

FLUXO DE ENERGIA VIBRATÓRIA DO CONJUNTO MOTO-COMPRESSOR PARA A CARÇAÇA DE UM COMPRESSOR HERMÉTICO ATRAVÉS DAS MOLAS DE SUSPENSÃO

Micael Gianini V. Carmo e Arcanjo Lenzi

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica
Laboratório de Vibrações e Acústica - Cx Postal 476 – 88037-140 – Florianópolis - SC
e-mail: micael@emc.ufsc.br, arcanjo@emc.ufsc.br

Edmar Baars

Empresa Brasileira de Compressores S/A - Embraco
Rua Rui Barbosa, 1020 – Joinville – SC
e-mail: Edmar_Baars@embraco.com.br

Resumo. *As molas e a carcaça de um modelo de compressor hermético alternativo foram modeladas usando o Método de Elementos Finitos, sendo os resultados validados experimentalmente. As velocidades média espacial quadrática da carcaça medidas no compressor em funcionamento e obtidas pelo modelo numérico foram comparadas e analisadas. As principais características do fluxo de potência do conjunto moto-compressor para a carcaça pelas molas foram obtidas numericamente.*

Palavras-chaves: *Compressor hermético, Molas Helicoidais, Fluxo de Potência.*

1. INTRODUÇÃO

Os crescentes níveis de exigência aos produtos e projetos desenvolvidos em engenharia, tais como: segurança, confiabilidade, durabilidade, bom desempenho, baixo preço, baixos níveis de vibrações e ruídos, requerem acurados e amplos conhecimentos físicos do comportamento e das características dinâmicas dos componentes mecânicos internos de geração de ruído e vibrações e seus demais mecanismos.

Dentre esses produtos, os equipamentos domésticos têm recentemente sido alvos dessas exigências devido ao longo período de proximidade dos usuários, tornando-se assim, umas das principais causas de desconforto e *stress* relacionados principalmente à exposição ao ruído.

Dentre os equipamentos domésticos principais responsáveis por estes efeitos estão os sistemas de refrigeração/congelamento, quais são: refrigeradores de ar e de água, *freezers*, geladeiras, e outros. A principal fonte de ruído e de vibrações desses sistemas é o compressor.

Como o objetivo principal é a atenuação dos níveis de vibração e, conseqüentemente, de ruído dos sistemas de refrigeração domésticos, o conjunto moto-compressor continua sendo o principal objeto de estudos e de otimização nestes sistemas.

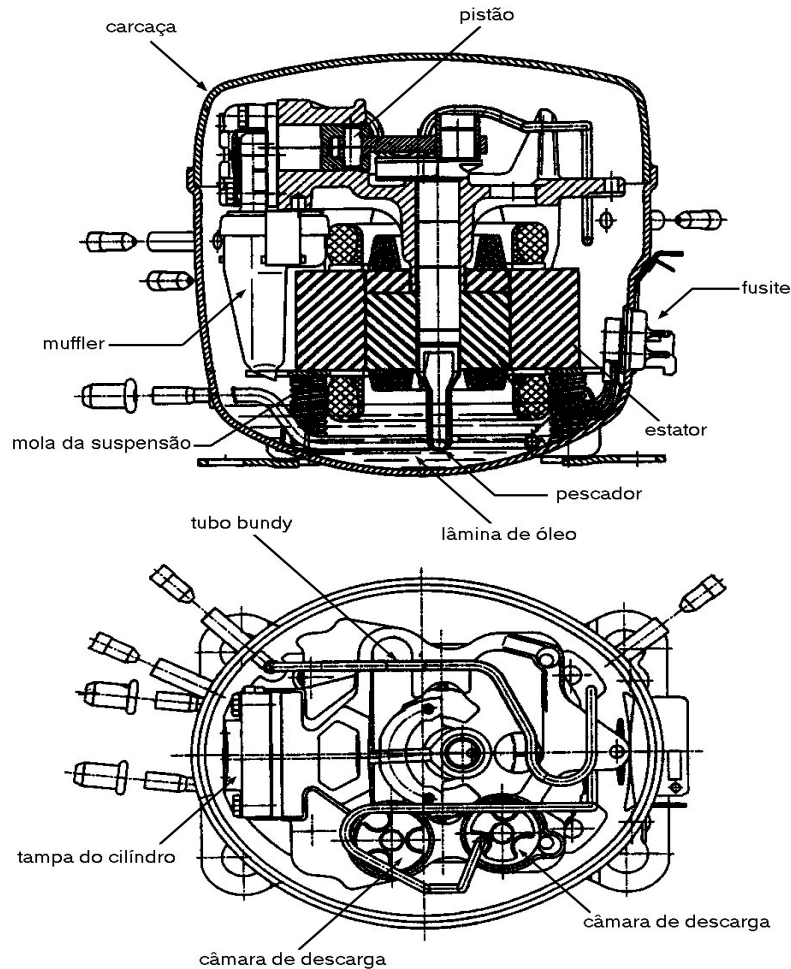


Figura 1- Compressor hermético, visto em cortes.

