

Introdução à dinâmica das estruturas

Humberto Lima Soriano



Introdução à dinâmica das estruturas

Humberto Lima Soriano



© 2014, Elsevier Editora Ltda.

Todos os direitos reservados e protegidos pela Lei nº 9.610, de 19/2/1998. Nenhuma parte deste livro, sem autorização prévia por escrito da editora, poderá ser reproduzida ou transmitida sejam quais forem os meios empregados: eletrônicos, mecânicos, fotográficos, gravação ou quaisquer outros.

Revisão: Marco Antonio Correa
Editoração Eletrônica: Thomson Digital

Elsevier Editora Ltda.
Conhecimento sem Fronteiras
Rua Sete de Setembro, 111 – 16º andar
20050-006 – Centro – Rio de Janeiro – RJ – Brasil

Rua Quintana, 753 – 8º andar
04569-011 – Brooklin – São Paulo – SP – Brasil

Serviço de Atendimento ao Cliente
0800-0265340
atendimento1@elsevier.com.br

ISBN 978-85-352-5153-1
ISBN (versão eletrônica) 978-85-352-5154-8

Nota: Muito zelo e técnica foram empregados na edição desta obra. No entanto, podem ocorrer erros de digitação, impressão ou dúvida conceitual. Em qualquer das hipóteses, solicitamos a comunicação ao nosso Serviço de Atendimento ao Cliente, para que possamos esclarecer ou encaminhar a questão. Nem a editora nem o autor assumem qualquer responsabilidade por eventuais danos ou perdas a pessoas ou bens, originados do uso desta publicação.

**CIP-BRASIL. CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO
SINDICATO NACIONAL DOS EDITORES DE LIVROS, RJ**

S691i

Soriano, Humberto Lima
Introdução à dinâmica das estruturas / Humberto Lima Soriano. - 1. ed. - Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.
il. ; 24 cm.

Inclui bibliografia e índice
ISBN 978-85-352-7713-5

1. Teoria das estruturas. 2. Engenharia de estruturas. . I. Título.

14-08796

CDD: 624.171
CDU: 624

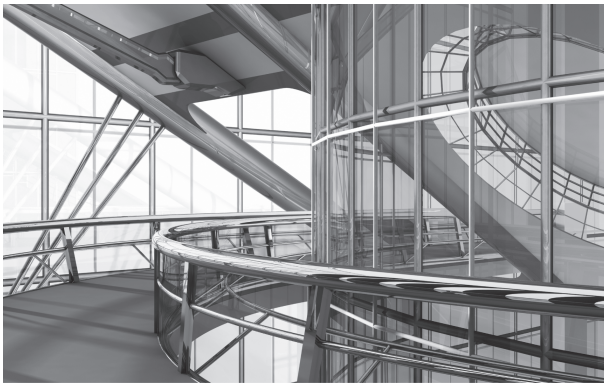
*À minha dedicada esposa, Carmina,
e aos meus queridos filhos,
Humberto e Luciana.*



*“Se eu fosse recomeçar meus estudos,
seguiria o conselho de Platão e
começaria pela matemática.”*

Galileo Galilei





Prefácio

A *Dinâmica das Estruturas* é um fascinante tema comumente incluído em disciplina optativa nos currículos de graduação em engenharia e é matéria obrigatória em cursos de pós-graduação na ênfase de estruturas. Isso porque a disponibilidade de diversos eficientes programas de computador, aliada ao aumento da eficiência de processamento dos micro-computadores, tem tornado cada vez mais frequente análise dinâmica. Principalmente em projeto de estrutura arrojada, por questões econômicas e de segurança, é imperativo determinar com acurácia o comportamento estrutural. No caso, não se justifica o uso de procedimentos aproximativos através de forças pseudoestáticas (equivalentes às ações dinâmicas), sendo a compreensão da *Dinâmica das Estruturas* a limitação para efetuar sofisticadas análises com aqueles programas. Assim, desenvolver essa compreensão é um desafio aos novos engenheiros, e o objetivo deste livro é facilitar esse desafio.

Escrevi este livro a partir dos dois últimos capítulos da obra *Método dos Elementos Finitos – Formulação e Aplicação em Estática e Dinâmica das Estruturas*, em que abordei essa dinâmica de forma condensada e no contexto do referido método. Neste novo livro autônomo, desenvolvo a dinâmica de forma ampla.

