
MANOEL HENRIQUE CAMPOS BOTELHO

RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS

PARA ENTENDER E GOSTAR

2.^a edição revista e ampliada



Blucher

Blucher

MANOEL HENRIQUE CAMPOS BOTELHO

Eng. Civil formado pela
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS

PARA ENTENDER E GOSTAR

2ª edição revista e ampliada

Resistência dos materiais – para entender e gostar

© 2013 Manoel Henrique Campos Botelho

5ª reimpressão – 2015

Editora Edgard Blücher Ltda.

Blucher

Rua Pedroso Alvarenga, 1245, 4º andar
04531-934 – São Paulo – SP – Brasil
Tel 55 11 3078-5366
contato@blucher.com.br
www.blucher.com.br

Segundo Novo Acordo Ortográfico, conforme 5. ed.
do *Vocabulário Ortográfico da Língua Portuguesa*,
Academia Brasileira de Letras, março de 2009.

É proibida a reprodução total ou parcial por quaisquer
meios, sem autorização escrita da Editora.

Todos os direitos reservados pela Editora
Edgard Blücher Ltda.

FICHA CATALOGRÁFICA

Botelho, Manoel Henrique Campos
Resistência dos materiais – para entender e gostar /
Manoel Henrique Campos Botelho. – 2. ed. – São Paulo:
Blucher, 2013.

Bibliografia.

ISBN 978-85-212-0750-4 (eletrônico)

1. Engenharia de estrutura 2. Resistência dos
materiais I. Título

13-0334

CDD-620.112

Índices para catálogo sistemático:
1. Resistência dos materiais: Engenharia



Carta ao Professor de Resistência dos Materiais (RM)

A RM é seguramente uma das principais matérias da Área de Engenharia e Arquitetura. É uma matéria essencial, bela e de compreensão fácil, pois a usamos diariamente na nossa vida comum.

Este é um livro ABC, com o objetivo de ajudar no ensino dos conceitos fundamentais da RM. Espero que o caro Professor goste e adote este livro.

Penso em publicar proximamente um outro livro de RM, agora dirigido especificamente para a área industrial mecânica, onde as operações com estruturas móveis, o choque e deformações sejam estudadas. Preciso para isso da colaboração e parceria de professores de RM, com formação mecânica ou industrial.

Convido, portanto, esse tipo de professor a me contatar para escrevermos esse novo livro.

Grato e boa leitura.

Manoel Henrique Campos Botelho
*e-mail: manoelbotelho@terra.com.br
janeiro/2008*

Agradecimentos pelos comentários, críticas e elogios

— Prof. José Sergio do Nascimento - UNIP

— Reynaldo C. Ferreira

— Prof. Romulo Feitosa Navarro (prpg@ufcg.edu.br)

— Prof. Paulo Afonso Franson Manoel - UNIP

Oferendas – 1.^a edição 2008

Aos vários livros sobre “Resistência dos Materiais” que consultei. Quando os li pela primeira vez, aos vinte e tantos anos, tinha deles uma ideia.

Ao relê-los, ao longo dos anos e à exaustão nesses últimos doze meses, e tendo agora sessenta e cinco anos, descobri belezas que a primeira leitura e os meus verdes anos não permitiram perceber.

*À Walda,
ela sabe a razão*

Aos colegas, mestres e amigos

Edson Gimenez Espejo
Geraldo de Andrade Ribeiro Jr.
Mário Massaro Jr.
Nelson Newton Ferraz

A Mauricio Campos Botelho, meu filho, que no passado, estudante de engenharia civil na Unicamp, que fez boa parte da interpretação de minha letra, ao passar o texto para o computador.

*A todos, o autor agradece
MHCB
janeiro/2008
e-mail: manoelbotelho@terra.com.br*

Comentários

O autor recebeu comentários e correções sobre este texto que muito ajudaram. Agradeço a Rosemary, João Bosco, Ramiz, Vuaden e Mathias.

MHC Botelho

Apresentação

Este livro é dirigido a estudantes de engenharia e arquitetura, de escolas técnicas e para jovens profissionais. Dentro da linha didática que procuro trilhar, dou extraordinária importância à compreensão do fenômeno e, com exemplos numéricos, procuro sensibilizar sua compreensão quantitativa.

Sendo um livro de primeiro grau, indico no fim do trabalho uma lista de livros para aperfeiçoamento do estudante. Quanto à importância do tema “Resistência dos Materiais”, dizia um velho professor de minha escola de engenharia, a sacrossanta Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Frases que norteiam a produção de livros escritos por Manoel Henrique Campos Botelho:

“A jornada de mil passos começa com o primeiro passo...”

“Caminhante. Temos um aviso. Não há caminhos. Os caminhos se abrem ao caminhar...”

“Se eu tivesse que reduzir ao máximo o número de matérias obrigatórias do ensino de engenharia, sobrariam duas matérias: Resistência dos Materiais e Custos”.

