

Estudo da Influência da Fundação na Resposta de Sistemas Rotativos

Augusto Crispim Mengalli Gilberti de Alencar, augustocmga@gmail.com¹

César Silva Rother, cesar.rother@gmail.com¹

Tiago Henrique Machado, tiagomh@fem.unicamp.br¹

¹Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, Rua Mendeleyev, 200 - CEP 13083-860, Campinas - SP

Resumo: A estrutura de fundação, também denominada simplesmente Fundação, é o elemento responsável pelo suporte nas máquinas rotativas. A fundação transmite a vibração do equipamento para o solo, mas também é fonte de vibração para o conjunto. Nesse aspecto, o conhecimento do comportamento dinâmico da fundação é de suma importância para evitar quebra de equipamento e custos com manutenção. Esse trabalho consiste na simulação de um rotor com a variação de diversos parâmetros da fundação, considerando para isso três modelagens diferentes: fundação rígida, parâmetros concentrados e impedância mecânica. A modelagem de fundação rígida é a modelagem mais simples e implica em desconsiderar a influência da fundação na resposta global. A modelagem por parâmetros concentrados considera a fundação como um sistema massa-mola-amortecedor acoplado ao nó de cada mancal. A modelagem por impedância mecânica necessita do cálculo da matriz de flexibilidade para obter a impedância mecânica e acoplar as equações do rotor e dos mancais com a da fundação. A partir da análise da resposta em frequência e do Diagrama de Campbell, é possível notar alterações nas frequências naturais e amplitudes para diferentes configurações de fundação, evidenciando a importância dos parâmetros da fundação para a análise dos equipamentos.

Palavras-chave: Dinâmica de Rotores, Estrutura de Fundação, Parâmetros Concentrados, Impedância Mecânica

1. INTRODUÇÃO

O uso de máquinas rotativas remonta a Idade Antiga, com a utilização de rodas d'água para transporte de água para aquedutos. Após muito desenvolvimento científico, o mesmo princípio é aplicado usando o movimento da água para geração de potência. Além das grandes turbinas usadas em usina hidrelétricas, também é possível encontrar rotores, mancais e estruturas em máquinas elétricas, turbo-geradores e bombas (Friswell, 2010).

A importância desempenhada pelo funcionamento dessas máquinas permitiu o surgimento de uma linha de estudo direcionada para entender os fenômenos associados à rotação (Tuckmantel, 2010). A rotação do eixo do rotor nos mancais suportados pela estrutura apresenta efeitos específicos que podem ser visualizados tanto em simulações computacionais quanto em procedimentos experimentais.

Vários trabalhos contemplam a relação entre os mancais e o rotor, e dentre os trabalhos mais recentes publicados nesta área pode-se citar Zhao *et al.* (2005), Yang *et al.* (2006), Machado *et al.* (2010) e Alves *et al.* (2015). A inclusão da fenomenologia causada pela fundação representa um passo a mais para tornar o modelo mais robusto. O conhecimento do comportamento completo permite identificar frequências naturais oriundas da fundação e permite que a mudança dos parâmetros da estrutura ajuste essas frequências para diminuir a influência no comportamento global do equipamento na faixa de operação.

Vários autores tem estudado formas de se incluir os efeitos da fundação na resposta do sistema, além de avaliar o impacto da fundação no comportamento dinâmico do rotor, dos quais pode-se citar Stephenson and Rouch (1992); Feng and Hahn (1995); Kang *et al.* (2000) e Cavalca *et al.* (2005).

Com o intuito de entender esses efeitos, é possível utilizar as formulações de parâmetros concentrados e impedância mecânica de maneira a criar matrizes mais representativas do sistema. Nesse trabalho, será avaliada a influência da fundação na resposta dinâmica do sistema, usando para isso os dois métodos de inserção citados.

2. MODELAGEM

A modelagem consiste em representar os elementos do sistema de tal maneira que o comportamento real possa ser previsto por uma simulação computacional. Modelos normalmente são baseados em simplificações, como derivadas nulas e linearizações. Modelos com poucas simplificações representam melhor a realidade, porém exigem alto custo computacional, ao passo que um modelo mais simplificado pode proporcionar respostas coerentes para o caso estudado.

Esta seção apresenta os modelos utilizados para os cálculos: modelo de eixo, modelo de disco rígido, modelo de mancal e modelos de fundação. Para a modelagem de fundação, mais de um modelo foi considerado para avaliar a

influência de diferentes modelos na resposta do sistema.