Apresento os conceitos, princípios e usuais métodos da *Dinâmica das Estruturas*, nos domínios do tempo e da frequência, além dos temas específicos de análise sísmica e de resolução do problema de autovalor em obtenção eficaz das características dinâmicas. Isto é, a determinação computacional das frequências e modos naturais de vibração de modelos com qualquer número de graus de liberdade. Nos exemplos numéricos processados através de computador, para controle da automatização dos diversos métodos, utilizei os algoritmos aqui apresentados e desenvolvidos por mim. Para confiabilidade, resultados de métodos diferentes foram cotejados entre si e, para possibilitar a conferência de tais resultados, todos os dados dos exemplos foram fornecidos.

Esforcei-me em apresentar a *Dinâmica das Estruturas* com rigor matemático, embora de forma simples e clara, com o objetivo de torná-la acessível aos iniciantes, e o seu estudo, na medida do possível, prazeroso pela oportunidade de compreender uma importante área de conhecimento da engenharia. Espero que tenha conseguido alcançar esse ambicioso intento.

O termo *introdução* que consta no nome deste livro se justifica pela grande amplitude da *Dinâmica das Estruturas*, que inclui, além dos tópicos aqui tratados, sistemas contínuos, dinâmica aleatória, dinâmica aeroelástica, propagação de onda, técnicas de medição de vibrações e critérios quanto ao conforto humano em ambiente vibratório. Contudo, como esses temas são de

aplicação muito específica e os usuais métodos de análise dinâmica são aqui desenvolvidos de forma consistente, com muitos exemplos e orientações de aplicação, este livro atenderá a disciplinas de graduação e de pós-graduação, assim como a engenheiros que projetam estruturas.

Ao leitor autodidata esclareço que são necessários conhecimentos básicos de *Estática (dos corpos rígidos)*, *Resistência dos Materiais*, *Álgebra Matricial* e *Cálculo Diferencial e Integral*. Além disso, é desejável uma iniciação em *Dinâmica dos Corpos Rígidos*, *Análise Matricial de Estruturas* e *Método dos Elementos Finitos*. Não obstante, para suprir eventual deficiência desses conhecimentos, os princípios e conceitos fundamentais da *Dinâmica Clássica* estão incluídos no Capítulo 1, e resumos da *Análise Matricial de Estruturas* e do *Método dos Elementos Finitos* estão apresentados no Capítulo 5. Além disso, para que possa automatizar os algoritmos dos métodos aqui desenvolvidos, é aconselhável que o leitor tenha familiaridade com uma linguagem computacional. Isso porque, embora existam diversos eficientes programas comerciais de análise dinâmica, o desenvolvimento próprio e a utilização de programações simples constituem a melhor maneira de compreender o funcionamento e a aplicabilidade dos métodos dessa análise.

No estudo deste livro, o foco principal deve ser o entendimento das premissas e da lógica do desenvolvimento dos métodos, e não propriamente a checagem dos desenvolvimentos analíticos. Nesse sentido, ao final de cada capítulo são propostos diversos exercícios (com as respectivas respostas), além da proposição de muitas questões para reflexão, que permitirão testar, melhorar e consolidar a aprendizagem. A habilidade em efetuar análises dinâmicas só é adquirida em experimentação, após a compreensão dos seus fundamentos e dos correspondentes métodos. Não basta saber “funcionar” um programa de computador, é necessário entender o que está por trás das opções oferecidas pelo mesmo, assim como saber interpretar e validar os seus resultados.

Em suma, espero que o leitor tenha apreço pela matemática, computação e comportamento de estruturas, além de estar inclinado a exercitar experimentação.

Sou grato ao saudoso professor *Fernando Lobo Barboza Carneiro*, que me apresentou à *Análise Matricial de Estruturas*, ao saudoso professor *Fernando Venancio Filho*, que despertou o meu interesse pela *Dinâmica das Estruturas*, e aos colegas que apresentaram sugestões ao presente texto.

