



REDUÇÃO DE VIBRAÇÕES EM PLACAS ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DE ESFORÇOS AXIAIS

Mariana M. Americano da Costa (*)

Carlos Magluta (*)

Ney Roitman (*)

José Renato Mendes de Sousa ()**

Paulo Batista Gonçalves (*)**

marianamiglioac@gmail.com

(*)Laboratório de Estruturas e Materiais – PEC/COPPE/UFRJ

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Centro de Tecnologia, Bloco I-216, Ilha do Fundão, CEP: 21941-972, Rio de Janeiro, Brasil,

(**)Laboratório de Análise e Confiabilidade de Estruturas Offshore – PEC/COPPE/UFRJ

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Prédio anexo do Centro de Tecnologia, 2º andar, Ilha do Fundão, CEP: 21941-972, Rio de Janeiro, Brasil.

(***) Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, R. Marquês de São Vicente, 225, CEP: 22451-900, Rio de Janeiro, Brasil.

Resumo. *Com o objetivo de solucionar problemas de vibrações indesejadas em estruturas, são utilizados métodos de controle estrutural para aumentar a capacidade de dissipar energia. Neste trabalho, foi desenvolvido um sistema de controle passivo que consiste na aplicação de esforços axiais de compressão em uma placa retangular aplicados por cabos de aço fixados através de cantoneiras em duas extremidades dessa placa. Os parâmetros modais foram aferidos através de ensaios experimentais realizados com testes de impactos e, em seguida, verificou-se o comportamento da estrutura com o sistema auxiliar. O desempenho da placa foi analisado variando as cargas axiais e os resultados foram correlacionados com modelos numéricos.*

Palavras Chave: *Controle estrutural, Sistemas passivos de absorção, Esforços axiais.*

1 INTRODUÇÃO

O crescente progresso das técnicas de análise e dimensionamento estruturais, em conjunto com a melhoria na qualidade e na rentabilidade econômica dos materiais, tem possibilitado projetos de estruturas cada vez mais esbeltas, tornando, portanto, as estruturas atuais mais flexíveis. Consequentemente, os valores referentes à frequência natural da estrutura diminuem e aproximam-se dos valores da frequência de excitação provocada pelos carregamentos ambientais (ventos, ondas, terremotos), ações humanas, equipamentos e tráfego, podendo aumentar as amplitudes de deslocamentos.

Antigamente, as construções eram projetadas como estruturas que dependiam da sua massa e rigidez para resistir às forças externas, sendo incapazes de adaptar-se a dinâmica de um ambiente em constante modificação. O enrijecimento estrutural era a maneira mais comum em solucionar problemas de vibrações em estruturas e, dessa forma, aumentava-se a frequência natural da estrutura distanciando-as da frequência de solicitação dos efeitos dinâmicos.

As estruturas com elevadas amplitudes de vibração dissipam energia através de tensões internas, fissuras, deformações plásticas, etc.; quanto maior a capacidade de dissipar energia menor a amplitude de vibração. Com a finalidade de reduzir as amplitudes de vibração produzidas pelas ações dinâmicas, muitos profissionais da área têm procurado métodos viáveis tecnicamente para aumentar a capacidade de dissipar energia, através do controle estrutural.

O controle estrutural é uma tecnologia para proteção de estruturas, que modifica as propriedades de rigidez, massa e/ou amortecimento através de dispositivos externos ou pela aplicação de forças externas. Os atenuadores dinâmicos de oscilação da estrutura geram forças de controle sobre a estrutura, que devem sempre se opor à força de excitação. Podem ser classificados em dois grandes grupos: sistemas passivos (Mecanismos de Amortecimento Adicional, Isoladores de Vibração, Atenuador Dinâmico Sintonizado, Múltiplos Atenuadores Dinâmicos Sincronizados e Atenuador de Coluna Líquida) e sistemas ativos (Sistema de Controle Ativo, Sistema de Controle Semi-Ativo, Sistemas de Controle Passivo-Ativo) (Battista 1993).

O controle passivo tem sido objeto de inúmeros estudos e pesquisas nas últimas décadas, contando com uma série de implementações práticas nos Estados Unidos e Japão (Soong e Dargush 1997). Este dispositivo de controle ao contrário dos sistemas ativos não necessitam de fontes externas de energia de controle; são bastante utilizados devido a sua simplicidade de projeto e execução e, quando calibrado corretamente, sua confiabilidade é extremamente alta. Um tipo comum de sistema de controle passivo é o amortecedor de massa sintonizado (AMS) constituído por um sistema de massas, molas e amortecedores.

