

## Referências Bibliográficas

- [1] ALVARADO, A. **Concepção de uma Bancada para Análise de Fenômenos rotativos**. Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 1999.
- [2] ATALA, M. J. **Estudo Fenomenológico do Diagrama de Campbell em Sistemas Rotativos com Poucos Graus de Liberdade**. Trabalho de Iniciação Científica, Departamento de Projeto Mecânico, Universidade Estadual de Campinas, Brasil, 1990.
- [3] BAVASTRI, C. **Redução de Vibrações de Banda Larga em Estruturas Complexas por Neutralizadores Viscoelásticos**. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.
- [4] BAZÁN, F. **Desenvolvimento de Ferramentas de Identificação Paramétrica de Sistemas Mecânicos no Domínio do Tempo**. Tese de Doutorado, Departamento de Projeto Mecânico, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1993.
- [5] BEER, F.; JOHNSTON, E. **Resistência dos Materiais**. Rio de Janeiro: McGraw Hill, 1989, 2. ed.
- [6] BORMANN, A.; GASCH, R. **Damping and Stiffness Coefficients of elastomer rings and their optimized application in rotor dynamics: Theoretical Investigations and Experimental Validation**. Paper, IFToMM Sixth International Conference on Rotordynamics proceedings, Sydney – Australia, 2002.
- [7] CHILDS, D. **Turbomachinery Rotordynamics**. New York: J. Wiley, 1993.
- [8] CRANDALL, S; DAHL, N. LARDNER, T. **An Introduction to the Mechanics of Solids**. Singapore: McGraw Hill, 1978. 2. ed.

- [9] DARLOW, M.; ZORZI, E. **Mechanical Design Handbook for elastomers**. Mechanical Technology Inc., Latham, NY (for NASA), 1981.
- [10] DEMMEL, J. W. **Applied Numerical Linear Algebra**. Philadelphia, Pa.: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1997.
- [11] DEN HARTOG, J. P. **Mechanical Vibrations**. New York: McGraw Hill, 1956. 4. ed.
- [12] DIEFENDERFER, A. J. **Principles of electronic instrumentation**. Philadelphia : Sauders College, c1994. 3. ed.
- [13] DIMAROGONAS, A. **Vibration for Engineers**. Upper Saddle River, N. J. : Prentice Hall, 1996. 2. ed.
- [14] EDWARDS, S.; LEES, A. W.; FRISWELL, M. I. **Experimental identification of Excitation and Support Parameters of a Flexible Rotor-Bearings-Foundation System from a Single Run-down**. Journal of Sound and vibration (2000) 232(5), 963-992 doi:10.1006/jsvi.1999.2779.
- [15] EYKHOFF, P. **Identification and System Parameter Stimation**. Symposium, the Hague/Delft, The Netherlands, 12-15 June 1973 Amsterdam : North-Holland ; New York : American Elsevier, 1973.
- [16] FERRY, J. D. **Viscoelastic Properties of Polymers**. New York: J. Wiley, 1970. 2. ed.
- [17] FLUGGE, Wilhelm. **Viscoelasticity**. Rev. Berlin: Springer, 1975. 2. ed.
- [18] GASCH, R.; NORDMANN, R.; PFÜTZNER, H. **Rotordynamik**. Springer-Verlag, 2002.
- [19] GINSBERG, J. H. **Advanced Engineering Dynamics**. Cambridge University Press, 1993.
- [20] HIMMELBLAU, D. M. **Applied Nonlinear Programming**. New York: McGraw Hill, 1972.
- [21] INMAN, D. J. **Vibration with control Measurements and Stability**. Englewood Cliffs, N. J. : Prentice Hall, 1989.
- [22] LALANE, M.; FERRARIS, G. **Rotordynamics Prediction in engineering**. Chichester: J. Wiley, 1990.

