



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Introdução aos Elementos de Máquinas

PMR 3320 - A01

INTRODUÇÃO

2020.2



Informações gerais

Docentes: Prof. Dr. Rodrigo Stoeterau e Prof. Dr. Nicola Getschko

Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas

Mecânicos - Salas MS-04 / MS-03

e-mails: rodrigo.stoeterau@usp.br

getnic@gmail.com

Horário: Segundas-feiras das 09:20 – 11:00 WebAulas



Estrutura da disciplina

Módulo 1 – Fundamentos de mecânica dos sólidos

Rodrigo

Módulo 2 – Teoria de falhas

Rodrigo

Módulo 3 – Elementos de máquinas

Nicola e Rodrigo

→ Módulo 3.1 – Elementos de fixação

→ Módulo 3.2 – Engrenagens

→ Módulo 3.3 – Mancais, molas e acoplamentos



Estrutura da disciplina

Módulo 1 – Fundamentos de mecânica dos sólidos

Rodrigo

Introdução e Modelagem, carregamento e equilíbrio

1 aula

Estado plano de tensões e deformações

1 aula

Total = 02 aulas



Estrutura da disciplina

Módulo 2 – Teoria de falhas

Rodrigo

Falha por deformações excessivas e permanentes

1 aula

Falha por fadiga

2 aulas

Total = 03 aulas



Estrutura da disciplina

Módulo 3.1– Elementos de fixação	Nicola
→ Fixação cubo eixo	1 aula
→ Dimensionamento Eixos	1 aula
→ Rebites	1 aula
→ Parafusos	1 aula
→ Fusos de potência	1 aula
Total = 5 aulas	



Estrutura da disciplina

Módulo 3.2 – Engrenagens

Rodrigo

Denominações e leis do engrenamento

1 aula

Esforços sobre os dentes da engrenagem

1 aula

Roteiro de projeto AGMA

1 aula

Total = 3 aulas



Estrutura da disciplina

Módulo 3.3 – Mancais, molas e acoplamentos

Rodrigo e Nicola

→ Mancais (Rodrigo)	2 aulas
→ Molas (Nicola)	1 aula
→ Acoplamentos e embreagens	1 aula

Total = 4 aulas



Método de Avaliação

Neste semestre utilizaremos avaliação continuada

Exercícios serão disponibilizados ao fim de cada aula, e devem ser resolvidos com prazo determinado

$$Notafinal = \frac{\sum_{i=1}^n (Ex_i - Ex_{menor\ nota})}{(n - 1)}$$

→ **NF ≥ 5,0**

→ A frequência mínima é de 75%; alunos que se ausentarem por mais de oito (08) aulas serão **reprovados**.

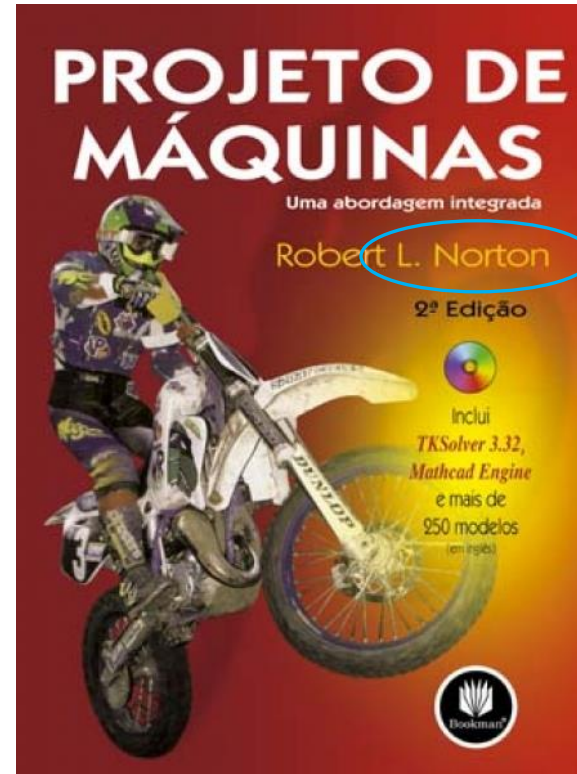
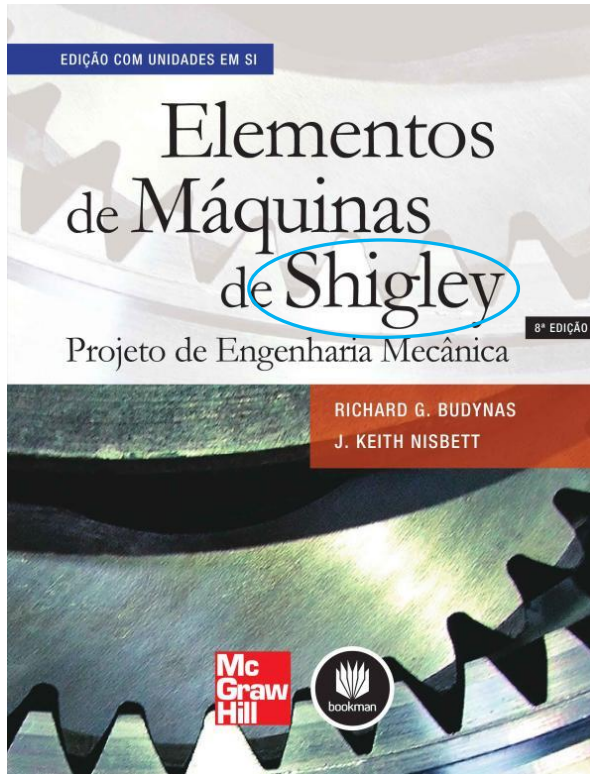


Cronograma de aulas

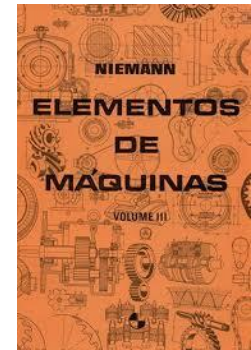
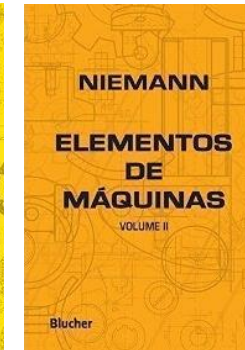
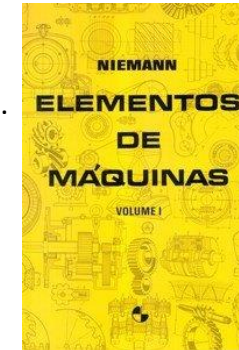
Dia	S	Aula	Tópico	Prof.
17.08	2ª	A1	Introdução a disciplina Modelagem, carregamento e equilíbrio	RS
24.08	2ª	A2	Composição de tensões Estado plano de tensões - Círculo de Mohr	RS
31.08	2ª	A3	Teorias de Falha: 2) Falha por deformação permanente: von Mises, Tresca, Coulomb-Mohr;	RS
07.09	2ª	---	Feriado - Independência do Brasil	
14.09	2ª	A4	Teorias de Falha: 3) Falha por fadiga: Parte - 1	RS
21.09	2ª	A5	Teorias de Falha: 3) Falha por fadiga: Parte - 2	RS
28.09	2ª	A6	Fixações cubo-eixo	RS
05.10	2ª	A7	Dimensionamento de Eixos	NG
12.10	2ª	---	Feriado - Dia da Criança	
19.10	2ª	A8	Especificação e dimensionamento de elementos de fixação: Rebites	NG
26.10	2ª	A9	Especificação e dimensionamento de elementos de fixação: Parafusos	NG
02.11	2ª	A10	Especificação e dimensionamento de elementos de transmissão: Fusos	NG
09.11	2ª	A11	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Engrenagens: Parte - 1	RS
16.11	2ª	A12	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Engrenagens: Parte - 2	RS
23.11	2ª	A13	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Mancais	RS
30.11	2ª	A17	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Molas	NG
07.12	2ª	A18	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Acoplamentos e embreagens	NG
14.12	2ª		Encerramento do semestre 2020-2	



Bibliografia



- Shigley, J. F.; Budynas, R.; Nisbett, J. K., Elementos de Máquinas. 8ª edição, McGraw-Hill
- Norton, R. L., Projeto de Máquinas, uma abordagem integrada, Prentice-Hall Publishing, 1998.
- Juvinall, R. C.; Marshek, K. M., Projeto de componentes de máquinas, LTC
- Niemann, H. Elementos de máquinas, vol i, II e III





Objetivo

Apresentar os fundamentos para o dimensionamento de elementos de máquinas utilização de critérios de falha e dinâmica, incluindo as formas de cálculo dos esforços internos e externos e combinação de tensões usando Círculo de Mohr.

Apresentar uma abordagem holística para a solução de problemas de engenharia que envolvam o projeto de sistemas mecânicos



Condições do curso

- As sessões consistirão de aulas expositivas dialogadas, com discussão dos assuntos do curso e reuniões para os trabalhos em grupo.
- Estão previstas as seguintes atividades **EXTRA-SALA**: trabalhos práticos, com leitura e estudo de textos, preparação dos relatórios e apresentação
- Será enfatizada a troca de experiências entre os participantes, e entre estes e o professor.
- Discussões serão estimuladas durante as aulas.



Condições do curso

➤ **Importante**

- ✓ ler, pensar, entender, reler, discutir e aplicar.
- ✓ Não separar o curso da sua vida profissional;
- ✓ aplicar ao seu trabalho sempre que possível



Aula 01

Tópicos

- Introdução
- Processo de desenvolvimento de produto
- Projeto detalhado



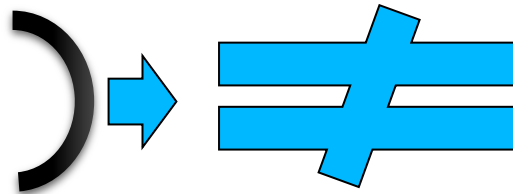
Introdução



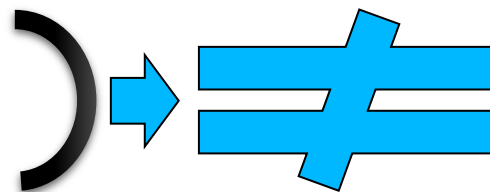
- Projeto



- Design
- Project

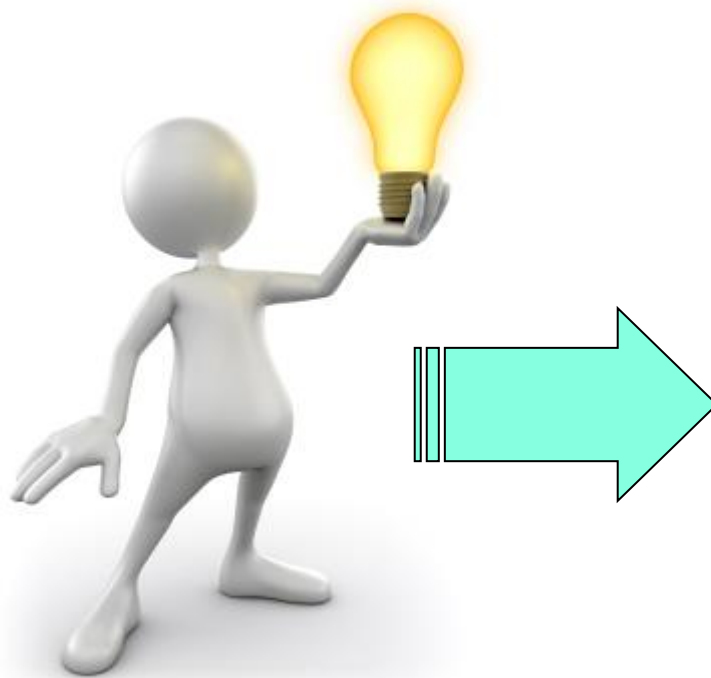


- Konstruktion
- Projekt

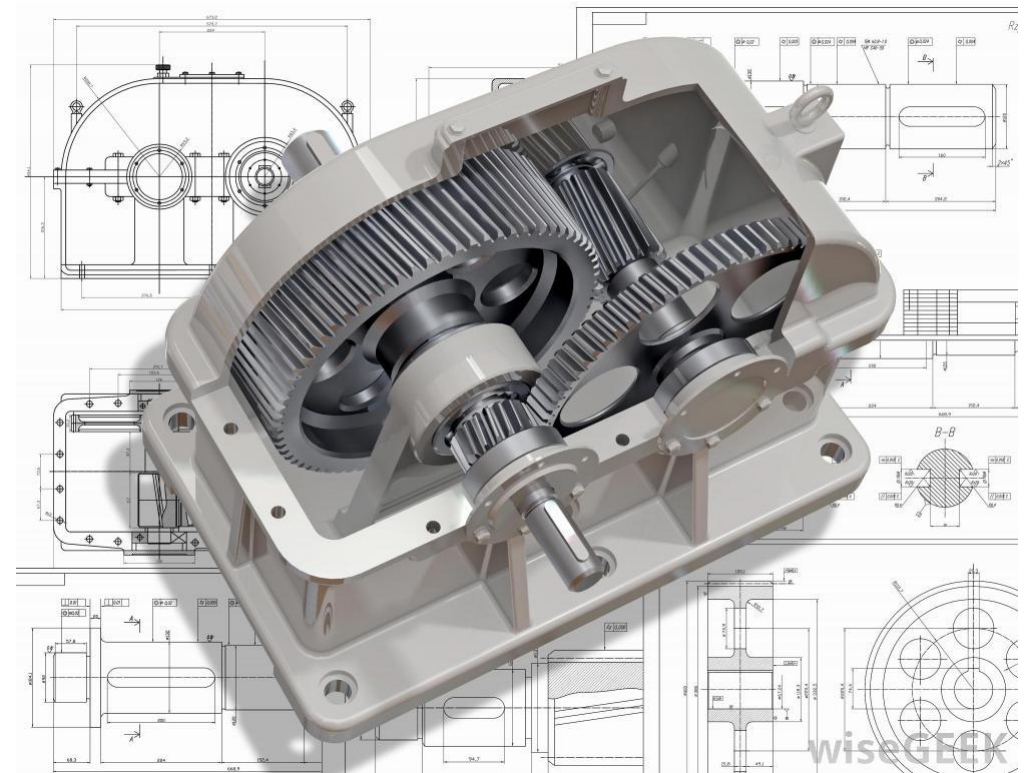




Processo de desenvolvimento de produto



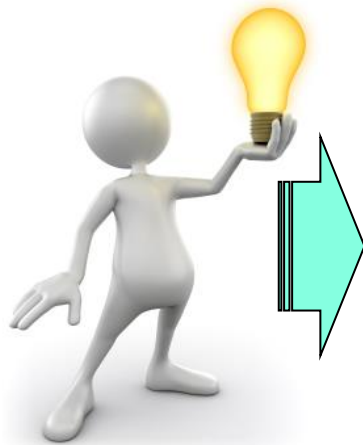
ideia



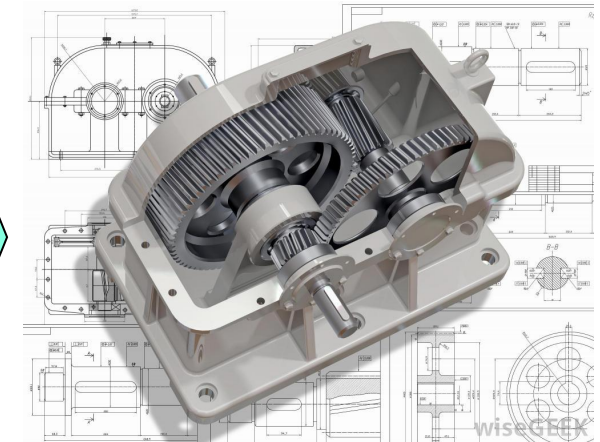
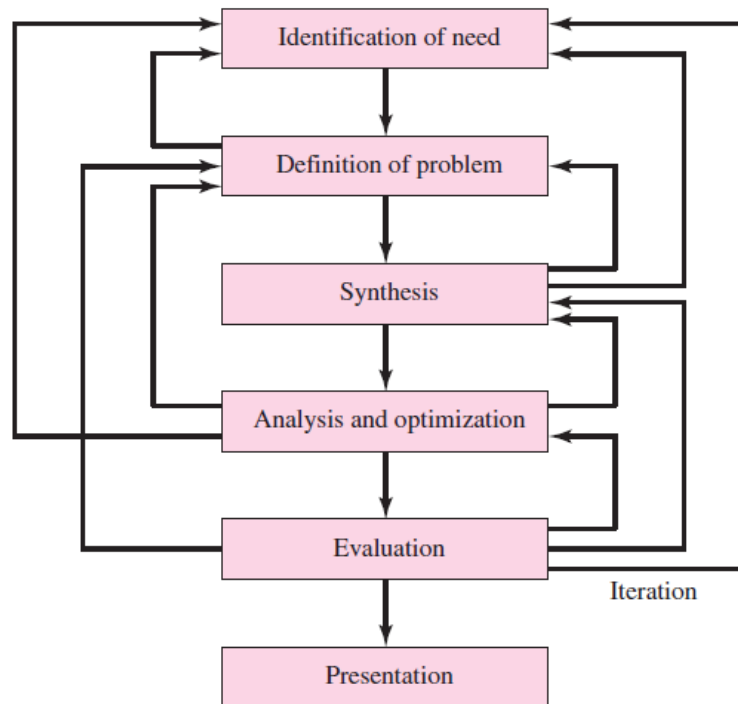
produto