O objetivo deste estudo é avaliar uma metodologia de redução dos níveis de vibrações através de controle passivo em placas retangulares através da aplicação de uma força de compressão distribuída uniformemente no plano da placa (Machado, 2007). Espera-se que as alterações das frequências naturais devido a aplicação de tensões no plano da placa controle a rigidez e o amortecimento da estrutura e, desta maneira, torne-a mais segura e confortável para o homem. Deve-se ressaltar que as novas frequências naturais devem ser projetadas adequadamente em função das cargas de excitação.

2 ESTRUTURA ANALISADA

O sistema estrutural utilizado constitui-se de um modelo físico simplificado representado por uma placa de alumínio retangular de dimensões 2.25m x 1.65m com 5mm de espessura, apoiada nos seus quatro bordos, fixada por parafusos na parte superior e inferior dentro de um perfil U, montada no LADEPIS (Laboratório de Dinâmica e Processamento de Imagens e Sinais) da COPPE. A Fig. 1 apresenta uma vista geral da montagem e a Fig. 2 um detalhe dos apoios utilizados.



Figura 1. Vista geral da placa de alumínio do LADEPIS

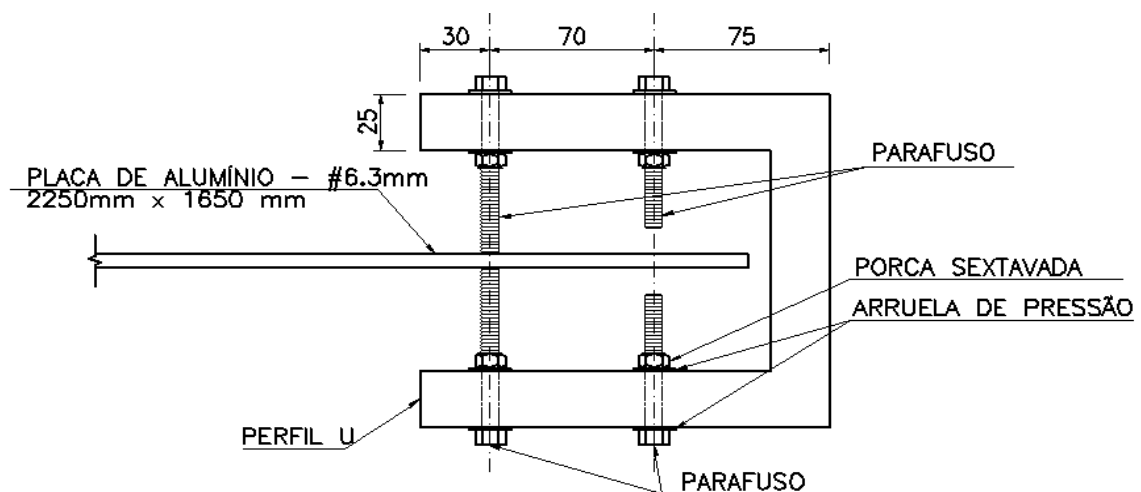


Figura 2. Esquema dos apoios

3 ENSAIO EXPERIMENTAL

3.1 Estrutura Original

Para estimar as frequências naturais e as taxas de amortecimento do sistema estrutural foram utilizados 9 acelerômetros localizados simetricamente, como visto na Fig. 3. A excitação do sistema foi gerada através de impactos nos acelerômetros 4, 2, 5 e as respostas dos sensores foram registradas ao longo do tempo.

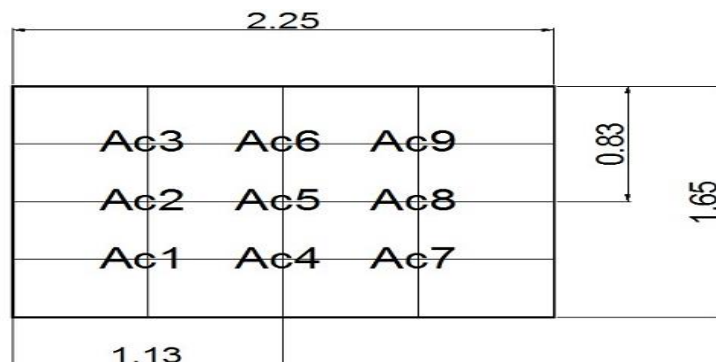


Figura 3. Localização dos acelerômetros na placa de alumínio do LADEPIS (cotas em metros)

Os parâmetros modais foram estimados através do processamento dos sinais utilizando-se o método *Short Time Fourier Transformer* (STFT), na qual a implementação foi desenvolvida por Bucher (2001). A Tabela 1 mostra os parâmetros modais obtidos no primeiro ensaio.