Creio que qualquer assunto da engenharia pode ser explicado, de maneira simples e compreensível para todos. Inspiro-me nas palavras do poeta João Cabral de Mello Neto:

*O Engenheiro
o lápis, o esquadro, o papel;
o desenho, o projeto, o número;
o engenheiro pensa o mundo justo,
mundo que nenhum véu encobre...*

Caro leitor, espero que este livro o ajude,

*O Autor
Praia do Perequê-Açu, Ubatuba, SP*

Conteúdo

1	O que é a Resistência dos Materiais	1
2	O equilíbrio das estruturas e as estruturas que não devem estar em equilíbrio	3
3	Os tipos de esforços nas estruturas.....	15
4	Tensões, coeficientes de segurança e tensões admissíveis	23
5	Todas as estruturas se deformam — Lei de Hooke e Módulo de Poisson	31
6	Quando as estruturas se apoiam — Entendendo os vários tipos de apoio.....	41
7	Estruturas isostáticas, hiperestáticas e hipostáticas.....	45
8	Estudando os vários tipos de flexão: flexão simples, flexão composta e flexão oblíqua etc.	49
9	Introdução aos conceitos de momento estático, momento de inércia, módulo resistente e raio de giração	55
10	Estudando a flexão normal nas vigas isostáticas — Diagramas de momentos fletores, forças cortantes e forças normais.....	59
11	Tensões normais em vigas isostáticas — a flexão normal.....	67
12	A flexão oblíqua nas vigas	79
13	Tensões tangenciais (cisalhamento) em vigas	85
14	Como as vigas se deformam — Linhas elásticas	95
15	Estudando as vigas hiperestáticas — Equação dos três momentos e Método de Cross.....	105
16	Flambagem ou o mal característico das peças comprimidas	115
17	Estruturas e materiais não resistentes à tração	129
18	Estruturas de resposta linear e não linear. Validade do processo de superposição	139

19	Ligando duas peças — Cálculo de rebites e soldas	147
20	A torção e os eixos	153
21	Molas e outras estruturas resilientes	163
22	Cabos.....	167
23	Nascem as treliças	175
24	Arcos e vigas curvas.....	183
25	Análise de vários e interessantes casos estruturais	189
26	Estruturas heterogêneas quanto aos materiais.....	199
27	Estamos encerrando a matéria	205
28	Bibliografia — O que há para ler nas bibliotecas e livrarias brasileiras	207
29	Anexo 1 Composição e decomposição de forças	211
30	Anexo 2 Estados de tensão — Critérios de resistência	217
31	Anexo 3 Glossário de primeira ajuda	223
32	Anexo 4 Resumo histórico do uso de materiais e de estruturas.....	227
33	Anexo 5 Falhas e defeitos em estruturas e equipamentos.....	233
34	Anexo 6 Consulta ao público leitor.....	239

1

O que é a Resistência dos Materiais

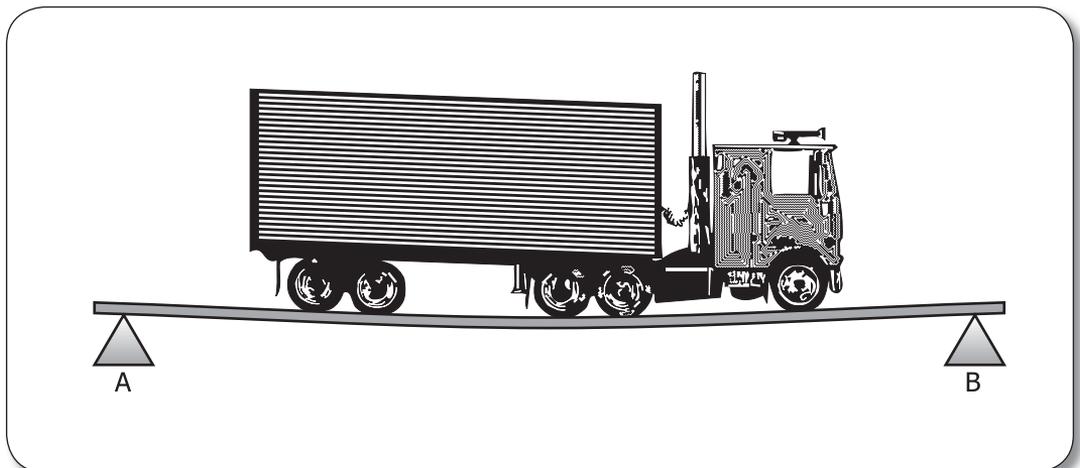
Para poder transformar a Natureza, o homem precisa de ferramentas e tecnologia. Para criar tecnologia, precisa de teorias que correspondam à sistematização de conhecimentos e à descoberta de leis naturais que orientam seu trabalho. Depois de criar uma série de teorias, algumas das quais superam e substituem outras, o homem procura sistematizá-las dando-lhe nomes, delimitando suas validades e estabelecendo um grau de hierarquia entre elas.

Do estudo das estruturas (casas, pontes, veículos etc.) surge a Resistência dos Materiais. Vamos a ela.

Vamos supor que se pretenda transportar uma peça de grande peso sobre uma estrutura de suporte (prancha) que, por sua vez, se assenta sobre dois apoios, A e B.

A estrutura receberá essa carga e sofrerá, com isso, uma série de esforços, deformando-se. A Resistência dos Materiais determinará tais esforços e a lei da deformação dessa viga. Conhecendo o material com que se construiu a estrutura-suporte, saberemos:

- se com o material usado no suporte e em face de suas dimensões — por exemplo, a espessura —, a estrutura ou resiste à solitação ou se rompe;
- as deformações que ocorrerão.



