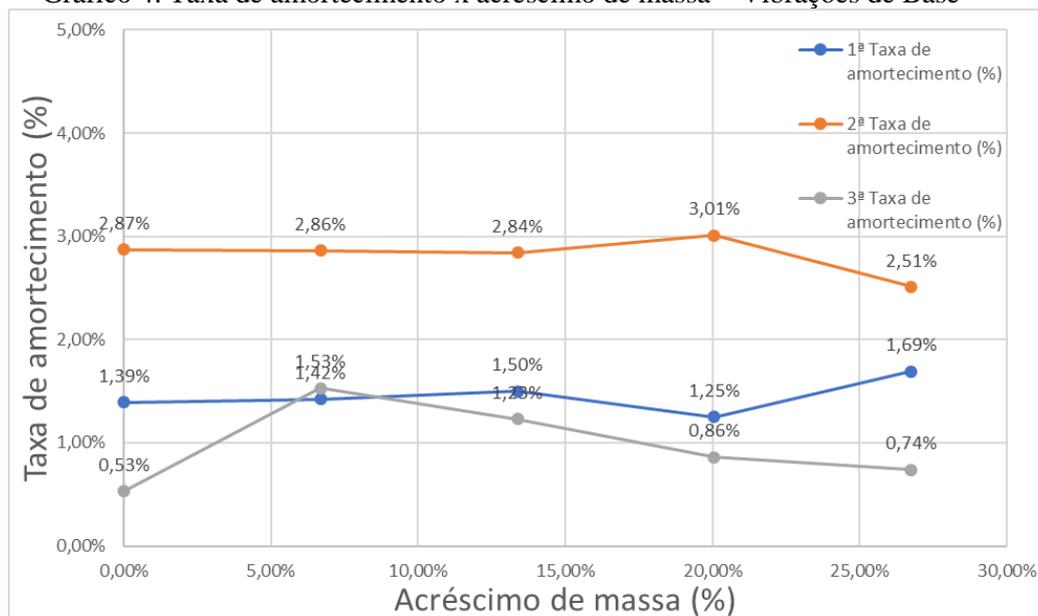


Gráfico 4. Taxa de amortecimento x acréscimo de massa – Vibrações de Base



5 Considerações finais

O presente trabalho propôs a realizar uma análise do acréscimo de massas adicionais em um pórtico metálico localizado no laboratório de estruturas do PPGEC do CEFET/MG. Para tanto, a metodologia foi dividida em duas etapas. A primeira consistiu na utilização de um sistema de registro das acelerações da estrutura, em ensaios considerando vibrações de impacto e vibrações de base. A segunda etapa consistiu na elaboração de um modelo numérico baseado no método dos elementos finitos para realizar uma simulação computacional dos ensaios.

A análise dos dados obtidos nos experimentos permitiu a formulação de algumas considerações. Apesar dos resultados obtidos nos ensaios e no modelo numérico apresentar algumas divergências, estes apresentaram a mesma tendência, isto é, todos os resultados apresentaram diminuição da frequência natural, conforme o acréscimo de massa aumentou,

o que respeita integralmente a equação da frequência natural e, conseqüentemente, atingiu-se o objetivo principal do trabalho.

Além do cumprimento do objetivo proposto os dados processados permitiram a realização de outras ponderações. Os erros médios das frequências naturais dos ensaios de campo, quando comparados ao modelo numérico, foram inferiores a 4,0%, o que indica que o modelo foi calibrado corretamente. Outra observação importante a se fazer, que corrobora a validade da calibração é a proporção da diminuição das frequências naturais que decaí praticamente na mesma proporção nos ensaios.

O estudo também evidenciou que a forma de excitação da estrutura, neste caso, seja ela por vibrações de impacto ou por vibrações de base apresentou resultados bastantes semelhantes, o que indica que utilizar vibrações de base não é um fator determinante na análise operacional modal, mas permite na grande maioria dos casos analisar o comportamento dinâmico das estruturas sem ser necessário a utilização de fontes artificiais de vibração.

Embora os resultados tenham sido satisfatórios e condizentes com as expectativas prévias dadas a eles, existiram pequenas divergências nos dados ao analisar o 3º modo de vibração. As frequências naturais que deveriam diminuir com o acréscimo de massa, permaneceu constante e até mesmo aumentou ligeiramente. Esta inconsistência foi justificada pelo fato do programa de processamento dos dados utilizado não ter sido capaz de identificação e remoção deste ruído. No entanto, de modo geral, esse dado não impacta no resultado final, já que todos os demais dados apresentam o comportamento esperado. Além disto, seria possível alterar vários parâmetros relacionados ao processamento dos dados visando melhor identificar este pico, o que pode ser feito em trabalhos futuros.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Capes (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e ao CEFET/MG (Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais) pelo apoio no desenvolvimento deste estudo.

Referencias

- [1] LUI, E. M. Structural Steel Desing. In: CHEN, W. F. Structural Engineering Handbook. 1ª. ed. Siracuse: CRC Press, 1995. Cap. 3.
- [2] BAŽANT, Z. P.; CEDOLIN, L. Stability of structures: elastic, inelastic, fracture and damage theories. Singapore: World Scientific, 2010.
- [3] ZHOU, Z. Vibration-Based Damage detection of bridges superstructures. Verlag, 2008.
- [4] RAINIERI, C.; FABBROCINO, G. Operational modal analysis of civil engineering structures. New York: Springer, 2014.
- [5] ARAÚJO, I. D. G. Análise modal operacional: métodos de identificação baseados em transmissibilidade. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, 2015.
- [6] BRINCKER, R.; VENTURA, C. E. Introduction to operational modal analysis. New Jersey: John Wiley & Sons, Ltd, 2015.