Mecânica Relacional e Implementação do Princípio de Mach com a Força de Weber Gravitacional

LF EDITORIAL

Conselho Editorial da LF Editorial

Amílcar Pinto Martins - Universidade Aberta de Portugal

Arthur Belford Powell - Rutgers University, Newark, USA

Carlos Aldemir Farias da Silva - Universidade Federal do Pará

Emmánuel Lizcano Fernandes - UNED, Madri

Iran Abreu Mendes - Universidade Federal do Pará

José D'Assunção Barros - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Luis Radford - Universidade Laurentienne, Canadá

Manoel de Campos Almeida - Pontifícia Universidade Católica do Paraná

Maria Aparecida Viggiani Bicudo - Universidade Estadual Paulista - UNESP/Rio Claro

Maria da Conceição Xavier de Almeida - Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Maria do Socorro de Sousa - Universidade Federal do Ceará

Maria Luisa Oliveras - Universidade de Granada, Espanha

Maria Marly de Oliveira - Universidade Federal Rural de Pernambuco

Raquel Gonçalves-Maia - Universidade de Lisboa

Teresa Vergani - Universidade Aberta de Portugal

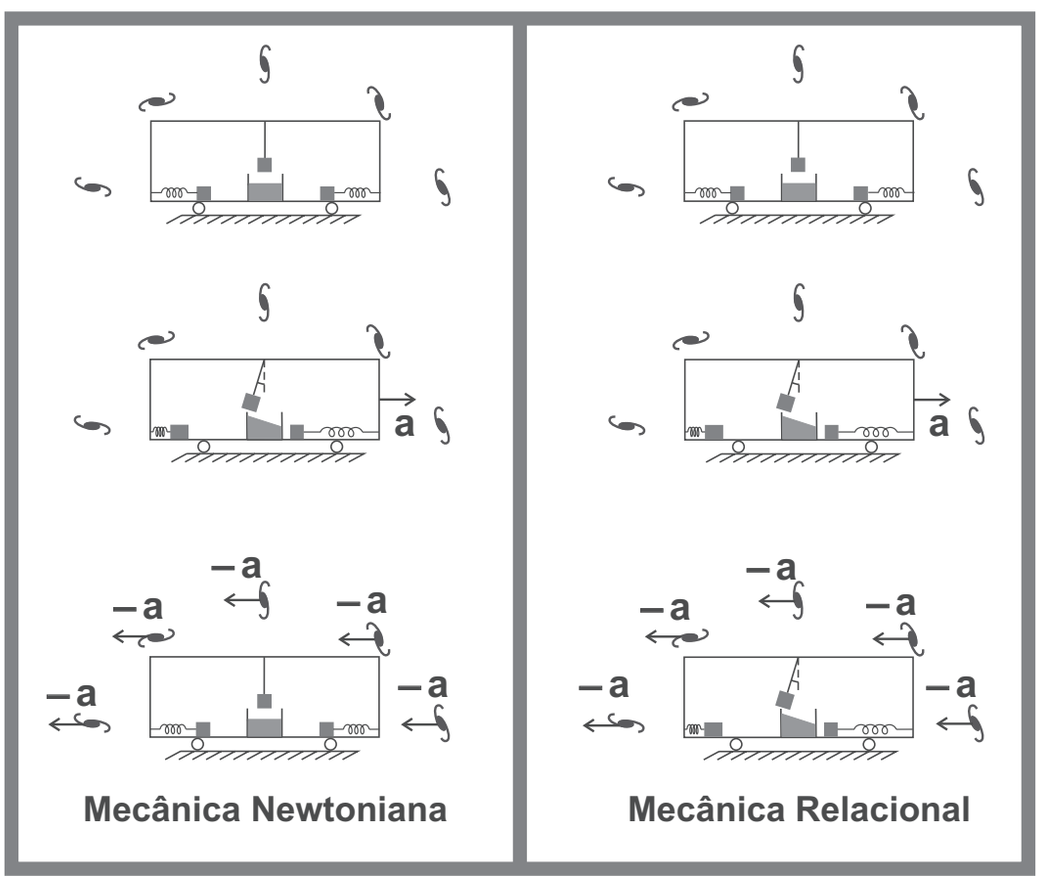
André Koch Torres Assis

Instituto de Física
Universidade Estadual de Campinas — UNICAMP
Rua Sérgio Buarque de Holanda 777
13083-859 Campinas, SP, Brasil

E-mail: assis@ifi.unicamp.br

Homepage: https://www.ifi.unicamp.br/~assis

Mecânica Relacional e Implementação do Princípio de Mach com a Força de Weber Gravitacional



2025

Copyright © 2026 o autor
1ª Edição

Direção editorial: Victor Pereira Marinho e José Roberto Marinho

Capa: Fabrício Ribeiro

Edição revisada segundo o Novo Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa

Dados Internacionais de Catalogação na publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Assis, André Koch Torres
Mecânica relacional e implementação do Princípio de Mach com a Força de Weber gravitacional / André Koch Torres Assis. – São Paulo: LF Editorial, 2026.