Em essência, estudar isso é estudar a Resistência dos Materiais (RM).

Atribui-se a Galileu Galilei o primeiro estudo sistemático de RM. Antes dele a arte de construir era ensinada oralmente pelos mestres aos discípulos, pelo método de repetição da experiência.^(*)

Objetivo do estudo da Resistência dos Materiais

A Resistência dos Materiais, *nos limites deste livro*, procurará estudar.

1. Estruturas que possam ser associadas à barras de eixo retilíneo;
2. Estruturas que obedeçam a uma lei, segundo a qual, se uma barra for submetida a uma carga q , ela se deformará de x , e se a carga for $2q$ a deformação deverá ser $2x$. A importância dessa lei — chamada Lei de Hooke — será mostrada ao longo do livro.
3. Situações de pequenas deformações.
4. Estruturas onde as cargas são estáticas e não dinâmicas.

Estruturas que não obedeçam a qualquer uma dessas quatro condições (placas, por exemplo) deverão ser estudadas por outras teorias estruturais, como a da Resistência dos Materiais avançada, e a Teoria da Elasticidade, que é muito útil em estruturas de mais de uma dimensão.

A Resistência dos Materiais estudada neste livro fornecerá os fundamentos para a compreensão e o estudo das seguintes estruturas:

- do dia a dia;
- da natureza;
- de pedra, de taipa e de alvenaria;
- de madeira;
- de aço, de alumínio etc.;
- de concreto simples e armado;
- de equipamentos;
- outras.

Nota sobre o sistema de unidades:

Optou-se por usar neste livro a expressão kgf como unidade de peso, em vez da unidade Newton. Deve-se isso a uma maior familiaridade do autor com a unidade clássica. Cremos que a maioria dos leitores também prefere essa opção.

Vale a transformação prática:

$$\begin{aligned} 10 \text{ N} &\cong 1 \text{ kgf} = \text{aproximadamente} \\ 10 \text{ kgf/cm}^2 &= 1 \text{ MPa} \\ \text{M} &= \text{mega} = 10^6 \end{aligned}$$

^(*) *Nota surpreendente* — As pirâmides do Egito foram construídas mais de 3.000 anos antes de Galileu, pois foram construídas ao redor dos anos 2.000 a.C.

2

O equilíbrio das estruturas e as estruturas que não devem estar em equilíbrio

Uma estrutura ou está em equilíbrio ou em movimento. Nós estudaremos principalmente as estruturas em equilíbrio, ou seja, as que estão estáticas, melhor dizendo em “equilíbrio estático”.

Para que uma estrutura esteja em equilíbrio estático, deve obedecer às seguintes leis da Estática:

$$\begin{array}{ll} \sum F_H = 0 & \sum F_V = 0 \\ \sum M_T = 0 & \sum M_F = 0 \end{array}$$

onde:

Σ = Somatória

F_H = Força horizontal

F_V = Força vertical

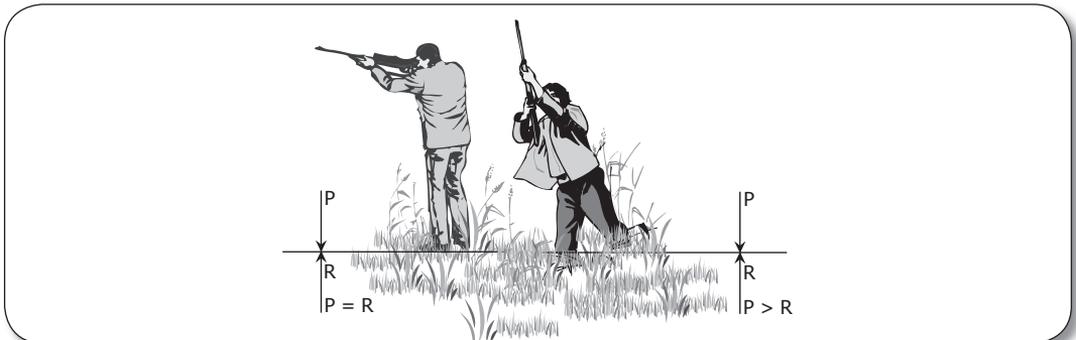
M_T = Momento de torção

M_F = Momento de flexão

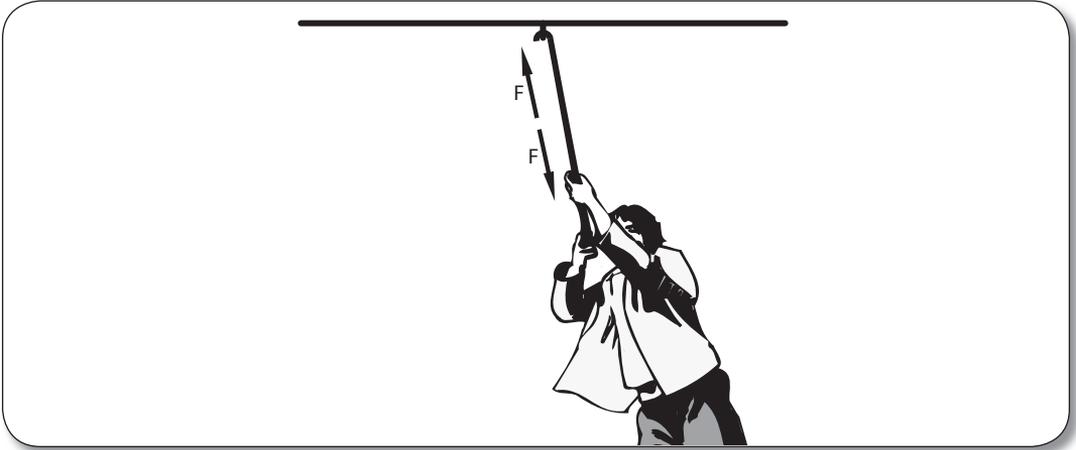
São as quatro famosas condições dos esforços externos