2.1 Modelo de Eixo

O eixo é modelado com 4 (quatro) graus de liberdade por nó, com 2 (duas) coordenadas de translação e 2 (duas) coordenadas de rotação, como mostrado na Fig. 1, onde W e V são as translações e B e Γ são as rotações. Para este trabalho, foi escolhido um eixo cilíndrico a fim de também obter elementos cilíndricos. Nelson (1980) apresenta uma equação para o movimento de um elemento de eixo rotativo que foi modificada nesse trabalho de modo a incluir o amortecimento estrutural proporcional, como mostrada na Equação 1.

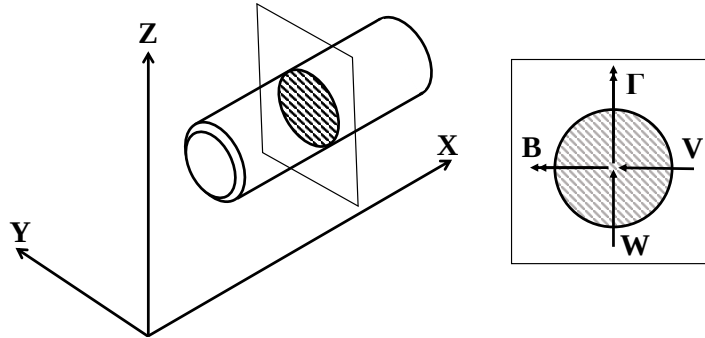


Figura 1: Representação das Coordenadas dos Graus de Liberdade de cada Nó do Eixo

$$[M]\{\ddot{q}\} + ([C] - \Omega[G])\{\dot{q}\} + [K]\{q\} = \{F\}$$

$$\{q\}^T = \{V_i, W_i, B_i, \Gamma_i, V_j, W_j, B_j, \Gamma_j\} \quad (1)$$

Cada elemento é formado por 2 (dois) nós adjacentes e, portanto, possui 8 (oito) graus de liberdade. Os elementos de eixo possuem matrizes de massa, de rigidez, de amortecimento e giroscópica que são calculadas a partir dos fatores de forma e propriedades geométricas e físicas dos elementos (Nelson, 1980).

A Fig. 2 mostra a montagem da matriz global para o eixo, os elementos em cinza escuro representam elementos obtidos a partir da superposição de matrizes, ou seja, da soma de matrizes de diferentes elementos. Para uma discretização de 5 nós, por exemplo, os elementos são representados por uma matriz 8x8 e a matriz global é uma matriz 20x20.

		Nó 1	Nó 2	Nó 3	Nó 4	Nó 5
		Elemento 1				Elemento 3
		Elemento 2				Elemento 4
Nó 1	Elemento 1					
Nó 2	Elemento 2					
Nó 3	Elemento 3					
Nó 4	Elemento 4					
Nó 5	Elemento 5					

Figura 2: Montagem das Matrizes Globais a partir das Matrizes dos Elementos para Discretização com 5 Nós

2.2 Modelo de Disco Rígido

O disco rígido é modelado com o centro de massa coincidente com a linha elástica do rotor. Ele possui os mesmos graus de liberdade dos nós do eixo (Tuckmantel, 2010), no entanto, este tipo de elemento não apresenta flexibilidade. As matrizes do disco rígido são mostradas na Equação 2.

$$M_{disco} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_t \end{bmatrix}, G_{disco} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -J_p \\ 0 & 0 & J_p & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

m representa a massa do disco

J_t e J_p representam os momentos de inércia transversal e polar respectivamente.

2.3 Modelo de Mancal

O mancal é responsável por permitir o movimento relativo entre o rotor (parte móvel) e o estator (parte fixa), representado pela fundação. É um componente importante para limitar ou guiar os graus de liberdade e também influencia na resposta oscilatória do sistema. O mancal deve dissipar o mínimo de energia possível (Tuckmantel, 2010). Existem diversos tipos de mancal, tanto na maneira de permitir o movimento, utilizando, por exemplo, esferas, óleo ou eletromagnetismo, quanto na geometria, como cilíndricos, elípticos ou segmentados. A Fig. 3 mostra uma representação do mancal utilizado neste trabalho, hidrodinâmico, curto e cilíndrico.

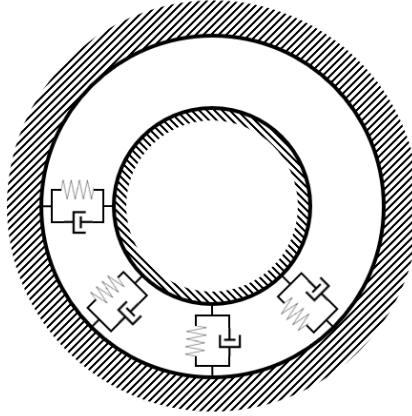


Figura 3: Representação do Mancal com Molas e Amortecedores equivalentes

Para este trabalho, o filme de óleo é modelado como vários conjuntos mola-amortecedor. Krämer (1993) descreve os parâmetros e coeficientes de rigidez e amortecimento como uma função da excentricidade, que por sua vez é uma função da velocidade de rotação do rotor. Os parâmetros de rigidez e amortecimento são mostrados nas Equações 3 e 4. As matrizes do mancal possuem dimensão 2x2, nas coordenadas de translação correspondentes do nó que possui o mancal, V e W.