Processo de desenvolvimento de produto



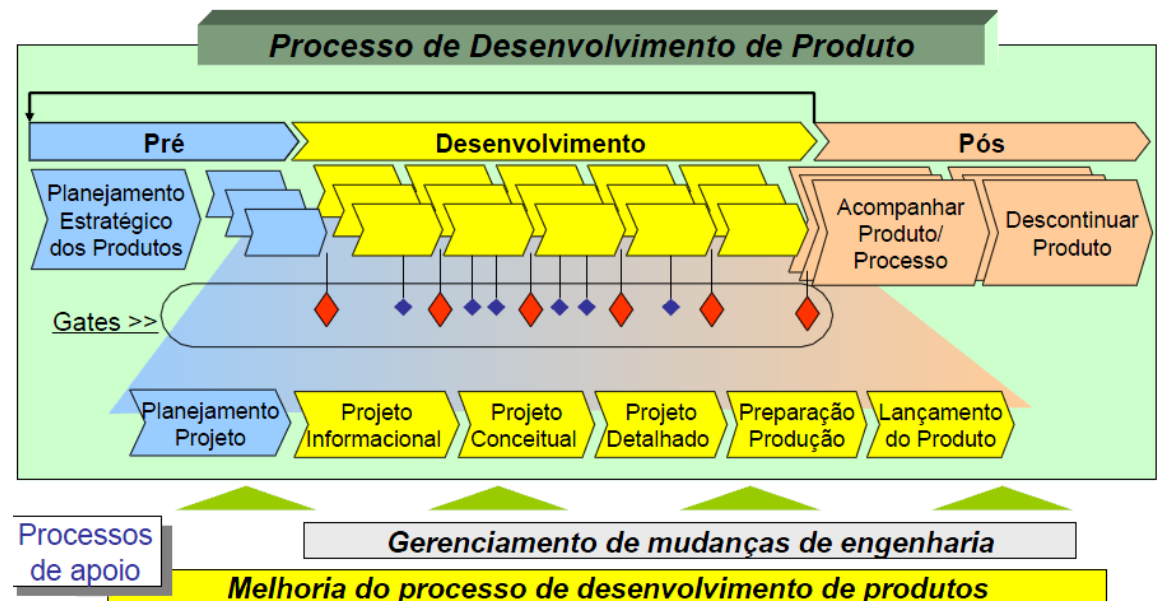
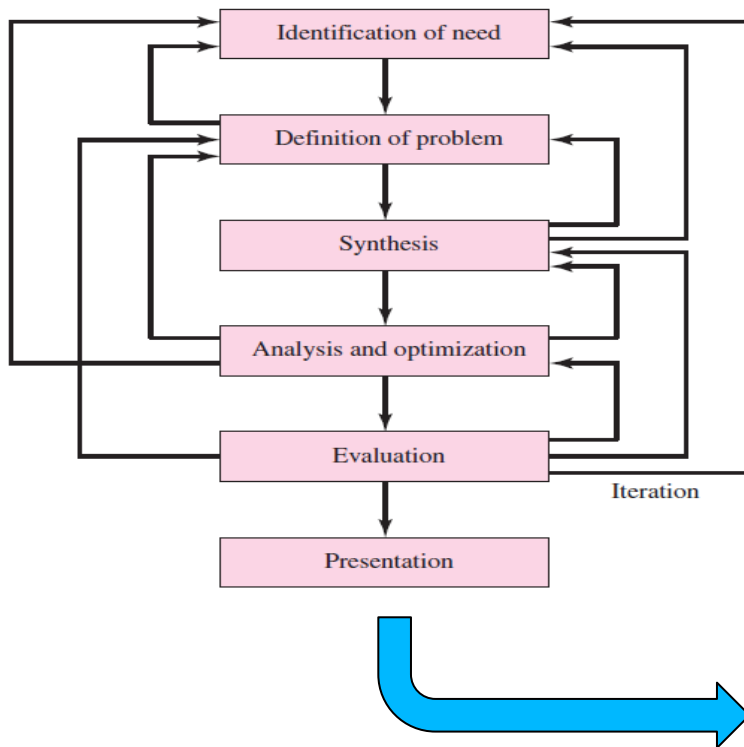
ideia



produto

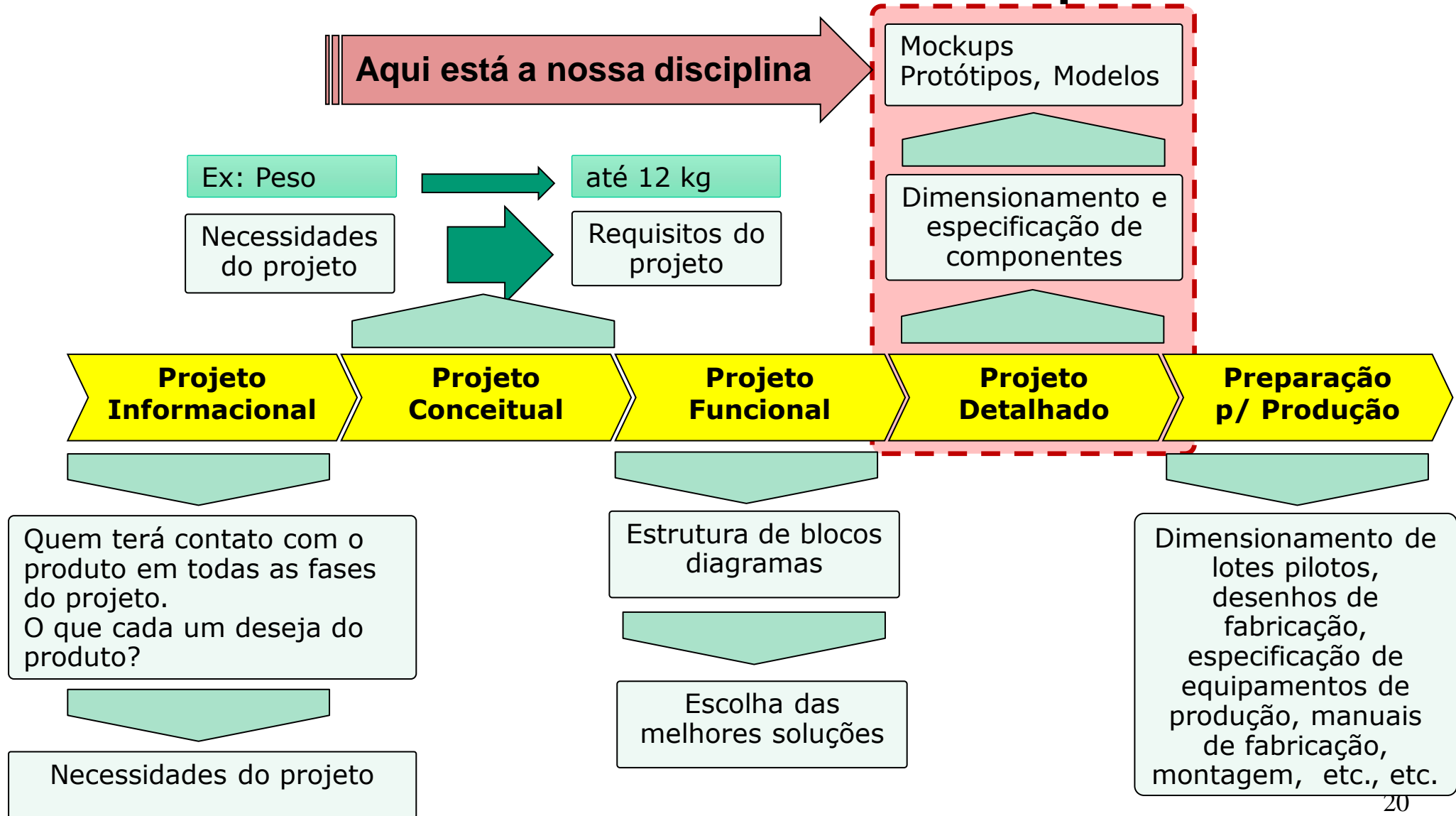


Processo de desenvolvimento de produto



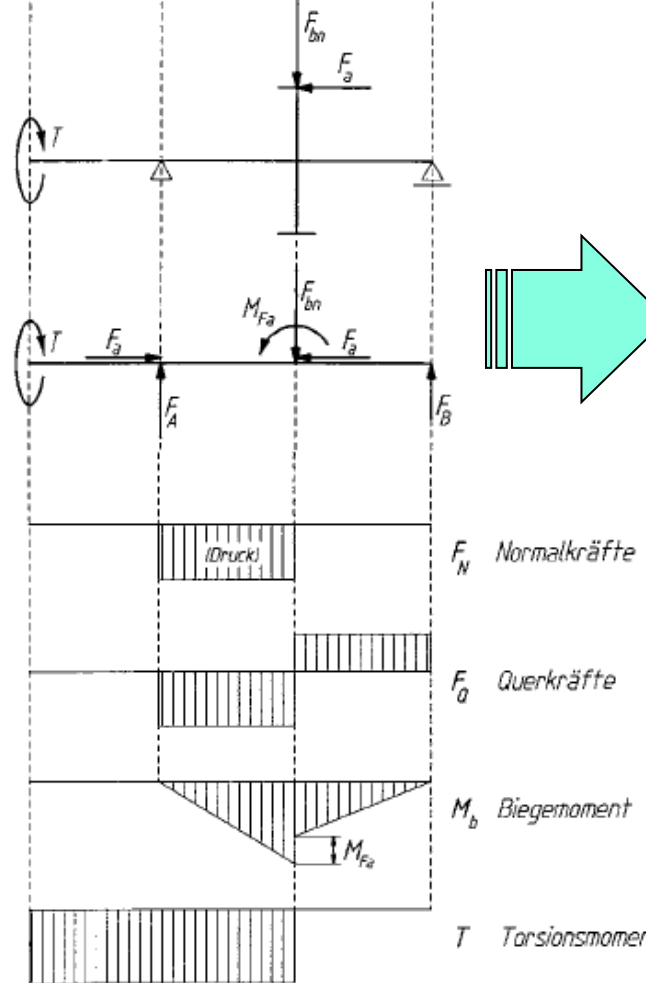
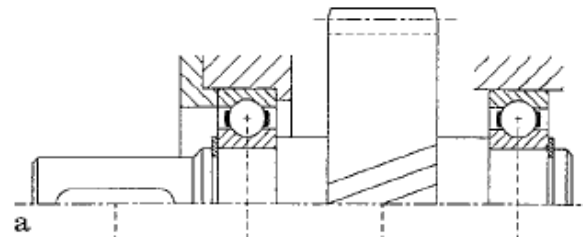
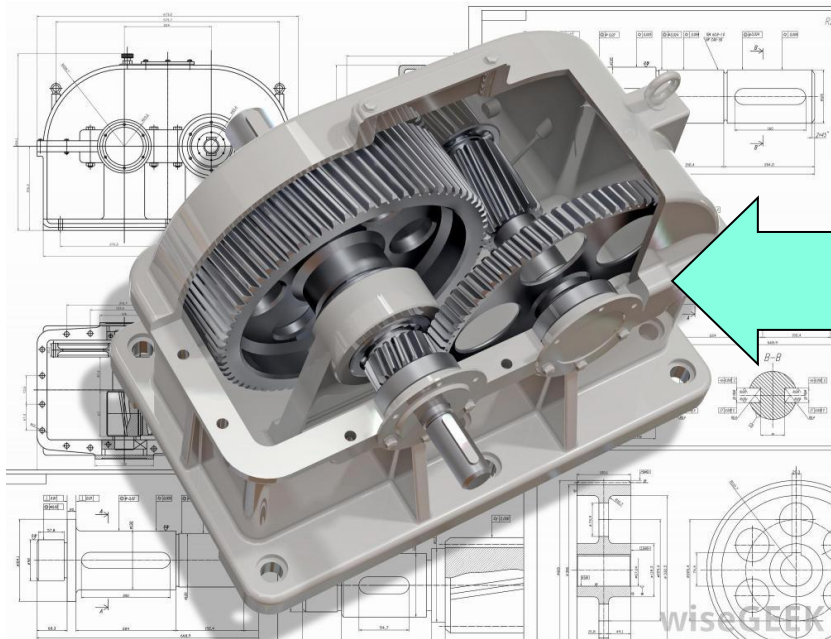


Processo de desenvolvimento de produto





Detalhamento



- Qual material?
- Qual geometria?
- Quais dimensões?
- Qual critério de falha?
- Quais normas?
- Qual processo de fabricação?
- Quais tolerâncias?
- Qual acabamento?
- Quais mancais?
- Qual custo?
- Etc.



Recomendações de como resolver um problema

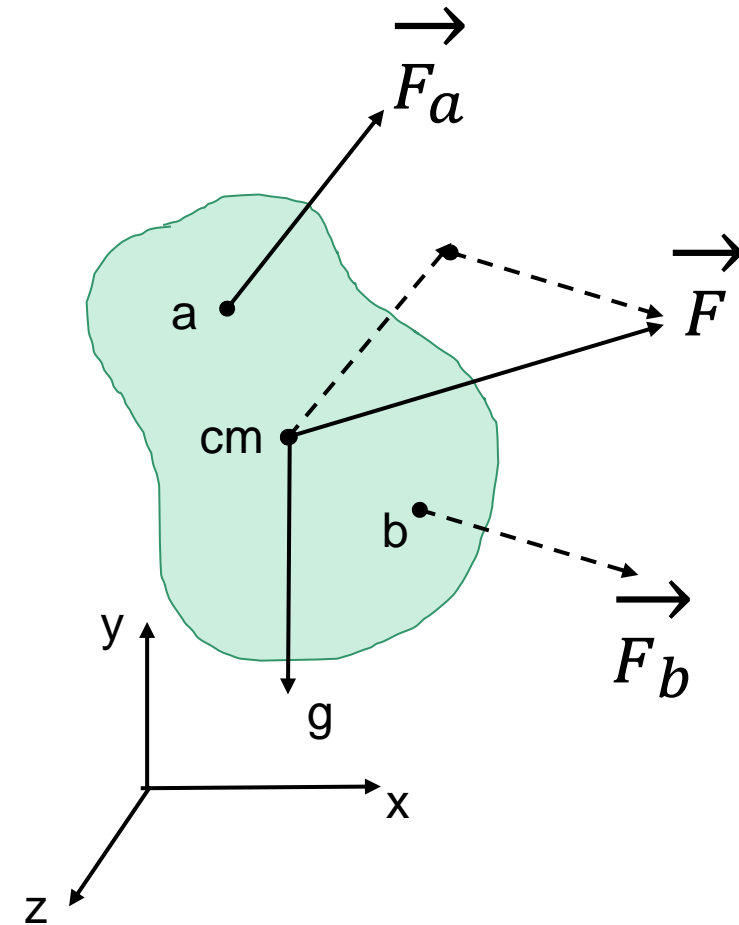
- Somente unidades no SI
- Faça bons desenhos de rascunhos
 - Identifique o sistema de coordenadas
 - Nomeie dimensões e forças
 - Bons diagramas de corpo livre são bons auxiliares na solução
- Mostre de forma organizada seu raciocínio
- Siga as convenções
- Desenvolva o raciocínio simbolicamente. Deixem os números para o final
- Verifique as respostas. Sempre pergunte: ***Faz sentido?***



Forças, momentos e vetores

➤ Forças

- Quais suas origens?
 - Contato?
 - Gravitacionais?
 - Campos?
- Identifique a força (nomeie)
- Identifique o ponto de aplicação
- Identifique a intensidade
- Identifique a direção



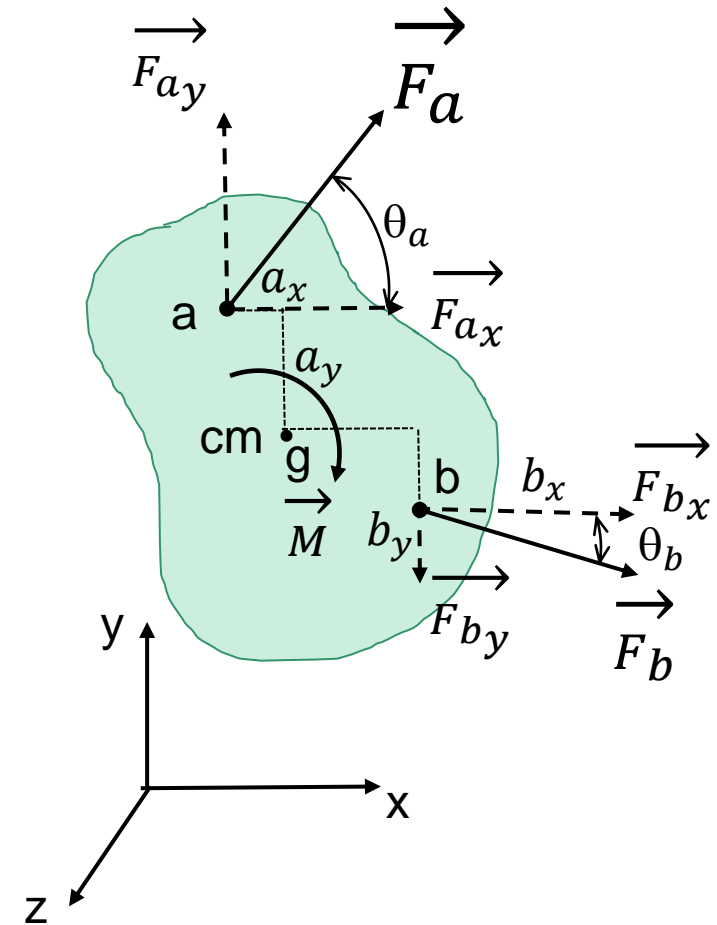
$$\vec{F}_a = F_{a_x} \hat{i} + F_{a_y} \hat{j} + F_{a_z} \hat{k}$$
$$\vec{F} = \vec{F}_a + \vec{F}_b$$



