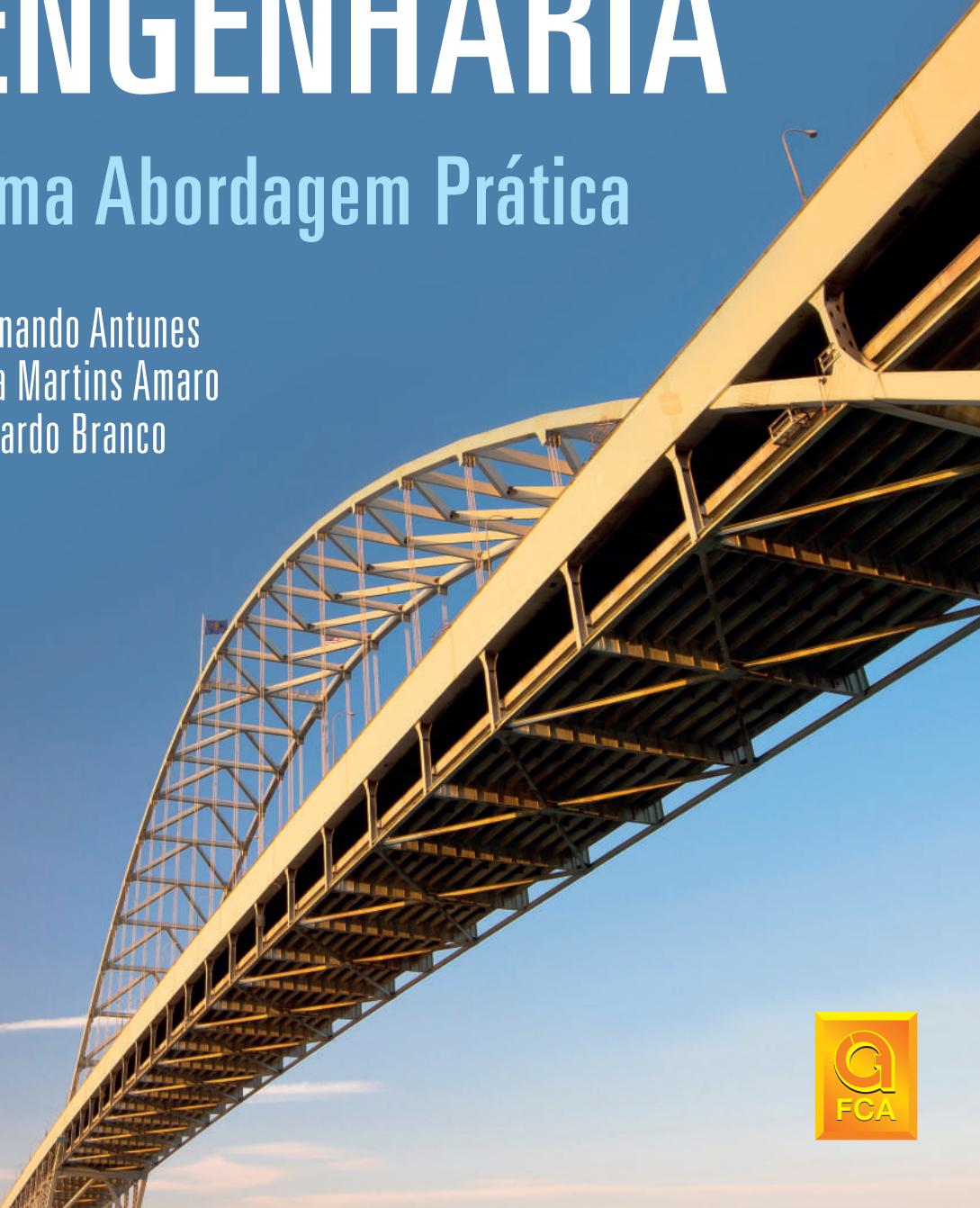


ESTÁTICA PARA ENGENHARIA

Uma Abordagem Prática

Fernando Antunes
Ana Martins Amaro
Ricardo Branco





Os livros de Engenharia da LIDEL agora são FCA!

O Grupo LIDEL é reconhecido pelas suas competências editoriais e padrões de qualidade na publicação de livros técnicos em língua portuguesa. Nos seus longos anos de atividade, foram várias as coleções criadas, de entre as quais se destaca a já reputada coleção *Engenharia*, dedicada quer aos estudantes do ensino superior, quer aos profissionais, engenheiros que pretendem consolidar os seus conhecimentos.

E porque a nossa missão é tornar cada livro não só numa ferramenta de trabalho e de divulgação do conhecimento, mas também num objeto que agrade pela sua excelência estética, decidimos renovar o grafismo da coleção e integrá-la na nossa editora FCA, que assumiu as publicações de todas as engenharias do Grupo LIDEL.

Esperamos assim continuar a corresponder às necessidades dos nossos leitores, com mais e variados títulos, com qualidade e atualidade, sempre com os olhos postos no futuro.



