



ANÁLISE DE VIBRAÇÕES DE DUTOS METÁLICOS REVESTIDOS COM MATERIAL REFRAATÓRIO

Wendell Diniz Varela

wendell@fau.ufrj.br

Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da UFRJ

Av. Pedro Calmon, 550, Cidade Universitária, 21941-901, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.

Eliane Maria Lopes Carvalho

elianemaria@vm.uff.br

Escola de Engenharia da UFF

Rua Passo da Pátria, 156, São Domingos, 24210-240, Niterói/RJ, Brasil.

Ronaldo Carvalho Battista

battista@coc.ufrj.br

Instituto COPPE/UFRJ e Controllato Ltda

Av. Horácio Macedo, 2030, Cidade Universitária, 21941-450, Rio de Janeiro/RJ, Brasil

Resumo. *Apresenta-se neste artigo uma avaliação comparativa dos resultados numéricos obtidos com modelagens estruturais alternativas para análise de vibrações em dutos cilíndricos de aço de parede fina revestidos internamente com camada de material refratário, comumente empregados em unidades industriais de refino de petróleo; onde, num cenário típico, estão submetidos a altas temperaturas e a ação fluido-dinâmica de grande intensidade de turbulência que podem causar a degradação da camada refratária. Foram elaborados seis modelos numérico-computacionais em elementos finitos do trecho de duto analisado, contemplando as seguintes condições físicas observadas durante a sua vida útil: com camada refratária íntegra e fissurada extensivamente. Para cada um dos seis modelos são apresentados resultados em termos de frequências e formas modais de vibração. Esses modelos são validados através da correlação com resultados de medições experimentais obtidas com sensores de aceleração instalados num protótipo estrutural. A análise comparativa destes resultados conduziu à seleção final de dois modelos apropriados para análise de vibrações do sistema mecânico-estrutural induzidas pela ação fluido-dinâmica de grande intensidade de turbulência que ocorre durante operação normal em altíssima temperatura.*

Palavras-chave: *dinâmica, cascas*

1 INTRODUÇÃO

Em refinarias de petróleo, as Unidades de Fracionamento e Craqueamento Catalítico (UFCC) produzem, através do processo de craqueamento catalítico fluido, gasolina e gás liquefeito de petróleo (GLP). Esse processo consiste basicamente na quebra de moléculas pesadas através do uso de alta temperatura e de um catalisador obtendo moléculas mais leves resultando em produtos com maior valor de mercado.

A Câmara de Orifícios é uma parte da UFCC que é submetida a grandes esforços pela passagem de fluido por válvulas de gaveta em movimento muito turbulento e a altíssima temperatura. Vibrações induzidas pela ação fluido-dinâmica podem levar o material refratário a um estado excessivo de fissuração, provocando a parada precoce do equipamento com consequentes prejuízos industrial, comercial e até mesmo ao meio ambiente.

Para estudar o comportamento dinâmico estrutural de um trecho entre válvulas de gaveta da casca mista da Câmara de Orifícios, foram elaborados seis modelos numérico-computacionais do trecho analisado, contemplando as seguintes condições físicas observadas durante a vida útil da: íntegra e com camada refratária fissurada extensivamente. Para cada um dos seis modelos (A a F) computacionais, discretizados em elementos finitos, são apresentados resultados numéricos em termos de frequências e modos naturais de vibração. Os modelos numéricos foram validados através da correlação com resultados de medições experimentais obtidas com sensores de aceleração instalados no equipamento em operação normal. A análise comparativa destes resultados conduziu à seleção final de dois modelos apropriados para análise de vibrações do sistema mecânico-estrutural induzidas pela ação fluido-dinâmica de grande intensidade de turbulência que ocorre durante operação normal em altíssima temperatura.

2 DESCRIÇÃO SUMÁRIA DA ESTRUTURA DO EQUIPAMENTO

A estrutura da Câmara de Orifícios, mostrada esquematicamente na Fig.1 como parte integrante da UFCC e em detalhe o trecho a ser analisado na Fig.2(a), é constituída por uma casca cilíndrica esbelta de seção circular em aço (ASTM A285 C, $f_y = 205$ MPa) contendo uma camada espessa de material cimentício refratário a ela ligada através de conectores soldados a sua superfície interna, tal como ilustra a Fig.2(b). Na Fig.2(a) estão destacadas em vermelho as válvulas de gaveta (*slide valves*) que possuem rigidez muito maior do que a casca mista (aço + refratário) da Câmara de Orifícios, conferindo condições de extremidades rígidas ao trecho analisado.

As características geométricas da estrutura de casca mista e as características físicas dos materiais que a compõem são dadas nas Tabelas 1 e 2.

3 MODELOS NUMÉRICOS

Para representar o trecho da estrutura tubular descrita no item 2 foram construídos seis modelos numérico-computacionais descritos a seguir. A ferramenta computacional utilizada foi o programa comercial Ansys (2005) que é baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF).