Bibliografia
ISBN 978-65-5563-691-8

1. Física 2. Mecânica 3. Newton, Isaac, 1642-1727 I. Título.

26-329447.0 CDD-531

Índices para catálogo sistemático:
1. Mecânica: Física 531

Eliane de Freitas Leite – Bibliotecária – CRB 8/8415

Todos os direitos reservados. Nenhuma parte desta obra poderá ser reproduzida sejam quais forem os meios empregados sem a permissão da Editora.
Aos infratores aplicam-se as sanções previstas nos artigos 102, 104, 106 e 107 da Lei Nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998

LF Editorial
www.livrariadafisica.com.br
www.lfeditorial.com.br
(11) 2648-6666 | Loja do Instituto de Física da USP
(11) 3936-3413 | Editora

Sumário

Nota sobre a Edição Brasileira **15**

Agradecimentos **i**

Prefácio **iii**

I A Mecânica Clássica **1**

1 Mecânica Newtoniana **3**
1.1 Introdução . . . 3
1.2 Leis do Movimento . . . 3
1.3 Gravitação Universal . . . 7
1.3.1 Formulação Moderna da Lei da Gravitação . . . 7
1.3.2 Massa Inercial e Massa Gravitacional . . . 8
1.3.3 Formulação Original de Newton . . . 9
1.4 As Forças Exercidas por Cascas Esféricas . . . 10
1.4.1 Força Exercida por uma Casca Esférica Parada . . . 10
1.4.2 Força Exercida por uma Casca Esférica Linearmente Acelerada . . . 14
1.4.3 Força Exercida por uma Casca Esférica Girando . . . 14
1.4.4 Implicações Cosmológicas de uma Casca Esférica Exercer Força Nula sobre Corpos Internos . . . 15
1.5 A Densidade Média da Terra . . . 16
1.6 As Medidas da Massa Inercial, do Tempo e do Espaço . . . 17
1.6.1 Medida da Massa Inercial . . . 17
1.6.2 Medida do Tempo . . . 17
1.6.3 Medida do Espaço . . . 19
1.7 Referenciais Inerciais . . . 21

2 Outras Forças da Natureza **25**
2.1 Força de Empuxo . . . 25
2.2 Força Elástica . . . 26
2.3 Força de Arraste em um Fluido . . . 29
2.4 Força entre Cargas Elétricas . . . 31
2.5 Força entre Polos Magnéticos . . . 32
2.6 Força de Ampère entre Elementos de Corrente . . . 34
2.7 Força entre um Dipolo Magnético e um Fio com Corrente . . . 37
2.8 Força de Weber entre Cargas . . . 38
2.8.1 O Modelo Planetário de Weber para o Átomo . . . 40
2.9 Equações de Maxwell e Força Baseada em Campos Eletromagnéticos . . . 41
2.9.1 Definições do Conceito de Campo . . . 41

2.9.2 Estas Definições São Contraditórias Entre Si . . . 44
2.9.3 Equações de Maxwell . . . 46
2.9.4 Força sobre uma Carga Baseada em Campos Eletromagnéticos . . . 47

3 Tópicos Adicionais da Mecânica Clássica 49
3.1 Conservação do Momento Linear . . . 49
3.2 Conservação do Momento Angular . . . 50
3.3 Centro de Massa . . . 51
3.4 Energia . . . 51
3.4.1 Energia Cinética . . . 51
3.4.2 Energia Potencial . . . 52
3.4.3 Relação entre Força e Energia Potencial . . . 54
3.4.4 Conservação da Energia . . . 54
3.5 Valores de Grandezas Terrestres, do Sistema Solar e Cosmológicas . . . 55

II Aplicações da Mecânica Newtoniana 59

4 Corpos em Repouso sobre a Terra 61
4.1 Bloco Parado . . . 61
4.2 Corpo Dependurado em um Fio ou Mola . . . 61
4.2.1 Fio Inclinado em Relação à Vertical quando uma Força Horizontal Atua sobre o Corpo . . . 63
4.3 Recipiente Parado com Fluido . . . 65

5 Movimento Retilíneo Uniforme sobre a Terra 67
5.1 Corpo Deslizando em Relação ao Solo enquanto está Preso em uma Mola . . . 67
5.2 Corpo Dependurado em um Fio ou Mola enquanto Desliza em Relação ao Solo . . . 69
5.3 Recipiente Deslizando sobre o Solo, com um Fluido em seu Interior . . . 69

6 Movimento Retilíneo com Aceleração Constante sobre a Terra 71
6.1 As Experiências de Queda Livre de Galileu . . . 71
6.1.1 Um Corpo em Queda Livre Cai com uma Aceleração Constante em Direção ao Solo . . . 71
6.1.2 A Aceleração Não Depende do Peso do Corpo . . . 74
6.1.3 A Aceleração Não Depende da Densidade nem da Composição Química do Corpo . . . 74
6.1.4 Newton e a Igualdade entre os Tempos de Queda Livre de Corpos Diferentes Soltos da Mesma Altura . . . 75
6.1.5 O Valor da Aceleração de Queda Livre . . . 76
6.2 Queda Livre na Mecânica Newtoniana . . . 77
6.2.1 Resultados Obtidos a partir das Leis de Newton . . . 77
6.2.2 A Proporcionalidade entre o Peso e a Massa Inercial a partir das Experiências de Queda Livre . . . 77
6.2.3 Movimento de Atração entre Dois Corpos no Referencial das Estrelas Fixas . 79
6.3 Carga Elétrica no Interior de um Capacitor Ideal . . . 81
6.3.1 Força Eletrostática por Unidade de Carga . . . 81
6.3.2 Carga Parada no Interior do Capacitor . . . 82
6.3.3 Carga sendo Acelerada no Interior do Capacitor . . . 85
6.4 Corpo sendo Acelerado em Relação ao Solo enquanto está Preso em uma Mola . . . 87