Os compressores herméticos são geralmente constituídos de um conjunto interno, que contém um motor elétrico, e um compressor alternativo de único pistão, ligado à carcaça através de uma suspensão inferior, e através do tubo de descarga. Um desenho de um compressor típico, fonte de estudo neste trabalho, está mostrado na Fig. 1.

Dentre os mecanismos responsáveis pela geração de vibrações no compressor destacam-se os seguintes:

- as excitações magnéticas causadas pelo fluxo magnético no motor elétrico que produzem esforços no estator e rotor, e, conseqüentemente, geram vibrações no conjunto moto-compressor.
- o fluxo intermitente de gás nas câmaras de descarga e sua pulsação causada pelo movimento oscilatório na válvula de sucção que excitam acusticamente a massa de gás contida no espaço entre a carcaça e o conjunto moto-compressor (cavidade).
- a variação brusca de pressão no fluxo de gás na descarga que ocorre quando a válvula de descarga é aberta, condicionando o gás a uma violenta queda de pressão com altíssima velocidade no tubo de saída resultando em fluxo altamente turbulento e gerando, conseqüentemente, ondas de pressão que se propagam pelo tubo e pelo gás até os demais componentes do sistema de refrigeração. Estas grandes variações de pressão excitam também vibrações no conjunto moto-compressor (Barbosa, 1989).

Um gráfico dos Níveis de Potência Sonora (NWS) médios típicos em função da frequência de compressores é mostrado na Fig. 2.

Pelos mecanismos básicos geradores de vibrações observa-se que os principais meios de propagação da energia vibratória são o tubo de descarga, as molas de suspensão e o gás que ocupa a cavidade. A carcaça é a irradiadora do ruído e transmissora de vibrações para outros componentes do sistema de refrigeração, quais são grade do condensador, carcaça e base dos equipamentos domésticos.

Quando a finalidade principal é a redução dos níveis de resposta estrutural, o preciso entendimento dos mecanismos de propagação de energia se torna de grande interesse, sobretudo quando a irradiação de ruído é parte integrante do problema.

A abordagem fundamental deste trabalho é o fluxo de energia vibratória do conjunto moto-compressor para a carcaça através das molas de suspensão, utilizando-se o método dos elementos finitos através do software comercial MSC-PATRAN/NASTRAN 70.5.

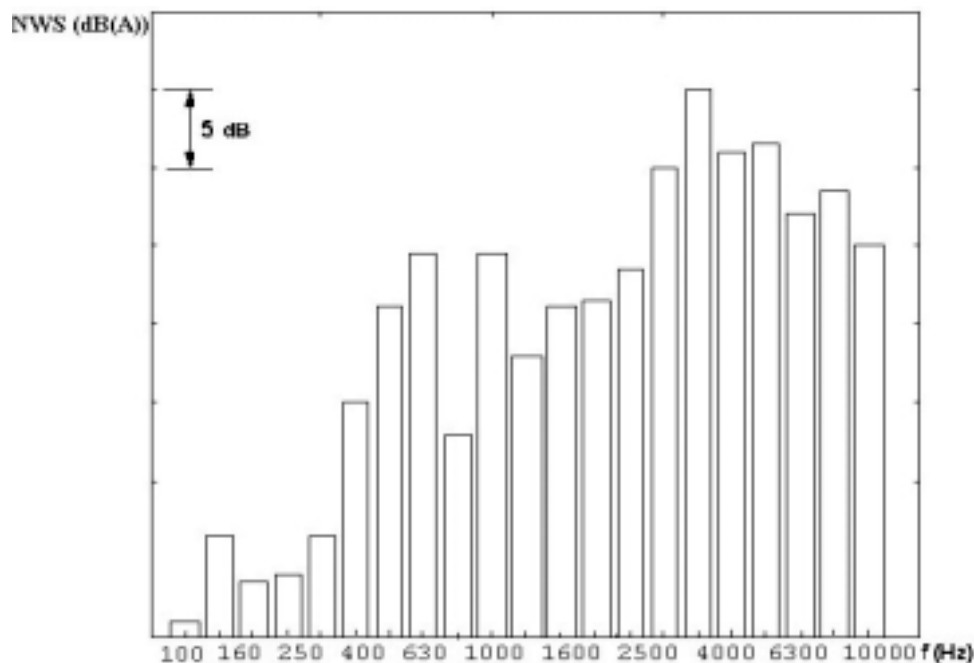


Figura 2- Níveis de Potência Sonora típicos do modelo do compressor em estudo, em faixa de 1/3 oitava. Variações em torno da média correspondem a $\pm \sigma$.