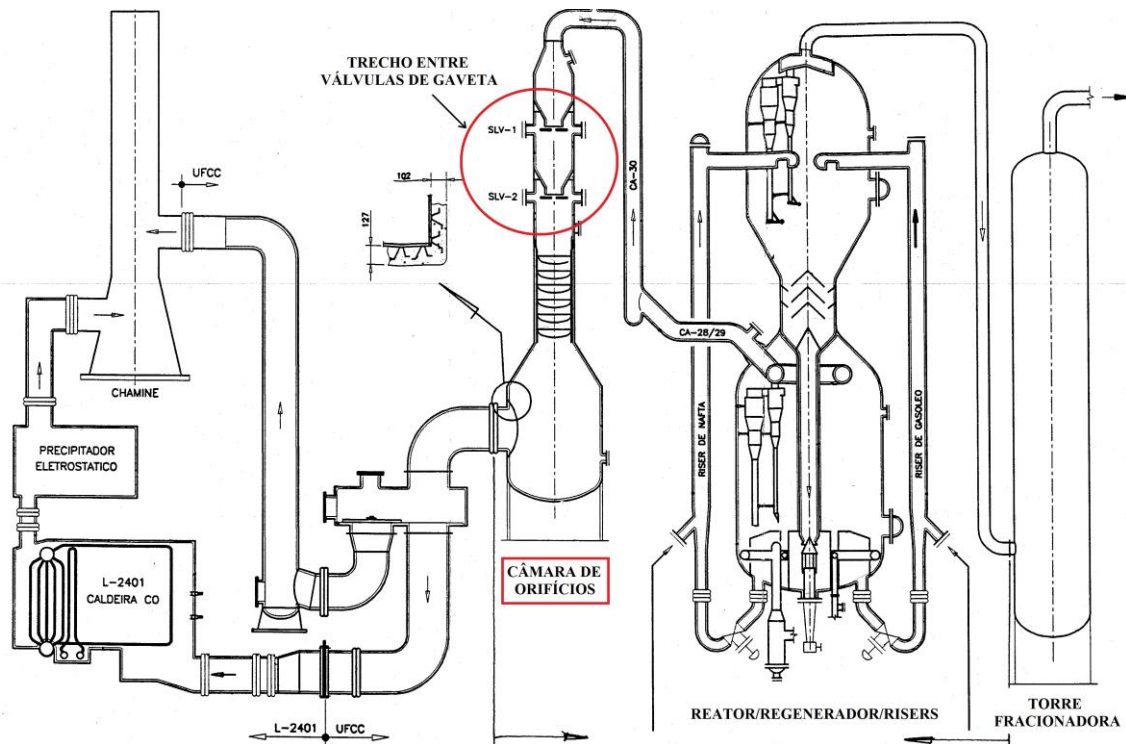


Figura 1 – Vista lateral esquemática do sistema de equipamentos da UFCC.

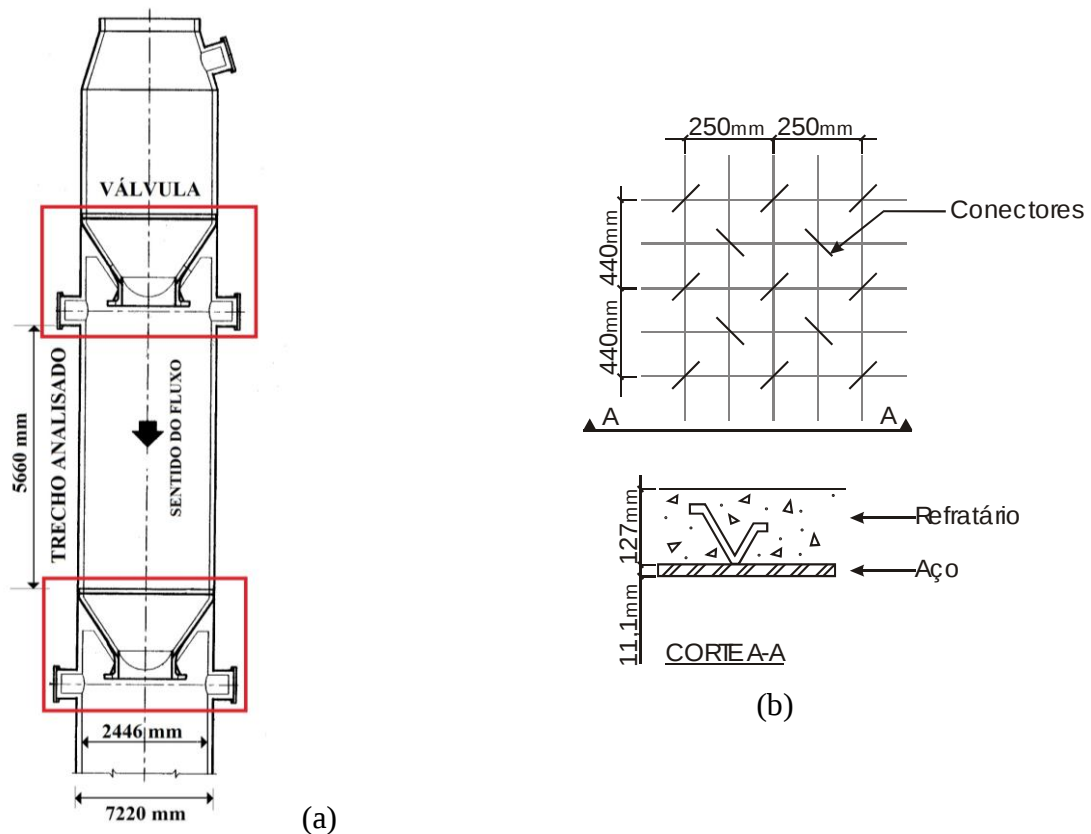


Figura 2 – Detalhes da estrutura analisada: (a) Câmara de Orifícios. (b) distribuição dos conectores.