$$K_{mancal} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix}, k_{ik} = \gamma_{ik} \frac{F_0}{\delta} \quad (3)$$

$$C_{mancal} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{bmatrix}, c_{ik} = \beta_{ik} \frac{F_0}{\Omega \delta} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \gamma_{11} &= [2\pi^2 + (16 - \pi^2)\epsilon^2]A(\epsilon) \\ \gamma_{12} &= \frac{\pi}{4} \frac{\pi^2 - 2\pi^2\epsilon^2 - (16 - \pi^2)\epsilon^4}{\epsilon(1 - \epsilon^2)^{1/2}} A(\epsilon) \\ \gamma_{21} &= -\frac{\pi}{4} \frac{\pi^2 + (32 + \pi^2)\epsilon^2 + (32 - 2\pi^2)\epsilon^4}{\epsilon(1 - \epsilon^2)^{1/2}} A(\epsilon) \\ \gamma_{22} &= \frac{\pi^2 + (32 + \pi^2)\epsilon^2 + (32 - 2\pi^2)\epsilon^4}{1 - \epsilon^2} A(\epsilon) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \beta_{11} &= \frac{\pi}{2} \frac{(1 - \epsilon^{1/2})}{\epsilon} [\pi^2 + (2\pi^2 - 16)\epsilon^2] A(\epsilon) \\ \beta_{12} &= \beta_{21} - [2\pi^2 + (4\pi^2 - 32)\epsilon^2] A(\epsilon) \\ \beta_{22} &= \frac{\pi}{2} \frac{\pi^2 + (48 - 2\pi^2)\epsilon^2 + \pi^2\epsilon^4}{\epsilon(1 - \epsilon^2)^{1/2}} A(\epsilon) \end{aligned} \quad (6)$$

$$A(\epsilon) = \frac{4}{[\pi^2 + (16 - \pi^2)\epsilon^2]^{3/2}} \quad (7)$$

F_0 representa o carregamento estático no mancal

δ representa a folga radial

Ω representa a velocidade angular de operação

ϵ representa a excentricidade

Estas matrizes de rigidez e amortecimento dos mancais são inseridas nas matrizes globais do sistema nos nós relativos a cada um dos mancais, de forma a incluir a flexibilidade e o amortecimento inerentes do filme de óleo.

2.4 Modelo de Fundação

A fundação é responsável pela interação entre o mancal e o solo e pode ser modelada como um sistema massa-mola-amortecedor nas direções de vibração lateral do rotor, como mostrado na Fig. 4. Existem 3 (três) principais abordagens que permitem o acoplamento da fundação na equação de movimento do sistema: parâmetros concentrados, impedância mecânica e coordenadas mistas. Neste trabalho será estudado o comportamento das duas primeiras formulações em relação a uma fundação rígida.

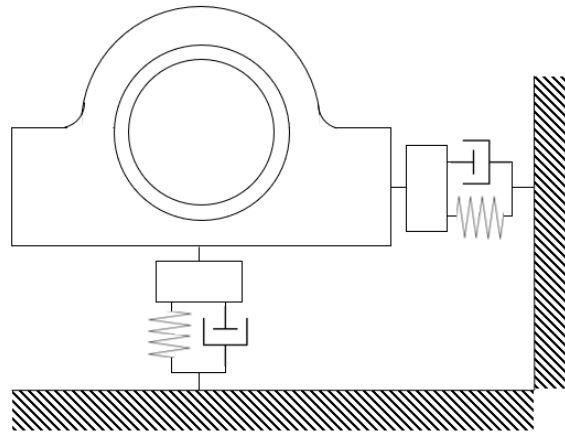


Figura 4: Representação da Fundação como um Sistema Massa-Mola-Amortecedor

A formulação por parâmetros concentrados consiste em encontrar as matrizes de massa $[M_f]$, rigidez $[K_f]$ e amortecimento $[R_f]$ da fundação de maneira coerente com a discretização do eixo, a equação de movimento da fundação em coordenadas físicas é mostrada na Equação 8.

$$[M_f]\{\ddot{x}_f\} + [R_f]\{\dot{x}_f\} + [K_f]\{x_f\} = F_f(t) \quad (8)$$

x_f representa as coordenadas dos nós de conexão entre rotor e fundação

A Equação 9 mostra a equação do sistema completo. A dificuldade deste método consiste em encontrar os valores dos parâmetros que sejam representativos para o tipo de fundação em análise.