Forças, momentos e vetores

➤ Momentos = Torque

- Momento = força * distância
- Identifique o momento (nomeie)
- Identifique o ponto de aplicação
- Identifique a intensidade
- Identifique as distâncias até o ponto de aplicação
- Identifique a direção
- Use a regra da mão direita

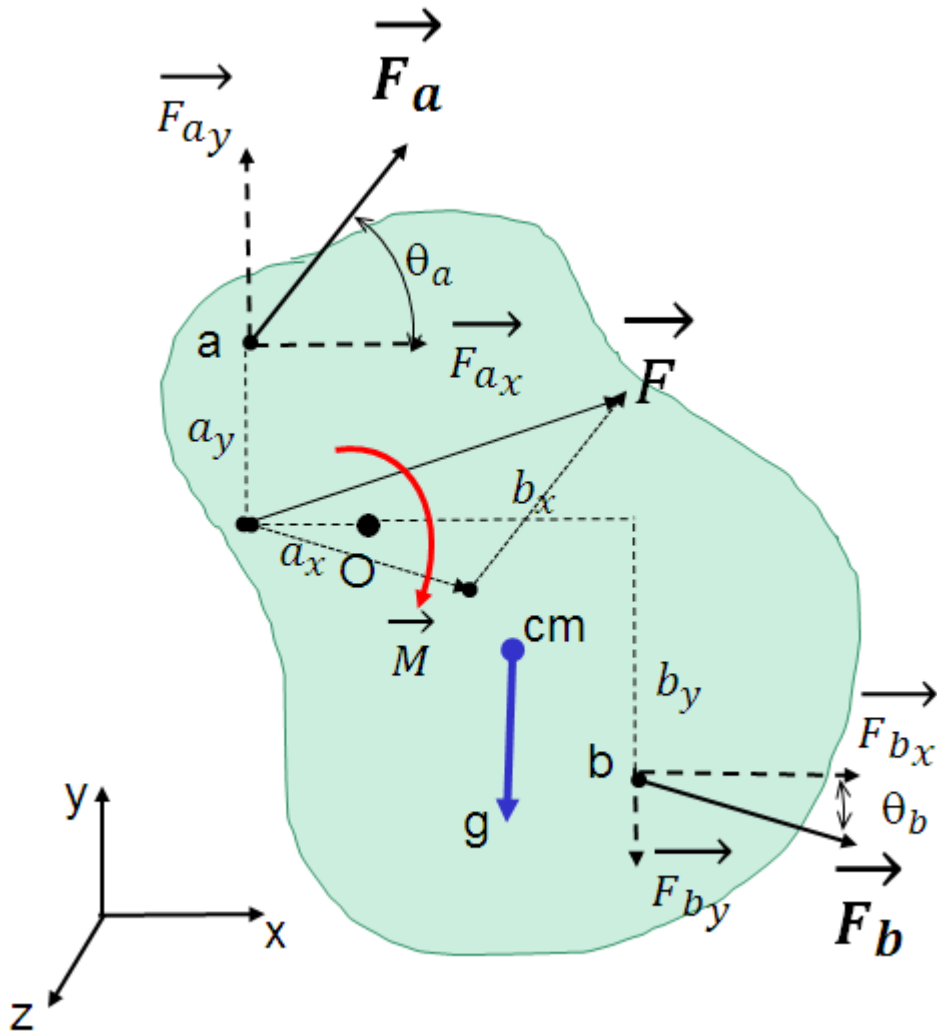


$$\vec{M}_{a_x} = a_y \vec{F}_{a_x}$$

$$\vec{M} = \vec{M}_{a_x} + \vec{M}_{a_y} - \vec{M}_{b_x} + \vec{M}_{b_y}$$



Revisando



$$\sum_{Ref} \vec{F}_n = \vec{F}$$

$$\sum_{Ref} \vec{M}_n = \vec{M}$$

$$\vec{F} = \vec{F}_a + \vec{F}_b$$

$$\vec{F}_a = F_{a_x} \hat{i} + F_{a_y} \hat{j} + F_{a_z} \hat{k}$$

$$\vec{M}_{a_x} = a_y \vec{F}_{a_x}$$

$$\vec{M} = \vec{M}_{a_x} + \vec{M}_{a_y} - \vec{M}_{b_x} + \vec{M}_{b_y} + \vec{M}_g$$



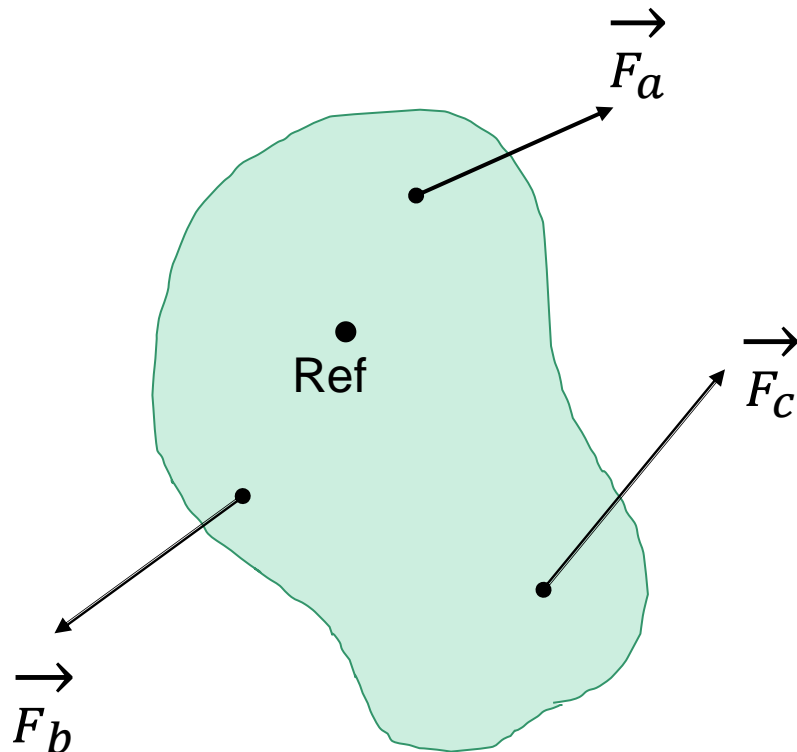
Exemplo

- Determinar os esforços resultantes no ponto Referencia

➤ Considerando

$$\vec{F}_b = 2 \cdot \vec{F}_a$$

$$\vec{F}_c = 3/2 \cdot \vec{F}_a$$



$$\sum_{Ref} \vec{F}_n = 0 \quad \sum_{Ref} \vec{M}_n = 0$$

Condições de equilíbrio

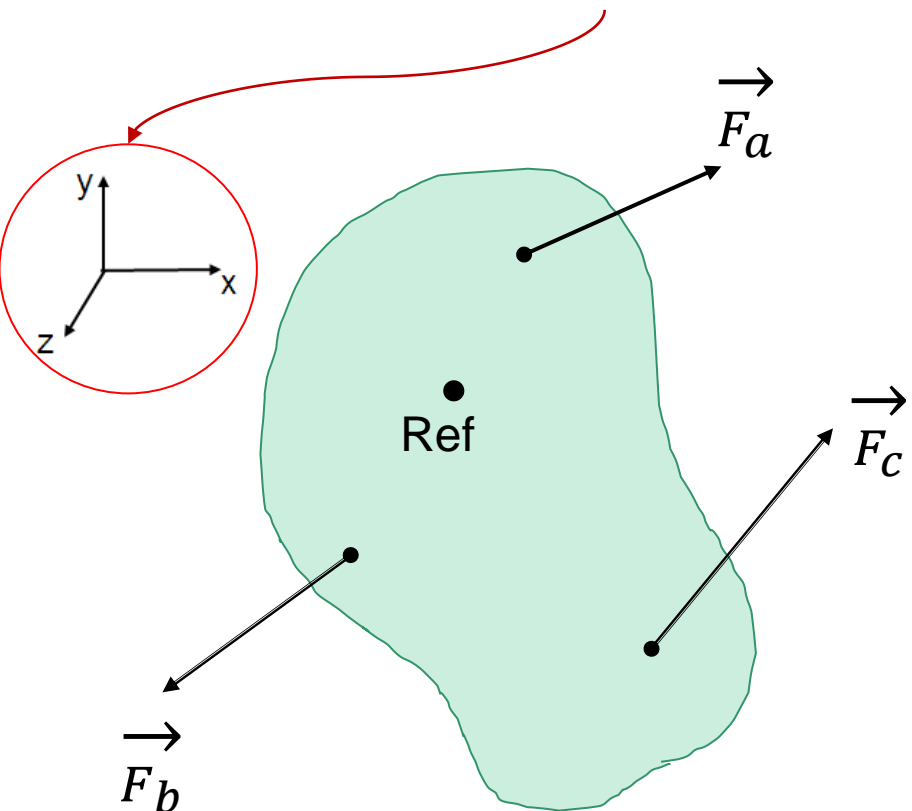


Exemplo

➤ Determine os esforços resultantes no ponto Referencia

➤ Identifique o sistema de coordenadas

Condições de equilíbrio



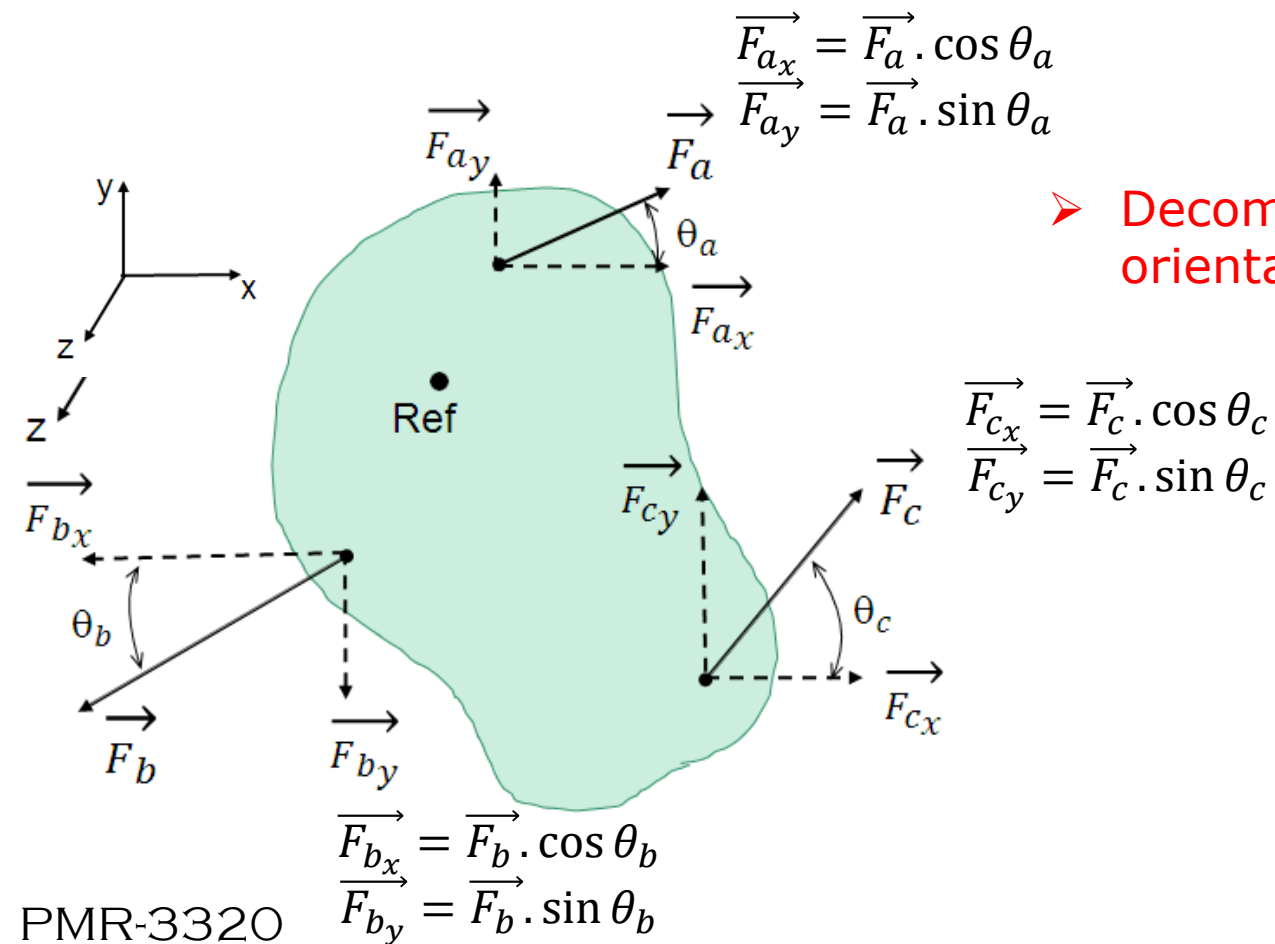
$$\sum_{Ref} \vec{F}_n = 0$$
$$\sum \vec{F}_{ref_x} = 0 \quad \xrightarrow{X(+)}$$
$$\sum \vec{F}_{ref_y} = 0 \quad \uparrow Y(+)$$

$$\sum_{Ref} \vec{M}_n = 0$$



Exemplo

- Determine os esforços resultantes no ponto Referencia



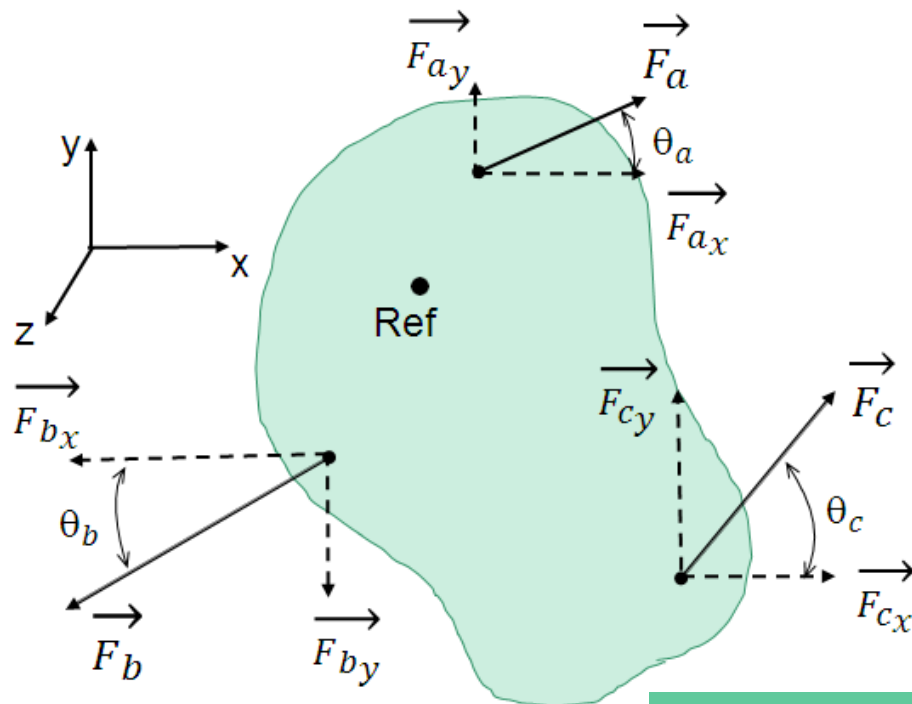
- Decomposição das forças segundo a orientação do sistema de coordenadas