Sejam as seguintes estruturas e vejamos as suas condições de equilíbrio:

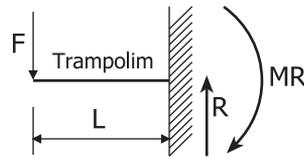
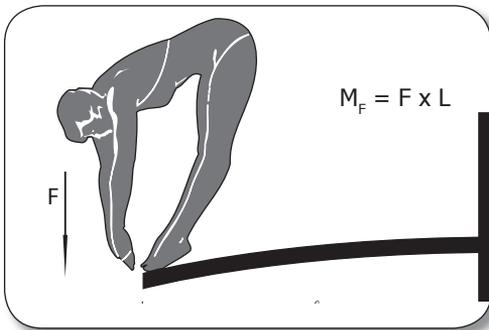
Uma pessoa está apoiada no chão. Se o chão puder reagir com uma reação igual ao peso, a pessoa estará em equilíbrio. Se o chão for um charco, um lodaçal, o chão não reagirá ao peso e a pessoa afundará.



Temos agora uma pessoa puxando um fio. Tudo estará em equilíbrio se a amarração do fio na parede e o próprio fio puderem reagir com uma força F igual e contrária à ação.



Uma pessoa empurra para baixo um trampolim. Seguramente, o trampolim se deformará, mas estará em equilíbrio se o engaste trampolim-estrutura puder reagir à força e ao momento de flexão $F \times L$ criado.



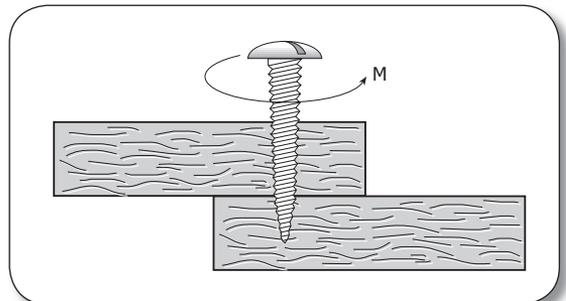
$$M + M_R = 0$$

$$M_R = F \times L$$

$$M_R = -M = -F \times L$$

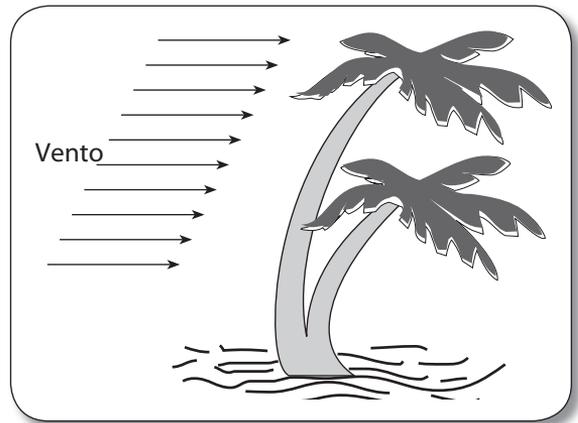
$$R = F$$

Temos agora um parafuso preso numa madeira e, com uma ferramenta apoiada nessa madeira, tentamos torcê-lo. Se o momento de torção que causamos for suficiente, o parafuso girará. Se for reduzido, então as resistências de atrito serão suficientes para reagir com um momento torsor reativo igual e de sentido contrário; desse modo, o parafuso fica em equilíbrio e não gira.



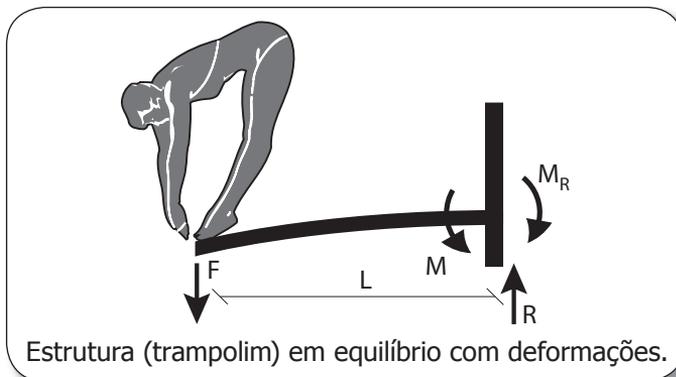
Notas:

1. Até agora vimos estruturas que procuraram o equilíbrio. Há estruturas que procuram, dentro de critérios, o não equilíbrio. Bicicletas, patins, pranchas de *windsurf*, carros, esteiras transportadoras e rodas-gigantes são exemplos disso.
2. Note que se obtêm as condições de equilíbrio com ações e reações externas ao corpo. Nada falamos dos esforços que essas forças e momentos externos causam nos corpos. Não mencionamos, por exemplo, que no caso da pessoa puxando uma corda isso também só será possível se a corda aguentar. A existência de ações externas, mesmo que equilibradas com reações também externas, gera esforços internos que serão resistidos, ou não, pela constituição do corpo.
3. Não confunda equilíbrio com deformações. Um coqueiro que se dobra ante o efeito de um vento está em equilíbrio enquanto não sair do local. Uma estrutura em equilíbrio pode ter enormes deformações, como o caso da árvore ou de um trampolim que se verga ao peso e ao impulso dinâmico de um banhista.