Tabela 1. Características geométricas da estrutura mista

Característica	Material	
	Aço	Argamassa refratária
Diâmetro externo da casca (mm)	2722	2700
Espessura da parede (mm)	11,1	12,7
Área da seção transversal dos conectores (mm ²)	10,2	-
Altura do cilindro entre as válvulas de gaveta H (mm)	5660	5660

Tabela 2. Características físicas dos materiais componentes da estrutura mista

Propriedade	Material	
	Aço	Argamassa refratária
Módulo de elasticidade longitudinal E (kN/m ²)	$2,035 \times 10^8$	$2,602 \times 10^7$
Módulo de elasticidade transversal G (kN/m ²)	$7,875 \times 10^8$	$1,084 \times 10^7$
Coeficiente de Poisson ν	0,292	0,200
Massa específica μ (ton/m ³)	7,850	2,100

Várias situações foram consideradas na investigação do comportamento do trecho da estrutura tubular cilíndrica em questão. Dentre estas situações consideram-se cascas cilíndricas circulares constituídas apenas de material refratário e/ou de aço, separadamente, além da casca composta, isto é, do conjunto das anteriores. Quando os materiais são considerados trabalhando em conjunto deve-se admitir uma situação com a ligação entre os materiais totalmente íntegra e outra com ligação parcial, além da integridade ou não (fissuração) do material refratário. Em todos os modelos foi considerada a condição de contorno de engaste perfeito representando a grande rigidez das válvulas de gaveta. Os modelos numéricos são ilustrados na Figura 3 e suas principais características de discretização estão resumidas na Tabela 3.

Os Modelos **A** e **B** (Fig. 3a) representam, respectivamente, o trecho de casca cilíndrica de aço e de material refratário considerados separadamente. No Modelo **A** foi utilizado elemento de casca fina (SHELL63) com quatro nós e seis graus de liberdade por nó baseado na teoria de Kirchhoff. No Modelo **B** foi utilizado elemento de casca espessa (SHELL43) com quatro nós e seis graus de liberdade por nó baseado na teoria de Reissner-Mindlin. Admite-se casca fina quando a relação entre o raio interno do cilindro e a espessura da parede é maior do que 50 (Battista *et al.*, 1981).

O Modelo **C** (Fig. 3b) representa a casca composta com interação completa entre as partes de materiais distintos. Foi utilizado o elemento *SHELL91* de casca laminada que possui 8 nós com 6 graus de liberdade em cada nó. Este elemento de casca laminada foi escolhido para representar a interação completa e perfeita aderência entre os materiais e a excentricidade entre as superfícies médias da casca de aço e do cilindro de argamassa refratária.

Os Modelos **D** a **F** (Fig. 3c) permitem inferir a influência do grau de interação entre os materiais e da integridade do material refratário nas características de vibração (frequências e modos naturais) da estrutura da casca cilíndrica composta. Esses modelos são compostos por elementos de casca, representando os cilindros de aço e de material refratário, unidos através de elementos de pórtico espacial (BEAM4) simulando os pinos de aço que fazem a conexão entre os cilindros. Esses elementos foram considerados com rigidez à flexão infinita. A forma de interação entre as estruturas utilizando pinos foi escolhida por dar liberdade na construção de diferentes situações sob análise, como, por exemplo, o relaxamento da condição de interação completa (i.e perda de aderência entre as superfícies dos cilindros, fissuração excessiva localizada) ou ainda a queda de parte do material refratário. No Modelo **D** os dois cilindros são discretizados com elementos de casca fina (SHELL63) enquanto que no Modelo **E** o cilindro de aço é discretizado com elementos do mesmo tipo (SHELL63) e o cilindro de refratário é discretizado em elementos de casca plana espessa (SHELL43). O Modelo **F** é similar ao Modelo **E**, considerando um módulo de elasticidade do material refratário reduzido a um terço do valor original para simular a perda de propriedades mecânicas devido ao estado de fissuração desse material.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Resultados obtidos

Para a análise de vibrações livres dos modelos apresentados foi utilizado o módulo de análise modal do ANSYS, através do método de “interação por subespaços” para determinação das frequências naturais (autovalores) e os respectivos modos de vibração (autovetores). Esta análise mostra a co-existência de dois autovetores para cada autovalor, fazendo com que a superposição de modos conjugados mantenha a característica axissimétrica da casca cilíndrica circular. Na Fig. 4, por exemplo, pode ser observada uma vista frontal do modelo do cilindro composto dois modos conjugados, com seis semiondas circunferenciais cada. Estes dois modos podem ser descritos de forma trigonométrica como a de dois cossenos com mesmo número de semiondas, defasados de meia semionda, tal como ilustrado na Fig.5.

A Fig. 6 ilustra um dos modos de vibração da estrutura, que possui seis semiondas circunferenciais ($n = 6$) e quatro semiondas longitudinais ($m = 4$). A Fig. 7 apresenta gráficos das frequências naturais de cada modelo em função do número de semiondas longitudinais e de semiondas circunferenciais.