Exemplo

➤ Determine os esforços resultantes no ponto Referencia

➤ Determinar a condição de equilíbrio $\sum \vec{F}_{ref} = \mathbf{0}$



$$\sum \vec{F}_{ref\ x} = \mathbf{0} \quad \vec{F}_{ax} = \vec{F}_a \cdot \cos \theta_a$$

$$\vec{F}_{cx} = \vec{F}_c \cdot \cos \theta_c$$

$$-\vec{F}_{bx} = \vec{F}_b \cdot \cos \theta_b$$

$$\sum \vec{F}_{ref\ y} = \mathbf{0} \quad \vec{F}_{ay} = \vec{F}_a \cdot \sin \theta_a$$

$$-\vec{F}_{by} = \vec{F}_b \cdot \sin \theta_b$$

$$\vec{F}_{cy} = \vec{F}_c \cdot \sin \theta_c$$

$$\vec{F}_{ref} = \sqrt{\left(F_{ref\ x}\right)^2 + \left(F_{ref\ y}\right)^2}$$



Exemplo

- Determine os esforços resultantes no ponto Referencia

$$\sum \vec{F}_{ref} = \mathbf{0}$$

- Considerando

$$\vec{F}_b = 2 \cdot \vec{F}_a$$

$$\vec{F}_c = 3/2 \cdot \vec{F}_a$$

$$\sum \vec{F}_{ref_y} = \mathbf{0} \uparrow Y(+)$$

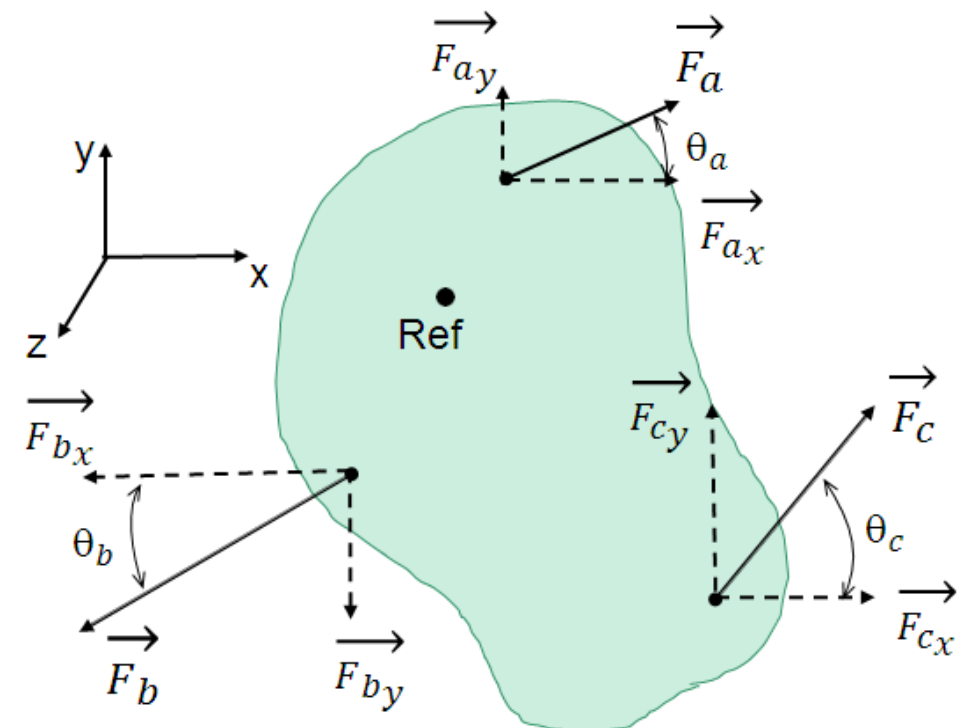
$$\sum \vec{F}_{ref_y} = \vec{F}_a \cdot \sin \theta_a - \vec{F}_b \cdot \sin \theta_b + \vec{F}_c \cdot \sin \theta_c = \mathbf{0}$$

$$\sum \vec{F}_{ref_y} = \vec{F}_a \cdot \sin \theta_a - 2 \vec{F}_a \cdot \sin \theta_b + (3/2) \vec{F}_a \cdot \sin \theta_c = \mathbf{0}$$

$$\sum \vec{F}_{ref_x} = \mathbf{0} \xrightarrow{X(+)}$$

$$\sum \vec{F}_{ref_x} = \vec{F}_a \cdot \cos \theta_a + \vec{F}_c \cdot \cos \theta_c - \vec{F}_b \cdot \cos \theta_b = \mathbf{0}$$

$$\sum \vec{F}_{ref_x} = \vec{F}_a \cdot \cos \theta_a - 2 \vec{F}_a \cdot \cos \theta_b + (3/2) \vec{F}_a \cdot \cos \theta_c = \mathbf{0}$$





Exemplo

- Determine os esforços resultantes no ponto Referencia

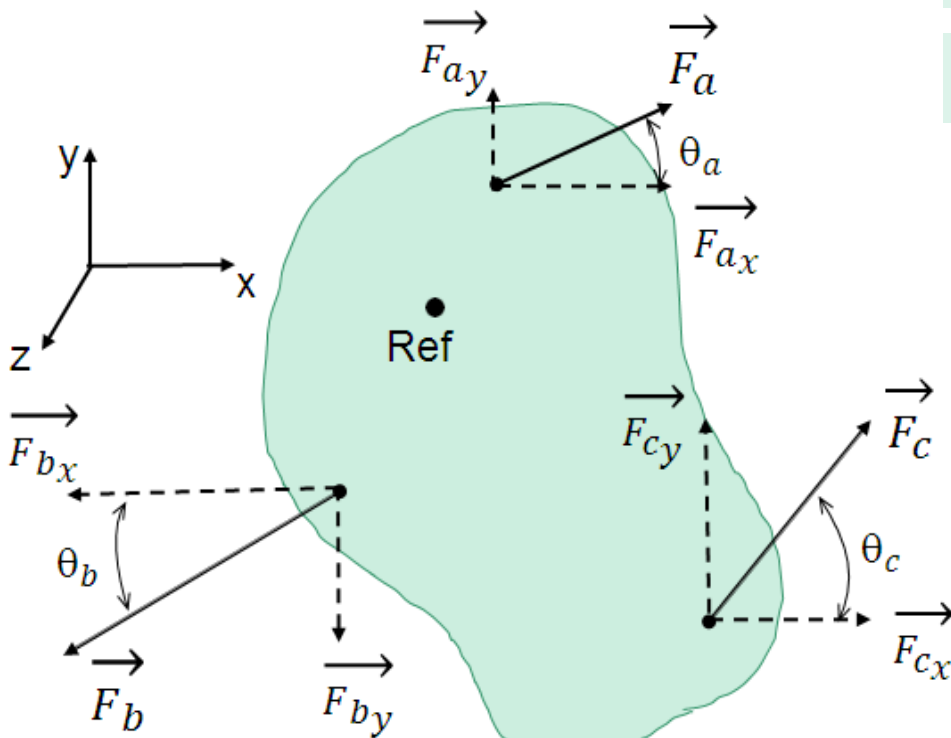
$$\sum_{Ref} \vec{F}_n = \mathbf{0}$$

$$\sum \vec{F}_{ref_x} = \vec{F}_a \cdot \cos \theta_a - 2 \vec{F}_a \cdot \cos \theta_b + (3/2) \vec{F}_a \cdot \cos \theta_c = \mathbf{0}$$

$$\sum \vec{F}_{ref_y} = \vec{F}_a \cdot \sin \theta_a - 2 \vec{F}_a \cdot \sin \theta_b + (3/2) \vec{F}_a \cdot \sin \theta_c = \mathbf{0}$$

$$\vec{F}_{ref} = \sqrt{\left(F_{ref_x}\right)^2 + \left(F_{ref_y}\right)^2}$$

$$\vec{F}_{ref} = \sqrt{\left(\vec{F}_a \cdot \cos \theta_a - 2 \vec{F}_a \cdot \cos \theta_b + (3/2) \vec{F}_a \cdot \cos \theta_c\right)^2 + \left(\vec{F}_a \cdot \sin \theta_a - 2 \vec{F}_a \cdot \sin \theta_b + (3/2) \vec{F}_a \cdot \sin \theta_c\right)^2}$$





Exemplo

- Determine os esforços resultantes no ponto **Ref**

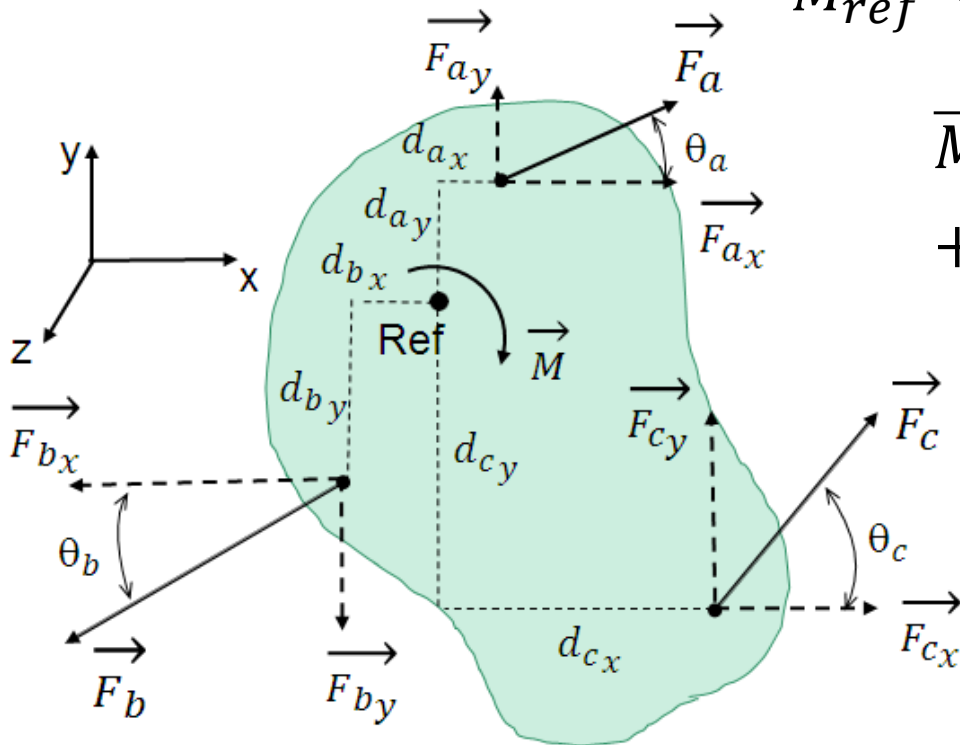
$$\sum_{Ref} \vec{M}_n = 0$$



$$\vec{M}_{ref} = \vec{M}_{a_x} - \vec{M}_{a_y} - \vec{M}_{b_x} + \vec{M}_{b_y} - \vec{M}_{c_x} - \vec{M}_{c_y}$$

$$\vec{M}_{ref} = \vec{F}_{a_x} \cdot d_{a_y} - \vec{F}_{a_y} \cdot d_{a_x} - \vec{F}_{b_x} \cdot d_{b_y} + \vec{F}_{b_y} \cdot d_{b_x} - \vec{F}_{c_x} \cdot d_{c_y} - \vec{F}_{c_y} \cdot d_{c_x}$$

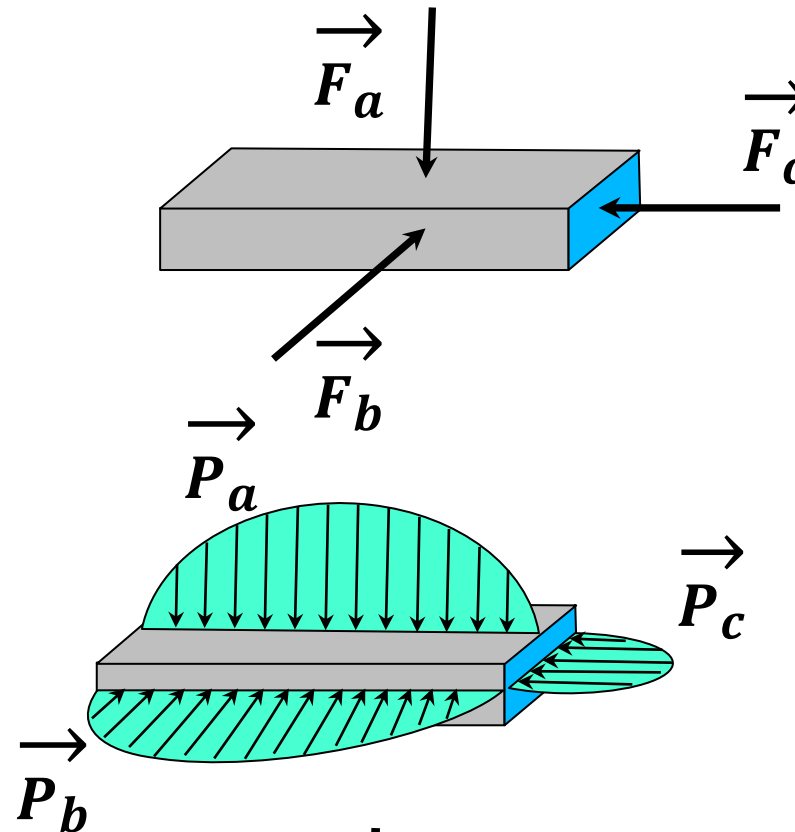
$$\vec{M}_{ref} = \vec{F}_a \cdot \cos \theta_a \cdot d_{a_y} - \dots$$