$$\begin{bmatrix} M_{rr} & 0 \\ 0 & M_{ff} + M_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_r \\ \ddot{x}_f \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} R_{rr} & R_{rf} \\ R_{fr} & R_{ff} + R_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_r \\ \dot{x}_f \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{rr} & K_{rf} \\ K_{fr} & K_{ff} + K_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_r \\ x_f \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_r \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (9)$$

x_r representa as coordenadas do rotor

O método de impedância mecânica consiste em obter a matriz de flexibilidade e, posteriormente, a matriz de impedância mecânica. A matriz de flexibilidade pode ser obtida a partir tanto da formulação de parâmetros concentrados quanto experimentalmente. A matriz de flexibilidade com parâmetros concentrados é dada pela Equação 11, a partir da substituição das relações mostradas na Equação 10 na Equação 8. A matriz de flexibilidade obtida experimentalmente é dada pela Equação 12. A grande vantagem desta formulação é a possibilidade de incluir informações experimentais da fundação (através de uma análise modal da estrutura) no modelo teórico do rotor.

$$x_f = \{x_{f0}\}e^{i\Omega_e t}, F_f = \{F_{f0}\}e^{i\Omega_e t} \quad (10)$$

$$[H(\Omega_e, p)]_{analitica} = -(-\Omega_e^2[M_f] + i\Omega_e[R_f] + [K_f])^{-1} \quad (11)$$

$$[H(\Omega_e, p)]_{experimental} = -[\Phi]^t[\Phi](-\Omega_e^2[m_f] + i\Omega_e[r_f] + [k_f])^{-1} \quad (12)$$

Ω_e representa a frequência de excitação

$[\Phi]$ representa a matriz modal da fundação

$[m_f], [r_f], [k_f]$ são as matrizes da fundação em coordenadas modais

A matriz de impedância mecânica é obtida a partir da inversão da Equação 11 ou 12, como mostrado na Equação 13.

$$[I(\Omega_e, p)] = [H(\Omega_e, p)]^{-1} \quad (13)$$

A equação de movimento da fundação com as matrizes de flexibilidade e de impedância mecânica é mostrada na Equação 14

$$x_{f0} = -[H(\Omega_e, p)]F_{f0} \rightarrow F_{f0} = -[H(\Omega_e, p)]^{-1}x_{f0} = [I(\Omega_e, p)]x_{f0} \quad (14)$$

3. PROCEDIMENTO COMPUTACIONAL

O rotor simulado é mostrado na Fig. 5. É um rotor laval centrado com mancais hidrodinâmicos e fundação com valores de massa, rigidez e amortecimento variáveis.

A formulação considerando a fundação totalmente rígida consiste da resposta para um sistema rotor-mancal, uma vez que uma rigidez extremamente alta permite a passagem de toda a vibração para o solo. A formulação considerando a fundação por parâmetros concentrados e por impedância mecânica consiste da resposta para um sistema rotor-mancal-fundação com a fundação representada por um conjunto de massa, mola e amortecedor (Krämer, 1993).

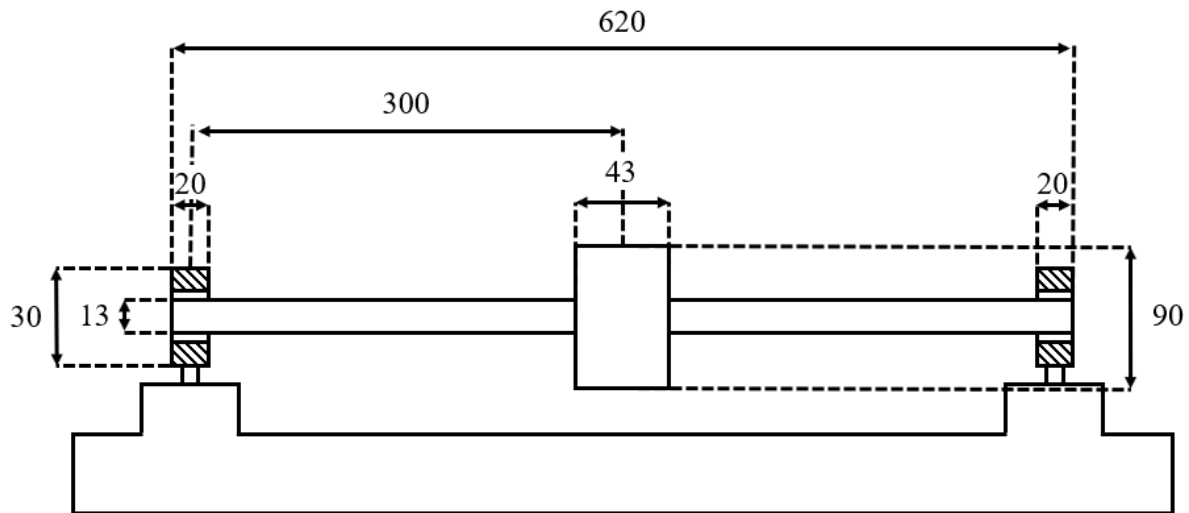


Figura 5: Rotor Laval Utilizado (Dimensões em mm)

A modelagem do problema utiliza elementos finitos para discretizar o eixo e os mancais e obter os deslocamentos em cada nó. O modelo foi dividido em 13 nós e possui, consequentemente, 12 elementos.