**2.1 – Exemplos**

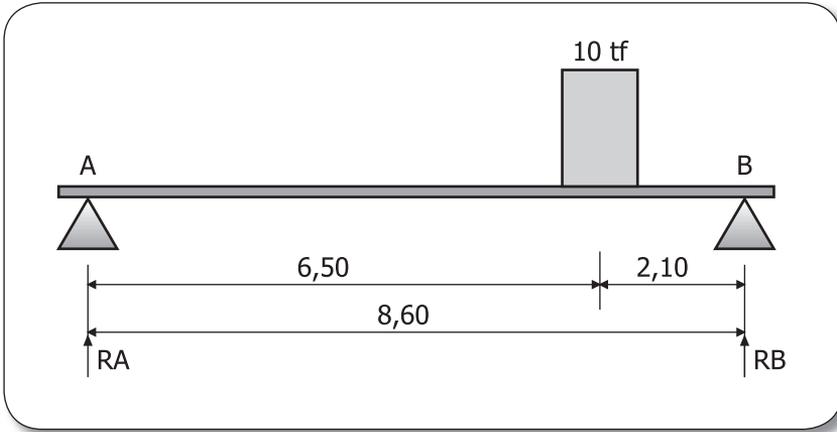
Uma prancha de *windsurf* desloca-se horizontalmente ao sabor do vento por não ter vínculo que se oponha a isso.

A prancha de *windsurf* não está em equilíbrio horizontal.



Exemplos numéricos de condições de equilíbrio

Exemplo 1



Viga com dois apoios e uma carga concentrada.

$$R_A + R_B = 10 \text{ tf}$$

$$\sum M_A = 0^{(*)}$$

$$R_B \times 8,6 - 10 \times 6,5 = 0$$

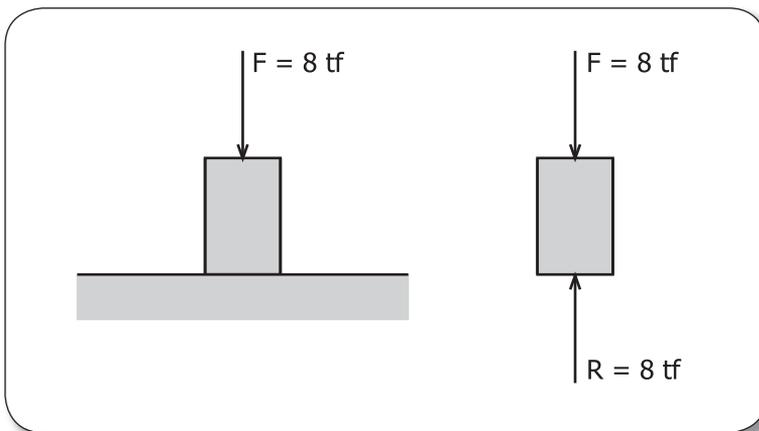
$$R_B = 7,6 \text{ tf}$$

$$R_A = 10 - R_B = 2,4 \text{ tf}$$

NOTA: Se a carga de 10 tf estivesse aplicada no apoio B então:

$$R_A = 0 \text{ tf e } R_B = 10 \text{ tf}$$

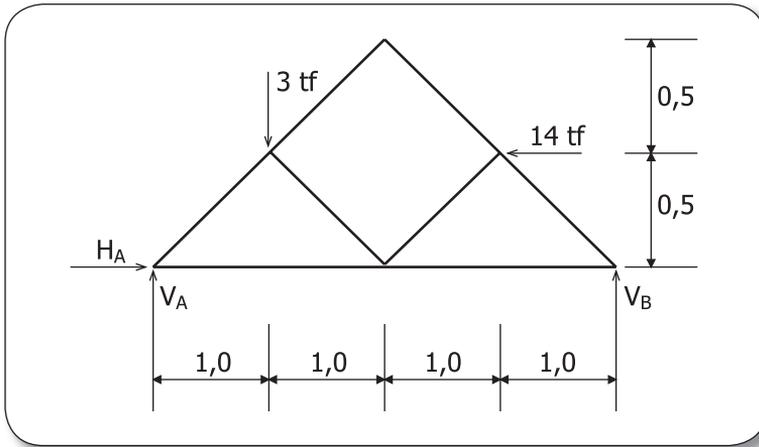
Exemplo 2



Corpo sendo comprimido

(*) Num corpo em equilíbrio, a somatória de todos os momentos causados por todas as forças tem que dar zero.