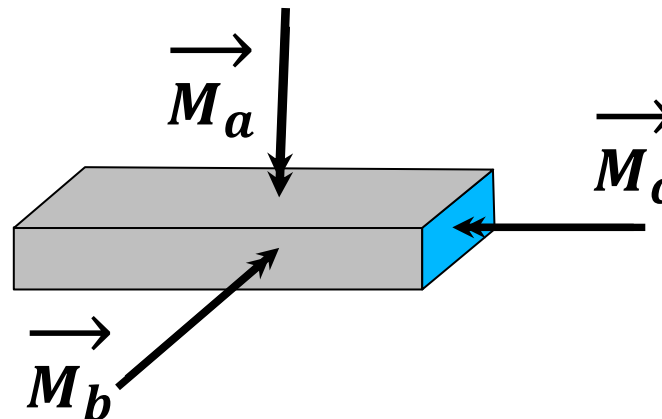


Carregamentos

- Forças
 - Concentrados
 - Distribuídos



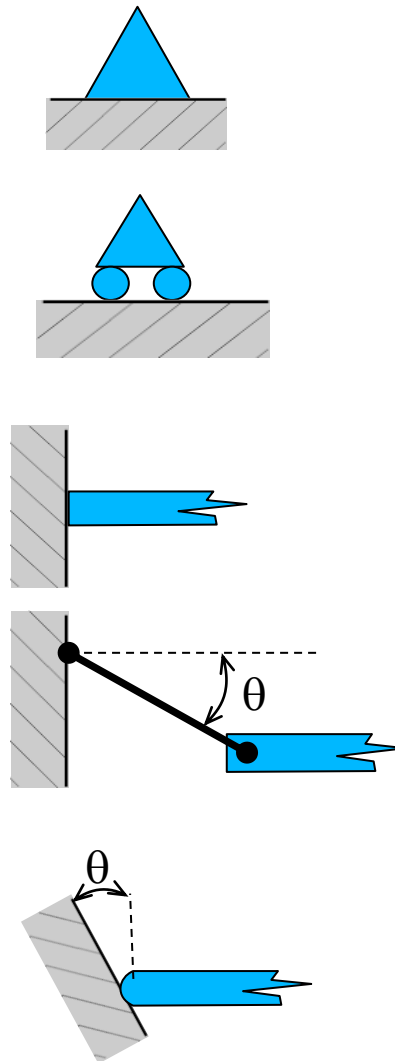
- Momentos



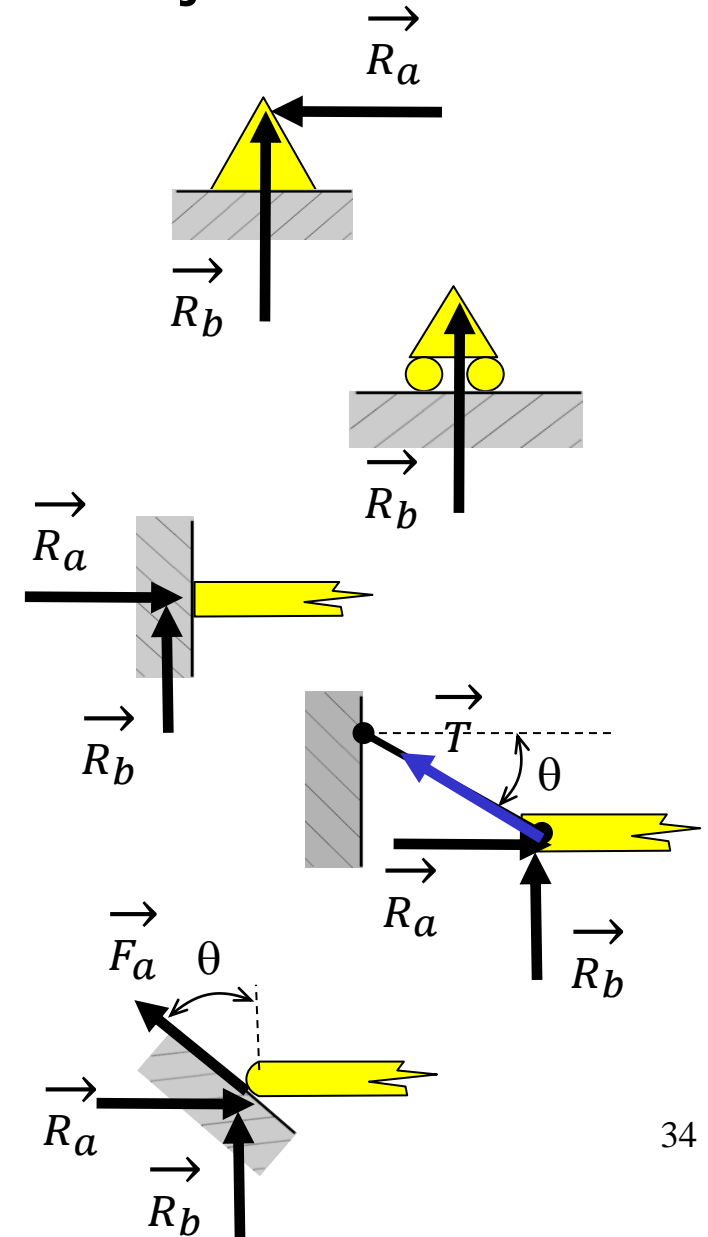


Apoios

- Fixo
- Deslizante
- Engastado
- Com cabo
- Com contato

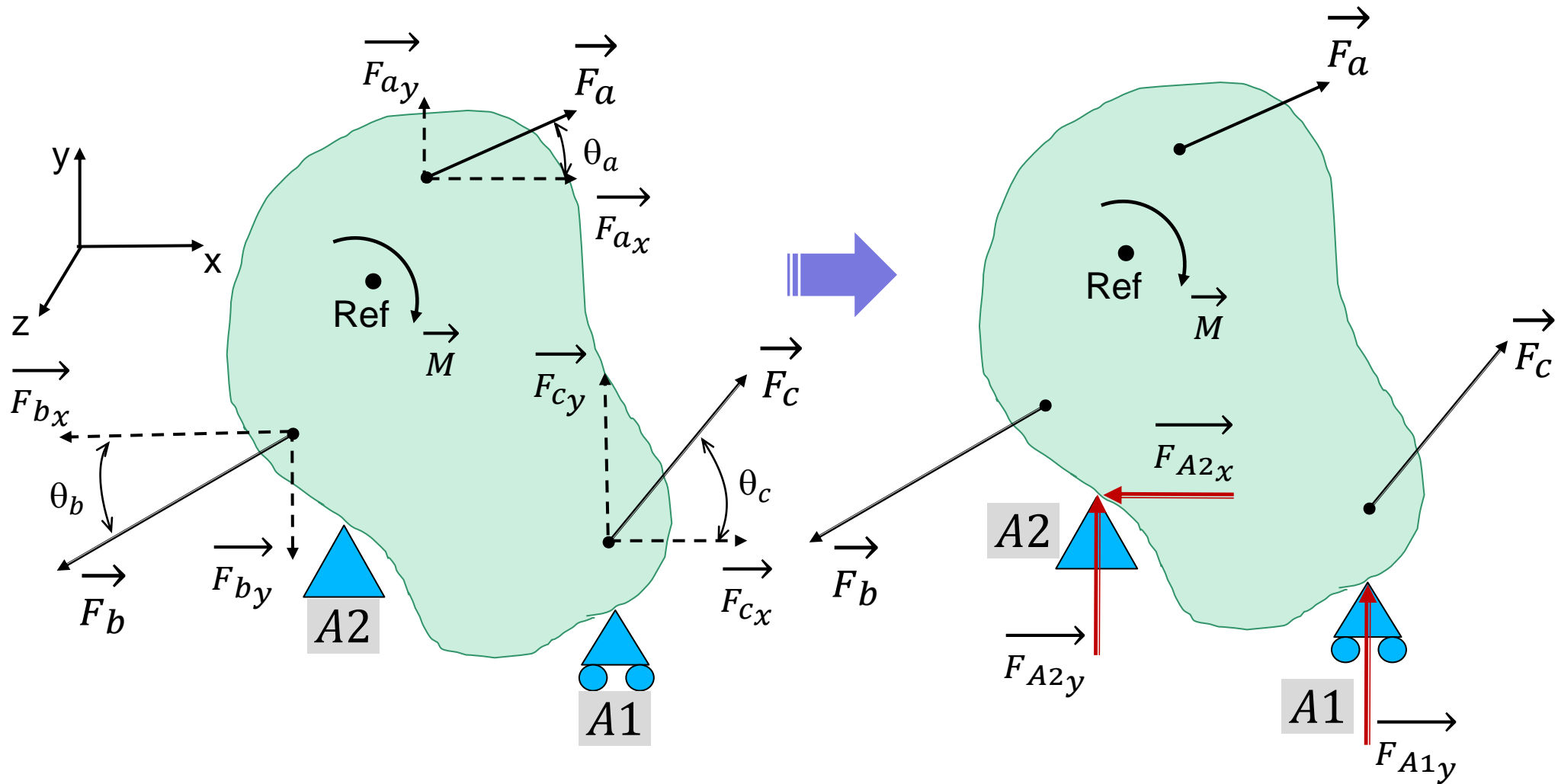


Reações



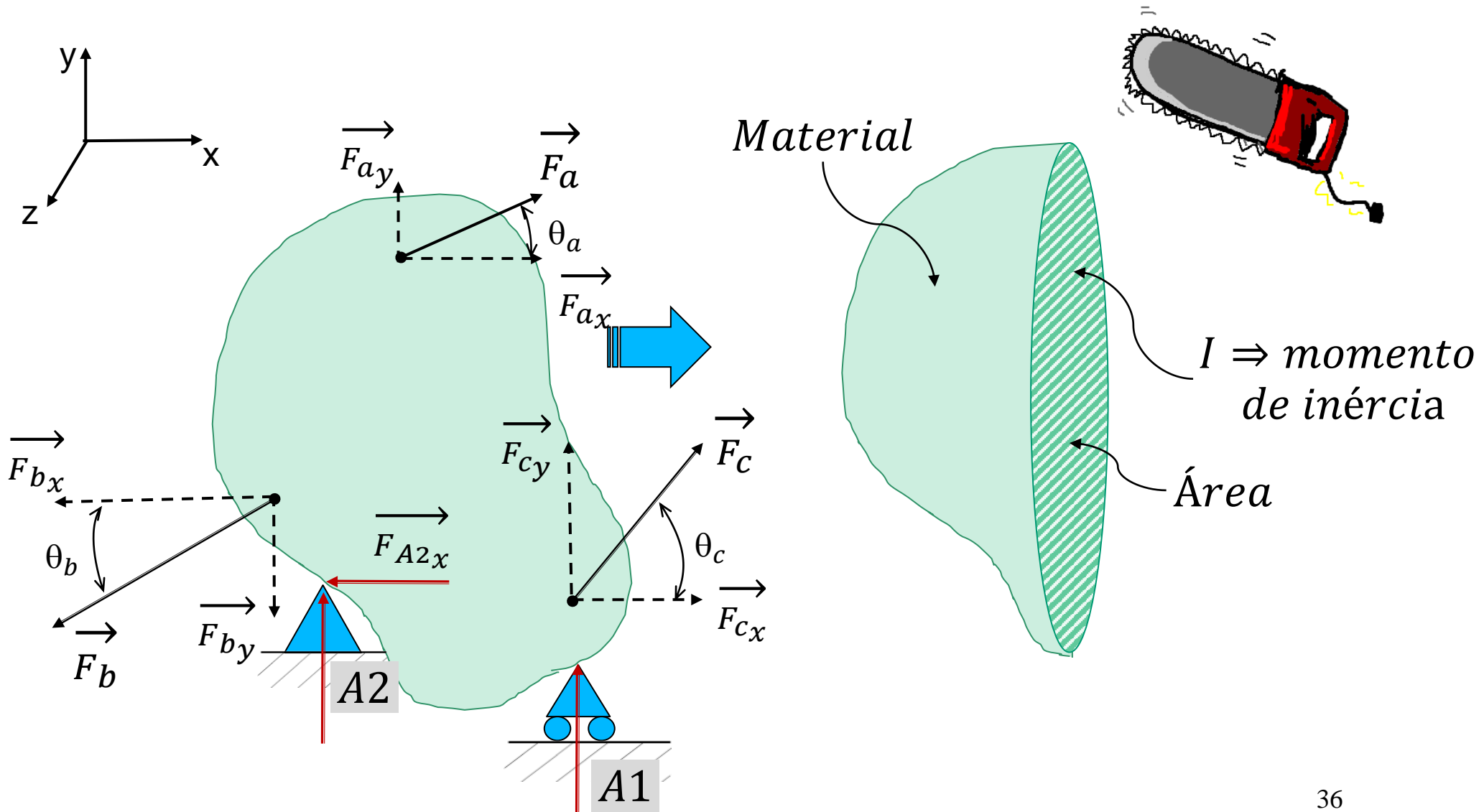


Apoios e reações



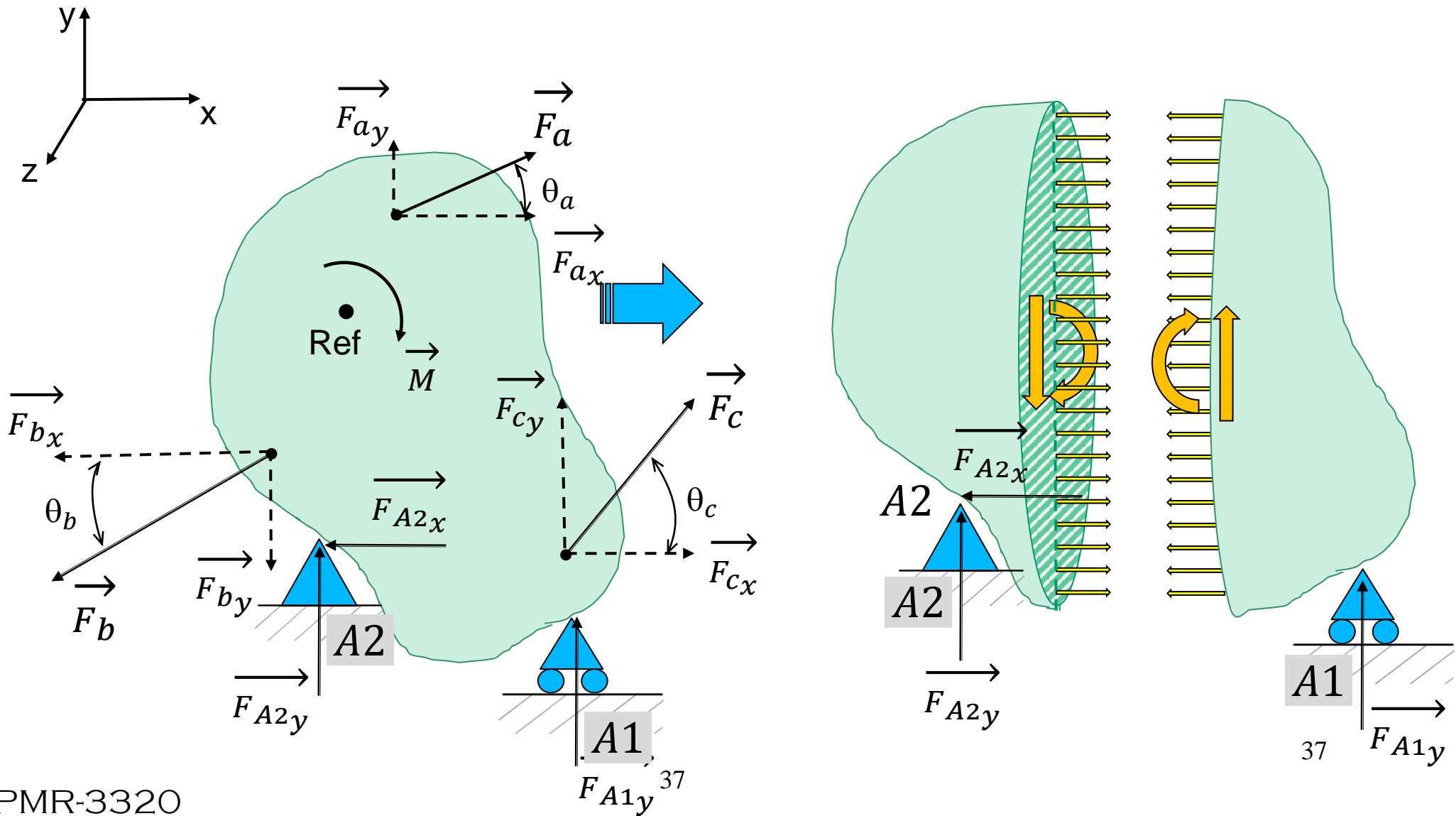


Apoios, reações e modelo de viga



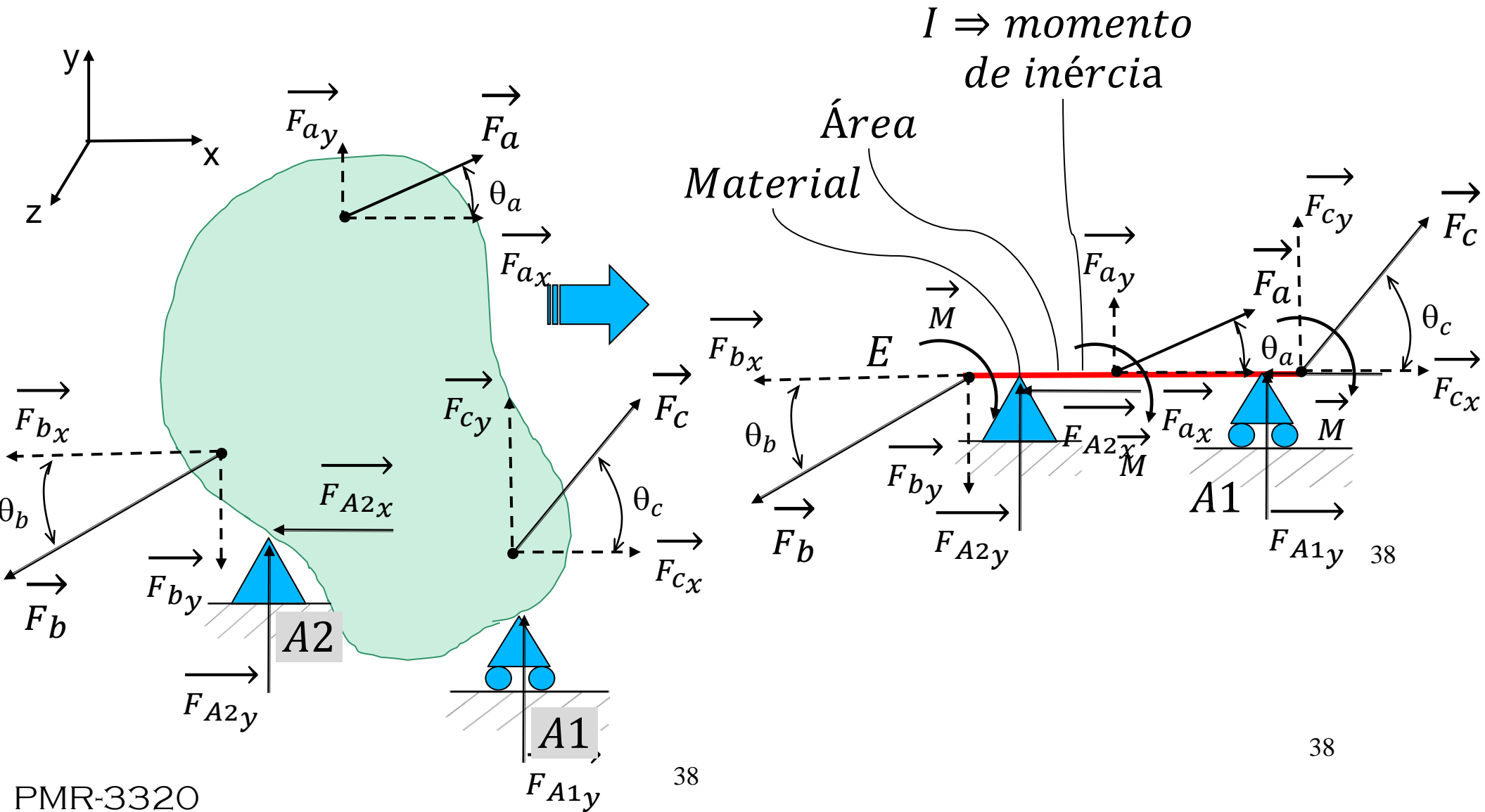


Apoios, reações e esforços internos



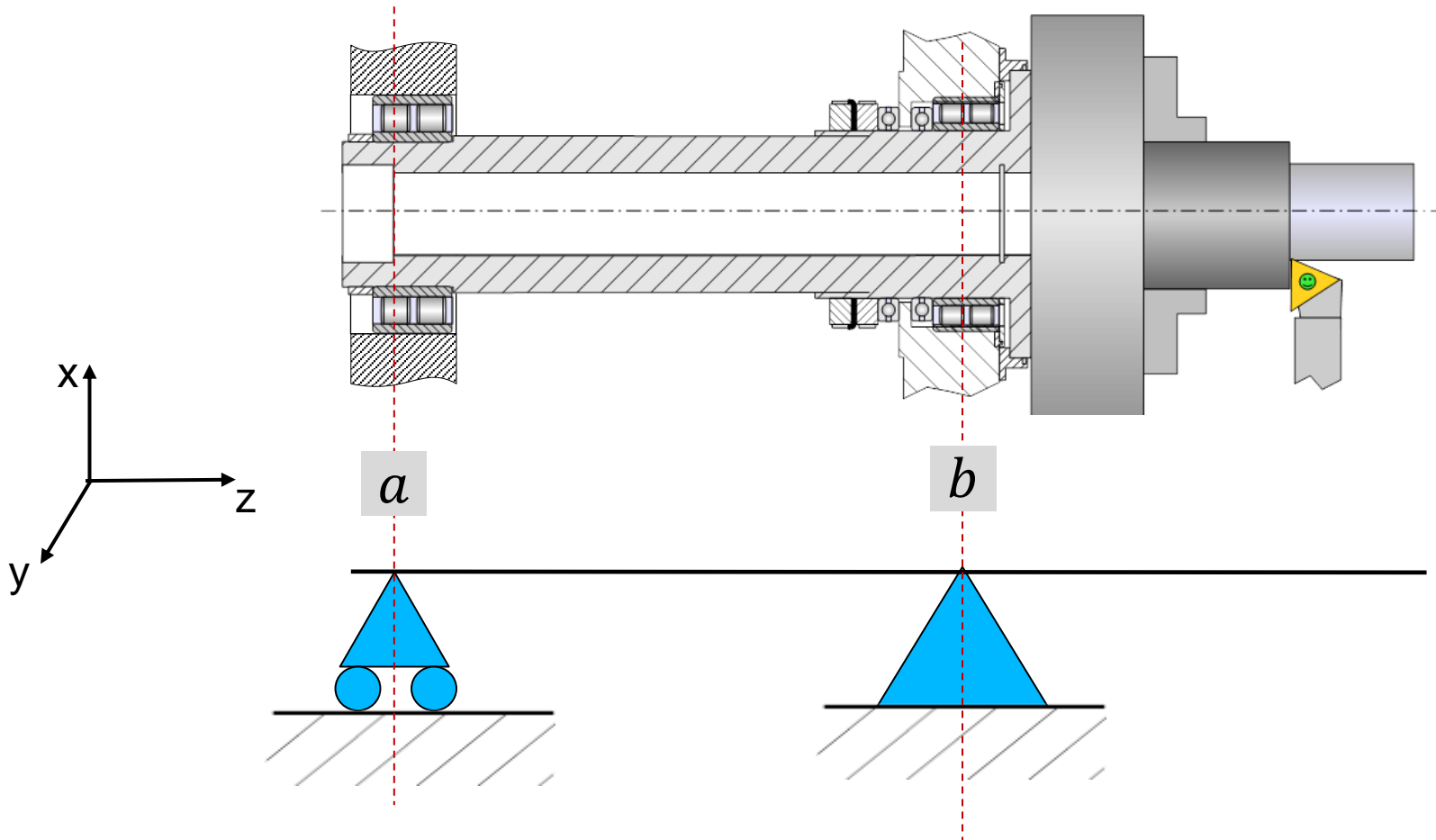


Apoios, reações e modelo de viga





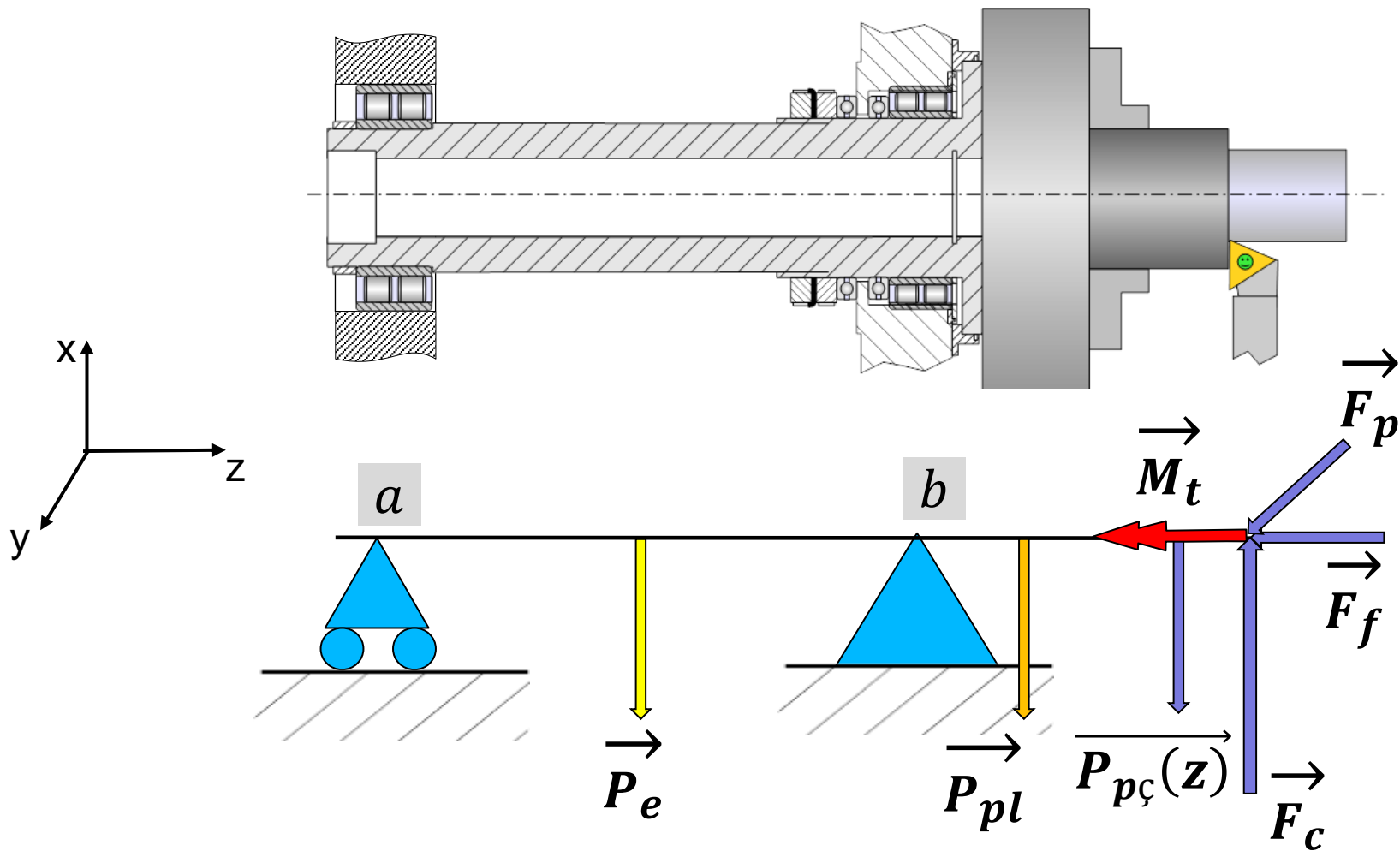
No projeto



$$\vec{F}_{ref} = \sqrt{(F_{ref_x})^2 + (F_{ref_y})^2}$$
$$\vec{F}_{ref} = \sqrt{(\vec{F}_a \cdot \cos \theta_a - 2 \vec{F}_a \cdot \cos \theta_b + (3/2) \vec{F}_a \cdot \cos \theta_c)^2 + (\vec{F}_a \cdot \sin \theta_a - 2 \vec{F}_a \cdot \sin \theta_b + (3/2) \vec{F}_a \cdot \sin \theta_c)^2}$$