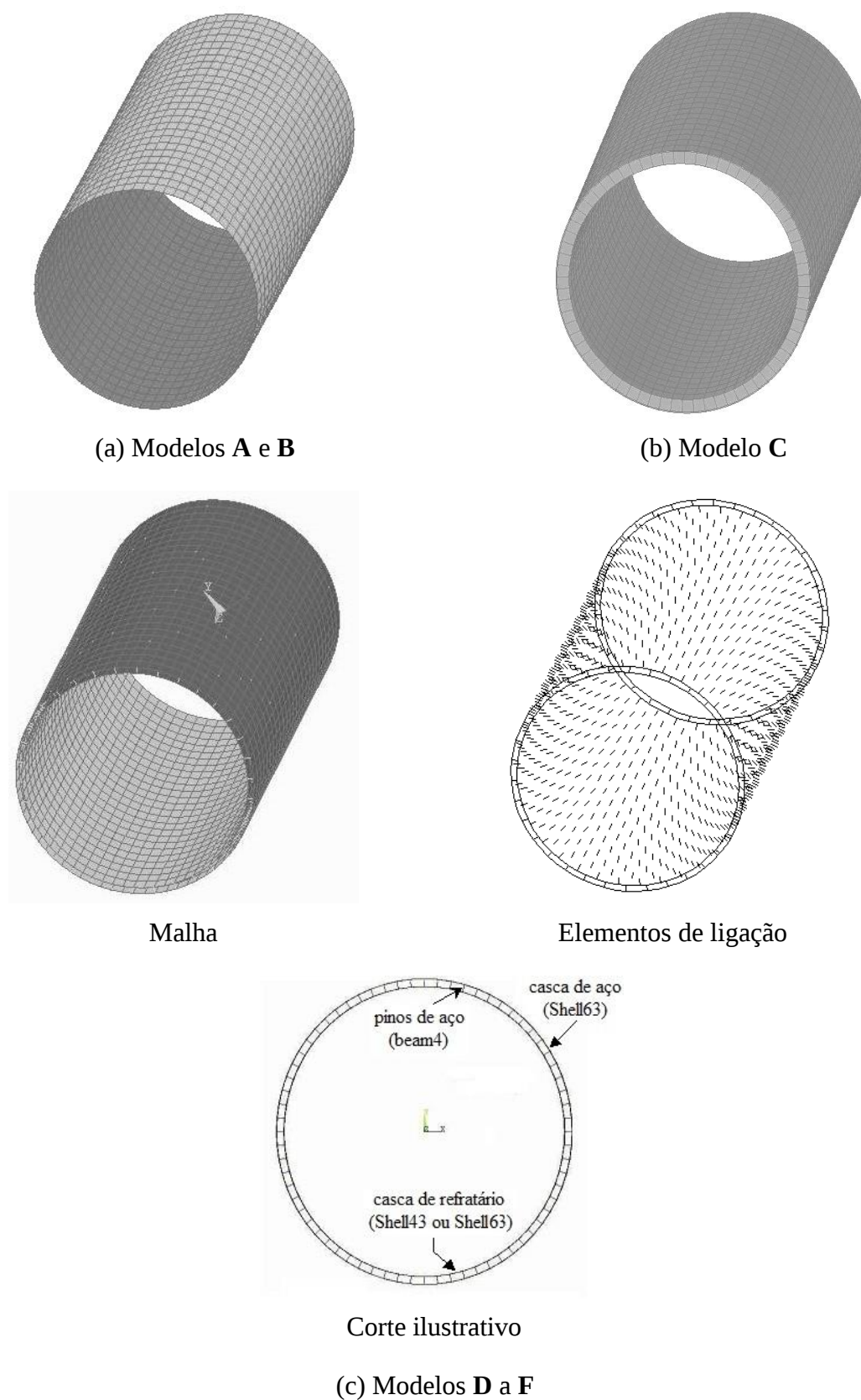
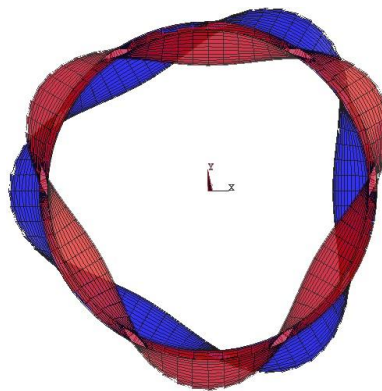
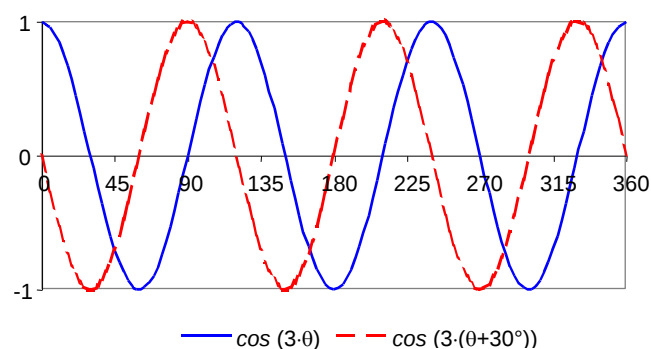


Figura 3 – Modelos numéricos da estrutura do equipamento.