Exemplo 3



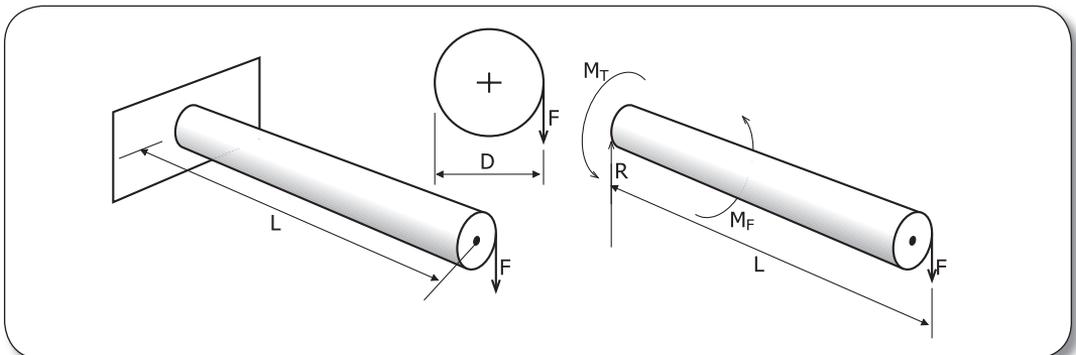
Treliça — estrutura onde as cargas aplicam-se nos nós.

$$\begin{aligned} \sum F_V &= 0 \\ V_A + V_B - 3 &= 0 \\ \sum M_A &= 0 \\ 4V_B + 14 \times 0,5 - 3 \times 1 &= 0 \\ V_B &= \frac{3-7}{4} = -1 \text{ tf} \\ V_A &= 3 + 1 = 4 \text{ tf} \\ \sum F_H &= 0 \\ H_A &= 14 \text{ tf} \end{aligned}$$

como V_B é negativo, essa estrutura está sendo arrancada em B .

Exemplo 4

Seja uma viga engastada em uma parede:



M_F = Momento fletor

M_T = Momento de torção

M_T , M_F e R no apoio A , são as reações que equilibram a força F distante de L do apoio e $D/2$ do eixo da viga.

Σ = somatória

$$\begin{aligned} \sum F_H = 0 & \quad R + F = 0 \\ & \quad R = -F \end{aligned}$$

$$\sum M_T = 0 \quad M_T = F \times \frac{D}{2}$$

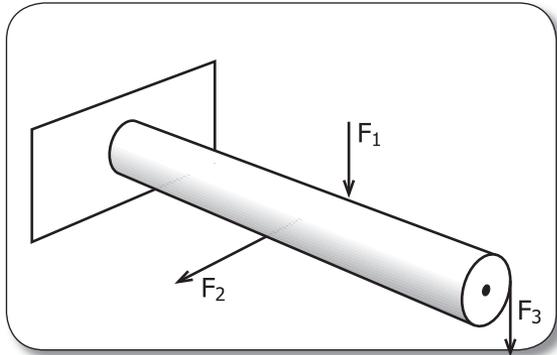
$$\sum M_F = 0 \quad M_A = F \cdot L$$

Intervalo didático

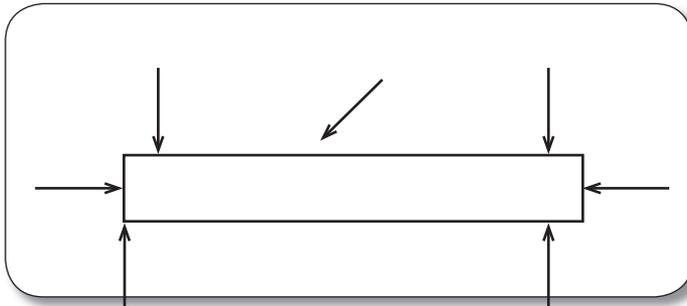
- a) Usaremos as quatro famosas equações nas estruturas espaciais (não contidas em um plano).

Condição de equilíbrio

$$\begin{aligned} \sum F_H = 0 & \quad \sum F_V = 0 \\ \sum M_T = 0 & \quad \sum M_F = 0 \end{aligned}$$



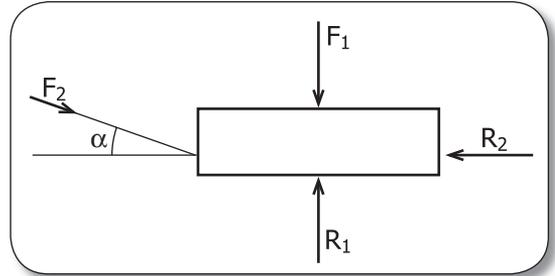
- b) Usaremos as três famosas equações nas estruturas que estejam contidas no plano.



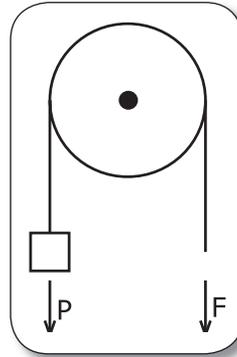
Condição de equilíbrio $\sum F_H = 0$ $\sum F_V = 0$ $\sum M_F = 0$

c) Usaremos uma ou duas famosas equações de equilíbrio em situações específicas.

$$\begin{aligned} \sum F_H &= 0 & \sum F_V &= 0 \\ R_1 &= F_1 + F_2 \cdot \text{sen } \alpha \\ R_2 &= F_2 \cdot \text{cos } \alpha \end{aligned}$$