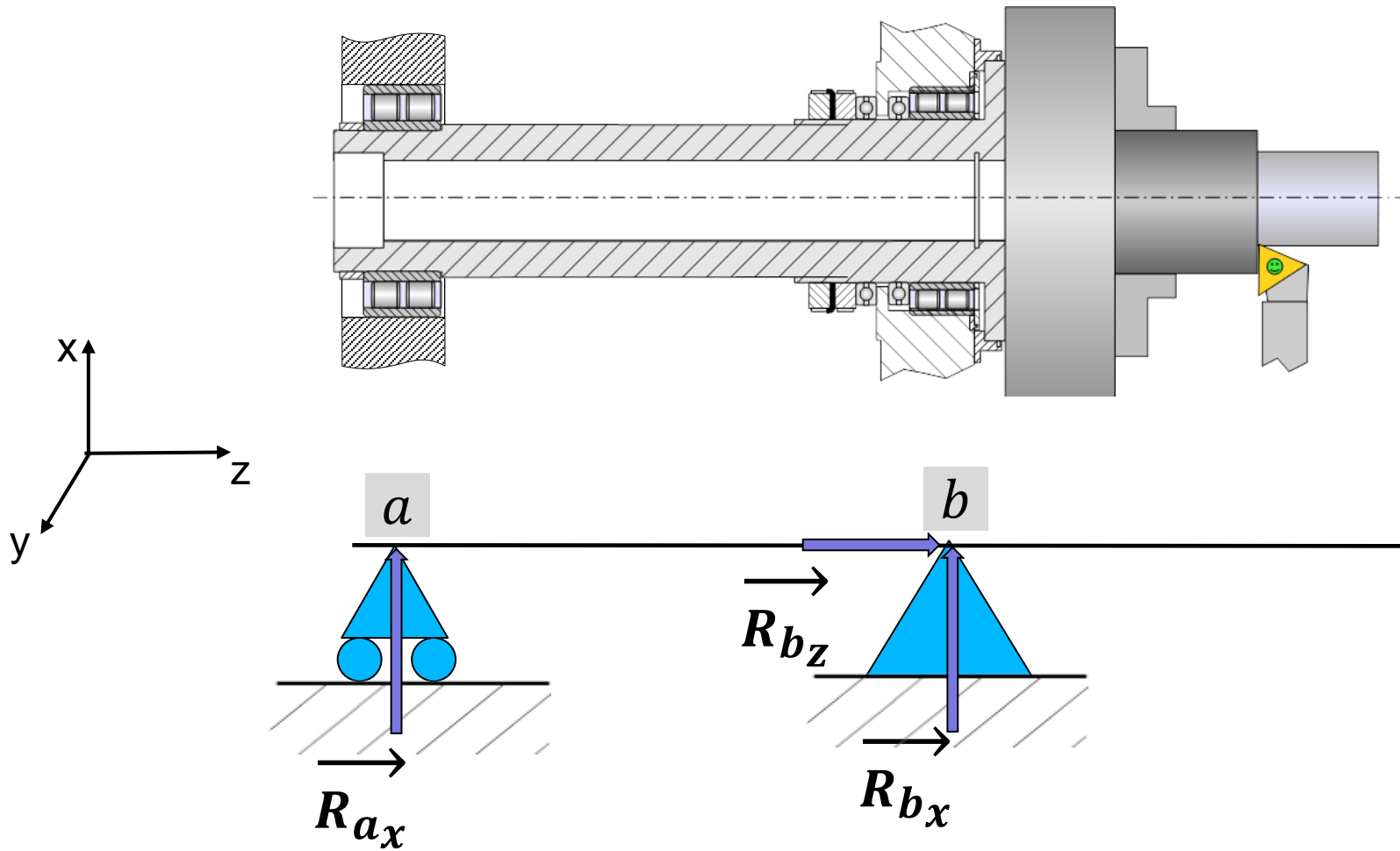


Forças e momentos atuantes





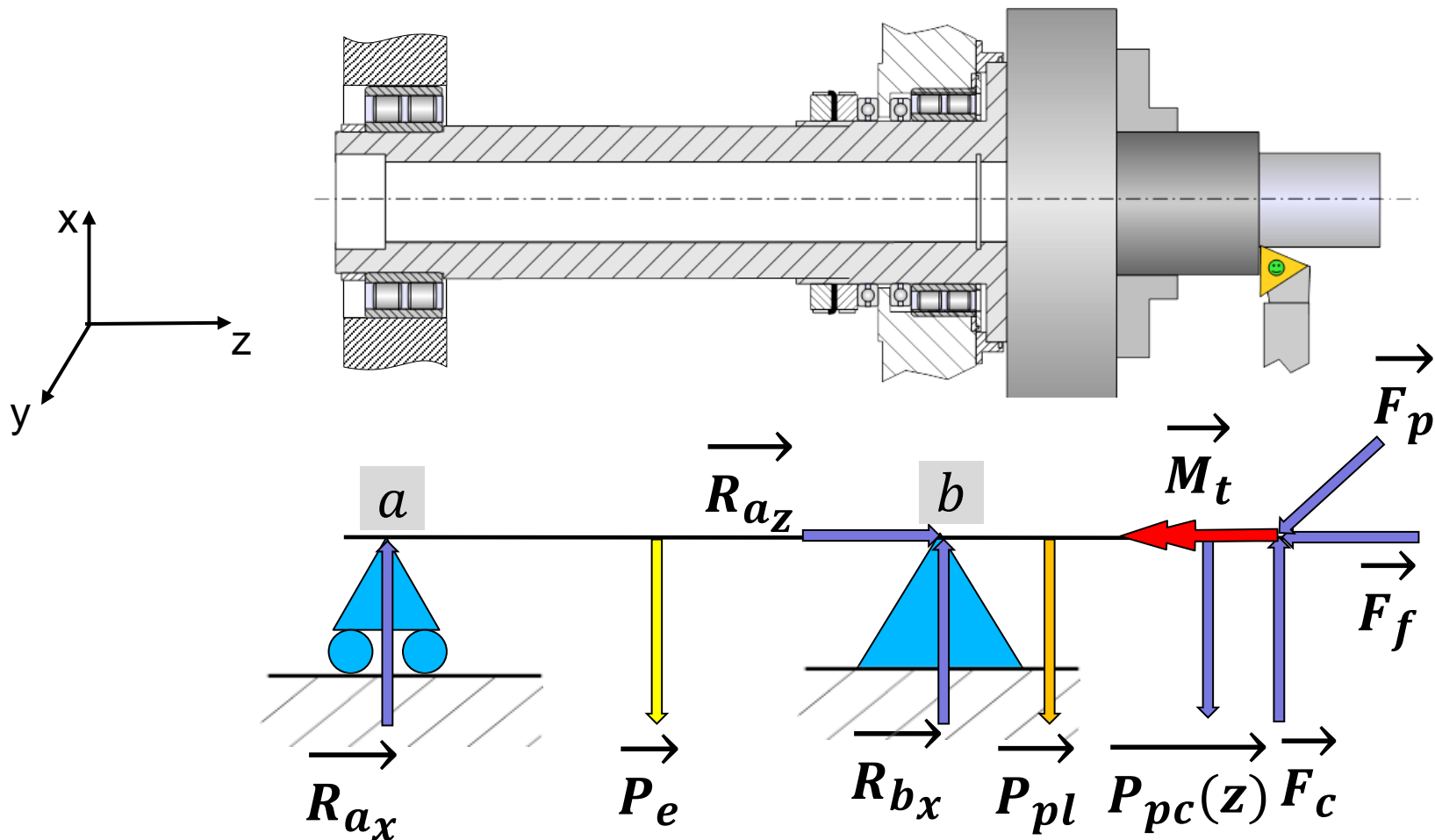
Reações - Bidimensional -





Diagramas de corpo livre

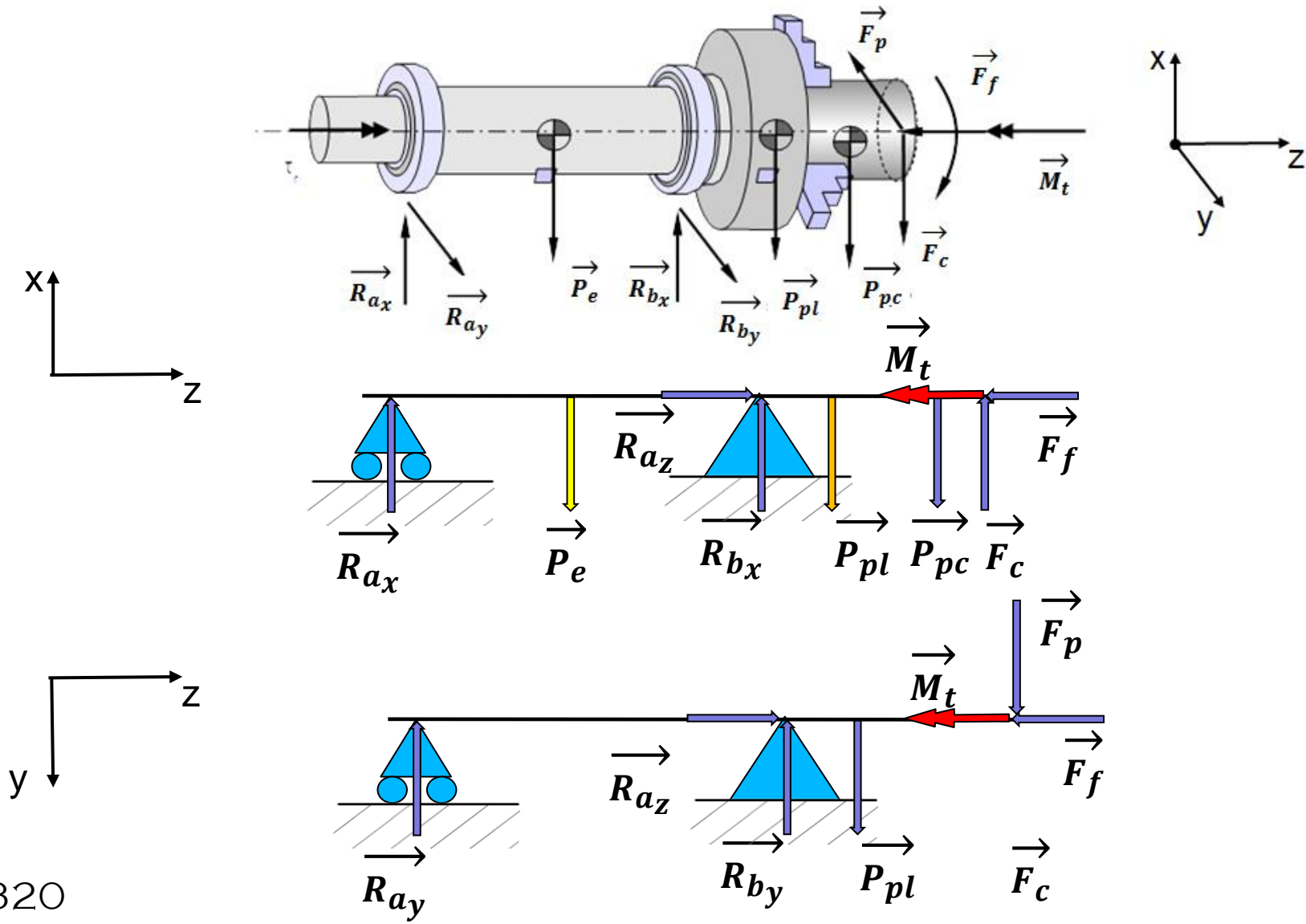
- Bidimensional -





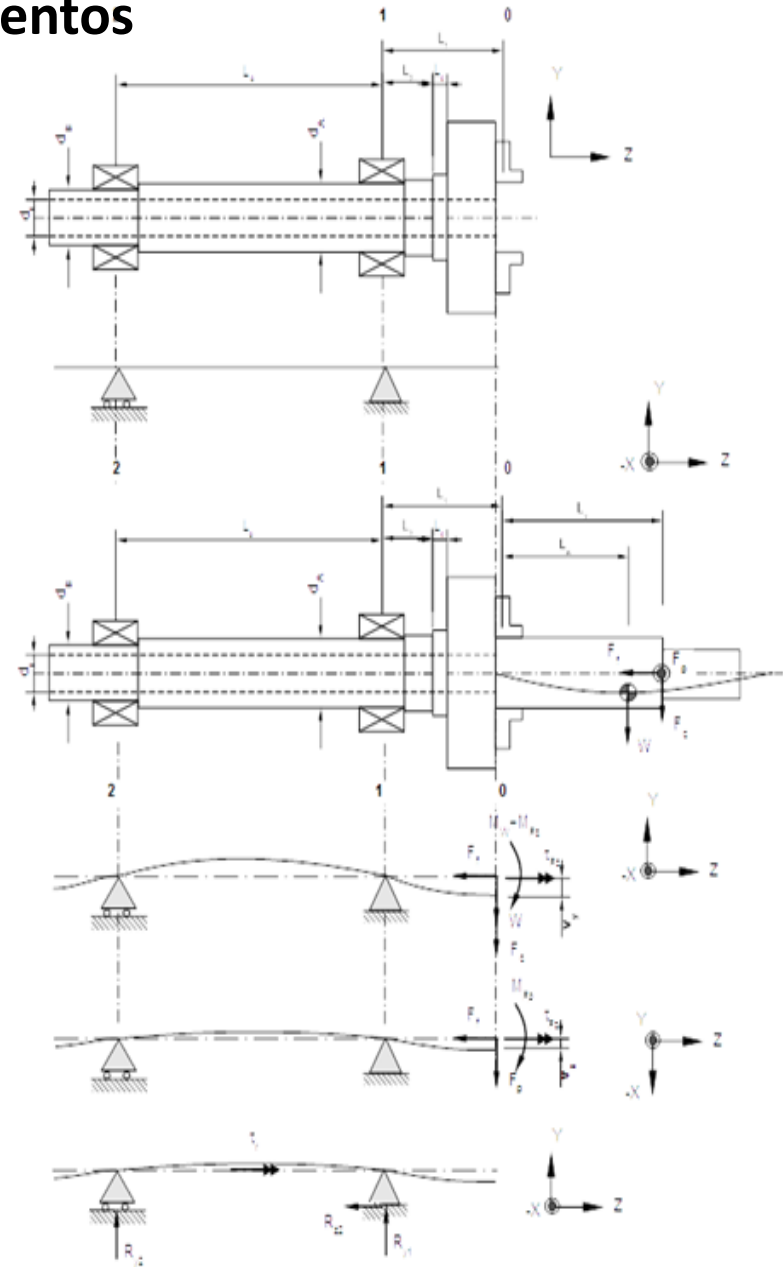
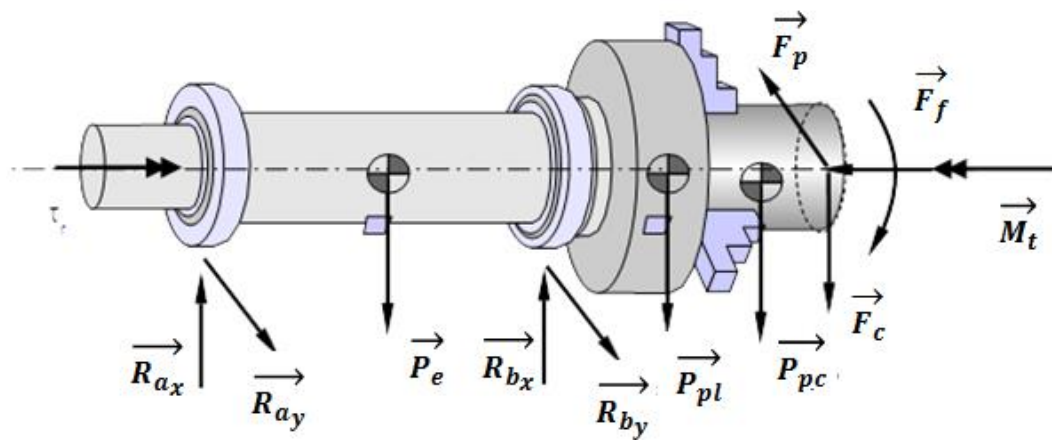
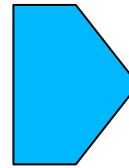
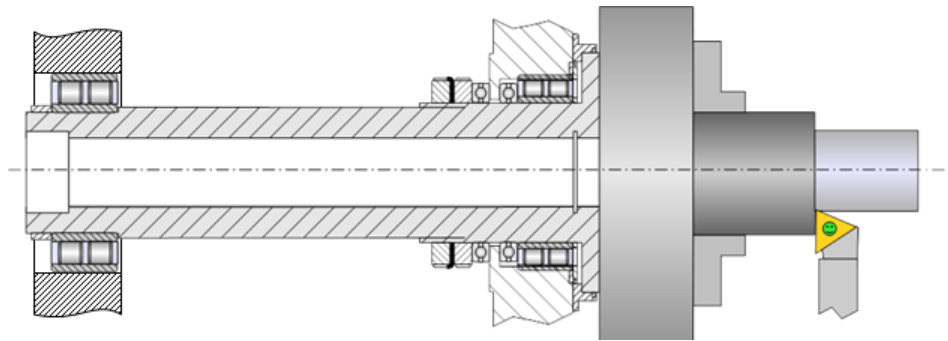
Diagramas de corpo livre

- Tridimensional -





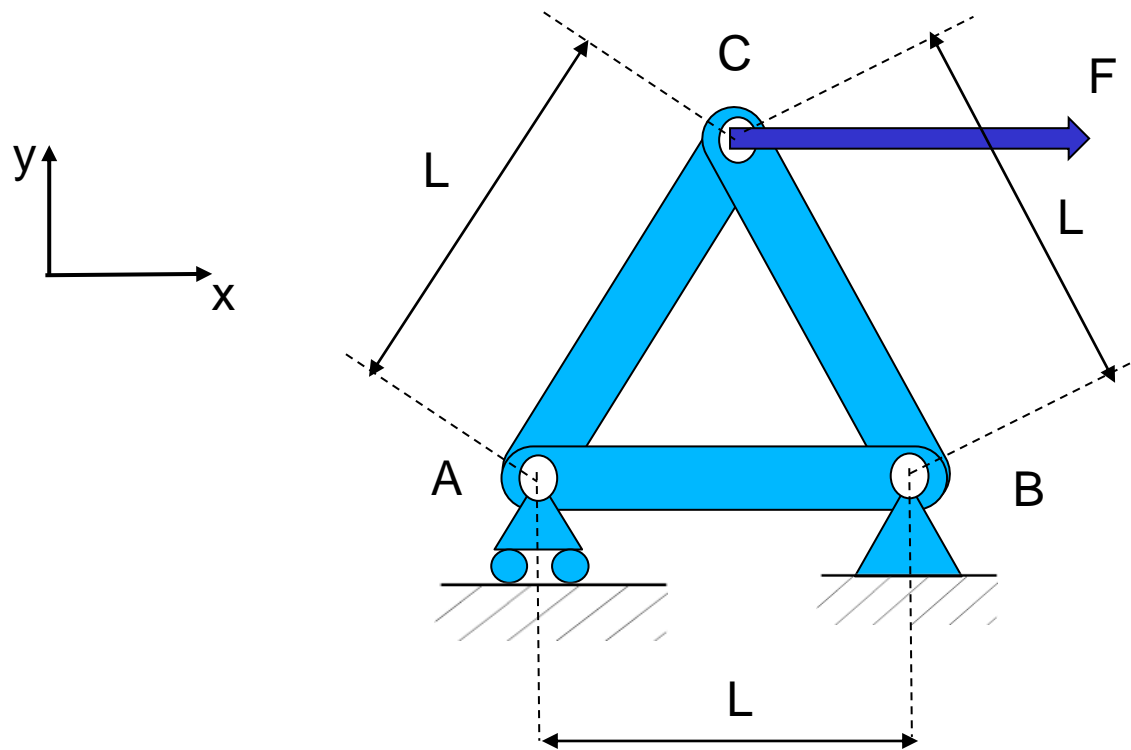
Carregamentos





Estado de tensão geral sobre um elemento

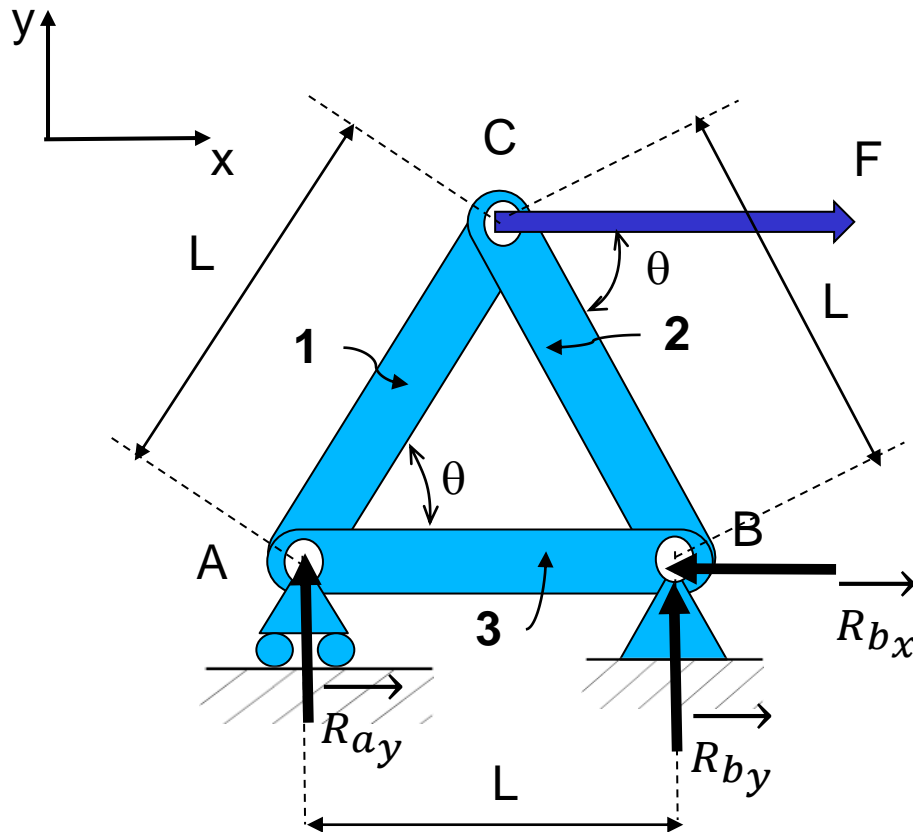
- Desenvolvendo as equações de equilíbrio estático para o corpo rígido abaixo





Estado de tensão geral sobre um elemento