Tabela 3 – Características da discretização dos modelos numéricos.

Característica	Modelos A a C	Modelos D a F
Número de elementos de casca	1768	3536
Altura dos elementos (m)	0,218	0,218
Largura dos elementos (m)	0,125	0,125
Relação entre lados dos elementos	1,744	1,744
Número de divisões ao longo da altura	26	26
Número de divisões ao redor da circunferência	68	68
Número de elementos de pórtico	-	918
Comprimento dos elementos de pórtico (m)	-	0,069

**Figura 4. Exemplo de modos conjugados.****Figura 5. Descrição trigonométrica dos modos da Fig. 4.**

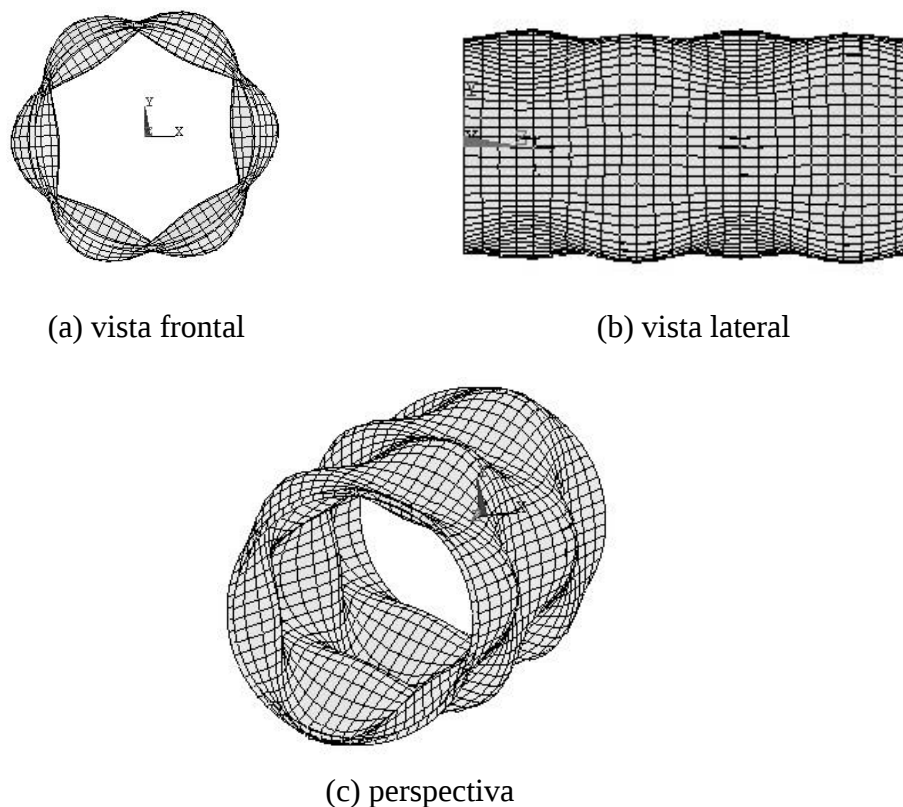


Figura 6. Modo de vibração da estrutura com $(n,m) = (6,4)$.

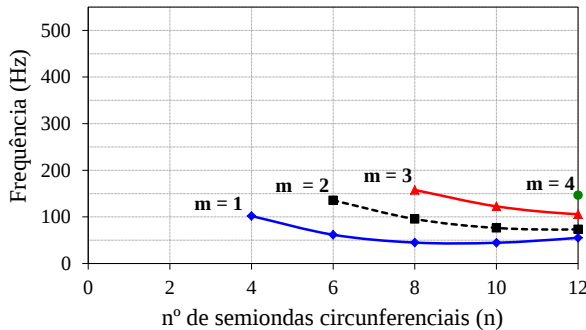
4.2 Análise dos resultados

Observa-se que o Modelo **B** (Fig.7b) apresenta frequências de vibrações livres com valores mais elevados em relação ao Modelo **A** (Fig.7a). Isto se deve a maior rigidez da parede composta da casca espessa da camada aderente de material refratário (Modelo **B**) em relação à casca fina de aço (Modelo **A**).

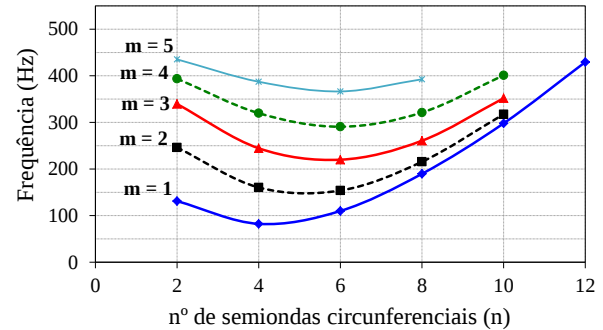
Os resultados obtidos para o Modelo **C** (Fig 7c), que representa o trecho composto por uma casca cilíndrica mista de material refratário interno e aço na parede externa, com interação completa entre as partes, apresenta comportamento semelhante ao Modelo **B** (Fig.7b) em termos de frequências e modos de vibrações livres. Esses resultados levam à conclusão que a camada de material refratário, por ser bem mais rígida que a parede fina de aço, tem papel determinante no comportamento da casca mista, enquanto íntegra.