Fernando Antunes

Professor Associado com Agregação na Universidade de Coimbra, com grande experiência na lecionação das disciplinas de Mecânica Aplicada. Investigador Integrado no Centro de Engenharia Mecânica, Materiais e Processos na área do comportamento mecânico de materiais, com ênfase no estudo da fadiga. Membro da Ordem dos Engenheiros e da Sociedade Portuguesa de Fratura e Integridade Estrutural.



Ana Martins Amaro

Professora Associada com Agregação na Universidade de Coimbra. Investigadora Integrada no Centro de Engenharia Mecânica, Materiais e Processos. Desenvolve a sua atividade profissional nas áreas de estruturas – Engenharia Mecânica/Biomecânica. Coordenadora do Grupo de Trabalho 3 do CT182 – Comissão de Normalização da Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista. Membro dos órgãos sociais da Sociedade Portuguesa de Biomecânica e da Sociedade Portuguesa de Fratura e Integridade Estrutural.



Ricardo Branco

Professor Associado na Universidade de Coimbra, com licenciatura, mestrado e doutoramento em Engenharia Mecânica. Investigador Integrado no Centro de Engenharia Mecânica, Materiais e Processos, onde desenvolve investigação na área da integridade estrutural. Integra o corpo editorial de várias revistas internacionais dedicadas ao estudo do comportamento mecânico dos materiais, incluindo a *Engineering Failure Analysis* e a *Forces in Mechanics*.

Estática para Engenharia

Uma Abordagem Prática

Fernando Antunes
Ana Martins Amaro
Ricardo Branco



www.fca.pt

**AVISO
IMPORTANTE**

Este produto tem reservados todos os direitos de autor, sendo proibida a sua reprodução total ou parcial em qualquer formato ou suporte, assim como a utilização em bases de dados, quaisquer que sejam os seus objetivos, sem prévia autorização por escrito da Editora.

EDIÇÃO

FCA – Editora de Informática
Av. Praia da Vitória, 14 A – 1000-247 LISBOA
Tel: +351 213 511 448
geral@fcapactor.pt
www.fca.pt

DISTRIBUIÇÃO

Lidel – Edições Técnicas, Lda.
R. D. Estefânia, 183, R/C Dto. – 1049-057 LISBOA
Tel: +351 213 511 448
lidel@lidel.pt
www.lidel.pt

LIVRARIA

Av. Praia da Vitória, 14 A – 1000-247 LISBOA
Tel: +351 213 541 418
livraria@lidel.pt

Copyright © 2025, FCA – Editora de Informática
® Marca registada da FCA PACTOR Editores, Lda.
ISBN edição impressa: 978-972-722-946-8
1.ª edição impressa: setembro de 2025

Paginação: Carlos Mendes
Impressão e acabamento: Tipografia Lousanense, Lda. – Lousã
Depósito Legal: 552850/25
Capa: José Manuel Reis
Imagem da capa: © Vit / Adobe Stock Photo

Todos os nossos livros passam por um rigoroso controlo de qualidade, no entanto aconselhamos a consulta periódica do nosso site (www.fca.pt) para fazer o download de eventuais correções.

Não nos responsabilizamos por desatualizações das hiperligações presentes nesta obra, que foram verificadas à data de publicação da mesma.

Os nomes comerciais referenciados neste livro têm patente registada.

Reservados todos os direitos. Esta publicação não pode ser reproduzida, nem transmitida, no todo ou em parte, por qualquer processo eletrónico, mecânico, fotocópia, digitalização, gravação, sistema de armazenamento e disponibilização de informação, sítio Web, blogue ou outros, sem prévia autorização escrita da Editora, exceto o permitido pelo CDADC, em termos de cópia privada pela AGECOP – Associação para a Gestão da Cópia Privada, através do pagamento das respetivas taxas.



Índice

| | |
|--|-----------|
| Lista de Símbolos e Abreviaturas..... | IX |
| Introdução | XI |
| PARTE I Forças..... | 1 |
| Capítulo 1 Conceitos e classificação..... | 3 |
| Introdução | 3 |
| 1.1 Conceito físico de força e momento..... | 3 |
| 1.2 Representação vetorial das forças e momentos | 4 |
| 1.2.1 Força..... | 4 |
| 1.2.2 Momento..... | 8 |
| 1.2.2.1 Momento de uma força em relação a um eixo | 9 |
| 1.2.2.2 Momento de uma força em relação a um ponto | 13 |
| 1.2.2.3 Momento de um binário de forças..... | 14 |
| 1.3 Classificação das forças | 16 |
| Capítulo 2 Força gravítica da Terra (peso)..... | 21 |
| Introdução | 21 |
| 2.1 Direção e sentido..... | 24 |
| 2.2 Magnitude do peso..... | 24 |
| 2.3 Ponto de aplicação da força peso..... | 27 |
| Capítulo 3 Forças exercidas por superfícies..... | 31 |
| Introdução | 31 |
| 3.1 Força normal | 31 |
| 3.1.1 Apoios (móvel, fixo e encastrado) | 32 |
| 3.2 Atrito de escorregamento | 34 |
| 3.3 Atrito de rolamento..... | 38 |
| Capítulo 4 Forças exercidas por elementos flexíveis | 45 |
| Introdução | 45 |
| 4.1 Cabos sujeitos ao peso próprio (catenária)..... | 48 |
| 4.2 Cabos de peso desprezável | 51 |
| Capítulo 5 Forças exercidas por molas e amortecedores..... | 53 |
| Introdução | 53 |
| 5.1 Forças exercidas por molas | 54 |
| 5.1.1 Molas lineares helicoidais | 58 |
| 5.1.2 Molas lineares à flexão | 59 |
| 5.1.3 Molas de torção helicoidais..... | 60 |