Tabela 1. Parâmetros modais obtidos experimentalmente

Freq. (Hz)	Desvio Padrão	Amort. (%)	Desvio Padrão
11.04	0.01	0.46	0.03
19.42	0.01	0.38	0.03
24.44	0.64	0.70	0.11
32.77	0.10	0.56	0.04

3.2 Estrutura + Esforços axiais

Com o objetivo de avaliar o comportamento dinâmico da estrutura foram impostos na placa forças de compressão de diferentes intensidades pela tração de cabos fixados na sua parte superior, em duas extremidades opostas, por cantoneiras de aproximadamente 5 x 5 cm espaçadas a cada 14.5 cm, conforme pode ser visto nas figuras 4, 5 e 6.

A carga axial aplicada aos cabos foi previamente definida em função da carga crítica estimada em estudo numérico. Nos ensaios realizados foram aplicadas pré-cargas equivalentes a 2.5% e 3.8% da carga crítica, e obtiveram-se os parâmetros modais para estas novas condições.



Figura 4. Placa de alumínio com cabos axiais

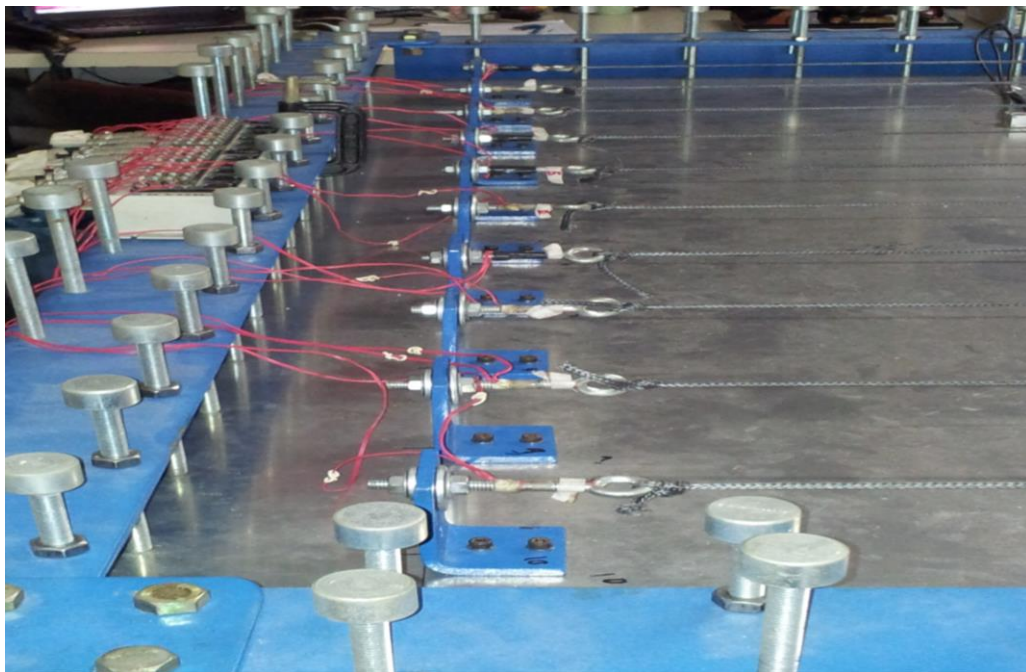


Figura 5. Detalhe das cantoneiras na placa

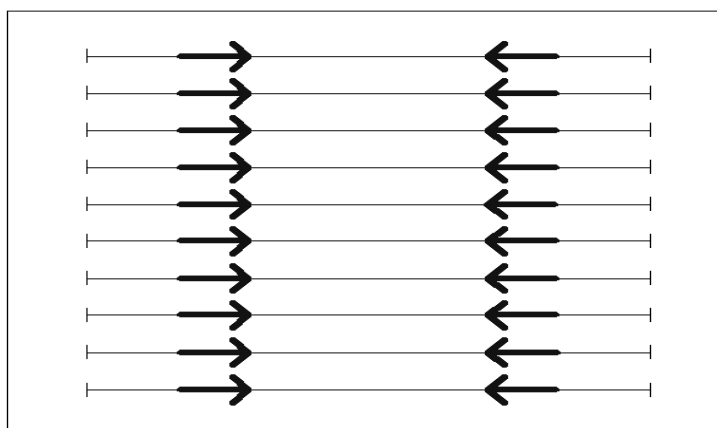


Figura 6. Esquema da placa com cabos de compressão

As Tabelas 2 e 3 mostram as frequências naturais da estrutura para cargas axiais de 20kgf (2.5% da carga crítica) e 30kgf (3.8% da carga crítica), os impactos foram impostos próximos ao acelerômetro Ac1 e a resposta foi medida no mesmo ponto.