6.4.1 Distinção entre Velocidade e Aceleração a partir da Variação do Comprimento da Mola . . . 87
6.4.2 Qual é a Origem da Força que está Esticando a Mola? . . . 88
6.5 Corpo sendo Acelerado em Relação ao Solo enquanto está Dependurado em um Fio 88
6.5.1 Proporcionalidade entre o Peso e a Massa Inercial a partir da Inclinação do Fio 89
6.5.2 Distinção entre Velocidade e Aceleração a partir da Inclinação do Fio . . . 90
6.5.3 Distinção entre Aceleração Relativa e Aceleração Absoluta a partir da Inclinação do Fio . . . 91
6.5.4 Qual Seria a Inclinação do Fio se Todas as Estrelas e Galáxias ao Redor da Terra Fossem Aniquiladas? . . . 95
6.5.5 Qual é a Origem da Força que está Inclinando o Fio? . . . 96
6.6 Corpo sendo Acelerado em Relação ao Solo enquanto está Dependurado em uma Mola 96
6.7 Recipiente Acelerado sobre o Solo, com um Fluido em seu Interior . . . 98
6.7.1 Formato da Superfície Livre do Fluido e a Pressão em Seu Interior . . . 98
6.7.2 A Proporcionalidade entre a Massa Inercial e a Massa Gravitacional a partir das Experiências com Fluidos Acelerados . . . 100
6.7.3 Distinção entre Velocidade e Aceleração a partir da Inclinação do Fluido . . . 102
6.7.4 Distinção entre Aceleração Relativa e Aceleração Absoluta a partir da Inclinação do Fluido . . . 102
6.7.5 Qual Seria a Inclinação do Fluido se Todas as Estrelas e Galáxias ao Redor da Terra Fossem Aniquiladas? . . . 103

7 Movimentos Oscilatórios 105
7.1 Mola . . . 105
7.1.1 Período e Frequência Angular de Oscilação de uma Mola . . . 105
7.1.2 A Razão entre os Períodos de Oscilação de Dois Corpos Presos a uma Mesma Mola Depende da Razão entre Suas Massas Inerciais . . . 106
7.2 As Experiências com Pêndulo de Galileu . . . 107
7.2.1 Relação entre o Período de Oscilação e o Comprimento do Pêndulo . . . 107
7.2.2 O Período de Oscilação de um Pêndulo Não Depende de Seu Peso nem de Sua Composição Química . . . 108
7.2.3 Relação entre o Período de Oscilação de um Pêndulo, Seu Comprimento e a Aceleração de Queda Livre . . . 108
7.3 Pêndulo Simples na Mecânica Newtoniana . . . 109
7.3.1 Período e Frequência Angular de Oscilação . . . 109
7.3.2 A Proporcionalidade entre o Peso e a Massa Inercial a partir das Experiências com Pêndulos . . . 111
7.3.3 Experiências de Newton com Pêndulos Mostrando a Proporcionalidade entre o Peso e a Massa Inercial . . . 113
7.4 Pêndulo Eletrizado Oscilando sobre um Ímã . . . 115
7.4.1 Precessão do Plano de Oscilação com o Eletromagnetismo Clássico . . . 115
7.4.2 Situações nas quais Obtém-se um Campo Magnético Uniforme . . . 118
7.4.3 Precessão do Plano de Oscilação com a Eletrodinâmica de Weber . . . 121

8 Movimento Circular Uniforme 125
8.1 Aceleração Centrípeta . . . 125
8.2 Órbita Circular de um Planeta . . . 127
8.2.1 Planeta Orbitando ao Redor do Sol . . . 127
8.2.2 Proporcionalidade entre a Massa Inercial e a Massa Gravitacional de Qualquer Planeta a partir da Terceira Lei de Kepler . . . 127

8.2.3 A Massa Inercial de Qualquer Corpo Parece estar Associada às Interações Gravitacionais deste Corpo . . . 130
8.2.4 Movimento Orbital de Dois Corpos no Referencial das Estrelas Fixas . . . 131
8.3 Rotação de Dois Globos, em Relação a um Referencial Inercial, ao Redor do Seu Centro Comum de Gravidade . . . 132
8.3.1 Dois Globos Girando Presos por uma Corda . . . 132
8.3.2 Dois Globos Girando Presos por uma Mola . . . 133
8.3.3 Newton e a Distinção entre a Rotação Relativa e a Rotação Absoluta . . . 133
8.4 A Experiência do Balde de Newton . . . 136
8.4.1 Balde Parado ou Girando Junto com a Água em Relação ao Solo . . . 136
8.4.2 A Proporcionalidade entre a Massa Inercial e a Massa Gravitacional a partir da Forma Côncava de Fluidos Girando Juntos com Seus Baldes . . . 140
8.4.3 Newton e a Distinção entre a Rotação Relativa e a Rotação Absoluta do Balde Girando Junto com a Água na Superfície da Terra . . . 141
8.4.4 Qual Seria o Formato da Água se Todos os Outros Corpos Astronômicos Desaparecessem? . . . 144
8.4.5 Qual Seria o Formato da Água se Ela Ficasse Parada em Relação ao Solo e Todos os Outros Corpos Astronômicos Girassem Rapidamente ao Redor do Eixo do Balde? . . . 145