VI Estática para Engenharia

| | | |
|--------------------|--|------------|
| 5.1.4 | Molas de torção em espiral | 61 |
| 5.2 | Forças exercidas por amortecedores..... | 66 |
| Capítulo 6 | Forças de pressão exercidas por fluidos em repouso | 69 |
| Introdução | 69 | |
| 6.1 | Pressão atmosférica | 70 |
| 6.2 | Pressão em líquidos | 73 |
| 6.3 | Força de impulsão (Princípio de Arquimedes) | 77 |
| 6.4 | Fluidos fechados e pressurizados (Lei de Pascal) | 81 |
| Capítulo 7 | Forças exercidas por fluidos em movimento | 89 |
| Introdução | 89 | |
| 7.1 | Forças do vento | 89 |
| 7.2 | Forças exercidas por líquidos | 98 |
| Capítulo 8 | Momentos de motores: de combustão interna e elétricos | 101 |
| Introdução | 101 | |
| 8.1 | Momentos de motores de combustão interna..... | 101 |
| 8.1.1 | Turborreatores..... | 103 |
| 8.2 | Momentos de motores elétricos..... | 104 |
| Capítulo 9 | Diagrama de forças | 113 |
| Introdução | 113 | |
| 9.1 | Designação das forças..... | 119 |
| 9.2 | Forças exercidas por cilindros..... | 120 |
| 9.3 | Identificar o corpo a estudar | 122 |
| 9.4 | Sistemas multicorpo | 124 |
| 9.5 | Sistemas de forças equivalentes | 126 |
| Capítulo 10 | Análise de mobilidade | 131 |
| Introdução | 131 | |
| 10.1 | Coordenadas cartesianas independentes..... | 132 |
| 10.2 | Constrangimentos..... | 133 |
| 10.2.1 | Encastramento..... | 133 |
| 10.2.2 | Apoio fixo..... | 135 |
| 10.2.3 | Apoio móvel | 136 |
| 10.2.4 | Apoio deslizante | 137 |
| 10.3 | Mobilidade | 138 |
| PARTE II | Estática | 153 |
| Capítulo 11 | Estática de um corpo | 155 |
| Introdução | 155 | |
| 11.1 | Estática da partícula..... | 156 |
| 11.2 | Estática do corpo rígido..... | 159 |

| | |
|--|------------|
| Capítulo 12 Estática multicorpo | 167 |
| Introdução | 167 |
| 12.1 Formulação matricial da estática..... | 167 |
| Capítulo 13 Estática de sistemas reticulados | 181 |
| Introdução | 181 |
| 13.1 Corpo sujeito a duas forças | 181 |
| 13.1.1 Corpo suspenso por um cabo..... | 182 |
| 13.1.2 Barras biarticuladas (tirantes)..... | 182 |
| 13.2 Estruturas reticuladas..... | 187 |
| 13.2.1 Análise pelo método dos nós..... | 191 |
| 13.2.2 Análise pelo método das secções ou de Ritter..... | 194 |
| Capítulo 14 Estática de vigas..... | 199 |
| Introdução | 199 |
| 14.1 Diagramas de esforços..... | 201 |
| Capítulo 15 Estática de sistemas hipostáticos | 217 |
| Introdução | 217 |
| 15.1 Análise de estabilidade | 217 |
| 15.1.1 Tombar..... | 218 |
| 15.1.2 Escorregar | 221 |
| 15.2 Multiplicação de força..... | 227 |
| 15.2.1 Alavancas..... | 227 |
| 15.2.2 Roldanas | 231 |
| 15.2.3 Plano inclinado e fusos | 235 |
| 15.2.4 Cunhas | 240 |
| 15.2.5 Sarilho | 242 |
| 15.2.6 Aplicação do princípio de Pascal..... | 243 |
| 15.3 Multiplicação de momento | 247 |
| 15.4 Aplicações de atrito | 252 |
| 15.4.1 Transmissão por correias | 252 |
| 15.4.2 Chumaceiras radiais | 253 |
| 15.4.3 Chumaceiras axiais | 259 |
| 15.4.4 Autobloqueio por atrito..... | 260 |
| Exercícios propostos..... | 265 |
| PARTE III Geometria de Massas | 323 |
| Capítulo 16 Geometria de massas | 325 |
| Introdução | 325 |
| 16.1 Centro de gravidade | 325 |
| 16.2 Centro de massas | 326 |
| 16.3 Centroide | 327 |
| 16.4 Momento de inércia de área | 333 |