- Desenvolvendo as equações de equilíbrio estático para o corpo rígido abaixo



$$\sum \vec{F}_x = 0 \quad \vec{F} + \vec{R}_{bx} = 0$$

$$\vec{R}_{bx} = -\vec{F}$$

$$\sum \vec{F}_y = 0 \quad \vec{R}_{ay} + \vec{R}_{by} = 0$$

$$\vec{R}_{ay} = -P \cdot \sin \theta$$

$$\vec{R}_{by} = P \cdot \sin \theta$$

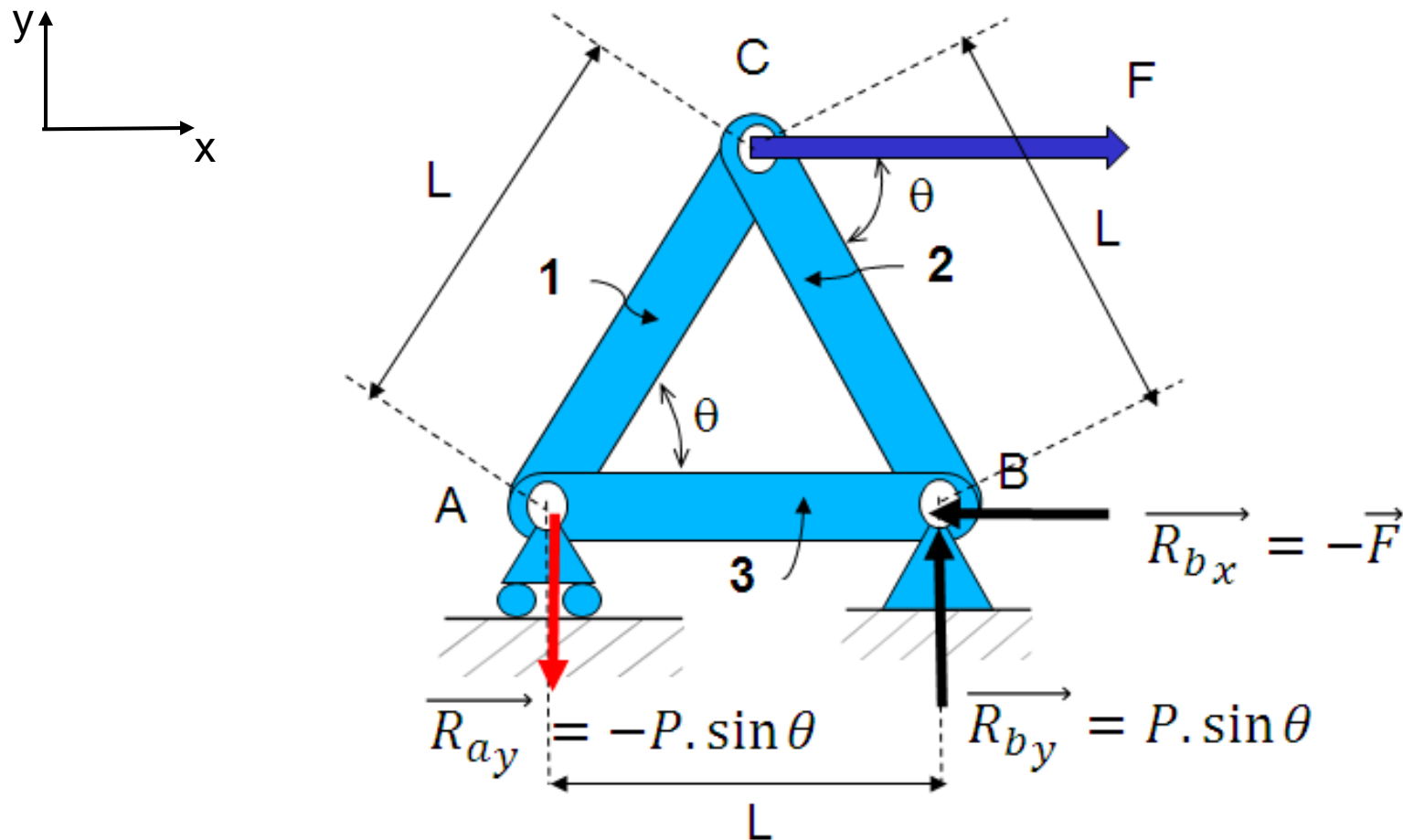
$$\sum \vec{M}_A = 0 \quad \vec{R}_{by} \cdot L + \vec{F} \cdot \sqrt{\left(\frac{3}{4}L^2\right)} = 0$$

$$\vec{R}_{by} \cdot L + \vec{F} \cdot (L \cdot \sin \theta) = 0$$



Estado de tensão geral sobre um elemento

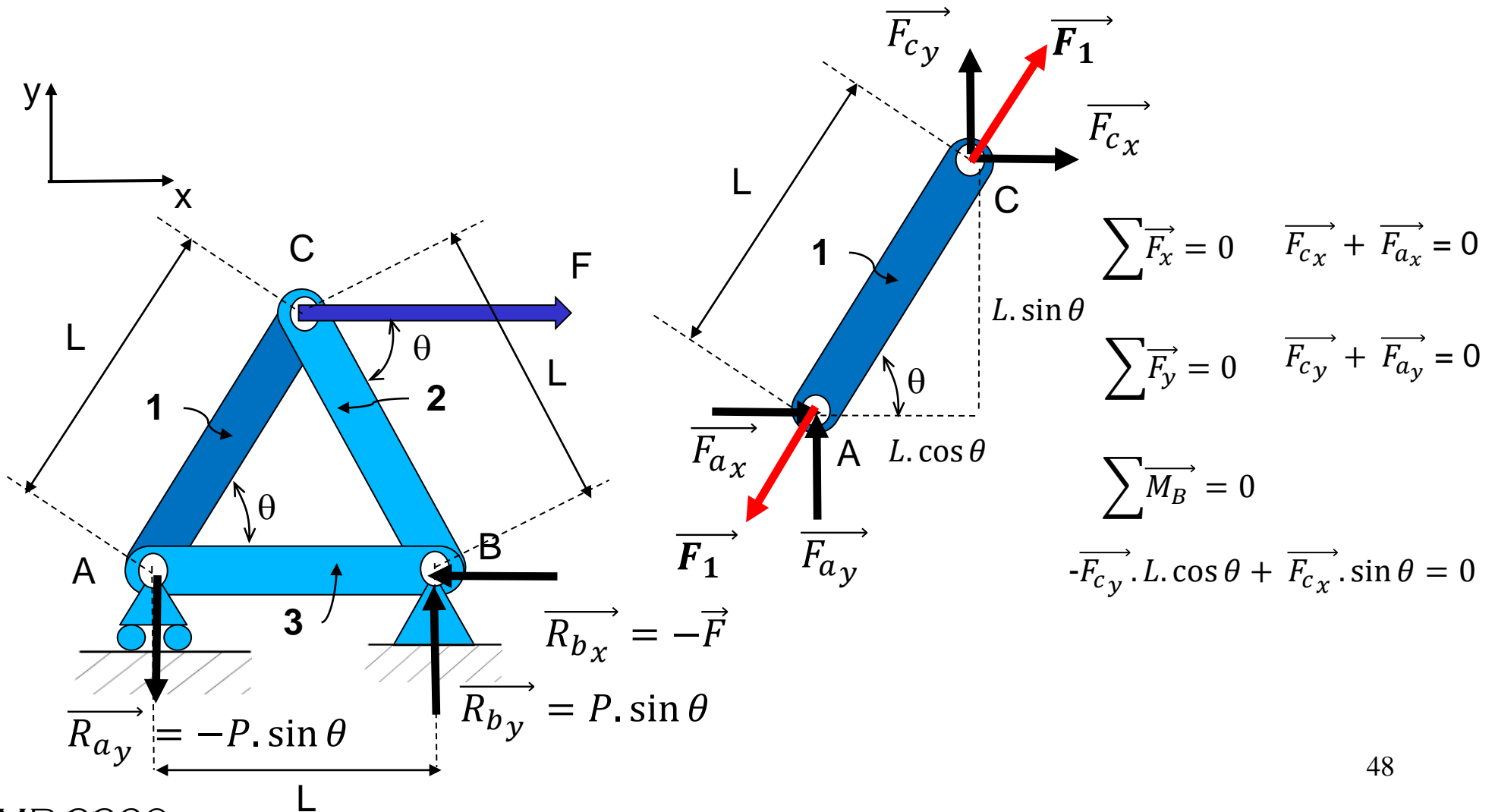
- Desenvolvendo as equações de equilíbrio estático para o corpo rígido abaixo