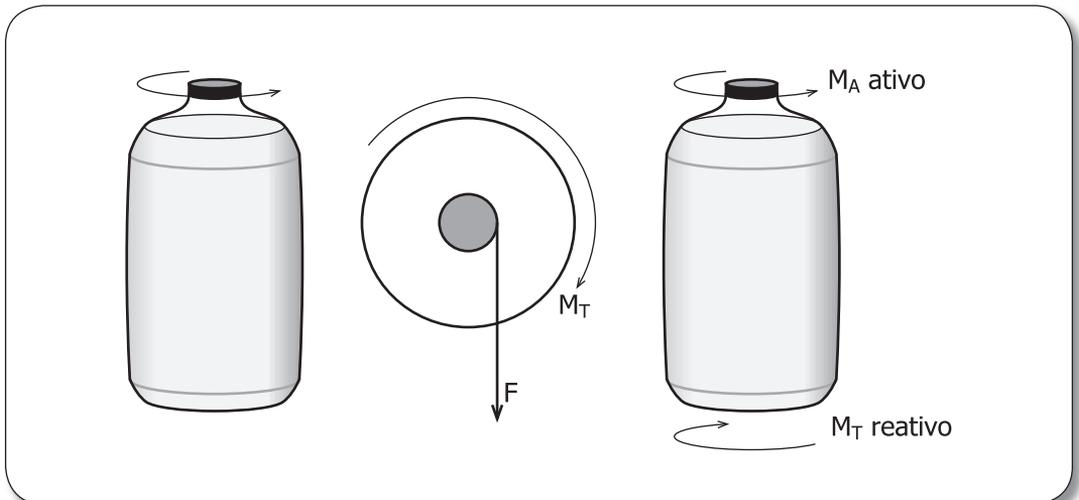


$$\begin{aligned} \sum F_V &= 0 \\ F - P &= 0 \\ F &= P \end{aligned}$$



2.2 – Reconhecendo as estruturas do dia a dia

Tente o caro leitor abrir uma garrafa de refrigerante (com rosca interna) com uma só mão em cima de um piso liso.



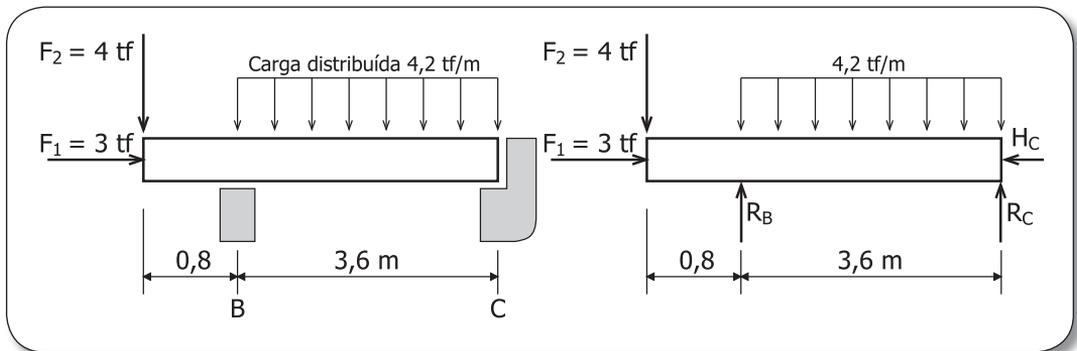
Você não vai conseguir por falta de apoio e reação; os efeitos do seu esforço serão nulos. Agora, segure a base da garrafa com uma mão e gire a tampa com a outra. A tampa girará. Você sentirá então que foram criados dois momentos de torção, um negativo e outro positivo. A sua mão sobre a tampa gerará um momento de torção sobre a estrutura que não girará, pois seria uma perda do equilíbrio, devido ao momento torsor reativo criado pela outra mão.

Vamos agora fazer alguns exercícios para fixar os conceitos.

2.3 – Exercícios numéricos

Exercício 1

Determine as reações na viga:



Primeira condição:

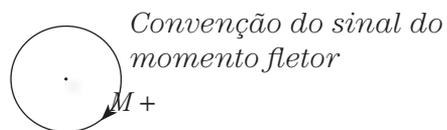
$$\begin{aligned}\sum F_H &= 0 \\ F_1 - H_C &= 0 \quad \rightarrow \quad H_C = 3 \text{ tf} \\ 3 - H_C &= 0\end{aligned}$$

Segunda condição:

$$\begin{aligned}\sum F_V &= 0 \\ 4 \text{ tf} + 4,2 \times 3,6 - R_B - R_C &= 0 \\ R_B + R_C &= 19,12 \text{ tf}\end{aligned}$$

Terceira condição:

$$\sum M_F = 0$$



Vamos aplicar esta condição para o ponto C. Substituiremos a carga distribuída pela sua resultante de intensidade $4,2 \times 3,6$ e situada no ponto médio entre B e C.