VIII Estática para Engenharia

| | | |
|------|-----------------------------------|-----|
| 16.5 | Momento de inércia polar | 334 |
| 16.6 | Produto de inércia | 336 |
| 16.7 | Raio de giração..... | 338 |
| 16.8 | Teorema dos eixos paralelos | 339 |
| 16.9 | Rotação de eixos | 341 |
| | Exercícios propostos..... | 353 |
| | Anexo I | 357 |
| | Índice Remissivo | 359 |

Introdução

Enquadramento

A **Figura I.1** é uma representação esquemática do mundo que nos rodeia. À nossa volta, existem outras pessoas, a natureza (rios, pedras, animais, plantas, etc.), muitas máquinas e estruturas produzidas pelo Homem. De facto, o Homem e as suas máquinas dominam a superfície da Terra. Um olhar atento permite perceber a multiplicidade de máquinas que rodeiam o Homem, facilitando a sua vida. Nas casas há eletrodomésticos (máquina de lavar, aspirador, varinha mágica, batedeira, etc.), mas também balanças, estores automáticos, elevadores e portões automáticos. Nas suas deslocações, o Homem utiliza automóveis, trotinetes, bicicletas, autocarros, comboios, navios e aviões. Quando chega ao escritório usa agrafadores, furadores, máquinas de cortar papel, impressoras, entre outros. Em ambiente industrial, na agricultura e na construção civil, são inúmeras as máquinas utilizadas para deslocar cargas e fazer todo o tipo de processamento. Há também inúmeras estruturas fixas, tais como pontes, estádios ou placas de sinalização.

Este contexto pode ser analisado adotando diferentes perspetivas: psicológica, social, política, química, ambiental, etc. A perspetiva que nos interessa é a mecânica, que olha para o movimento dos corpos e para as forças envolvidas. Perceber o funcionamento mecânico é compreender uma parte importante deste nosso mundo, que tem muito de forças e movimento.

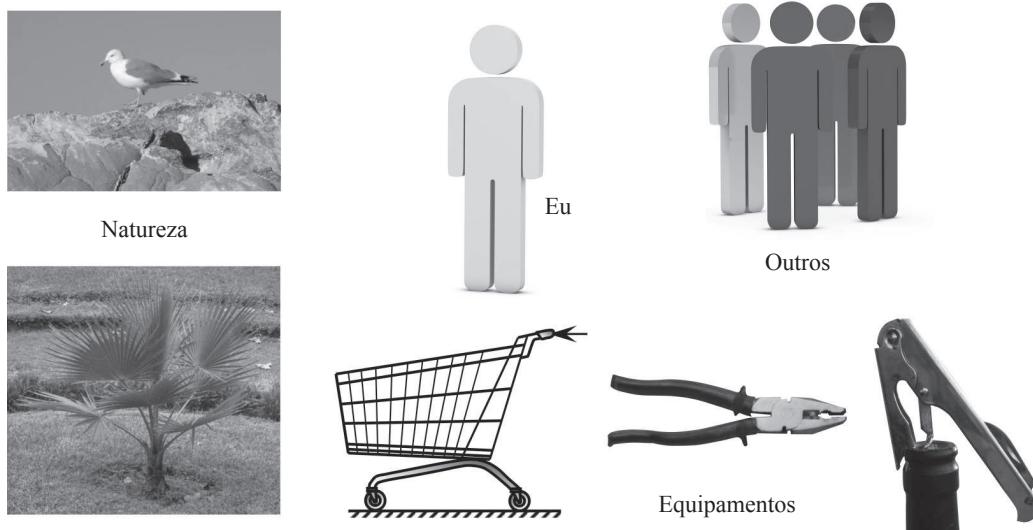


Figura I.1 Representação esquemática do mundo que nos rodeia

Um engenheiro, em particular, não pode basear-se somente na sua intuição e experiência para prever e controlar os acontecimentos relacionados com forças e movimento (até porque os sentidos são muitas vezes enganados).



Assim, a **Mecânica** é a ciência física que estuda o movimento dos corpos, a relação existente entre o movimento, as forças e o equilíbrio de forças.

Os sistemas em estudo podem incluir fluidos (líquidos ou gasosos) ou corpos sólidos (deformáveis ou rígidos). Assim, a Mecânica subdivide-se naturalmente em mecânica dos fluidos, mecânica dos corpos deformáveis e mecânica dos **corpos rígidos**. Este documento estuda corpos rígidos, isto é, aqueles em que se assume que não apresentam qualquer deformação relativa entre as suas partes. Considerar que os corpos são rígidos é sempre uma simplificação, uma vez que todos os corpos se deformam quando sujeitos a forças. Ainda assim, em muitas situações, as deformações são pequenas, sendo perfeitamente razoável considerar que os corpos são rígidos.