2. MODELOS NUMÉRICOS

2.1. Carcaça

A carcaça é o recipiente envolvente de todo o conjunto moto-compressor. Funciona como um receptáculo hermeticamente fechado impedindo a contaminação do gás refrigerante e do óleo lubrificante e, conseqüentemente, a queda no rendimento térmico e na vida útil dos elementos do compressor.

As principais características geométricas desse elemento estão mostradas na Fig. 1, com seção transversal de forma elíptica, com diâmetro maior de 205 mm e diâmetro menor de 171 mm, altura de 204 mm, medidas para o modelo de compressor estudado neste trabalho.

Por meio da base inferior da carcaça o conjunto moto-compressor é fixado nos equipamentos domésticos, funcionando também como um caminho de transmissão de energia vibratória para outros elementos como grade do condensador, tubos de conexão, base e carcaça dos equipamentos de refrigeração.

A carcaça foi modelada com elementos de placa quadrangulares, definidos por 4 nós de 5 graus de liberdade por nó (Blakely, 1993 e Caffrey,1994), levando-se em conta a deformação cizalhante em virtude da importância das ondas de cisalhamento em altas frequências.

A carcaça foi considerada de material isotrópico e de espessura uniforme. O modelo da carcaça e a densidade da malha usada podem ser vistos na Fig. 3.

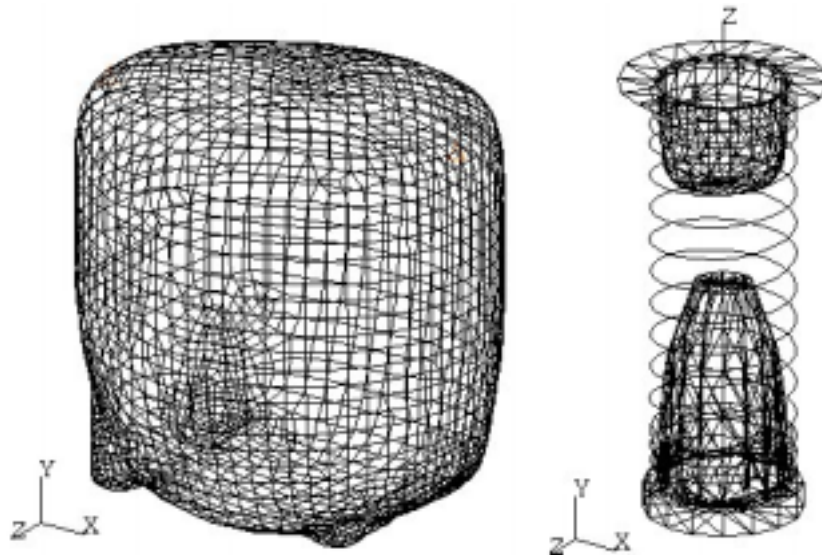


Figura 3- Modelo de Elementos Finitos da carcaça e mola/batente.

A validação do modelo numérico foi feita através da comparação numérica experimental das respostas em frequência pontual em alguns pontos de interesse. O tipo de amortecimento usado no modelo da carcaça foi amortecimento estrutural determinado através do ajuste das curvas (F.R.F.) numéricas em relação à experimental. A comparação numérica experimental das respostas em frequência esta mostrada na Fig. 4.

Ressalta-se que outros modelos de carcaça foram testados, tais como: com malha mais refinada e com outros tipos de elementos. O modelo usado mostrou-se ser computacionalmente mais barato e suficientemente preciso.

2.2. Conjunto mola/batentes

A suspensão interna situada na porção inferior da carcaça é formada por um conjunto de 4 molas, fixadas na parte inferior da carcaça apenas por encaixe em batente de plástico. Na parte superior da mola é apoiado o conjunto moto-compressor, através do estator, Fig. 1.

O material das molas é aço mola corda de piano.

Em virtude da importância dos momentos de flexão no fluxo de potência para estruturas irradiadoras tipo casca, um modelo de molas usando apenas elementos escalares seria pouco representativo no problema em questão. Assim, as molas foram modeladas com elementos de viga definidos por 2 nós com 6 graus de liberdade por nó (Blakely, 1993 e Caffrey,1994).