9 Rotações Diárias da Terra 149
9.1 Rotações Relativas ou Cinemáticas da Terra . . . 149
9.1.1 Rotação em Relação às Estrelas — Dia Sideral . . . 150
9.1.2 Rotação em Relação ao Sol — Dia Solar . . . 151
9.1.3 Rotação em Relação às Galáxias Distantes . . . 152
9.1.4 Rotação em Relação à Radiação Cósmica de Fundo . . . 152
9.1.5 Equivalência entre os Sistemas Ptolomaico e Copernicano a Partir das Rotações Cinemáticas da Terra . . . 153
9.2 Rotações Dinâmicas da Terra . . . 154
9.2.1 Previsão de Newton para o Achatamento da Terra . . . 155
9.2.2 Cálculo do Achatamento da Terra . . . 156
9.2.3 Qual Seria o Formato da Terra se Ela Ficasse Parada no Espaço e Todos os Outros Corpos Astronômicos Girassem ao Redor de Seu Eixo Norte-Sul com um Período de Um Dia? . . . 164
9.2.4 Pêndulo de Foucault . . . 166
9.2.5 Giroscópios . . . 172
9.2.6 Não Há Equivalência entre os Sistemas Ptolomaico e Copernicano a Partir das Rotações Dinâmicas da Terra . . . 177
9.2.7 O que Aconteceria com o Plano de Oscilação do Pêndulo de Foucault se, com Exceção da Terra, Todos os Outros Corpos Astronômicos Desaparecessem? . 178

10 Sistemas de Referência Não Inerciais e as Forças Fictícias 181
10.1 Corpos em Repouso sobre a Terra . . . 181
10.2 Movimento Retilíneo com Aceleração Constante sobre a Terra . . . 184
10.2.1 Queda Livre . . . 184
10.2.2 Corpo sendo Acelerado em Relação ao Solo enquanto está Dependurado em um Fio . . . 185
10.2.3 Recipiente Acelerado sobre o Solo, com um Fluido em seu Interior . . . 186
10.3 Movimento Circular Uniforme e a Força Centrífuga . . . 188
10.3.1 Órbita Circular de um Planeta . . . 188
10.3.2 Dois Globos Girando Presos por uma Corda . . . 191

10.3.3 A Experiência do Balde de Newton . . . 192
10.4 Rotação da Terra . . . 194
10.4.1 Achatamento da Terra no Referencial Terrestre . . . 194
10.4.2 Cálculo da Precessão do Plano de Oscilação do Pêndulo de Foucault no Referencial Terrestre Utilizando a Força de Coriolis . . . 195
10.4.3 Comparação da Rotação Cinemática com a Rotação Dinâmica da Terra . . . 198
10.5 Força Fictícia Geral . . . 199

III Problemas com a Mecânica Newtoniana 203

11 Paradoxo Gravitacional 205
11.1 Newton e o Universo Infinito . . . 205
11.2 O Paradoxo Baseado na Força . . . 206
11.3 O Paradoxo Baseado no Potencial . . . 208
11.4 Soluções do Paradoxo . . . 209
11.4.1 Suposição I: O Universo Tem uma Quantidade Finita de Matéria . . . 209
11.4.2 Suposição II: A Lei de Newton da Gravitação Deve Ser Modificada . . . 210
11.4.3 Suposição III: Existem Dois Tipos de Massa Gravitacional no Universo, Positiva e Negativa . . . 212
11.5 Relação entre a Gravitação, a Óptica e a Cosmologia . . . 213
11.6 Absorção da Gravidade . . . 215

12 Leibniz e Berkeley 219
12.1 Leibniz e o Movimento Relativo . . . 219
12.1.1 Leibniz e a Experiência do Balde . . . 221
12.1.2 Qual Seria o Formato da Terra se Todos os Outros Corpos Astronômicos Desaparecessem? . . . 223
12.1.3 Conclusão . . . 226
12.2 Berkeley e o Movimento Relativo . . . 226
12.2.1 Berkeley e a Experiência do Balde . . . 227
12.3 Conclusão . . . 230

13 Mach e a Mecânica de Newton 233
13.1 Defesa do Espaço Relativo . . . 233
13.2 Defesa do Tempo Relativo . . . 235
13.3 Comparação entre a Rotação Cinemática da Terra e Sua Rotação Dinâmica . . . 237
13.4 Nova Definição de Massa Inercial . . . 238
13.5 A Formulação de Mach da Mecânica . . . 240
13.6 Mach, o Achatamento da Terra e o Pêndulo de Foucault: Equivalência entre os Sistemas Ptolomaico e Copernicano . . . 241
13.7 Mach e a Experiência do Balde: Defesa do Movimento Relativo . . . 243
13.8 O Princípio de Mach . . . 246
13.9 O Que Mach Não Mostrou . . . 247