Tabela 2. Parâmetros modais obtidos para força de 2.5% da carga crítica

Modo	Freq. (Hz)	Desvio Padrão	Amort. (%)	Desvio Padrão
1	12.75	0.02	0.35	0.02
2	21.10	0.02	0.36	0.02
3	26.29	0.02	0.64	0.03
4	34.72	0.10	0.83	0.10

Tabela 3. Parâmetros modais obtidos para força de 3.8% da carga crítica

Modo	Freq. (Hz)	Desvio Padrão	Amort. (%)	Desvio Padrão
1	12.76	0.02	0.39	0.02
2	21.48	0.02	0.48	0.02
3	26.38	0.02	1.16	0.03
4	34.76	0.10	0.97	0.10

4 CORRELAÇÃO NUMÉRICA-EXPERIMENTAL

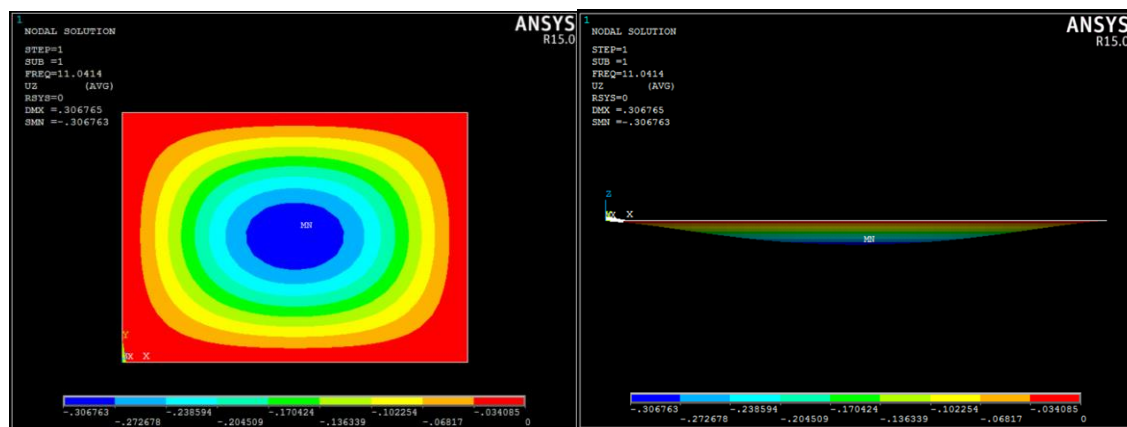
4.1 Modelagem Numérica

A modelagem numérica do sistema estrutural em análise foi realizada através do software Ansys Mechanical APDL 14.0. A malha ideal foi definida através de várias discretizações do modelo geométrico da estrutura, cada vez mais refinadas, até atingir um valor com pouca variação da frequência natural referente ao quarto modo de vibração.

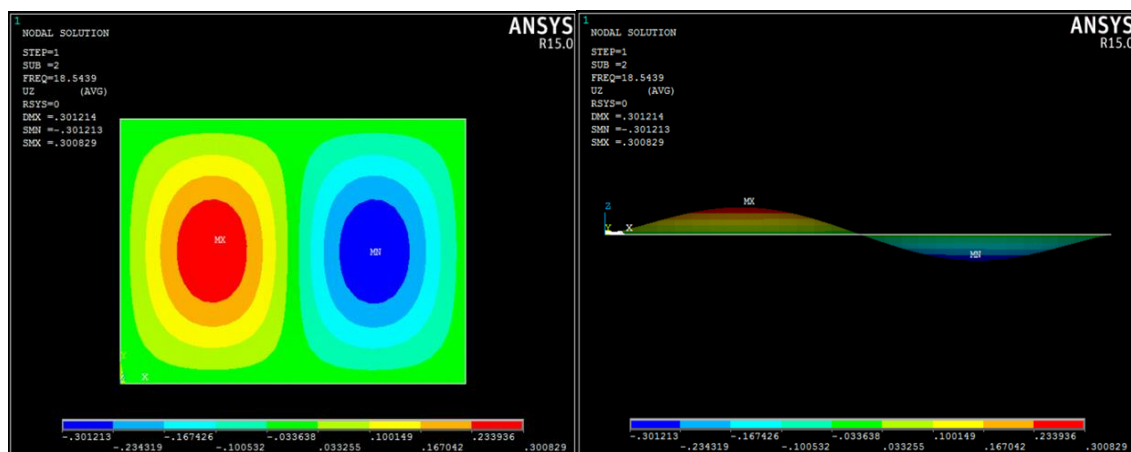
A frequência natural da estrutura foi estimada considerando-se a condição deformada obtida pela análise estática. Desta maneira a condição de contorno foi ajustada de forma que as frequências naturais experimentais e numéricas, principalmente para o primeiro modo de vibração, fossem compatíveis.

A placa foi modelada sendo apoiada verticalmente e com uma rigidez rotacional em torno dos 3 eixos nos quatro bordos. Em apenas um lado, o de maior comprimento, foi colocado também apoio na direção transversal e no outro lado, o lado de menor comprimento, foi colocado também apoio na direção transversal. Foram considerados, na modelagem, os efeitos associados ao carregamento imposto à placa.