A mola foi considerada de material isotrópico e de diâmetro uniforme sobre toda a sua extensão. O modelo da mola e a densidade da malha usada pode ser visto na Figura 3.

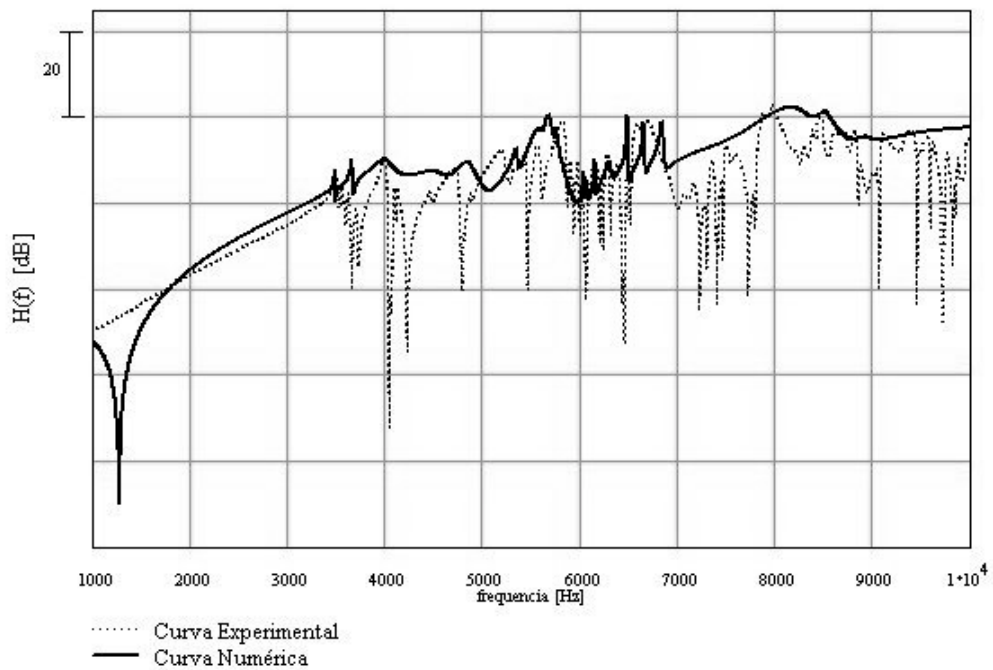


Figura 4- Comparação de respostas em frequência numérica e experimental da carcaça.

Os encaixes superior e inferior, onde a mola é acoplada ao compressor, foram modelados com os mesmos elementos de placa da carcaça, elementos quadrangulares com 4 graus de liberdade por nó.

Para a simulação da dissipação de energia no modelo de mola utilizaram-se elementos escalares de amortecimento, variando com a frequência. A quantidade de amortecimento também foi determinada através do ajuste das respostas em frequência numérica.

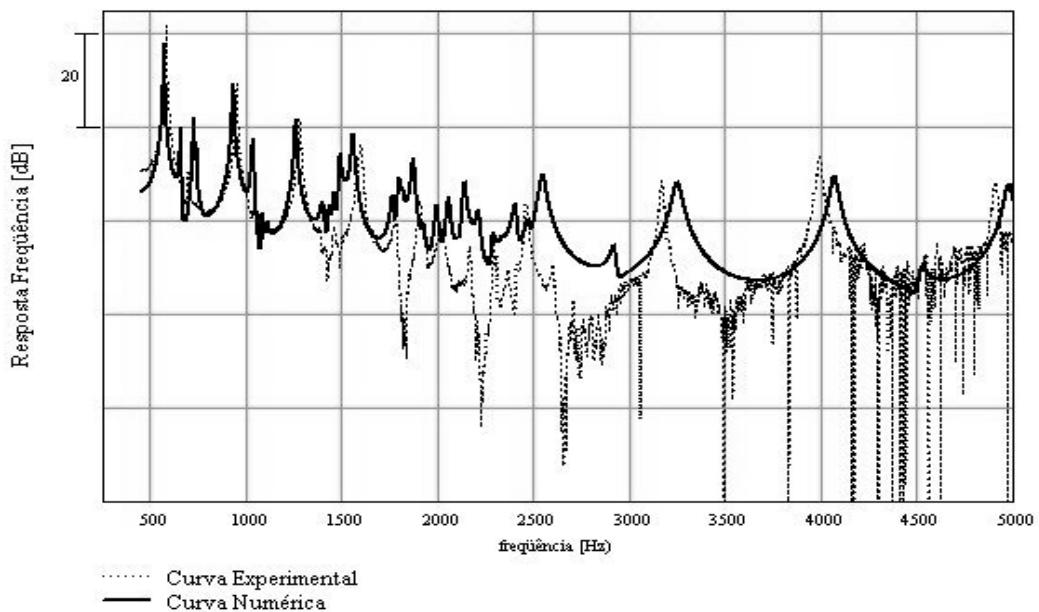


Figura 5- Comparação de respostas em frequência numérica e experimental das molas.