IV Teorias da Relatividade de Einstein 251

14 Teoria da Relatividade Especial 255
14.1 Indução Eletromagnética . . . 255
14.1.1 Assimetria Apontada por Einstein . . . 255

14.1.2 Esta Assimetria Não Existe no Fenômeno Observado Experimentalmente . . 255
14.1.3 Esta Assimetria Não Existia para Faraday 256
14.1.4 Esta Assimetria Não Existia para Maxwell 260
14.1.5 Esta Assimetria Não Existe na Eletrodinâmica de Weber 260
14.1.6 Origem da Assimetria Apontada por Einstein 263
14.2 Princípio ou Postulado da Relatividade 263
14.3 Paradoxo dos Gêmeos 264
14.4 Constância da Velocidade da Luz 266
14.4.1 Einstein Postulou que a Velocidade da Luz é Constante Qualquer que Seja a Velocidade da Fonte Luminosa e Qualquer que Seja a Velocidade do Observador ou do Detector 266
14.4.2 Fenômenos balísticos 267
14.4.3 Fenômenos Ondulatórios 268
14.4.4 Nos Fenômenos Balísticos e Ondulatórios as Velocidades dos Projéteis e das Ondas Sempre Dependem da Velocidade do Observador ou do Detector . . . 269
14.5 Origens e Significados da Velocidade v que Aparece na Força Magnética q v X B . . 271
14.5.1 Significado da Velocidade para Maxwell 272
14.5.2 Significado da Velocidade para Thomson e para Heaviside 274
14.5.3 Significado da Velocidade para Lorentz 274
14.5.4 Significado da Velocidade para Einstein 277
14.6 Experiência de Michelson-Morley 279

15 Teoria da Relatividade Geral 283
15.1 Grandezas Relacionais 283
15.2 Invariância da Forma das Equações 284
15.3 As Forças Exercidas por Cascas Esféricas 285
15.3.1 O Que Seria Necessário para Implementar as Ideias de Mach 285
15.3.2 Força Exercida por uma Casca Esférica Parada 286
15.3.3 Força Exercida por uma Casca Esférica Linearmente Acelerada 288
15.3.4 Força Exercida por uma Casca Esférica Girando 289
15.3.5 Na Relatividade Geral um Corpo Tem Inércia Mesmo em um Universo Vazio, Contrariando o Princípio de Mach 291
15.4 Outros Aspectos pelos quais a Relatividade Geral Não Implementa o Princípio de Mach 292
15.5 Incoerências da Teoria da Relatividade Geral 292
15.5.1 Força Gravitacional Exercida pelas Galáxias sobre Corpos no Sistema Solar . 292
15.5.2 Achatamento da Terra 295
15.5.3 Pêndulo de Foucault 297
15.5.4 A Experiência do Balde de Newton 300
15.6 Comentários Gerais 305
15.7 Mach Rejeitou as Teorias da Relatividade de Einstein 307

V Mundo Novo 309

16 Mecânica Relacional 311
16.1 Conceitos Primitivos e Postulados 311
16.2 Equação de Movimento na Mecânica Relacional 315
16.3 Forças Eletromagnéticas e Gravitacionais 317
16.4 Propriedades da Energia Potencial e da Força de Weber Aplicadas ao Eletromagnetismo e à Gravitação 318

16.5 As Forças Exercidas por Cascas Esféricas . . . 319
16.5.1 Força Exercida por uma Casca Esférica Parada . . . 320
16.5.2 Força Exercida por uma Casca Esférica Linearmente Acelerada . . . 321
16.5.3 Força Exercida por uma Casca Esférica Girando . . . 323
16.6 As Energias Inerciais e as Forças Inerciais . . . 324
16.6.1 Força Inercial no Referencial Universal Supondo uma Lei de Weber . . . 325
16.6.2 Força Inercial no Referencial Universal Supondo uma Lei de Weber com Decaimento Exponencial . . . 326
16.6.3 Contribuição da Nossa Galáxia para a Força Inercial . . . 327
16.6.4 Força Inercial quando o Conjunto de Galáxias está Acelerado . . . 329
16.6.5 Força Inercial quando o Conjunto das Galáxias está Girando . . . 330
16.7 Equações de Movimento em Diversos Sistemas de Referência . . . 331
16.7.1 Equação de Movimento no Referencial Universal . . . 332
16.7.2 Equação de Movimento quando o Conjunto de Galáxias está Acelerado . . . 334
16.7.3 Equação de Movimento quando o Conjunto de Galáxias está Girando . . . 336