No estudo de corpos rígidos sob a ação de forças, podem ocorrer duas situações:

- As forças equilibram-se, de modo que o corpo está estável, isto é, em repouso ou com velocidades linear e angular constantes. Esta situação é estudada pelo ramo da Mecânica denominado **Estática**;
- As forças não se equilibram, pelo que o corpo adquire uma determinada aceleração (linear e/ou angular) que depende do desequilíbrio de forças e da inércia do sistema. Esta situação é estudada pelo ramo da Mecânica denominado **Dinâmica**.

Nas máquinas, é possível estudar isoladamente o movimento, o que é feito no âmbito da **Cinemática**. De facto, apesar de existirem forças envolvidas, o movimento depende somente da geometria dos corpos envolvidos.

Olhando à volta, é possível identificar inúmeros objetos, de diferentes dimensões, que estão em repouso: cadeiras, mesas, postes de iluminação, árvores, placas de sinalização automóvel, caixotes do lixo, pontes, pavilhões, casas, entre outros. Efetivamente, a maior parte dos equipamentos e estruturas está em repouso em relação à crosta terrestre. Mesmo os equipamentos vocacionados para o movimento, como os automóveis, bicicletas, elevadores, escavadoras ou gruas, estão muitas vezes em repouso ou deslocam-se com velocidade constante. A **Figura I.2** ilustra duas situações em que existe equilíbrio de forças. Na **Figura I.2A**, pode ver-se uma grua constituída por três segmentos acionados por cilindros. Na **Figura I.2B**, pode ver-se uma comporta com acionamento manual.

Assim, é importante dedicar uma atenção particular ao estudo da Estática. A compreensão do funcionamento estático é fundamental para obter estruturas mais seguras, mais económicas e mais amigáveis em termos ambientais.

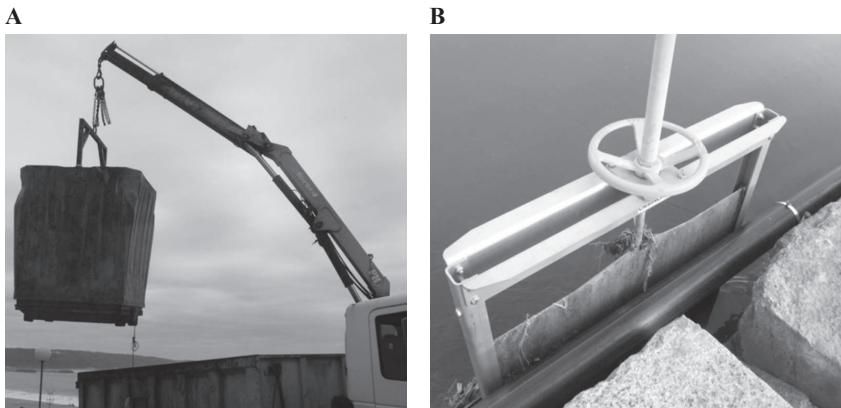


Figura I.2 Situações de estática: (A) grua a elevar caixote de lixo; (B) comporta em lago artificial

A análise estática baseia-se em alguns **pressupostos**, isto é, em conceitos que se tomam como pontos de partida e não são questionados. Esses conceitos são:

- A lei da atração universal:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (\text{I.1})$$

Em que G é a constante gravitacional universal ($G = 6,673 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg}\cdot\text{s}^2$), m_1 e m_2 são as massas dos corpos e r é a distância entre eles;

- A definição de massa específica, que é a massa por unidade de volume de um corpo:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{I.2})$$

- As **leis de Newton**:

- **1.^a lei (lei fundamental da estática)** – se o somatório das forças que atuam numa partícula é nulo, a partícula está em repouso ou tem um movimento retílineo e uniforme;
- **2.^a lei (lei fundamental da dinâmica)** – uma partícula sujeita a uma força F tem uma aceleração a de acordo com a equação $F = m \cdot a$, em que m é a massa da partícula;
- **3.^a lei (lei da ação-reação)** – se uma partícula A exerce força sobre uma partícula B , então esta reage exercendo sobre a partícula A uma força com a mesma direção e magnitude, mas em sentido e ponto de aplicação opostos.

Além disso, assume-se que os corpos em estudo não se deformam, isto é, têm uma rigidez infinita. Isso significa que os diferentes pontos do corpo mantêm a sua posição relativa. De facto, todos os corpos se deformam por ação de forças. Porém, se as variações de

forma são desprezáveis quando comparadas com as dimensões totais do corpo ou com as variações de posição, a hipótese de rigidez infinita é razoável.

Objetivos



Assim, o objetivo geral deste livro é estudar a estática do corpo rígido, mecanismos e estruturas.