A validação do modelo numérico do conjunto mola-batentes foi feita através da comparação numérica experimental da resposta em frequência da força resultante longitudinal na parte de baixo do batente inferior, em relação à aceleração do batente superior, como mostram as Figs. 5 e 6.

Para efeitos de validação do modelo numérico, foi realizado um experimento em que um bloco de aço foi acoplado sobre as molas de forma similar a real, e a parte inferior das molas encaixadas em um outro bloco de aço, simulando uma base inercial. Em baixo de uma das molas um transdutor de força foi fixado de forma que os pontos de apoio da mola tivessem a mesma altura. Através da excitação do bloco superior com excitador eletrodinâmico, os sinais de força no transdutor e aceleração no topo da mola foram utilizados para o cômputo da resposta em frequência. A comparação destas duas respostas em frequência está mostrada na Fig. 5.

2.3. Conjunto carcaça/molas

O acoplamento dos modelos da carcaça e das molas foi feito através de elementos rígidos. A Fig. 6 mostra o modelo numérico do conjunto carcaça/molas acoplados.

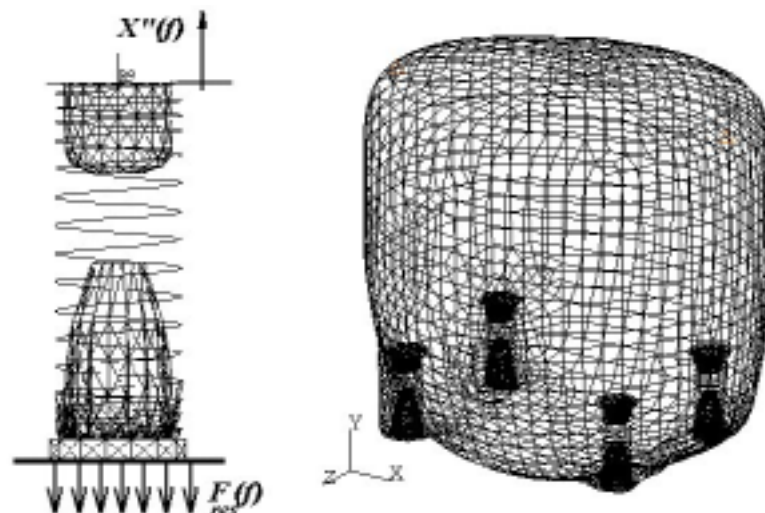


Figura 6- Esquema para validação do modelo mola/batentes e modelo de carcaça/molas acoplados.

3. ANÁLISES

Os espectros das acelerações de translação foram medidas no topo das molas do compressor em condição de funcionamento nas três direções X, Y e Z. Assim, um caso com as molas acopladas à carcaça e com as acelerações medidas usadas como excitações no topo das molas foi simulado. A média quadrática espacial de 35 pontos da velocidade normal à carcaça foi obtida numericamente e, também experimentalmente, com o compressor em condição de funcionamento.

A Fig. 8 mostra os resultados numéricos e experimentais em bandas de 1/3 de oitava. As diferenças são atribuídas às dificuldades experimentais de obtenção da velocidade média espacial da carcaça quando os demais caminhos são eliminados. Tendo em vista estas enormes dificuldades, a concordância dos resultados foi considerada boa.

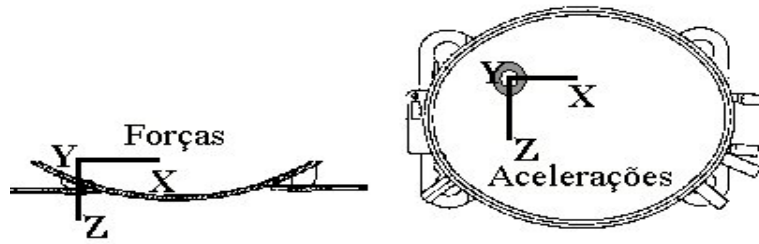


Figura 7- Sistemas de coordenadas usado como referência para simulações numéricas.