O eixo é feito de aço, com Módulo de Elasticidade $E = 200 \text{ GPa}$, densidade $\rho = 7860 \text{ kg/m}^3$ e coeficiente de proporcionalidade do amortecimento $\beta = 2 \times 10^{-4}$.

Os mancais foram modelados dispostos de maneira simétrica nos nós 2 e 12. Os mancais têm diâmetro de 30 mm e largura de 20 mm, com folga radial de 0,09 mm e viscosidade de 0,07 Pa.s.

A massa foi posicionada no centro do eixo, com a força devido ao desbalanceamento rotativo presente no nó 7 e causada por uma massa de 1,5 g com excentricidade de 41 mm. A discretização do sistema rotor-mancais é mostrada na Fig. 6.

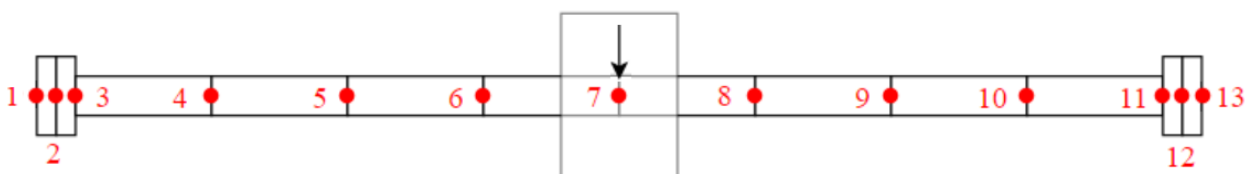


Figura 6: Nós do Modelo de Rotor Laval Utilizado

Considerando o diâmetro e o comprimento dos elementos, existem 2 (dois) tipos de elementos no modelo. As dimensões de cada tipo são mostradas na Tab. 1.

Tabela 1: Dimensões dos Tipos de Elemento

Tipo de Elemento	Comprimento (mm)	Diâmetro (mm)	Elementos Correspondentes
I	10	30	1, 2, 11, 12
II	72,5	13	3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Primeiramente, o rotor foi simulado com a fundação rígida. A Figura 7 mostra a amplitude e a fase da resposta para o nó com o disco e para o nó com o mancal.

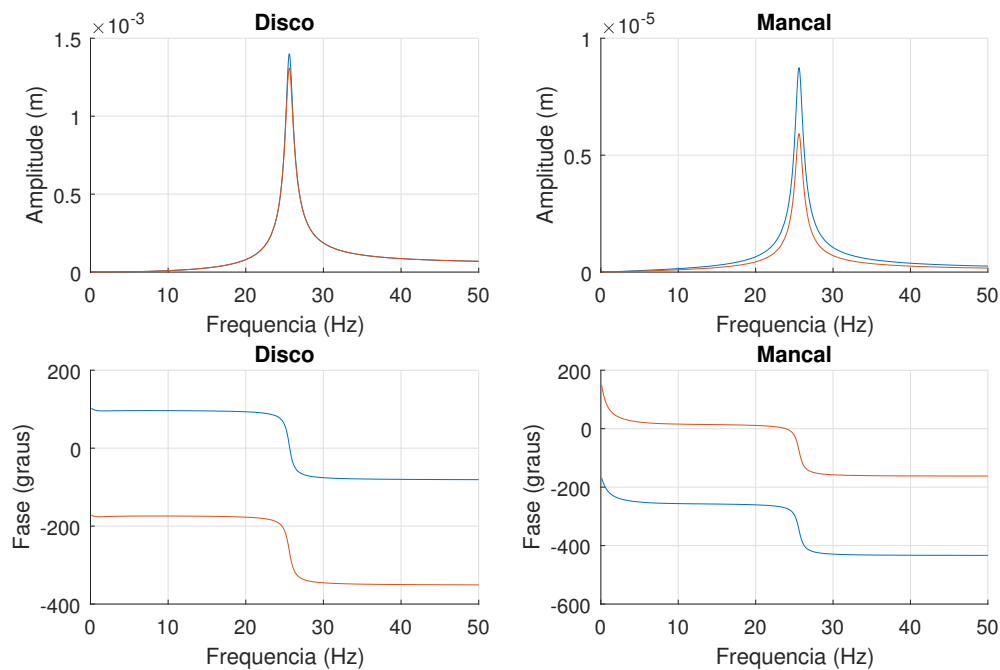


Figura 7: Amplitude e Fase para Fundação Rígida

A frequência de ressonância é de aproximadamente 25,6 Hz, como é possível ver nos picos de amplitude e na mudança de 180° nos gráficos de fase. As direções Y e Z apresentam comportamento muito semelhante.