17 Tópicos Adicionais da Mecânica Relacional 341
17.1 Movimento de Atração entre Dois Corpos no Referencial das Galáxias Distantes . . . 341
17.2 Os Valores das Constantes que Aparecem nas Forças Relacionais . . . 342
17.3 Conservação do Momento Linear . . . 347
17.4 Conservação do Momento Angular . . . 348
17.5 Centro de Massa Gravitacional . . . 349
17.6 Universo Com ou Sem Expansão . . . 349
17.6.1 Interpretações da Lei de Hubble . . . 349
17.6.2 Interpretações sobre a Radiação Cósmica de Fundo com uma Temperatura de 2,7 K . . . 350
17.6.3 Nosso Modelo Cosmológico . . . 351
17.7 Implementação das Ideias de Einstein . . . 351
17.7.1 Aumento da Inércia de um Corpo ao Colocá-lo no Interior de uma Casca Esférica . . . 352
17.7.2 Corpo Acelerado Exercendo uma Força sobre um Outro Corpo . . . 354
17.7.3 Força Centrífuga e Força de Coriolis Exercidas por uma Casca Esférica Girando ao Atuar sobre um Corpo em Seu Interior . . . 356
17.7.4 Um Corpo em um Universo Vazio Não Tem Inércia . . . 356
17.8 Visões de Mundo Ptolomaica e Copernicana . . . 356
17.9 Condições nas Quais se Pode Escrever a Equação de Movimento na Sua Forma Mais Simples e Baseada na Aceleração do Corpo de Prova em Relação à Terra ou em Relação às Estrelas Fixas . . . 358

18 Comparação das Leis e Conceitos da Mecânica Relacional e da Mecânica Clássica 361
18.1 Dedução de uma Equação de Movimento Análoga à Segunda Lei de Newton . . . 361
18.2 Dedução de uma Equação de Movimento Análoga à Primeira Lei de Newton . . . 362
18.3 Condições nas Quais a Terra e as Estrelas Fixas podem ser Consideradas Bons Referenciais Inerciais . . . 363
18.4 Equivalência entre a Rotação Cinemática e a Rotação Dinâmica da Terra . . . 364
18.5 Proporcionalidade da Massa Inercial com a Massa Gravitacional . . . 366
18.6 Razão das Massas como o Inverso das Razões das Acelerações em Relação ao Referencial Universal . . . 368
18.7 Não São Necessárias Transformações de Coordenadas na Mecânica Relacional . . . 368
18.8 Interpretação da Força Inercial na Mecânica Clássica e na Mecânica Relacional . . . 370
18.8.1 A Força Inercial -m a . . . 370

18.8.2 Ação e Reação da Força Inercial . . . 373
18.8.3 A Força Inercial Centrífuga e a Força Inercial de Coriolis . . . 374
18.8.4 A Energia Cinética na Mecânica Clássica e a Energia Inercial na Mecânica Relacional . . . 374
18.9 Como Passar dos Resultados da Mecânica Clássica para os Resultados Análogos da Mecânica Relacional . . . 374
18.10 Resumo dos Principais Resultados da Mecânica Relacional ao Compará-la com a Mecânica Newtoniana . . . 376

VI Aplicações da Mecânica Relacional 379

19 Corpos em Repouso ou em Movimento Retilíneo Uniforme sobre a Terra 381
19.1 Equação de Movimento quando é Nula a Força Resultante sobre um Corpo devida à Sua Interação com os Corpos Locais . . . 381
19.2 Corpo Dependurado em uma Mola Parada ou Deslizando com Velocidade Constante em Relação ao Solo . . . 383

20 Corpos em Movimento Retilíneo com Aceleração Constante sobre a Terra 387
20.1 Queda Livre . . . 388
20.1.1 Estudo do Movimento no Referencial Terrestre e no Referencial do Corpo de Prova . . . 388
20.1.2 Explicação do Motivo pelo Qual Dois Corpos Caem com a Mesma Aceleração Não Interessando Seus Pesos ou Composições Químicas . . . 390
20.1.3 A Densidade de Massa Gravitacional do Universo Controla a Aceleração de Queda Livre . . . 390
20.1.4 Movimento de Atração entre Dois Corpos no Referencial Universal . . . 391
20.2 Carga sendo Acelerada no Interior de um Capacitor Ideal . . . 393
20.3 Corpo sendo Acelerado em Relação ao Solo enquanto está Preso em uma Mola . . . 394
20.3.1 Qual é a Origem da Força que está Esticando a Mola? . . . 395
20.3.2 A Densidade de Massa Gravitacional do Universo Controla a Aceleração de um Corpo Ligado a uma Mola Esticada . . . 397
20.3.3 Forças no Referencial do Vagão . . . 397
20.3.4 Qual Seria o Comprimento da Mola se Fosse Possível Acelerar as Galáxias em Relação ao Solo? . . . 398
20.4 Corpo sendo Acelerado em Relação ao Solo enquanto está Dependurado em um Fio 399
20.4.1 Qual é a Origem da Força que está Inclinando o Fio? . . . 401
20.4.2 Forças no Referencial Parado com o Corpo . . . 402
20.4.3 Qual Seria a Inclinação do Fio se Fosse Possível Acelerar as Galáxias em Relação ao Solo? . . . 402
20.5 Corpo sendo Acelerado em Relação ao Solo enquanto está Dependurado em uma Mola 404
20.6 Recipiente Acelerado sobre o Solo, com um Fluido em seu Interior . . . 404
20.6.1 Qual é a Origem da Força que está Inclinando o Fluido? . . . 406
20.6.2 Qual Seria a Inclinação do Fluido se Todos os Outros Corpos Astronômicos Desaparecessem? . . . 406
20.6.3 Forças no Referencial Parado com o Fluido . . . 406
20.6.4 Qual Seria a Inclinação do Fluido se Fosse Possível Acelerar as Galáxias em Relação ao Solo? . . . 407
20.7 Distinção entre a Mecânica Newtoniana e a Mecânica Relacional . . . 408