Outros três casos, sendo cada um com acelerações no topo das molas em somente uma direção foram simulados; duas simulações com excitações nas direções transversais (X e Z) e um terceiro com excitação longitudinal (Z), como mostra a Fig. 7. As curvas da velocidade média quadrática dos mesmos 35 pontos destas três simulações em bandas de 1/3 de oitava estão mostradas na Fig. 9.

A potência média representa a taxa média de trabalho realizado ou de energia fornecida para um sistema mecânico (Ingard, 1988). A potência transferida por um determinado tipo de esforço em função da frequência pode ser calculada em função da respectiva velocidade de deslocamento. Como exemplo, as potências transferidas por uma força **F** e por um momento **M**, são dadas por [Baars, 1996].

$$W_{ir}^F(f) = \frac{1}{2} \text{Re}\{\overline{F}_i(f) \cdot \overline{V}_i^*(f)\} \tag{1}$$

$$W_{ir}^M(f) = \frac{1}{2} \text{Re}\{\overline{M}_i(f) \cdot \overline{\theta}_i^*(f)\}$$

sendo $V(f)$ e $\theta'(f)$ as velocidades de translação e de rotação, e * representa o complexo conjugado.

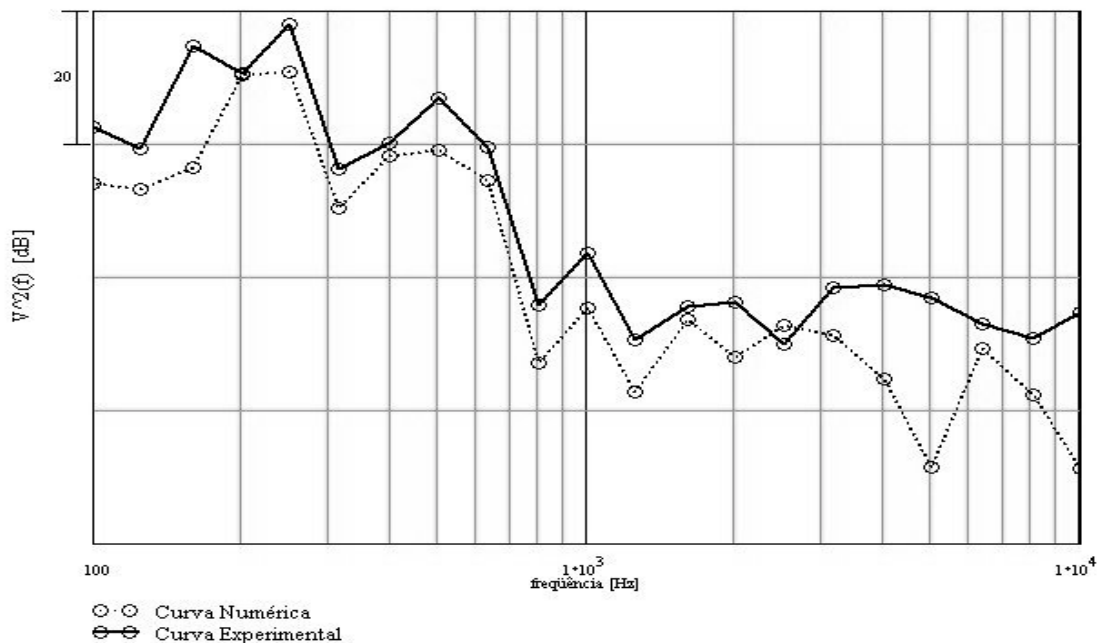


Figura 8- Velocidade média quadrática espacial numérica e experimental.