- [23] LJUNG, L. **System identification : theory for the user**. Englewood Cliffs, N. J. : Prentice-Hall, 1999. 2. ed.
- [24] MEAD, D. J. **Passive Vibration Control**. John Wiley & Sons, 1998.
- [25] MEIROVITCH, L. **Principles and Techniques of Vibrations**. Upper Saddle River, N. J. : Prentice Hall, 1997.
- [26] **Mini Course Notes**. Fourth International Conference on Rotor Dynamics, Chicago, Illinois, September 7-9, 1994.
- [27] RAMIREZ, R. W. **The FFT Fundamentals and Concepts**. Englewood Cliffs, N. J. : Prentice Hall, 1985.
- [28] ROEHL, J. L. P. **Dinâmica de Estruturas**. Apostila do curso do Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2001.
- [29] SMALLEY, A. J.; Darlow, M. S.; Mehta, R. K.. **The Dynamic Characteristics of O'-Rings**. ASME Paper No. 77-DET-27, Journal of Mechanical Design, 1978.
- [30] SNOWDON, J. C. **Vibration and Shock in Damped Mechanical Systems**. New York: J. Wiley, 1968.
- [31] SOUZA, S. **Estudo de Técnicas não Convencionais de Processamento de Sinais para Diagnostico de máquinas Rotativas**. Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2000.
- [32] TRINDADE, M.A. **Optimization of Sandwich/Multilayer Viscoelastic Composite Structure for Vibration Damping**. Proceedings of OMAE'01, 20th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, June 3-8, 2001, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [33] VANCE, J. M. **Rotordynamics of Turbomachinery**. New York: J. Wiley, 1988.
- [34] WEBER, H. I. **Some Basic Properties of the Equations of Motion of Simple Rotating Systems and the Representation in Campbell Diagrams**. Relatório DMP No. 001/92, Universidade Estadual de Campinas, Brasil, 1992.

## Apêndice A

### Determinação da Matriz de Rigidez

#### A.1.

#### Sistema sem apoios elásticos

A matriz de rigidez pode ser calculada usando o método dos coeficientes de influência, usando a segunda lei de Newton (equilíbrio) e o teorema de Castigliano. O modelo utilizado considera aos apoios como articulações, pode-se fazer isto já que foram usados na bancada rolamentos autoalinhantes, os quais satisfazem esta condição. Segundo o modelo mostrado na figura 2.1, pode-se fazer o análise em cada plano por separado.

#### Plano horizontal ( $xy$ )

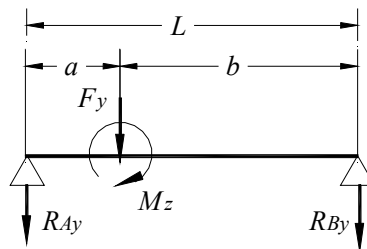


Figura A.1: Plano Horizontal

Considerando o método dos coeficientes de influência, os termos da matriz de rigidez são calculados fazendo distintas configurações de deformação do eixo, levando em conta, em cada configuração, um grau de liberdade unitário e os restantes iguais a zero. A primeira configuração é mostrada na figura A.2a, a segunda na figura A.2b.

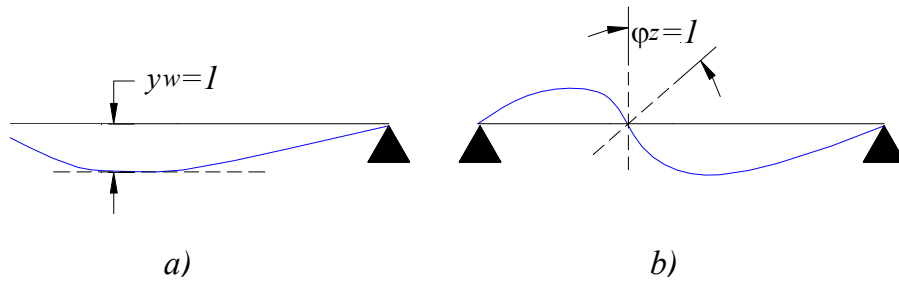


Figura A.2: Configurações de Deformação do Eixo

### Plano vertical ( $xz$ )

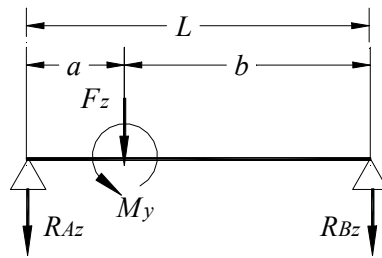


Figura A.3: Plano Vertical

A primeira configuração é mostrada na figura A.4a, a segunda na figura A.4b.