Os próximos resultados são para uma fundação flexível inserida através do método dos parâmetros concentrados. Os parâmetros da fundação utilizados para esta simulação foram: massa de 10 kg, amortecimento de 10 Ns/m e rigidez de 100 N/m. A Figura 8 mostra os resultados de amplitude e fase para este caso.

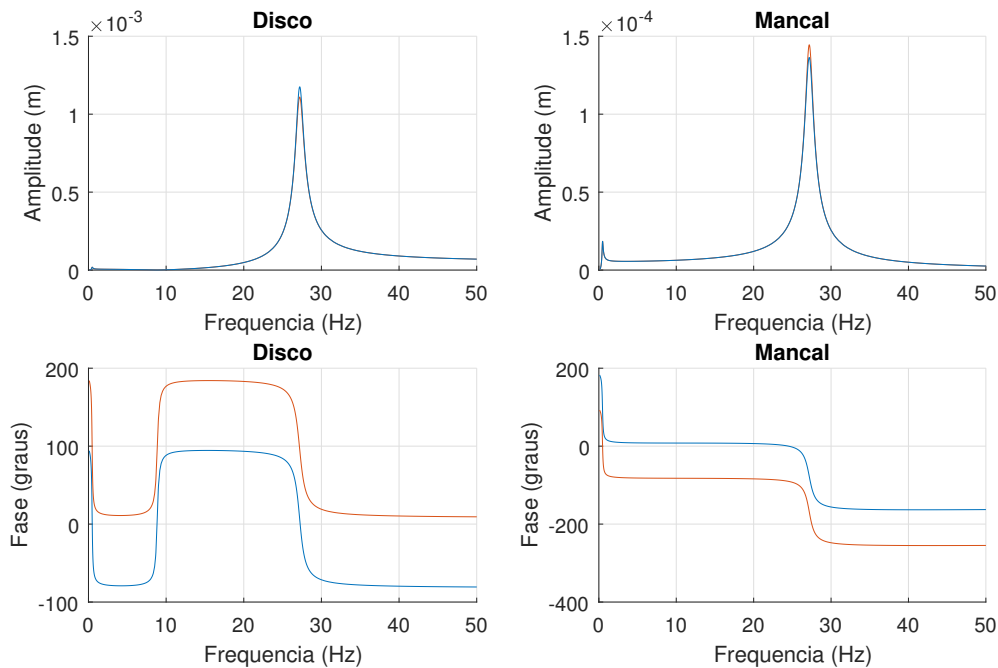


Figura 8: Amplitude e Fase para Fundação Flexível - Caso 1

Analisando a Fig. 8 é possível perceber um pico pequeno de amplitude (tanto no disco como no mancal) em uma frequência baixa. Este pico de amplitude retrata a influência da frequência natural da fundação na resposta do sistema rotativo. O outro pico de amplitude é muito mais evidente e está em uma frequência de 27Hz, um pouco após a primeira frequência crítica observada no caso do rotor rígido.

A Figura 9 mostra os resultados de amplitude e fase para o modelo com a inclusão da fundação por parâmetros concentrados considerando agora a massa da fundação como 10 kg, o amortecimento da fundação como 10^{10} Ns/m e a rigidez da fundação de 100 N/m.