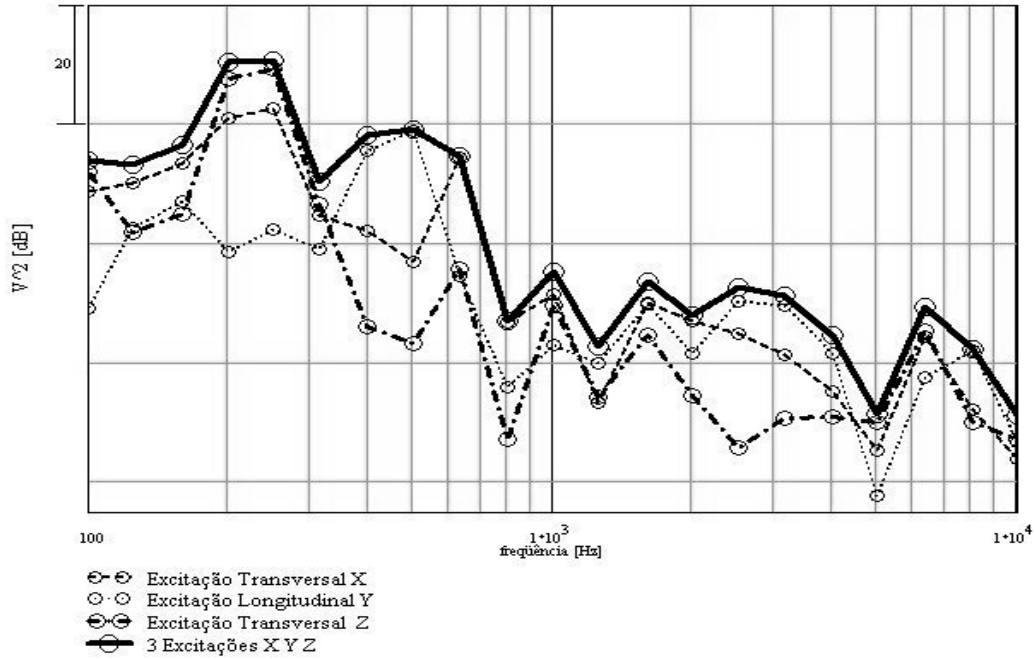


Figura 9- Velocidade média quadrática espacial para excitações em X, Y e Z.

O fluxo de potência da mola para a carcaça causados pelas forças (F_x , F_y e F_z) foram calculados e estão mostrados na Fig. 10, e os causados pelos momentos (M_x e M_y) mostrados na Fig. 11 em bandas de 1/3 de oitava. O sistema de coordenadas usado como referência é mostrado na Fig. 7.

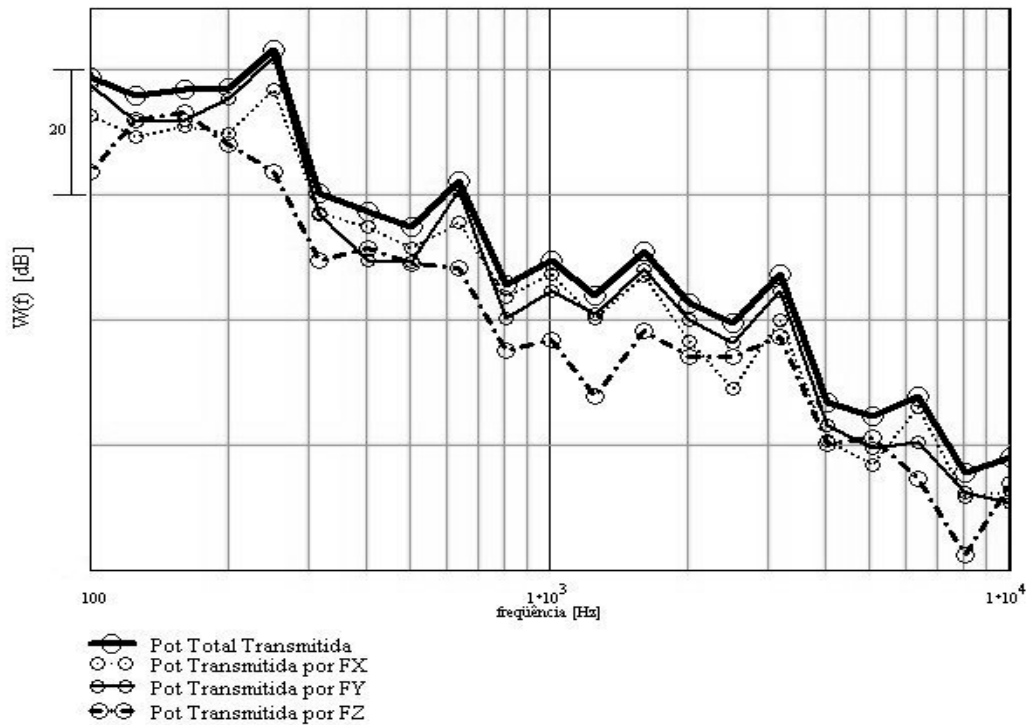


Figura 10- Fluxo Potência transmitida pela mola para a carcaça pelos esforços tipo Força (F_x , F_y e F_z).