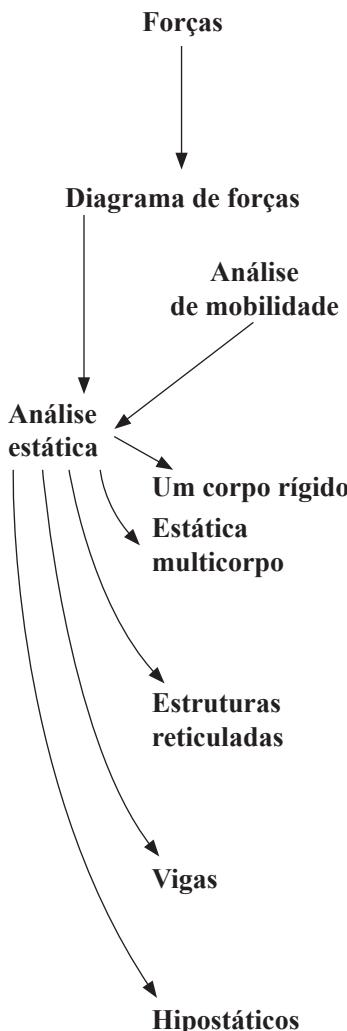
Como **objetivos mais específicos** podem apontar-se:

- A **identificação e caracterização dos diferentes tipos de forças externas** que se fazem sentir nas situações práticas: força gravítica, forças de contacto entre superfícies (normal e de atrito), forças exercidas por cabos, molas, amortecedores, fluidos (em repouso e em movimento) e motores (elétricos e de combustão interna). Esta análise detalhada das forças é a base da estática, permitindo uma visão abrangente das interações entre corpos;
- A representação do **diagrama de forças (DF)**, que oferece uma reprodução esquemática e inclui os corpos em estudo, as forças aplicadas, as dimensões relevantes e um sistema de eixos. Esta representação é fundamental para a resolução de problemas de estática;
- A **análise de mobilidade**, que permite orientar a resolução do problema e identificar as forças desconhecidas. As estruturas isostáticas e hiperestáticas estão em repouso, pelo que há equilíbrio de forças (estática). Os mecanismos hipostáticos podem mover-se. Contudo, ainda assim, as forças aplicadas têm a possibilidade de se equilibrar;
- A **análise estática de diferentes estruturas**, em que numa estratégia de complexidade crescente se estudam consecutivamente: um corpo rígido, vários corpos rígidos (multicorpo), estruturas reticuladas e vigas;
- O estudo de **sistemas hipostáticos** em que estes se podem mover, mas quando o fazem, realizam-no com velocidade muito baixa (quase-estaticamente) ou com velocidade constante, pelo que continua a existir equilíbrio de forças. Estas situações são agrupadas em três grupos que configuraram: análise de estabilidade, multiplicação de força ou aplicações de atrito.

As situações analisadas localizam-se na superfície da Terra, onde os corpos estão sujeitos à força gravítica desta e à ação da atmosfera. Além disso, direciona-se o estudo para situações do dia a dia e para os problemas com os quais, normalmente, um engenheiro se depara, fugindo aos assuntos que, apesar de terem interesse teórico, têm pouca aplicação prática. A abordagem é analítica, tendo como base as leis de Newton, a lei de atração gravítica e a rigidez dos corpos, como já foi referido.

Estrutura do livro

Com vista a atingir os objetivos anteriormente definidos, este documento está estruturado da seguinte forma:



Nos **Capítulos 1 a 8**, apresentam-se os conceitos físico e matemático de força e momento. Além disso, analisam-se, detalhadamente, os diferentes tipos de força que existem na prática e que resultam da atração gravítica, de cabos, molas, fluidos (em repouso ou em movimento) e motores.

No **Capítulo 9**, destaca-se o DF, fundamental para a análise estática.

No **Capítulo 10**, desenvolve-se a análise de mobilidade. Trata-se de uma ferramenta fundamental para perceber o funcionamento do mecanismo e encaminhar a resolução do problema.

No **Capítulo 11**, estuda-se a estática de um corpo rígido.

No **Capítulo 12**, analisa-se a estática multicorpo, isto é, de estruturas com vários corpos. É proposta uma abordagem matricial para ultrapassar a dificuldade imposta pelo aumento do número de equações de equilíbrio, que é proporcional ao número de corpos.

No **Capítulo 13**, aprofundam-se as estruturas reticuladas, em que os elementos estão somente sujeitos a esforços de tração ou compressão. São bastante utilizadas na prática, pois permitem o desenvolvimento de estruturas resistentes utilizando uma quantidade de material relativamente baixa.

No **Capítulo 14**, exploram-se as vigas, com o objetivo de obter as reações nos apoios e os diagramas de esforço normal, esforço cortante ou transversal e de momentos fletores.

O **Capítulo 15** trata as situações hipostáticas, que foram organizadas em três tópicos: análise de estabilidade, multiplicação de força e aplicações de atrito.