Agradeço à Escola Politécnica da UFRJ e à COPPE-UFRJ, onde fui professor por muitos anos, ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, que me apoiou como pesquisador, à Faculdade de Engenharia da UERJ, que me propiciou a oportunidade do desenvolvimento dos manuscritos deste livro, e à *Editora Elsevier*, pela produção gráfica deste livro. Antecipadamente agradeço aos leitores que enviarem comentários, sugestões e críticas ao endereço eletrônico sorianohls@gmail.com, de modo que possam contribuir ao melhoramento deste texto para futuras edições. A um livro técnico sempre se pode agregar valor, independentemente da necessidade de sua contínua atualização. Além do que, a receptividade de meus livros é o grande incentivo para continuar como autor.

Importa também registrar o inestimável apoio e a carinhosa compreensão de minha esposa *Carmina* e de meus filhos *Humberto* e *Luciana*, sem os quais este livro não viria a se tornar realidade.

Humberto Lima Soriano



Sumário

Dedicatória.....	v
Prefácio	vii
CAPÍTULO 1 Fundamentos.....	1
O que é e qual a importância da Dinâmica das Estruturas?	1
1-1 Introdução.....	3
1-2 Fundamentos históricos	5
1-3 Modelos discretos e modelos contínuos	10
1-4 Formulação das equações de movimento	13
1-5 Pêndulos.....	19
1-5.1 Pêndulo simples	19
1-5.2 Pêndulo sólido.....	25
1-5.3 Pêndulo de torção.....	27
1-5.4 Pêndulo sólido com mola de torção.....	28
1-5.5 Pêndulo invertido com mola de translação	30
1-6 Exercícios propostos	35
1-7 Questões para reflexão	38
CAPÍTULO 2 Oscilador Simples Não Amortecido	41
O que é um oscilador simples?.....	41
2-1 Equação de movimento.....	42
2-2 Vibração livre.....	43
2-3 Vibração sob força harmônica	47
2-4 Oscilador simples equivalente	51
2-4.1 Viga em balanço.....	53
2-4.2 Viga biapoiada.....	54
2-4.3 Outros casos de vigas.....	55
2-5 Associações de molas	60
2-6 Exercícios propostos	64
2-7 Questões para reflexão	69

CAPÍTULO 3 Oscilador Simples Amortecido	71
Por que e como é desenvolvido o estudo do oscilador simples amortecido?.....	71
3-1 Esclarecimentos iniciais.....	72
3-1.1 Forças externas.....	73
3-1.2 Amortecimento.....	74
3-2 Equação de movimento com amortecimento viscoso.....	76
3-3 Vibração livre.....	77
3-4 Vibração sob força harmônica	82
3-4.1 Solução em notação trigonométrica.....	82
3-4.2 Fator de amplificação dinâmica	86
3-5 Determinação de amortecimento	90
3-5.1 Método do decremento logarítmico.....	90
3-5.2 Método da meia amplitude	92
3-5.3 Método da largura de banda.....	93
3-5.4 Valores usuais de amortecimento viscoso.....	95
3-5.5 Amortecimento viscoso equivalente	96
3-6 Vibração amortecida sob força periódica arbitrária.....	98
3-6.1 Série de Fourier em notação trigonométrica.....	99
3-6.2 Resposta em regime permanente	102
3-7 Vibração sob força aperiódica	103
3-7.1 Integral de Duhamel.....	104
3-7.2 Resolução direta por segmentos lineares da ação externa.....	110
3-7.3 Integração numérica em caso linear.....	113
3-7.4 Integração numérica em caso não linear.....	124
3-8 Controle de transmissão de vibração	133
3-9 Exercícios propostos.....	140
3-10 Questões para reflexão.....	144
CAPÍTULO 4 Modelo de Dois Graus de Liberdade.....	147
Por que estudar modelo de dois graus de liberdade?.....	147
4-1 Equações de movimento.....	148
4-2 Vibração livre não amortecida	150
4-3 Batimento.....	159
4-4 Vibração não amortecida sob força harmônica.....	161
4-5 Amortecedor não amortecido de massa sintonizada.....	163
4-6 Exercícios propostos.....	166
4-7 Questões para reflexão.....	169
CAPÍTULO 5 Construção de Modelo de Multigráus de Liberdade.....	171
O que significa e como são construídos os modelos de multigráus de liberdade?.....	171
5-1 Considerações iniciais	172