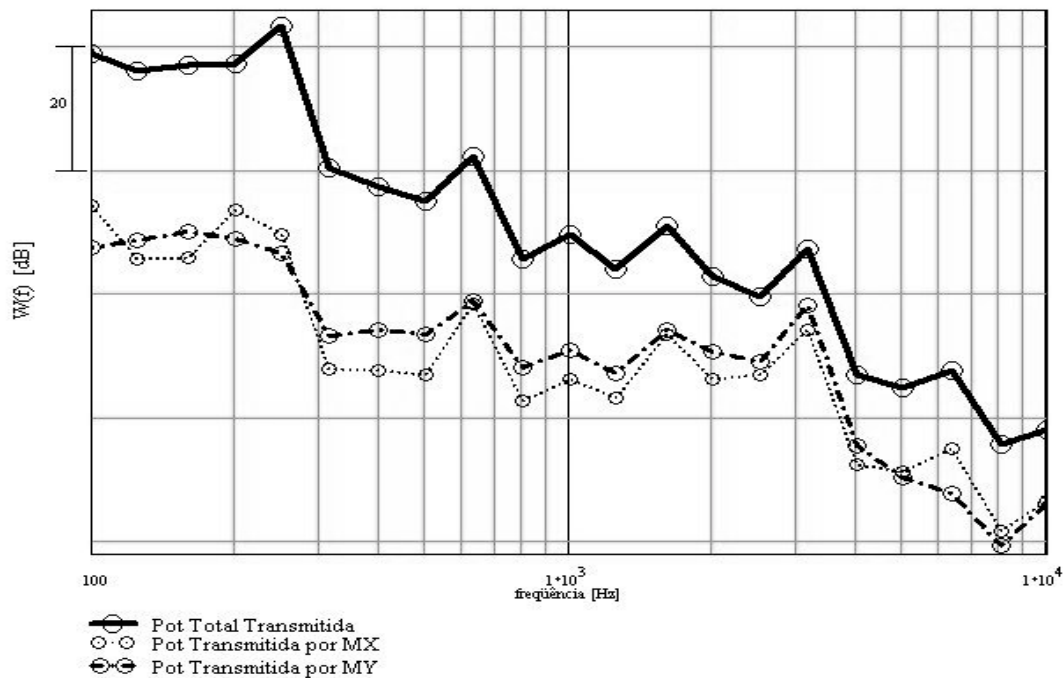


Figura 11- Fluxo Potência transmitida pela mola para a carcaça pelos esforços tipo Momento (Mx e My).

Observa-se através da Fig. 9 que os esforços causados pelos deslocamentos longitudinais (direção Y) e transversal na direção X, são os responsáveis pelas maiores excitações da carcaça, principalmente na região de frequências entre 1 kHz e 5 kHz. Os esforços tipo força, orientados segundo as direções X e Z (Fx e Fz), também são os responsáveis pelas maiores excitações da carcaça, como mostra a Fig. 10. A Fig.11 mostra que os esforços tipo momento proporcionam fluxos de energia considerados pouco importantes.

4. CONCLUSÕES

Os resultados de respostas da carcaça obtidos numericamente apresentam boa concordância com os experimentais, apesar das sérias dificuldades de realização dos experimentos, em que o compressor opera nas condições de teste, onde são eliminados os demais caminhos de fluxo de energia para a carcaça.

Os esforços tipo força transmitidos para a carcaça são responsáveis pelos maiores fluxos de potência transmitidas. Projetos de novas carcaças devem considerar estes efeitos nas regiões de fixação das molas.

REFERÊNCIAS

Baars, E. , Fluxo de Potência Vibratória em Componentes Estruturais Tipo Barras e Vigas, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, UFSC, 1996.

- Barbosa, W. A., Estudo do Fluxo de Energia Vibratória entre o Conjunto Moto-Compressor e a Carcaça de um Compressor Hermético por Análise Estatística Energética, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, UFSC, 1989.
- Blakely, K. , MSC/NASTRAN Basic Dynamic Analysis – User’s Guide, The Macneal-Schwendler Corporation,1993.
- Caffrey, J. P. & Lee, J. M. , MSC/NASTRAN Linear Static Analysis – User’s Guide, The Macneal-Schwendler Corporation,1994.
- Ingard, K. U., Fundamentals of Waves and Oscillations, Cambridge University Press, New York, 1988.
- Sangoi, R. , Estudo de Identificação de Fontes de Ruído e Vibrações em um Compressor Hermético, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, UFSC, 1983.

VIBRATORY ENERGY FLOW FROM PUMP MOTOR ASSEMBLY TO COMPRESSOR CASING OF A HERMETIC COMPRESSOR THROUGH SUSPENSION SPRINGS

***Abstract.** The suspension springs and casing of a hermetic reciprocating compressor were modeled by the Finite Elements Method. Experimental testing has been made in order to validate the numeric models, results obtained showed good agreement. Measurements on operating compressor and results obtained by Finite Element model of the spatial squared velocity of the casing were compared and discussed. The principal features of the power flow from the motor pump assembly to the casing through mounting springs were obtained numerically.*

***Key-words:** Helical springs, Power Flow, Hermetic Compressor.*