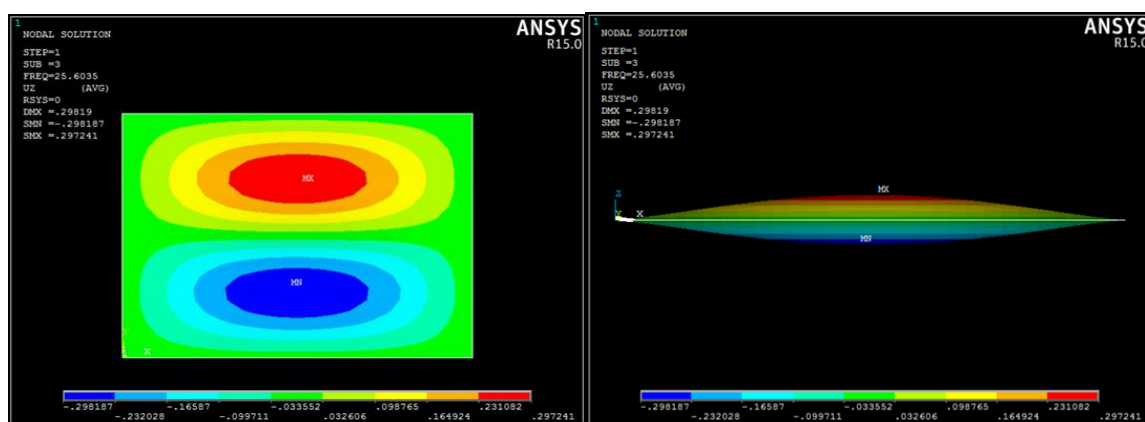
As Figuras 7. (a-d) ilustram os quatro primeiros modos de vibração obtidos e a correlação numérica experimental para esta situação é visualizada na Tabela 4. Pode-se observar na Tabela 5 a correlação entre duas modelagens da placa, uma com o peso próprio e levando em consideração o carregamento inicial imposto à placa e a outra modelagem sem levar em consideração o peso próprio.



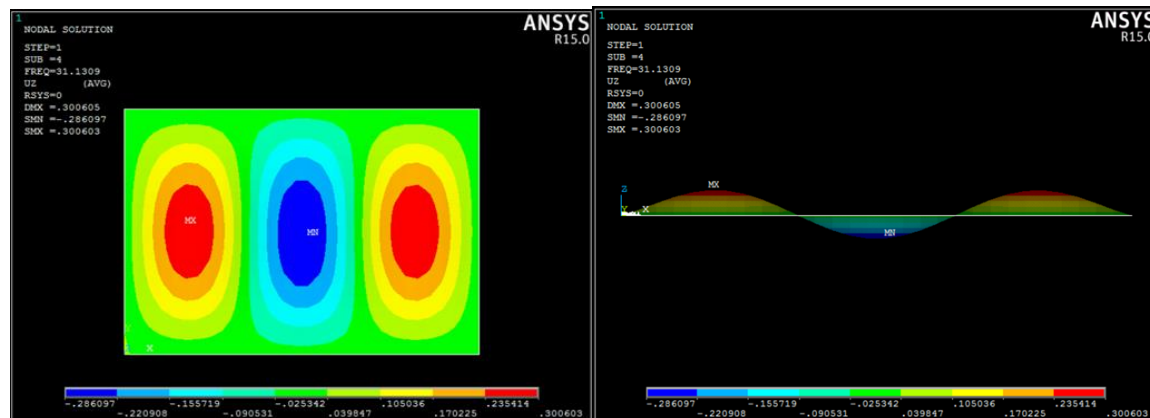
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 7. Modos de vibração da placa (a) 1ºmodo (b) 2ºmodo (c) 3ºmodo (d) 4ºmodo

Tabela 4. Correlação numérica-experimental da Estrutura Original

	Numérico	Experimental
Modo	Freq. (Hz)	Freq. (Hz)
1	11.04	11.04
2	18.54	19.42
3	25.60	24.44
4	31.13	32.77

Tabela 5. Correlação numérica da Estrutura Original com e sem o Peso Próprio

	PP (Est. Deformada)	Sem PP
Modo	Freq. (Hz)	Freq. (Hz)
1	11.04	10.26
2	18.54	17.75
3	25.60	25.25
4	31.13	30.39

As Tabelas 4 e 5 indicam uma boa correlação entre as primeiras frequências, principalmente para o primeiro modo. Além disso, verifica-se que, levando em consideração o efeito do carregamento inicial, as frequências tendem a aumentar devido ao estado de tensão que passa atuar na placa. Cabe ressaltar que usualmente esta análise mais sofisticada não é levada em conta no projeto de estruturas, no entanto, os valores obtidos foram superiores aos esperados conforme observado na Tabela 5.