Para o ponto C:

$$-4(0,8 + 3,6) + R_B \cdot 3,6 - 4,2 \times 3,6 \times \frac{3,6}{2} = 0$$

$$R_B = 12,5 \text{ tf}$$

$$R_B + R_C = 19,12 \text{ tf}$$

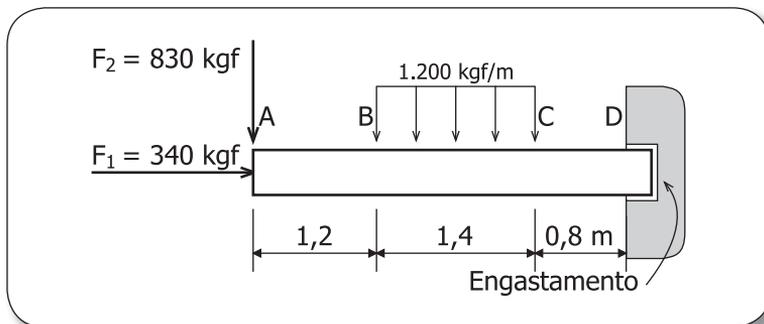
$$R_C = 19,2 - 12,5 = 6,7 \text{ tf}$$

$$R_C = 6,7 \text{ tf}$$

Estão definidas as reações na viga. Note que pusemos no apoio C as reações compatíveis com o apoio, que é uma articulação, portanto, as reações são forças.

Exercício 2

Determine as reações da viga a seguir: só há apoio em D e é um engastamento (encaixe).



Valem as três famosas condições:

- 1 $\Sigma F_H = 0$
- 2 $\Sigma F_V = 0$
- 3 $\Sigma M = 0$ (momento fletor)

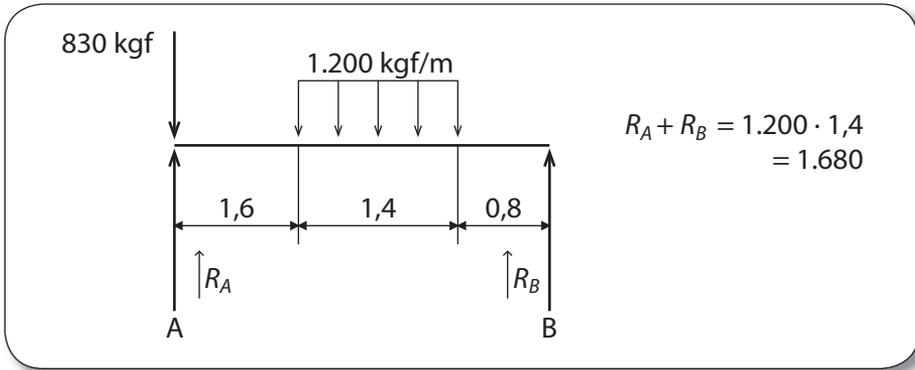
O ponto D estará em equilíbrio se o momento fletor causado pelas forças externas for igual ao momento fletor reativo M_D . Logo:

$$M_D = 830(1,2 + 1,4 + 0,8) + 1.200(1,4) \left(\frac{1,4}{2} + 0,8 \right)$$

$$M_D = 2.822 + 2.520 = 5.342 \text{ kgfm}$$

$$M_D = 5.342 \text{ kgfm}$$

As forças externas causaram no encaixe um momento fletor externo de 5.342 kgfm, e o encaixe reage com um momento fletor contrário do mesmo valor numérico.

Exercício 3

$$MB(+) = R_A = (1,6 + 1,4 + 0,8) = + R_A \cdot 3,8$$

$$MB(-) = (-) 1.200 \cdot \left(\frac{1,4}{2} + 0,8\right) = (-) 1.800$$

$$R_A \cdot 3,8 - 1.800 = 0 \quad R_A = \frac{1.800}{3,8} = 473 \text{ kgf}$$

$$R_B + R_A = 1.200 \cdot 1,4 = 1.680 \text{ kgf}$$

$$R_B = 1.680 - 473 = 1.207 \quad R_B = 1.207 \text{ kgf}$$

$$R_B = 1.207 \text{ kgf}$$

Levando em conta também a carga de 830 kgf atuando no apoio A ela não transmite esforço para a viga e para a reação R_B . É uma força só atuante em A.

Então

$$R_A (\text{total}) = 473 + 830 = 1.303 \text{ kgf}$$

Notas didáticas:

- a) No exercício 2, para que a peça não gire (ela está impedida de girar pelo encaixe-engastamento), o apoio engastado possibilita essa tendência de não girar causada pelas forças externas. Logo, há momento fletor externo em D . Como veremos ao longo deste livro, mesmo não havendo momentos fletores externos, há em cada seção da viga momentos fletores internos à direita e à esquerda de cada ponto, momentos fletores positivos e negativos e de mesmo módulo que equilibram a seção. Além de equilibrarem a seção, esses momentos fletores causam tensões na viga, as quais a viga terá que suportar. Chegaremos lá.

- b) Quando projetamos e usamos estruturas que se movimentam — portas, eixos de motores, esteiras rolantes, navios —, esse movimento atende a determinadas restrições. Por exemplo, uma porta deve se movimentar (girar) em torno de um eixo. Um automóvel deve se deslocar em várias direções e sentidos. As estruturas feitas pelo homem, portanto, devem estar ou em *equilíbrio estático* (como as construções fixas da construção civil) ou em *equilíbrio dinâmico* (como as construções mecânicas).

Um caso muito curioso é a bicicleta. Ela só adquire equilíbrio dinâmico de não tombar quando está em movimento (não equilíbrio no sentido horizontal). Basta retornar ao equilíbrio no sentido horizontal para que ela entre em desequilíbrio e tombe.