O Modelo **D** (Fig.7d), que representa a casca mista (usando somente elementos de casca fina) com interação entre as partes simulada por pinos metálicos, apresenta para os modos de vibração com menor número de ondas comportamento semelhante ao do Modelo **C** (Fig.7c) e para os modos de vibração com maior número de ondas valores mais baixos de frequências. Isto se deve à menor aderência entre as cascas na consideração dos pinos de conexão, o que representa de forma mais precisa o comportamento real de interação entre as duas cascas. Nos modos mais baixos, com menor número de semiondas, a influência dos pinos na rigidez é desprezível, enquanto que nos modos mais altos, com maior número de semiondas, essa influência passa a ser perceptível. Para o modo com oito semiondas circunferenciais e quatro

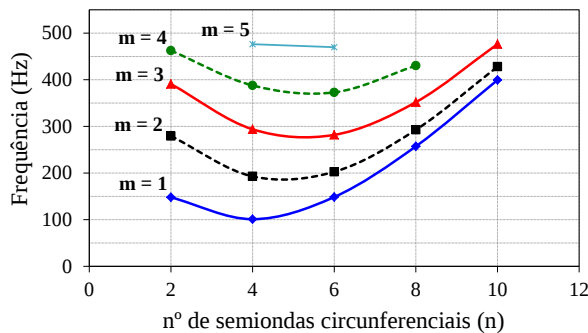
semiondas longitudinais ($n = 8$, $m = 4$), por exemplo, o valor da frequência natural foi reduzido em 8,3% do modelo com interação completa para o modelo com interação simulada por pinos metálicos. Pode-se concluir que a aderência entre as partes tem relevância no comportamento dinâmico da casca mista.



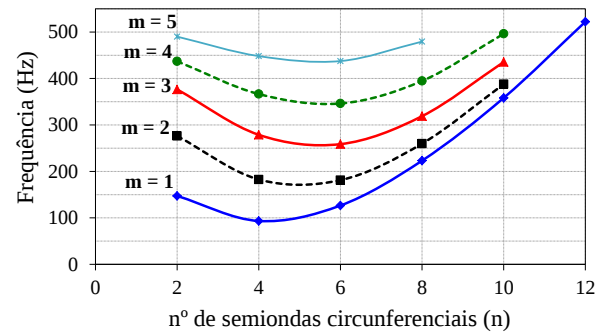
(a) Modelo A



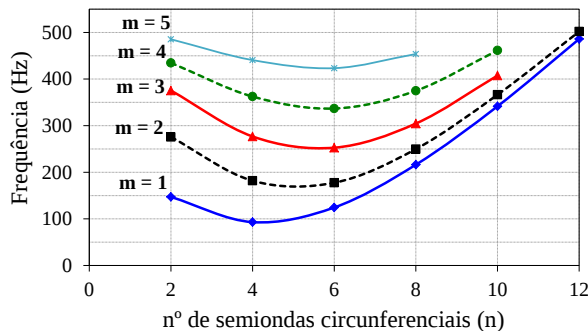
(b) Modelo B



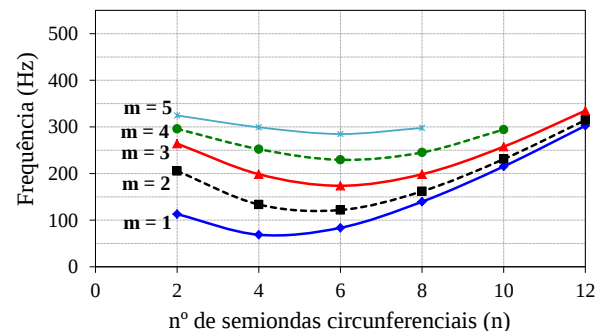
(c) Modelo C



(d) Modelo D



(e) Modelo E



(f) Modelo F

Figura 7. Frequências naturais dos modelos numéricos em função do número de semiondas.

O Modelo E (Fig.7e), semelhante ao Modelo D (Fig.7d) mas que representa a casca de aço por meio de elementos de casca fina e a casca de material refratário por meio de elementos de casca espessa, apresenta para os modos mais baixos comportamento semelhante ao do Modelo D (Fig.7d) e para os modos mais altos valores mais baixos de frequências naturais. Observa-se que o elemento de casca fina não considera as deformações por cisalhamento, sendo, portanto, mais rígido que o de casca espessa, resultando em frequências naturais mais altas nos modos mais altos onde essas deformações não podem ser desprezadas.

O Modelo F, de mesma configuração do Modelo E, mas considerando o material refratário como fissurado, apresenta valores de frequências naturais menores e menos espaçadas em relação ao Modelo E, obviamente devido à perda de rigidez do material refratário fissurado. Isto pode ser observado claramente comparando os resultados mostrados nas Figs.7e e 7f. Para o modo com seis semiondas circunferenciais e quatro semiondas longitudinais ($n = 6$, $m = 4$), por exemplo, o valor da frequência natural reduziu em 31,9% do estado íntegro para o estado fissurado. Pode-se concluir que o aspecto de integridade da casca de material refratário é de fundamental importância para a definição das características dinâmicas da casca mista.