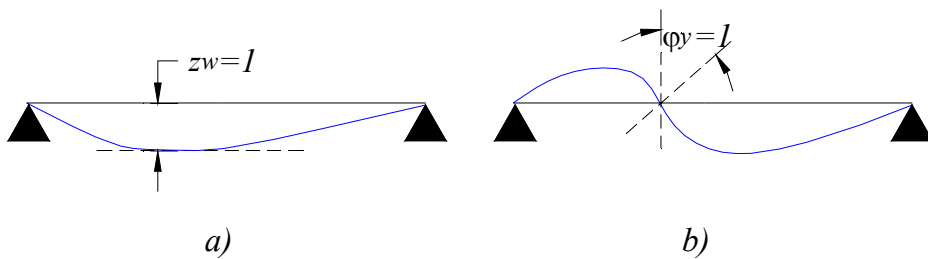


Figura A.4: Configurações de Deformação do Eixo

### Matriz de rigidez total

$$\begin{pmatrix} \mathbf{K}_y & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_z \end{pmatrix} \quad (\text{A.1})$$

Onde:

$$\mathbf{K}_y = \begin{pmatrix} \frac{3.E.I.L}{a^3b^3} \cdot (a^2 - ab + b^2) & \frac{3.E.I.L}{a^2b^2} \cdot (a - b) \\ \frac{3.E.I.L}{a^2b^2} \cdot (a - b) & \frac{3.E.I.L}{ab} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{K}_z = \begin{pmatrix} \frac{3.E.I.L}{a^3b^3} \cdot (a^2 - ab + b^2) & \frac{-3.E.I.L}{a^2b^2} \cdot (a - b) \\ \frac{-3.E.I.L}{a^2b^2} \cdot (a - b) & \frac{3.E.I.L}{ab} \end{pmatrix}$$

## A.2.

### Sistema com apoios elásticos

Segundo o modelo mostrado na figura 4.1, pode-se fazer a análise realizada na seção A.1, considerando adicionalmente o cálculo da deflexão numa viga engastada. Os cálculos dos coeficientes serão feitos em cada plano por separado, logo a matriz de rigidez total será construída por superposição dos dois planos.

### Deflexão numa viga engastada

A equação da deflexão de uma viga engastada produzida por uma força, segundo mostra a figura A.5, é:

$$w_{g(x)} = \frac{P_g}{6EI} \left( 3\delta x^2 - x^3 + (x - \delta)^3 \right) \quad k_{\delta\delta} = \frac{P_g}{w_{g(x)}} \quad (\text{A.2})$$

Onde  $k_{\delta\delta}$  é a rigidez da viga.

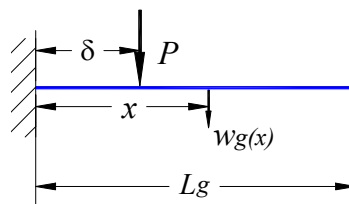


Figura A.5: Deflexão numa Viga Engastada

### Plano horizontal ( $xy$ )

O modelo para o plano horizontal é mostrado na figura A.6:

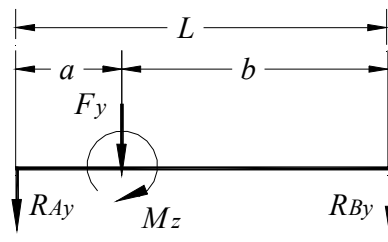


Figura A.6: Plano Horizontal

- Primeira configuração**

$$y_1 = 1 \quad y = 0 \quad \varphi_z = 0 \quad y_2 = 0$$

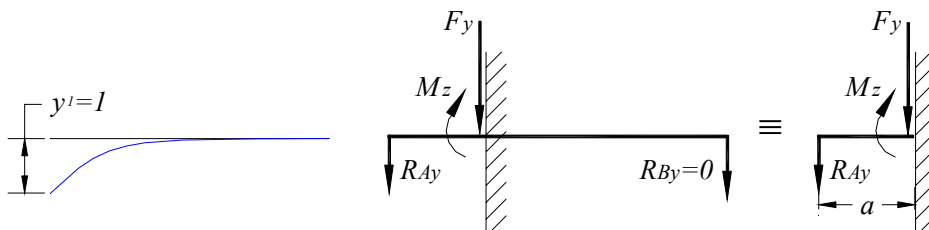


Figura A.7: Primeira Configuração do Eixo Deformado

- Segunda configuração**

$$y_1 = 0 \quad y = 1 \quad \varphi_z = 0 \quad y_2 = 0$$

Esta configuração é igual à primeira configuração na seção A.1:

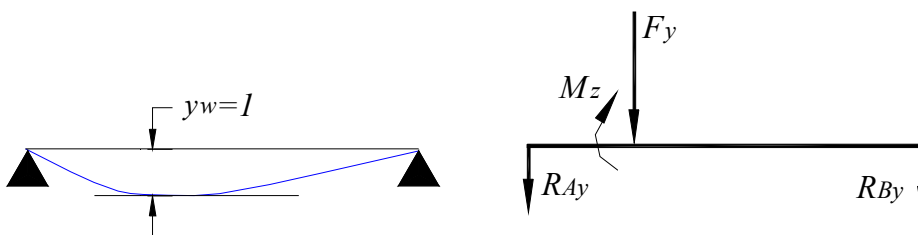


Figura A.8: Segunda Configuração do Eixo Deformado

- Terceira configuração:**

$$y_1 = 0 \quad y = 0 \quad \varphi_z = 1 \quad y_2 = 0$$

Esta configuração é igual à segunda configuração na seção A.1:

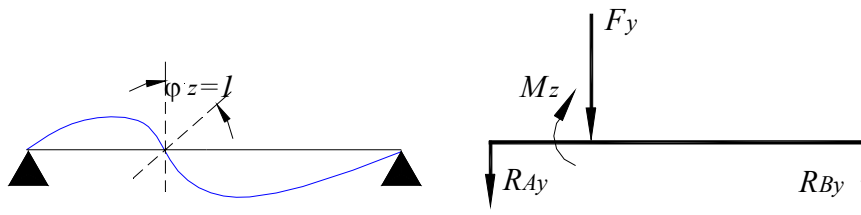


Figura A.9: Terça Configuração do Eixo Deformado

- **Quarta configuração**

$$y_1 = 0 \quad y = 0 \quad \varphi_z = 0 \quad y_2 = 1$$

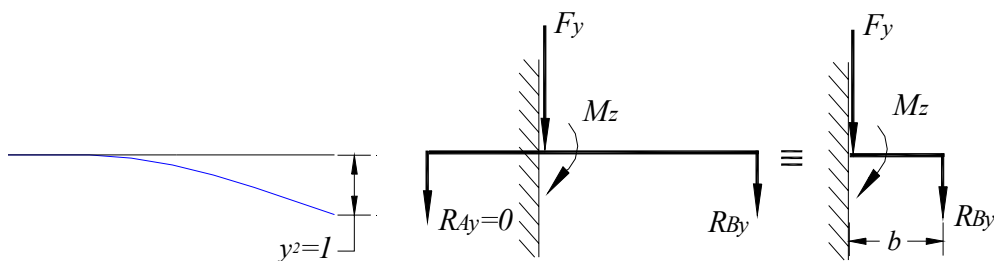


Figura A.10: Quarta Configuração do Eixo Deformado

A matriz de rigidez no plano horizontal é:

$$\mathbf{K}_y = \begin{pmatrix} \frac{3.E.I}{a^3} & \frac{-3.E.I}{a^3} & \frac{3.E.I}{a^2} & 0 \\ \frac{-3.E.I}{a^3} & \frac{3.E.I.L}{a^3 b^3} \cdot (a^2 - ab + b^2) & \frac{3.E.I.L}{a^2 b^2} \cdot (a - b) & \frac{-3.E.I}{b^3} \\ \frac{3.E.I}{a^2} & \frac{3.E.I.L}{a^2 b^2} \cdot (a - b) & \frac{3.E.I.L}{ab} & \frac{-3.E.I}{b^2} \\ 0 & \frac{-3.E.I}{b^3} & \frac{-3.E.I}{b^2} & \frac{3.E.I}{b^3} \end{pmatrix} \quad (\text{A.3})$$

### Plano Vertical ( $xz$ )

O modelo para o plano horizontal é mostrado na figura A.11:

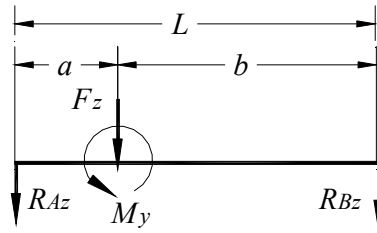


Figura A.11: Plano Vertical

- Primeira configuração**

$$z_1 = 1 \quad z = 0 \quad \varphi_y = 0 \quad z_2 = 0$$

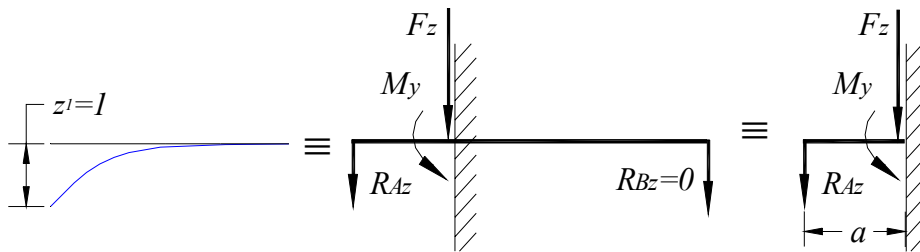


Figura A.12: Primeira Configuração do Eixo Deformado

- Segunda configuração: (figura A.13)**

$$z_1 = 0 \quad z = 1 \quad \varphi_y = 0 \quad z_2 = 0$$

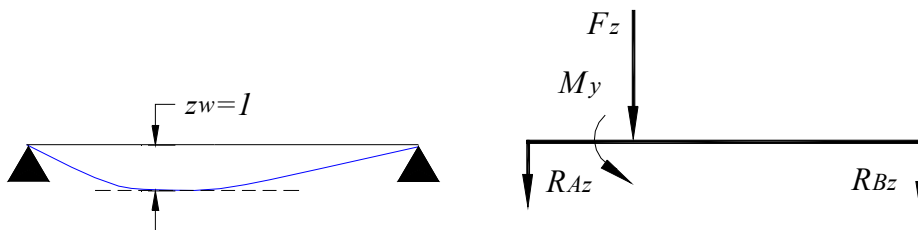


Figura A.13: Segunda Configuração do Eixo Deformado

- Terceira configuração**

$$z_1 = 0 \quad z = 0 \quad \varphi_y = 1 \quad z_2 = 0$$

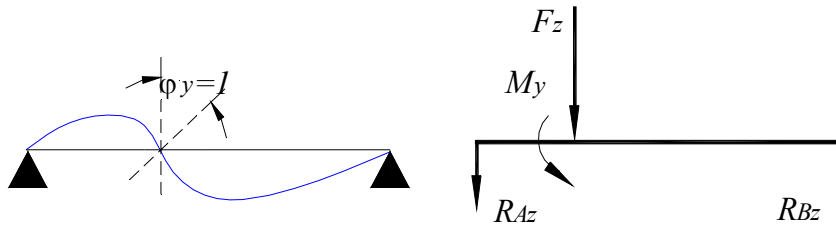


Figura A.14: Terça Configuração do Eixo Deformado

• **Quarta configuração**

$$z_1 = 0 \quad z = 0 \quad \varphi_y = 0 \quad z_2 = 1$$

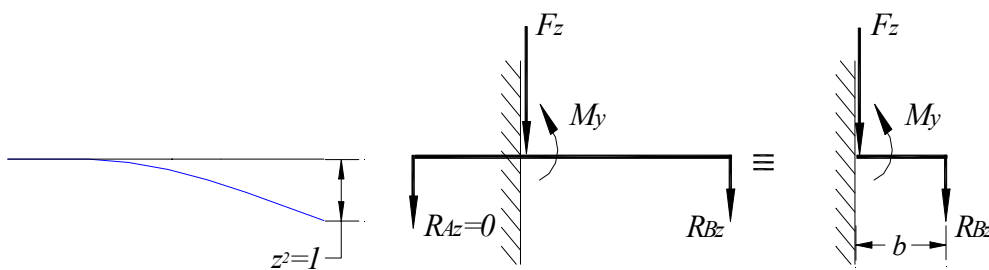


Figura A.15: Quarta Configuração do Eixo Deformado

A matriz de rigidez no plano horizontal é:

$$\mathbf{K}_z = \begin{pmatrix} \frac{3.E.I}{a^3} & \frac{-3.E.I}{a^3} & \frac{-3.E.I}{a^2} & 0 \\ \frac{-3.E.I}{a^3} & \frac{3.E.I.L}{a^3 b^3} \cdot (a^2 - ab + b^2) & \frac{-3.E.I.L}{a^2 b^2} \cdot (a - b) & \frac{-3.E.I}{b^3} \\ \frac{-3.E.I}{a^2} & \frac{-3.E.I.L}{a^2 b^2} \cdot (a - b) & \frac{3.E.I.L}{ab} & \frac{3.E.I}{b^2} \\ 0 & \frac{-3.E.I}{b^3} & \frac{3.E.I}{b^2} & \frac{3.E.I}{b^3} \end{pmatrix} \quad (\text{A.4})$$

**Matriz de rigidez total**

Das equações (A.3) e (A.4), a matriz de rigidez total é:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{K}_y & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_z \end{pmatrix} \quad (\text{A.5})$$