4.2 Carga Crítica

A partir de três forças axiais quaisquer, foi definida a carga crítica da estrutura para, em seguida, proceder com os ensaios experimentais e as demais análises numéricas. Isto pode ser visto na Figura 8.

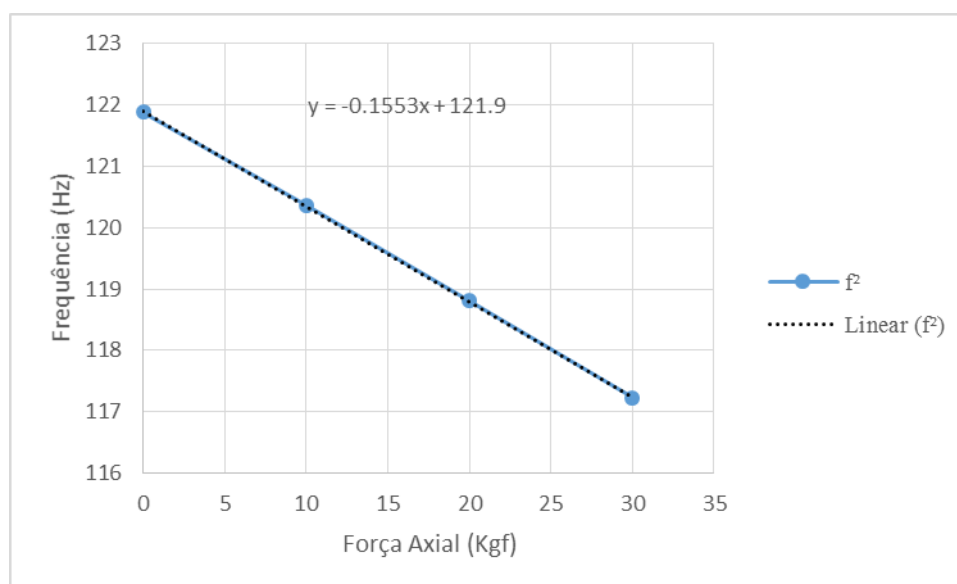


Figura 8. Carga Crítica

De acordo com o gráfico acima (Figura 8), a carga crítica de flambagem é igual a 785kgf.

4.3 Esforços axiais

Foram realizadas análises experimentais com forças axiais e um momento referente à excentricidade dos cabos de aço em cada ponto de aplicação da força. As Tabelas 5 e 6 correlacionam os resultados numéricos e experimentais para forças de compressão axiais equivalente a 2.5 e 3.8% da carga crítica, respectivamente.

Tabela 6. Correlação numérica – experimental da Estrutura 2.5% da Carga Crítica

2.5% da carga crítica		
	Numérico	Experimental
Modo	Freq. (Hz)	Freq. (Hz)
1	11.46	12.75
2	18.81	21.10
3	25.13	26.29
4	31.31	34.72

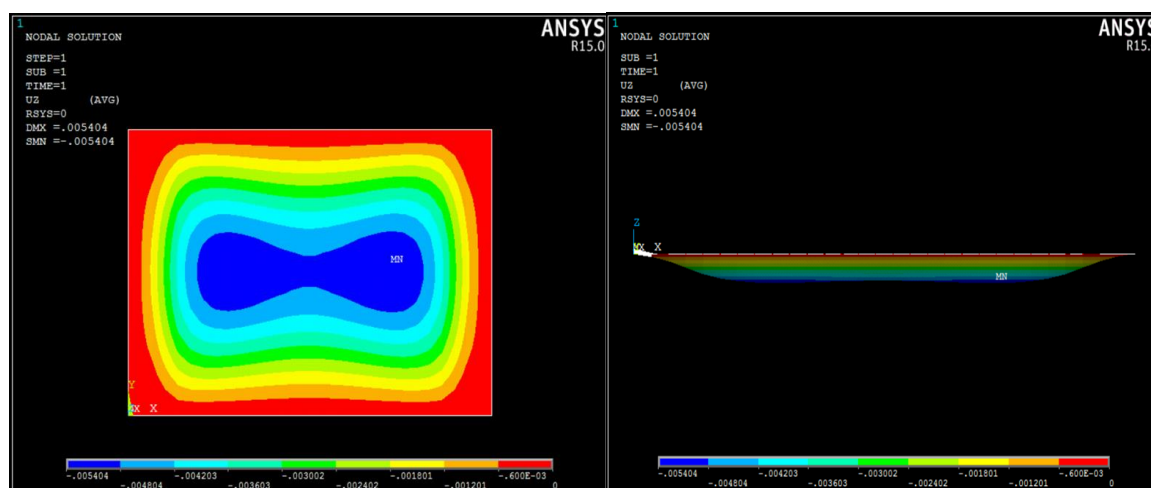
Tabela 7. Correlação numérica – experimental da Estrutura 3.8% da Carga Crítica