5 MEDIÇÕES EXPERIMENTAIS

O plano de instrumentação consistiu de 31 acelerômetros resistivos modelo ASW da Kyowa Co (capacidade de 1g, 2g, 5g e 20g) localizados em diferentes posições para identificar as propriedades dinâmicas e respostas em operação normal não somente da Câmara de Orifícios, mas de todos os componentes estruturais do equipamento industrial. A Fig. 8 apresenta a posição esquemática do acelerômetro (com capacidade 5g) localizado na casca mista da Câmara de Orifícios aqui analisada. Os resultados obtidos com os demais acelerômetros e as discussões sobre os problemas encontrados e as análises numéricas e soluções propostas de vários componentes deste equipamento podem ser encontrados em Battista *et al.* (2001), Medeiros *et al.* (2010), Simões *et al.* (2009) e Battista e Varela (2013).

O sistema de aquisição de dados foi composto de dois condicionadores de sinal com 16 canais cada (modelo ADS2000 da Lynx Ltda). Os acelerômetros foram instalados em cantoneiras de alumínio que foram fixadas às estruturas dos componentes do equipamento industrial.

A Fig. 9 mostra o espectro de resposta em frequências obtida com a aplicação da transformada rápida de Fourier (FFT) ao sinal temporal do acelerômetro instalado na parede da casca.

O que pode ser imediatamente notado na Fig.9 é a grande densidade espectral da resposta da casca mista da Câmara de Orifícios, decorrente não somente das características dinâmicas da casca, mas também, da forte intensidade de turbulência da ação fluido-dinâmica que ocorre em operação normal, decorrente do fluxo turbulento de fluido ejetado das válvulas de gaveta que se espraia atingindo as paredes da casca. Observa-se também que os picos com maior densidade de energia ocorreram nas frequências de 165 Hz, 220 Hz e 248 Hz.

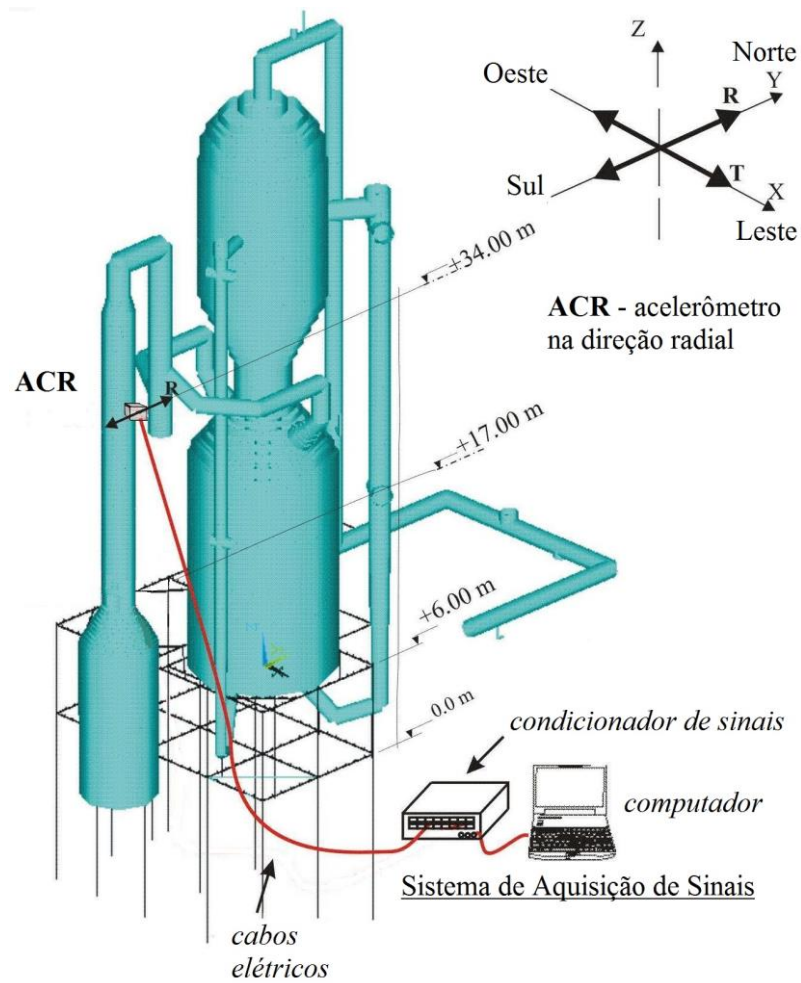


Figura 8. Instrumentação da casca mista da Câmara de Orifícios.