No **Capítulo 16**, abordam-se os principais conceitos relacionados com a distribuição da massa e da área em corpos rígidos e superfícies, essenciais para a análise mecânica de sólidos.

Material complementar

As soluções dos exercícios propostos estão disponíveis para *download* no *site* da editora, em www.fca.pt.

14

Estática de vigas

Introdução

A **Figura 14.1A** ilustra uma viga (no plano Oxy) com um apoio fixo do lado esquerdo e um apoio móvel do lado direito, sujeita a um conjunto de forças. As forças são aplicadas segundo o eixo dos yy, existindo, também, momentos em torno do eixo dos zz. Estas forças tendem a dobrar o corpo, isto é, a provocar flexão. Se também existirem forças longitudinais ao elemento estrutural, este passa a designar-se por **viga-barra**. Na **Figura 14.1B**, pode ver-se um exemplo de uma viga-barra sujeita à ação de duas forças pontuais, F_1 (longitudinal) e F_2 (transversal), e de uma força distribuída linear, $q(x)$. As reações nos apoios determinam-se resolvendo o sistema de equações da estática que traduzem o equilíbrio do corpo.



A viga é um elemento estrutural em que as dimensões características das secções transversais são bastante menores do que o seu comprimento, estando sujeito a esforços de flexão.

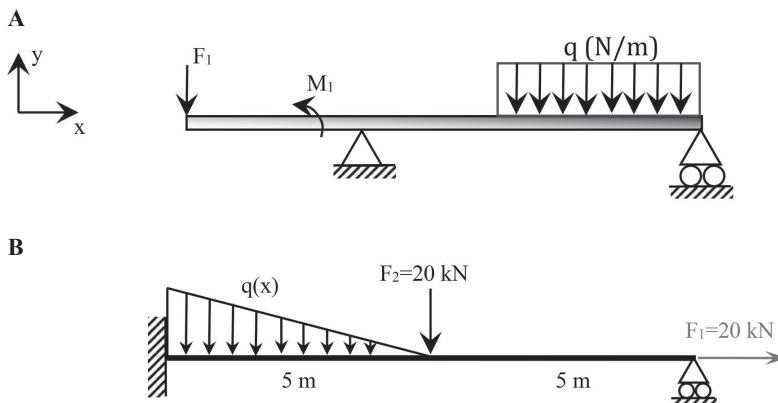


Figura 14.1 (A) viga simples; (B) viga-barra

O dispositivo de controlo de forças é um exemplo de um elemento viga-barra (**Figura 14.2**) utilizado pelos médicos-dentistas em procedimentos de restauração dentária. Como se pode observar na **Figura 14.2A**, o dispositivo está sujeito à ação de forças segundo o eixo da normal (F_z) e segundo o eixo perpendicular (F_y).

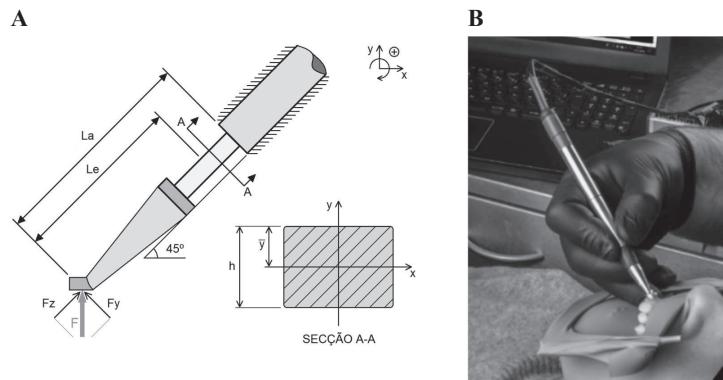


Figura 14.2 Dispositivo: (A) representação esquemática; (B) em ambiente real de treino

Outro exemplo de aplicação é a prótese ilustrada na **Figura 14.3**, utilizada pelo atleta paralímpico Telmo Pinão, com amputação transtibial, a qual lhe permitiu dar continuidade à prática de ciclismo de modo seguro e confortável e, assim, representar a Seleção Nacional de Paraciclismo. A força representada na **Figura 14.3B** é a resultante da ação segundo o eixo da prótese (normal) e transversal, e traduz a força envolvida durante a pedalada. Para o desenvolvimento desta prótese, foi necessário fazer a avaliação dos esforços que se desenvolvem na estrutura (viga-barra).