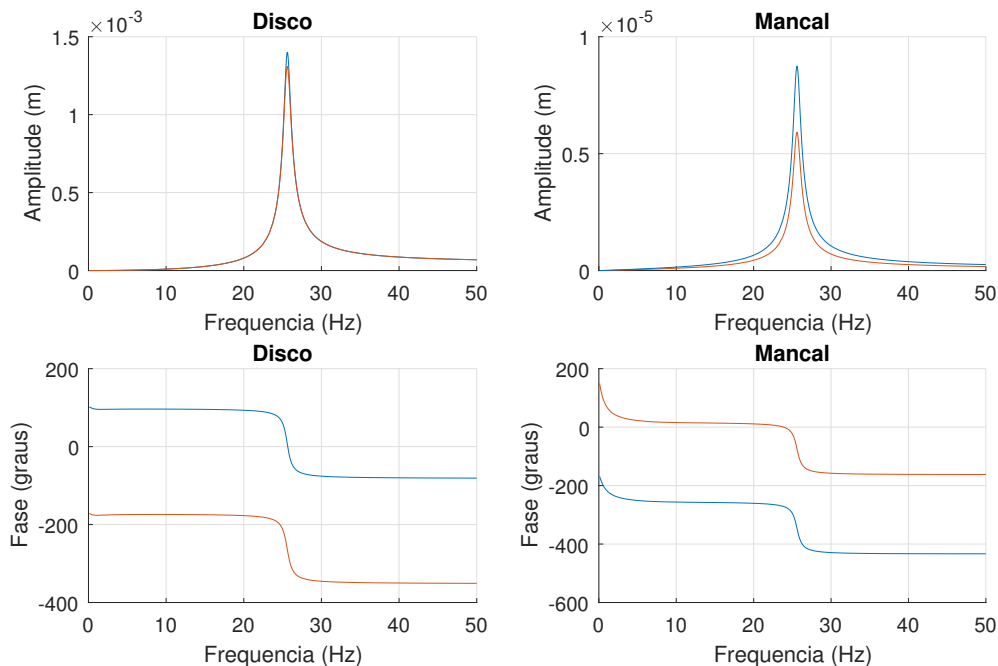


Figura 9: Amplitude e Fase para Fundação Flexível - Caso 2

A análise da Fig. 9 permite visualizar que o aumento do amortecimento eliminou o primeiro pico de amplitude da resposta, quando comparada com a Fig. 8, e a frequência de ressonância retornou para 25,6 Hz, primeira frequência crítica para o caso rígido. Um amortecimento elevado impede a influência da rigidez, deixando os resultados muito próximos do caso rígido.

A Fig. 10 mostra os últimos resultados simulados no artigo. Para este caso, utiliza-se o modelo de impedância mecânica, onde a matriz de flexibilidade é obtida a partir da formulação de parâmetros concentrados (Eq. 11). São apresentadas as respostas de amplitude e fase para o sistema, considerando agora uma fundação anisotrópica, com a massa da fundação de 10 kg, o amortecimento da fundação de 10 Ns/m e a rigidez da fundação de 100 N/m na direção horizontal e o amortecimento da fundação como 10 Ns/m e a rigidez da fundação de 10^{12} N/m na direção vertical.

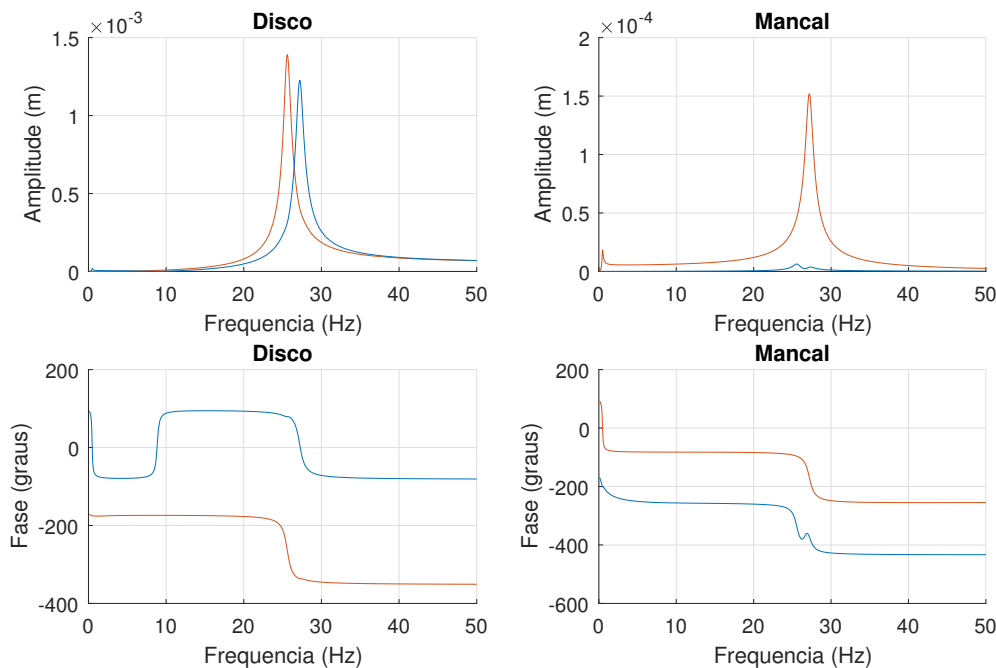


Figura 10: Amplitude e Fase para Fundação Flexível - Caso 3

A anisotropia fica evidente com o comportamentos das amplitudes e fases. Como era esperado, devido as características de cada direção da fundação, a direção horizontal apresentou comportamento semelhante ao caso 1 enquanto a direção vertical foi semelhante ao caso 2.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou amplitudes e fases da resposta em frequência do sistema rotativo para elucidar o comportamento da inclusão da modelagem da fundação nos modelos que já incluem rotores e mancais.