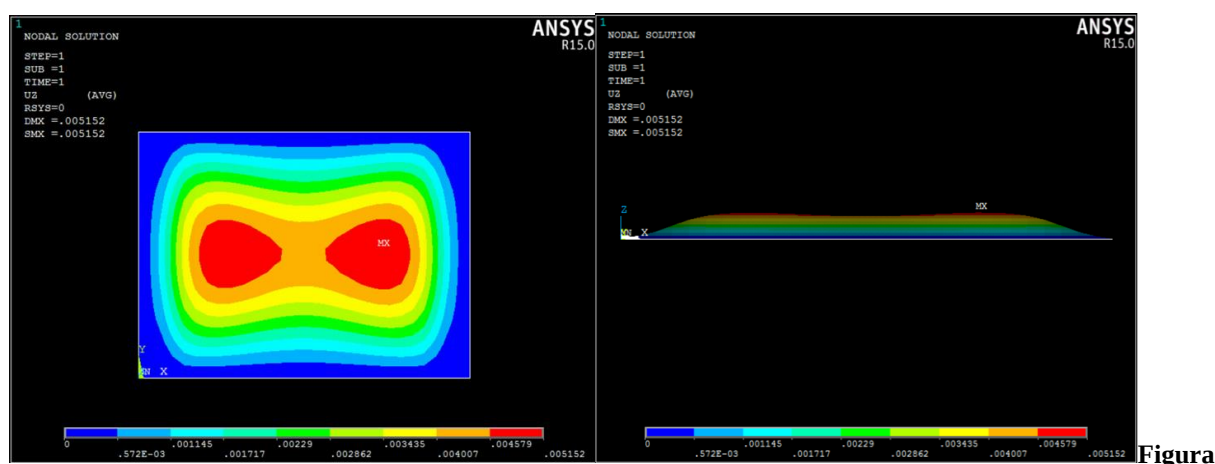
3.8% da carga crítica		
	Numérico	Experimental
Modo	Freq. (Hz)	Freq. (Hz)
1	11.75	12.76
2	19.02	21.48
3	25.49	26.38
4	31.50	34.76

Foi observado, nas Tabelas 6 e 7, uma correlação numérica-experimental próxima até o terceiro modo de vibração e como esperado, com o acréscimo da força, a frequência tende a aumentar.

O deslocamento aferido experimentalmente no centro da estrutura com a força axial de 3.8% da carga crítica foi de 4.4 mm enquanto que, o deslocamento numérico foi de aproximadamente 5 mm.

Com a finalidade de analisar o comportamento da ação do momento na estrutura, foi mantida a força axial referente a 3.8% da carga crítica e foram variados os valores de momento. Isto foi realizado para duas situações, uma simulando a aplicação da força de compressão com os cabos de aço na parte superior, e outra situação na qual os cabos estão na parte inferior da placa, ou seja, o sinal do momento foi invertido para estas análises. As Figuras 9 e 10 ilustram estas análises.

**Figura 9. Deformação devido a variação do momento – Força de compressão na parte superior**



Figura

10. Deformação devido a variação do momento – Força de compressão na parte inferior

Conforme esperado o deslocamento da estrutura é invertido. Concluindo as análises, as Tabelas 8 e 9 mostram a variação das frequências naturais devido ao aumento do momento para as duas situações citadas anteriormente.