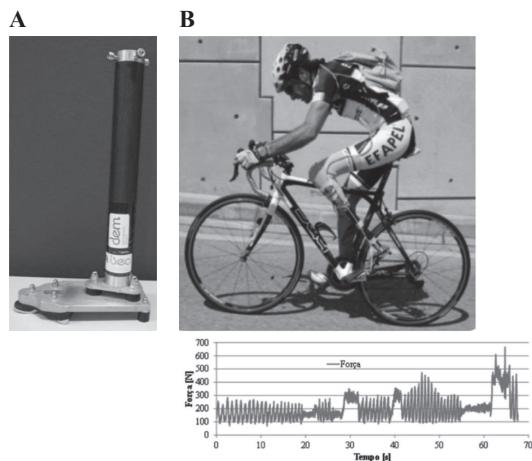


Figura 14.3 (A) prótese transtibial; (B) teste em estrada

Na **Figura 14.4**, observa-se uma alavancas utilizada para operar uma prensa simples com o propósito de compactação de latas de refrigerantes. O elemento *BC* é biarticulado e tem peso desprezável, pelo que está sujeito a forças segundo a direção do seu eixo da normal (i.e., forças axiais). Este elemento estrutural designa-se por **barra**. É de notar que as estruturas reticuladas são constituídas apenas por barras. Na **Figura 14.4**, coexistem uma viga-barra (*ABD*) e uma barra (*BC*).

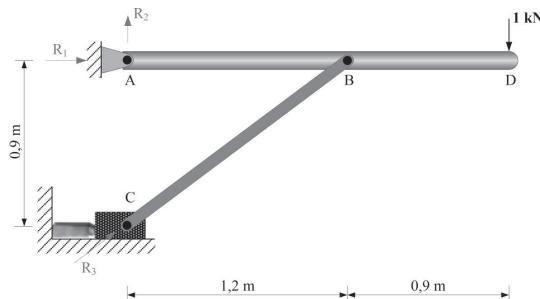


Figura 14.4 Equipamento para compactação de latas constituído por uma barra (BC) e uma viga-barra (ABD)

14.1 Diagramas de esforços

Um corpo sujeito a solicitações exteriores desenvolve, no seu interior, um sistema de forças interiores designadas por esforços internos. O conhecimento da distribuição destes esforços é essencial para se compreender a resposta estrutural do corpo.

Assim, para se avaliar a distribuição dos esforços internos, representam-se os diagramas de esforços (normais, cortantes e momentos fletores). Para isso, o corpo é seccionado (as vezes necessárias para a obtenção de todos os esforços), de modo a colocar em evidência os esforços internos, através da análise do equilíbrio de cada uma das partes resultantes do seccionamento. Sendo que o corpo estava em equilíbrio antes de ser seccionado, tem de o manter após a divisão em partes, pelo que é obrigatório substituir a ação que cada uma das partes seccionadas exercia sobre a outra por um sistema de forças.

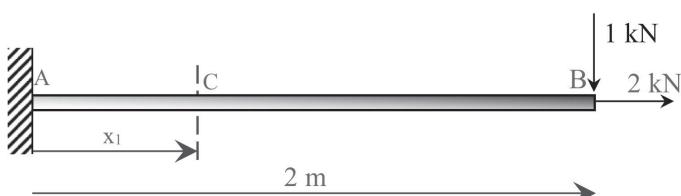


É importante reforçar a nomenclatura utilizada:

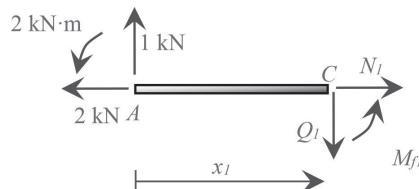
- Forças são as solicitações exteriores exercidas sobre o corpo em estudo;
- Esforços são as solicitações que se fazem sentir dentro do corpo.

Exemplo de aplicação 14.1

Enunciado: Considere a viga representada, de peso desprezável. Represente os diagramas de esforços cortantes e momentos fletores.



Resolução: Pelas equações da estática, verifica-se que o encastramento tem uma reação vertical de 1 kN, uma reação horizontal de 2 kN e um momento fletor de valor igual a 2 kN·m. Para avaliar os esforços internos a que a viga está sujeita, é necessário efetuar um seccionamento na estrutura numa posição genérica, como se indica na figura acima. A posição longitudinal da secção é definida pela coordenada x_I , que varia de 0 a 2 m. O segmento AC está em contacto com o encastramento em A e com a porção CB da viga, pelo que o diagrama de forças é:



No ponto C existem duas forças e um momento, de um modo similar a um encastramento. Essas forças e momento, por serem interiores à viga, são designados por esforços: esforço normal (N_I), esforço cortante (Q_I) e momento fletor (M_{fI}). Os sentidos assumidos são os considerados positivos, de acordo com as convenções que a seguir se descrevem.



Os esforços normais são considerados positivos, quando são de tração, e negativos, quando são de compressão (**Figura 14.5**). Esta convenção está de acordo com a utilizada no estudo dos esforços nas estruturas reticuladas.



Figura 14.5 Convenção de sinais para os esforços normais



Os esforços cortantes são positivos, quando apontam para cima do lado esquerdo da estrutura e para baixo do lado direito, e negativos, quando a sua ação é contrária, conforme se representa na **Figura 14.6**.

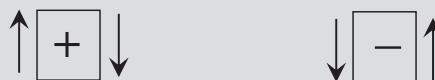


Figura 14.6 Convenção de sinais para os esforços cortantes