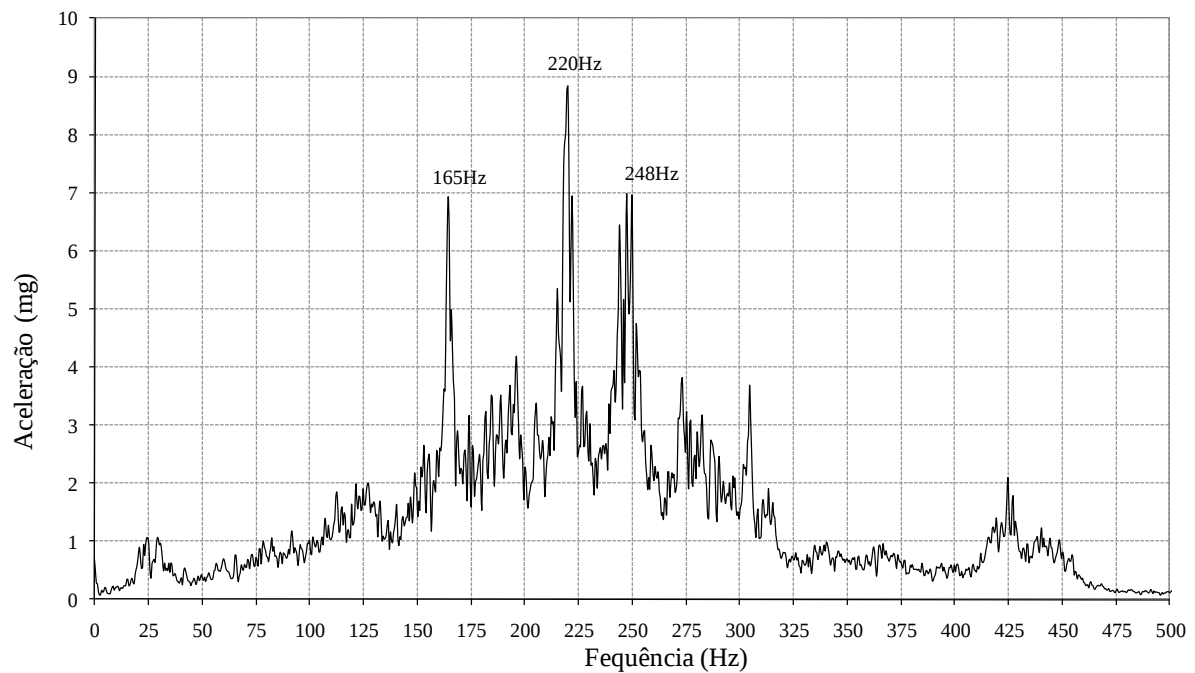


Figura 9. Espectro de resposta em frequência em termos de acelerações radiais medidas com o acelerômetro instalado na parede da casca da Câmara de Orifícios.

6 CONCLUSÕES

Foram desenvolvidos seis modelos numéricos de casca mista (aço e material cerâmico) para simular o comportamento dinâmico de um trecho de duto de aço de parede fina revestido internamente por camada refratária entre válvulas de gaveta da Câmara de Orifícios de uma planta industrial.

Os modelos foram desenvolvidos visando analisar a influência dos diferentes materiais no comportamento dinâmico da casca mista, bem como a influência da interação entre as partes e o grau de integridade do material refratário.

Observa-se de uma maneira geral que os resultados obtidos com os diversos modelos numéricos se encontram dentro da mesma faixa de frequências obtidas experimentalmente. Essa boa correlação valida os modelos numéricos desenvolvidos. Os modelos E e F, que simulam a casca mista com integração parcial entre a parede de aço e a camada refratária; além de diferentes graus de integridade, são os que melhor representam as características de vibração da estrutura, podendo ser utilizados para análises das respostas dinâmicas do sistema mecânico-estrutural sob ação fluido-dinâmica turbulento que ocorre durante operação normal do equipamento. Particularmente o modelo F, com interação parcial entre a casca de aço e a camada refratária e que simula a fissuração desse material, obteve a melhor correlação com esses resultados experimentais por apresentar suas frequências de vibração menos espaçadas que nos demais modelos numéricos analisados. Pode-se inferir que os modos dominantes obtidos com o resultado experimental correspondem aos modos do modelo F com número de semiondas longitudinais (m) /circunferenciais (n) igual a: $m=2/n=8$ para $f = 165\text{Hz}$, $m=2/n=10$ para $f = 220\text{ Hz}$ e $m=3/n=10$ para $f = 248\text{ Hz}$. Como os modos de vibração mais excitados apresentam um grande número de semiondas circunferenciais, isso acelera o estado de degradação por fissuração da camada de material refratário.

REFERÊNCIAS

- Ansys. 2005. *Basic analysis procedures*. Version 10.0, Second edition, Swanson Analysis Systems Inc.
- Battista, R., Ellinas, C. & Croll, J., 1981. Overall Buckling Of Stringer Stiffened Cylinders. - *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, v. 71, n.2, pp. 479-512.
- Battista, R., Varela, W., Oliveira, V. & Sarquis, F., 2001. *Vibrações Induzidas na Câmara de Orifícios da UFCC, Relatório Técnico 1*. COPPETEC Projeto 3191, Brasil.
- Battista, R. & Varela, W., 2013. An experimental/numerical study of the structural behaviour of a FCC unit. *Proc. of Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures (EVACES'13)*, Ouro Preto, Brasil, pp. 1-7.
- Medeiros, J., Battista, R. & Carvalho, E., 2010. Fluid Catalytic Cracking (FCC) Riser Submitted to Flow Induced Vibration Fatigue Life Estimation. *Proc. of the XXXI Iberian-Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE)*, Buenos Aires, Argentina, pp. 1-14.
- Simões, C., Patrício Jr, N., Carvalho, E. & Battista, R., 2009. Análise de fadiga em ciclones de unidades FCC sob ação fluido-dinâmica. *Proc. of the XXX Iberian-Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE)*, Armação de Búzios, Brasil, pp. 1-15.