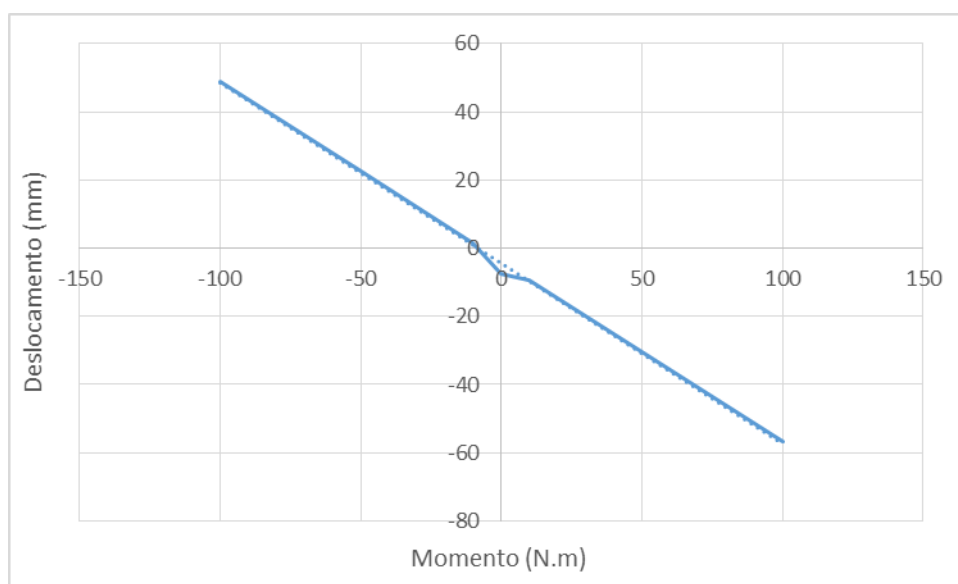
O comportamento dinâmico obtido com a modelagem foge ao que seria esperado, uma vez que, ao inverter o momento, a frequência natural deveria reduzir até um determinado valor quando o efeito da flecha devido ao peso próprio fosse compensado e, posteriormente, deveria voltar a aumentar passando a apresentar uma flecha no sentido contrário. A Figura 11 apresenta a flecha no meio do vão devido à variação do momento. Isto provavelmente pode estar associado a incapacidade do modelo numérico em representar adequadamente este comportamento. Esta situação se tornará mais clara quando forem realizadas as campanhas experimentais com as cantoneiras na parte inferior da placa.

Tabela 8. Frequências naturais, em Hz, com variação do momento - 3.8% da Carga Crítica

Momento (N.m) com as cantoneiras na parte superior da placa							
Modo	10	20	40	60	100	200	500
1	11.75	12.33	13.60	14.70	16.53	19.71	27.94
2	19.02	19.73	21.21	22.50	24.64	26.94	30.10
3	25.49	27.09	28.37	29.44	31.11	28.38	33.35
4	31.50	32.31	33.69	34.22	34.82	34.55	39.95

Tabela 9. Frequências naturais, em Hz, com variação do momento 3.8% da Carga Crítica

Momento (N.m) com as cantoneiras na parte inferior da placa			
Modo	10	50	100
1	9.72	4.00	0
2	16.72	11.48	0
3	24.41	19.50	5.55
4	29.11	25.03	17.58

**Figura 11. Deformação devido a variação do momento – Força de compressão na parte inferior**

5 COMENTÁRIOS FINAIS

Neste artigo, foi analisada uma metodologia de redução dos níveis de vibrações através de controle passivo em placas retangulares devido à aplicação de uma força de compressão distribuída uniformemente no plano da placa. Foram realizados ensaios experimentais com a aplicação destas forças fixadas por cantoneiras na parte superior da estrutura, apesar de, para finalidades práticas, ser usual a aplicação de cargas com as cantoneiras fixadas na parte inferior da estrutura. No entanto, foram realizados testes numéricos simulando a aplicação destes esforços com a cantoneira na parte inferior também.

Verificou-se que, levando em consideração o efeito do carregamento inicial nas análises numéricas com os cabos na parte superior da placa, as frequências naturais tendem a aumentar devido ao estado de tensão que passa a atuar na placa. Caso os cabos estejam na parte inferior

as frequências tendem a diminuir. Cabe ressaltar que apenas a variação das frequências naturais pode não reduzir o nível de vibração na estrutura, isto dependerá do tipo de carregamento atuante.

Com o acréscimo da carga axial, esperava-se que, além da variação das frequências naturais, a taxa de amortecimento também aumentasse garantindo assim uma redução dos níveis de vibração. No entanto isto não foi verificado, o que demanda a realização de novos ensaios experimentais para um melhor entendimento do comportamento.

REFERENCIAS

- Americano da Costa, M. M. (2014). Análise do comportamento de estrutura utilizando múltiplos sistemas passivos de absorção. Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Battista, R. C. (1993). Notas de Aula da disciplina – Redução e Controle de Vibrações. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Bucher, H. F. (2001). Metodologias para aplicação de técnicas em dinâmica estrutural e ao método dos elementos de contorno. Tese de D. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Clough, R. W., Penzien, J. (2003). Dynamics of Structures, 3rd ed, McGraw-Hill International, New York.
- Frahm, H. (1911). Device of Damping Vibration of Bodies, United States n. 989.958.
- Lenzen, K. H. (1966). Vibration of Steel Joist – Concrete Slabs Floors. Engineering Journal of American Institute of Steel Construction, v. 3, n. 3, p. 133-136.
- Machado, F.J.D. (2007). Análise e Controle Passivo das Vibrações de Placas Retangulares. Dissertação de M. Sc., Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- Soong, T. T., Dargush, G. F. (1997). Passive energy dissipation systems in structural engineering. John Wiley & Sons. Chichester, Inglaterra.