5-2	Equações de movimento dos elementos de barra	177
5-2.1	Matriz de rigidez.....	177
5-2.2	Matriz de massa	181
5-2.3	Vetor das forças nodais equivalentes.....	182
5-2.4	Transformação ao referencial global.....	183
5-3	Equações de movimento de elemento finito	187
5-4	Sistema global das equações de movimento.....	195
5-5	Frequências e modos naturais de vibração	203
5-6	Redução de graus de liberdade	217
5-7	Exercícios propostos	222
5-8	Questões para reflexão	226
CAPÍTULO 6	Análise de Modelo de Multigraus de Liberdade	229
	Em que consiste a análise de um modelo de multigraus de liberdade?.....	229
6-1	Procedimento aproximado de análise de modelo sob força harmônica.....	230
6-2	Método de superposição modal	233
6-2.1	Transformação modal	234
6-2.2	Correção estática dos modos superiores	240
6-2.3	Vibração amortecida sob força harmônica.....	245
6-2.4	Vibração amortecida sob força aperiódica	246
6-3	Matriz de amortecimento global	249
6-3.1	Amortecimento proporcional	249
6-3.2	Amortecimento não proporcional	256
6-4	Integração numérica direta em caso linear	259
6-4.1	Método por diferença finita central.....	260
6-4.2	Método de Newmark.....	262
6-4.3	Método de Wilson θ	263
6-5	Integração numérica direta em caso não linear.....	270
6-6	Considerações finais	273
6-7	Exercícios propostos	277
6-8	Questões para reflexão	279
CAPÍTULO 7	Análise no Domínio da Frequência	281
	O que é e qual a importância da análise no domínio da frequência?	281
7-1	Série de Fourier em notação complexa.....	282
7-2	Transformadas de Fourier	283
7-2.1	Transformadas contínuas	284
7-2.2	Transformadas discretas.....	288
7-2.3	Transformadas rápidas	292
7-3	Oscilador simples amortecido.....	293
7-3.1	Força harmônica	293
7-3.2	Força periódica arbitrária.....	301

7-3.3	Força aperiódica.....	302
7-3.4	Controle das aproximações.....	307
7-3.5	Consideração das condições iniciais ao movimento.....	315
7-4	Formulação matricial.....	316
7-4.1	Matriz de transformada de Fourier implícita.....	317
7-4.2	Consideração das condições iniciais.....	319
7-4.3	Propriedades da matriz de transformada implícita.....	319
7-4.4	Transposição ao domínio do tempo.....	322
7-5	Modelo de multigráus de liberdade.....	326
7-5.1	Resolução com coordenadas modais.....	326
7-5.2	Resolução direta.....	328
7-6	Considerações finais.....	336
7-7	Exercícios propostos.....	338
7-8	Questões para reflexão.....	339
CAPÍTULO 8	Análise Sísmica.....	341
	Por que e como efetuar uma análise sísmica de estrutura?.....	341
8-1	Terminologia.....	342
8-2	Ação sísmica.....	343
8-3	Espectros de resposta.....	350
8-4	Estruturas de edifícios.....	358
8-4.1	Análise estática equivalente.....	359
8-4.2	Análise dinâmica.....	360
8-5	Estruturas com ações múltiplas nos apoios.....	369
8-6	Exercícios propostos.....	371
8-7	Questões para reflexão.....	372
CAPÍTULO 9	Resolução Numérica do Problema de Autovalor.....	373
	Por que estudar a resolução do problema de autovalor?.....	373
9-1	Propriedades fundamentais.....	374
9-2	Quociente de Rayleigh e análise de Rayleigh-Ritz.....	383
9-3	Método de Jacobi.....	392
9-4	Sequência de Sturm.....	402
9-5	Iteração inversa.....	405
9-6	Iteração por subespaço.....	412
9-7	Vetores de Ritz e vetores de Lanczos.....	417
9-8	Eficiência computacional.....	420
9-9	Exercícios propostos.....	422
9-10	Questões para reflexão.....	424
	Notações.....	427
	Glossário.....	431
	Bibliografia.....	439
	Respostas dos Exercícios Propostos.....	441
	Índice Remissivo.....	459