21 Movimentos Oscilatórios **411**
21.1 Mola . . . 411
21.2 Pêndulo Simples . . . 412
21.2.1 Força Inercial no Pêndulo . . . 414
21.3 Pêndulo Eletrizado Oscilando sobre um Ímã . . . 415
21.4 Pêndulo de Foucault . . . 417

22 Movimento Circular Uniforme **423**
22.1 Órbita Circular de um Planeta no Referencial das Estrelas Fixas . . . 423
22.1.1 Influência das Galáxias no Movimento Orbital de um Planeta ao Redor do Sol 425
22.1.2 Forças no Referencial que Gira Junto com o Planeta e com o Sol . . . 427
22.2 Rotação de Dois Globos em Relação às Galáxias . . . 428
22.2.1 Dois Globos Girando Presos por uma Corda . . . 428
22.2.2 Dois Globos Girando Presos por uma Mola . . . 431
22.3 A Experiência do Balde de Newton . . . 432
22.3.1 Balde Parado ou Girando Junto com a Água em Relação ao Solo . . . 432
22.3.2 Análise deste Problema no Referencial que Gira Junto com a Água . . . 433
22.3.3 Qual Seria o Formato da Água se Todos os Outros Corpos Astronômicos Desaparecessem? . . . 433
22.3.4 Qual Seria o Formato da Água se Fosse Possível Girar o Conjunto de Galáxias ao Redor do Eixo do Balde? . . . 434
22.4 Achatamento da Terra . . . 435
22.4.1 Cálculo do Achatamento no Referencial Universal . . . 435
22.4.2 Cálculo do Achatamento no Referencial Terrestre . . . 436
22.4.3 Qual Seria o Formato da Terra se Todos os Outros Corpos Astronômicos Desaparecessem? . . . 437
22.4.4 Qual Seria o Formato da Terra se Fosse Possível Girar o Conjunto de Galáxias ao Redor do Eixo Terrestre Norte-Sul? . . . 438

23 Além de Newton **441**
23.1 Precessão do Periélio dos Planetas no Referencial das Estrelas Fixas . . . 441
23.2 Anisotropia da Massa Inercial Efetiva na Gravitação . . . 445
23.3 Massa Inercial Efetiva no Eletromagnetismo . . . 447
23.4 Partículas com Altas Velocidades no Referencial Universal . . . 450
23.5 Testes Experimentais da Mecânica Relacional . . . 451
23.5.1 Variação na Aceleração de Queda Livre ao Cercar o Corpo por uma Casca Esférica . . . 451
23.5.2 Variações das Frequências de Oscilação de Corpos Colocados no Interior de uma Casca Esférica . . . 453
23.5.3 Testando a Anisotropia da Massa Inercial Efetiva . . . 454
23.5.4 Acelerando uma Casca Esférica ao Redor de um Corpo Preso a uma Mola, de um Corpo Preso a um Fio, ou de um Recipiente com Fluido . . . 458
23.5.5 Decaimento Exponencial na Gravitação . . . 461
23.5.6 Achatamento de um Corpo Elástico Parado no Interior de uma Casca Esférica Girando ao Seu Redor . . . 461
23.5.7 Balde e Água Parados no Solo, enquanto uma Casca Esférica Gira ao Redor do Eixo do Balde . . . 465

24 História da Mecânica Relacional **469**
24.1 Gravitação 469
24.2 Eletromagnetismo 470
24.3 Lei de Weber Aplicada para a Gravitação 473
24.4 Mecânica Relacional 474

25 Conclusão **483**

VII Apêndices **487**

A Casca Esférica Interagindo com uma Partícula de acordo com a Lei de Weber **489**
A.1 Força Exercida por uma Casca Esférica Parada 490
A.2 Força Exercida por uma Casca Esférica Linearmente Acelerada 495
A.3 Força Exercida por uma Casca Esférica Girando 496

B Casca Esférica Interagindo com uma Partícula com a Lei de Weber com Decaimento Exponencial **499**
B.1 Força Exercida por uma Casca Esférica Parada 499
B.2 Força Exercida por uma Casca Esférica Linearmente Acelerada 500
B.3 Força Exercida por uma Casca Esférica Girando 501

Referências Bibliográficas **502**

Dedicado à memória de Isaac Newton,
que indicou o caminho para as gerações
passadas, presentes e futuras.

Nota sobre a Edição Brasileira

Este livro foi publicado originalmente em português e inglês pela editora canadense Apeiron, estando disponível tanto no formato impresso quanto gratuitamente no formato digital em PDF.[1] Esta nova edição está sendo publicada para facilitar a aquisição deste livro no formato impresso pelos leitores brasileiros. Foram atualizadas e incluídas novas referências bibliográficas. Foi corrigida a errata da versão em português publicada pela editora Apeiron.