Os resultados indicam a influência da fundação flexível quando comparada com o modelo de fundação rígida. É possível perceber uma significativa mudança da posição dos picos de ressonância, uma vez que mais graus de liberdade são incluídos no modelo. As diferentes simulações com variação de massa, rigidez e amortecimento resultaram em picos próximos, porém não coincidentes, mostrando que a variação de parâmetros também possui limitações de influência.

Em relação à comparação entre as modelagens de parâmetros concentrados e impedâncias mecânicas, os resultados foram muito próximos, o que é coerente, visto que inicialmente a matriz de impedância mecânica foi consequência dos parâmetros usados. Como foi discutido, a matriz de impedância mecânica também pode ser obtida experimentalmente e, portanto, inserida diretamente no modelo, substituindo a matriz obtida a partir de parâmetros concentrados. No entanto, esta abordagem não foi apresentada nos resultados deste trabalho.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CAPES, CNPq e projeto nº 2017/07454-8 da Fundação de Pesquisa de São Paulo (FAPESP) pelo apoio financeiro a esta pesquisa.

7. REFERÊNCIAS

- Alves, D.S., Daniel, G.B. and Cavalca, K.L., 2015. "Thermal effects in hydrodynamic cylindrical bearings". *Proceedings of the 9th IFToMM International Conference on Rotor Dynamics*, pp. 1123–1133.
- Cavalca, K.L., Cavalcante, P.F. and Okabe, E.P., 2005. "An investigation on the influence of the supporting structure on the dynamics of the rotor system". *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 19, pp. 157–174.
- Feng, N. and Hahn, E.J., 1995. "Including foundation effects on the vibration behaviour of rotating machinery". *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 9, pp. 243–256.
- Friswell, M.I., 2010. *Dynamics of Rotating Machines*. Cambridge University Press.

- Kang, Y., Chang, Y.P., Tsai, J.W., Mu, L.H. and Chang, Y.F., 2000. "An investigation in stiffness effects on dynamics of rotor-bearing-foundation systems". *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 231, pp. 343–374.
- Krämer, E., 1993. *Dynamics of Rotors and Foundations*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH. ISBN 978-3-662-02800-1. doi:10.1007/978-3-662-02798-1.
- Machado, T.H., Cavalca, K.L. and Arima, G., 2010. "Influence of different geometries of hydrodynamic bearing in the dynamic response of a rotating system". *SAE Technical Paper Series*.
- Nelson, H.D., 1980. "A finite rotating shaft element using timoshenko beam theory". *Journal of Mechanical Design*, Vol. 102, pp. 793–803.
- Stephenson, R.W. and Rouch, K.W., 1992. "Generating matrices of the foundation structure of a rotor system from test data". *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 154, pp. 467–484.
- Tuckmantel, F.W.S., 2010. *Integração de sistemas rotor-mancais hidrodinâmicos-estrutura de suporte para resolução numérica*. Tese de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.
- Yang, S.H., Kim, C. and Lee, Y.B., 2006. "Experimental study on the characteristics of pad fluttering in a tilting pad journal bearing". *Tribology International*, Vol. 39, pp. 686–694.
- Zhao, S.X., Dai, X.D. and Zhu, J., 2005. "An experimental study of nonlinear oil-film forces of a journal bearing". *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 287, pp. 827–843.

8. RESPONSABILIDADE AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

Foundations Influence in Rotating Systems Response

Augusto Chrispim Mengalli Gilberti de Alencar, augustocmga@gmail.com¹

César Silva Rother, cesar.rother@gmail.com¹

Tiago Henrique Machado, tiagomh@fem.unicamp.br¹

¹Mechanical Engineering School, UNICAMP, Mendeleyev Street, 200 - CEP 13083-860, Campinas - SP

Abstract: Foundation structures are responsible by the support of rotating machinery. They transmit vibration from the rotor to the ground, at the same time being themselves a source of vibration for the system. In this aspect, knowing the dynamic behavior of foundations is important to avoid faults and minimize maintenance costs. This work consists in simulating a rotor for several distinct foundation parameters. Three different models of foundations are used: rigid, lumped parameters and mechanical impedance. The rigid foundation is the simpler one, done by ignoring foundation displacements, therefore, its effect in system response. The lumped parameters approach uses a mass-spring-damper equivalent coupled to bearings' nodes. Mechanical impedance modelling is done through compliance matrix, coupling rotor, bearings and foundation equations. Through frequency response and Campbell Diagram analysis, changes in natural frequencies and amplitudes can be seen for different foundations, highlighting the importance of foundation parameters in rotor dynamic analysis

Keywords: Rotordynamics, Foundation, Lumped Parameters, Mechanical Impedance