Capa: O Prof. Fabio Menezes de Souza Lima e seus estudantes do Instituto de Física da Universidade de Brasília sugeriram essa capa. Ela é mais didática que a imagem original que apareceu quando o livro foi publicado pela editora canadense Apeiron. Descrição dessa figura de capa:

Esse livro compara a Mecânica Newtoniana (figuras da esquerda) com a Mecânica Relacional (figuras da direita). Na figura da capa há um vagão com um pêndulo preso ao teto, um balde parcialmente preenchido com água, uma massa presa à mola que está fixa na parede esquerda do vagão e uma outra massa presa à mola que está fixa na parede direita do vagão. Quando o vagão está parado em relação ao solo (figuras do alto) o pêndulo fica vertical, a superfície da água fica horizontal e as duas molas ficam relaxadas. As figuras centrais ilustram diversos efeitos visíveis que são observados quando o vagão sofre uma aceleração constante em relação ao solo (por exemplo, uma aceleração $a = +5\ m/s^2$ para a direita, indo de uma certa árvore em direção a uma casa específica): o pêndulo fica inclinado para trás em relação à vertical, a superfície da água fica inclinada com a horizontal ficando mais alta na parte de trás e mais baixa na parte da frente, a mola da esquerda fica comprimida e a mola da direita fica esticada. As figuras inferiores ilustram o que aconteceria com estes corpos nessas duas teorias (Mecânica Newtoniana e Mecânica Relacional) em uma situação hipotética na qual, enquanto o vagão permanece em repouso em relação ao solo, fosse possível acelerar uniformemente o conjunto de galáxias no sentido oposto com a mesma intensidade (por exemplo, com uma aceleração em relação ao solo de $a = -5\ m/s^2$ para a esquerda, com todas as galáxias deslocando-se com essa aceleração, indo da casa específica em direção à árvore mencionada anteriormente). Na Mecânica Newtoniana nada aconteceria com os corpos no interior do vagão: o pêndulo continuaria vertical, a superfície da água continuaria horizontal e as duas molas continuariam relaxadas. O motivo para isso é que o conjunto de galáxias não exerce qualquer força resultante sobre os corpos que estão no vagão, tanto no caso em que o conjunto de galáxias está parado em relação ao solo, quanto no caso em que todas as galáxias estivessem deslocando-se conjuntamente em relação ao solo com uma aceleração de $a = -5\ m/s^2$. Na Mecânica Relacional a previsão é totalmente diferente. Quando o conjunto de galáxias sofre uma aceleração constante para a esquerda em relação ao solo, elas exercem uma força resultante sobre todos os corpos que estão na Terra. Essa força resultante aponta no mesmo sentido da aceleração das galáxias, sendo proporcional a essa aceleração. Nesse caso específico em que as galáxias são aceleradas para a esquerda, o pêndulo ficaria inclinado para a esquerda, a superfície da água ficaria inclinada em relação à horizontal ficando mais alta do lado esquerdo e mais baixa do lado direito, a mola da esquerda ficaria comprimida e a mola da direita ficaria esticada. A aceleração relativa entre o vagão e o conjunto de galáxias é a mesma tanto na figura central quanto na figura inferior (ou seja, há

[1] [Ass13] e [Ass14].

uma aceleração relativa de 5 m/s^2 entre o vagão e o conjunto de galáxias nos dois casos). Logo, de acordo com a Mecânica Relacional, os mesmos efeitos devem ser observados. Ou seja, tanto no caso da figura central quanto no caso da figura inferior, o pêndulo deve ficar inclinado do mesmo ângulo em relação à vertical, a superfície da água deve ficar inclinada do mesmo ângulo em relação à horizontal, a mola da esquerda deve sofrer a mesma compressão e a mola da direita deve ficar esticada do mesmo valor. A Mecânica Relacional implementa matematicamente o conceito intuitivo de que situações cinematicamente equivalentes devem ser dinamicamente equivalentes. O mesmo já não ocorre com a Mecânica Newtoniana. Essa equivalência também não ocorre nas teorias da relatividade de Einstein. Fenômenos como esses são discutidos detalhadamente nesta obra.

Agradecimentos

Este livro é uma versão ampliada de algumas obras anteriores, entre as quais podemos citar *On Mach's principle* (1989), *On the absorption of gravity* (1992), *Mecânica Relacional* (1998), *Relational Mechanics* (1999), *Uma Nova Física* (1999) e *The principle of physical proportions* (2001 a 2004).[2] Além das pessoas e Instituições mencionadas nestas obras, gostaríamos de agradecer também a diversos outros colegas por suas sugestões, referências, ideias, apoio e incentivo: Silvio Chibeni, José Lourenço Cindra, Ricardo Lopes Coelho, Eduardo Greaves, Hermann Härtel, David de Hilster, C. Roy Keys, Wolfgang Lange, José Oscar de Almeida Marques, Juan Manuel Montes Martes, Itala M. L. D'Ottaviano, Francisco A. Gonzalez Redondo, Karin Reich, Martin Tajmar, Frederick David Tombe, Greg Volk, Karl-Heinrich Wiederkehr (in Memoriam), Bernd Wolfram e Gudrun Wolfschmidt.

[2] [Ass89a], [Ass92f], [Ass98], [Ass99a], [Ass99b], [Ass01], [Ass03a] e [Ass04]. Todos os artigos e a maioria dos livros de Assis encontram-se disponíveis em formato PDF na homepage: https://www.ifi.unicamp.br/~assis