Resultantes Internas

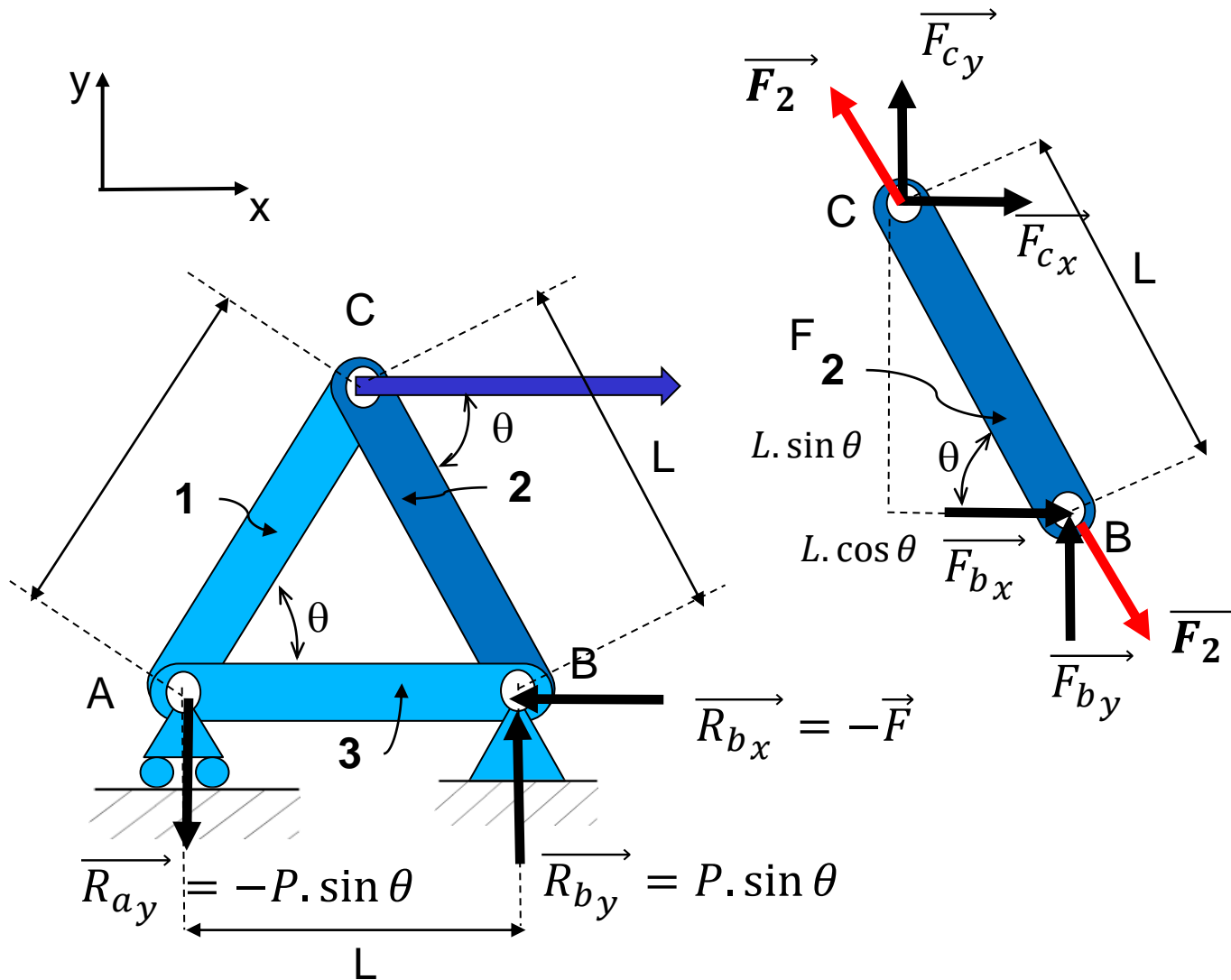
Análise individual dos esforços





Resultantes Internas

Análise individual dos esforços



$$\sum \vec{F}_x = 0 \quad \vec{F}_{cx} + \vec{F}_{bx} = 0$$

$$\sum \vec{F}_y = 0 \quad \vec{F}_{cy} + \vec{F}_{by} = 0$$

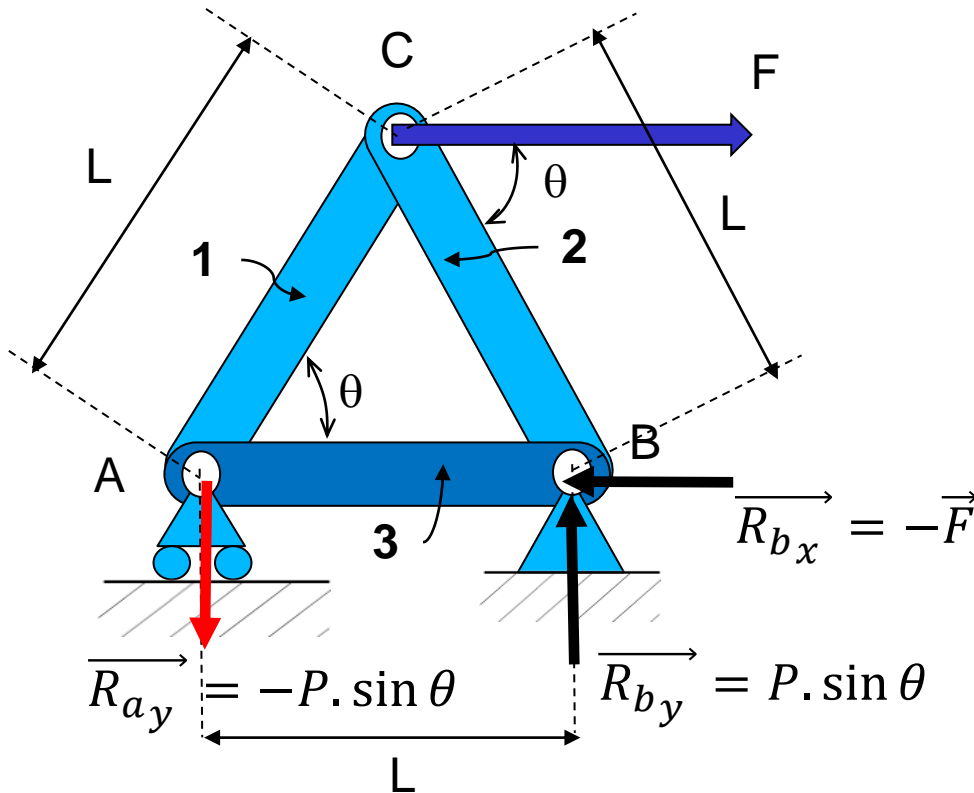
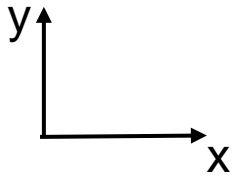
$$\sum \vec{M}_B = 0$$

$$\vec{F}_{cy} \cdot L \cdot \cos \theta + \vec{F}_{cx} \cdot \sin \theta = 0$$



Resultantes Internas

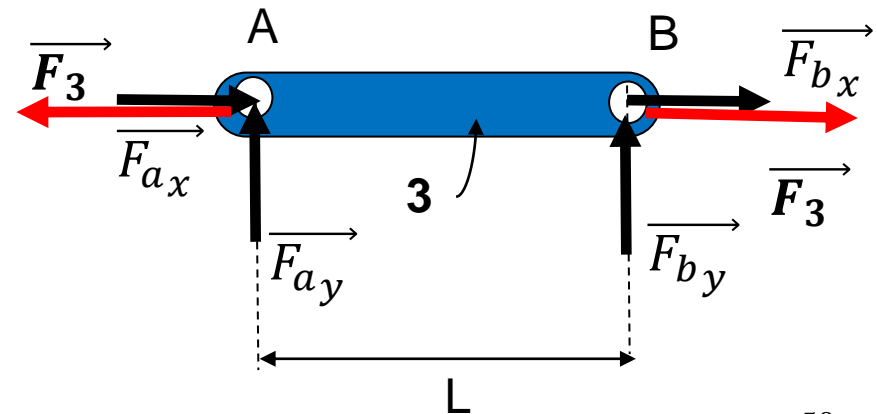
Análise individual dos esforços



$$\sum \vec{F}_x = 0 \quad \vec{F}_{cx} + \vec{F}_{ax} = 0$$

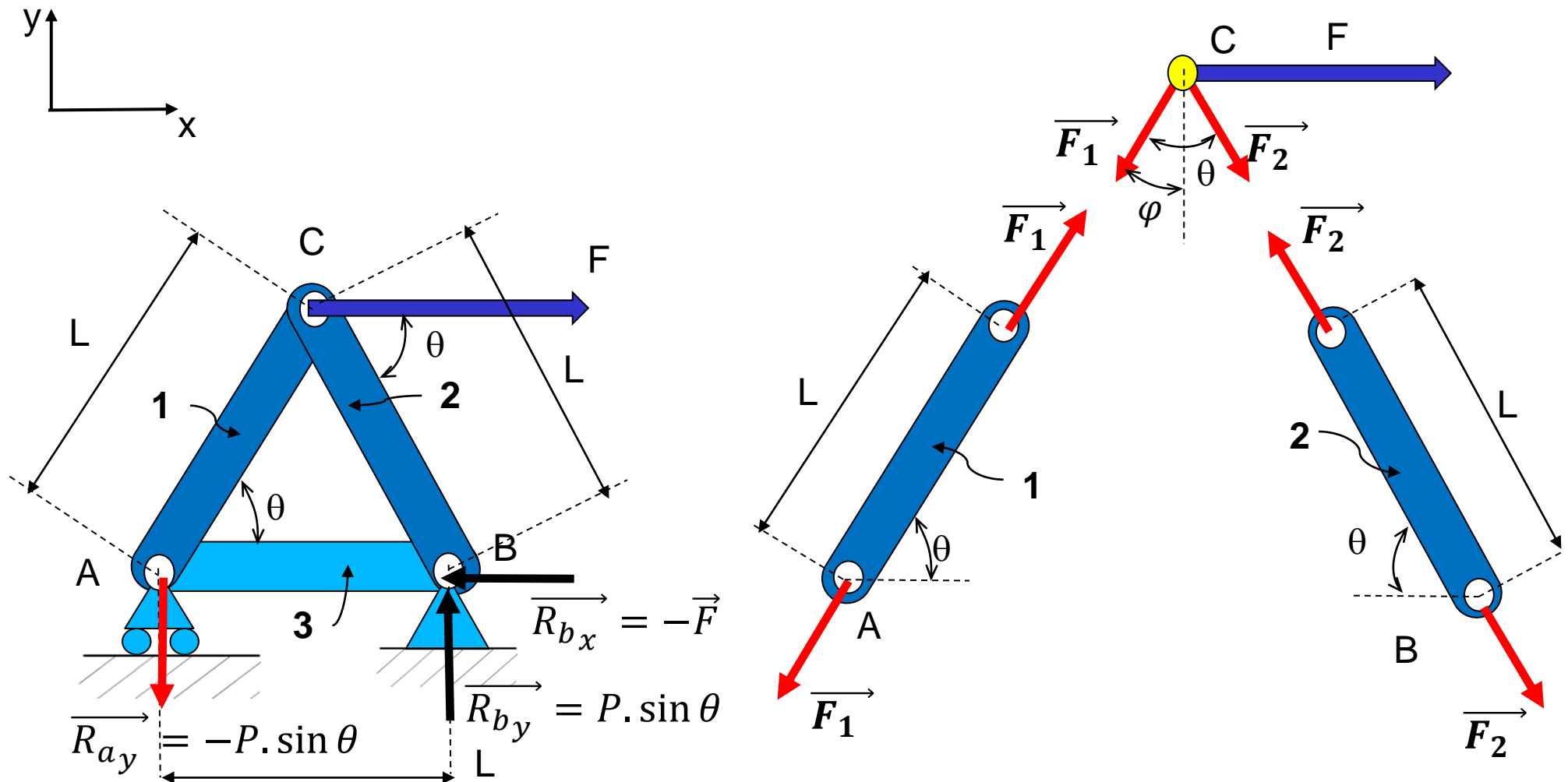
$$\sum \vec{F}_y = 0 \quad \vec{F}_{cy} + \vec{F}_{ay} = 0$$

$$\sum \vec{M}_A = 0 \quad -\vec{F}_{by} \cdot L = 0$$





Esforços combinados (\neq Tensões combinadas)





Esforços combinados

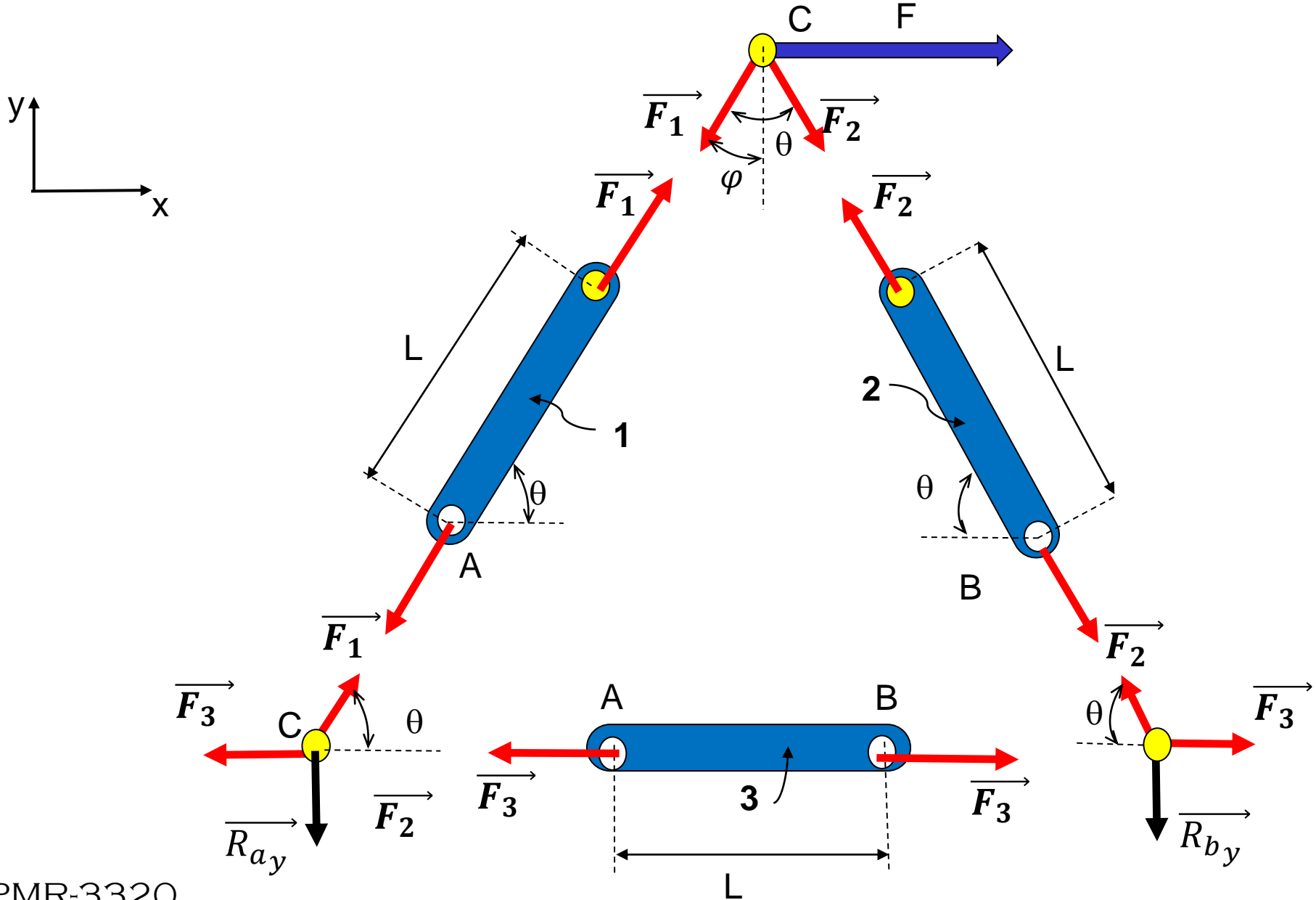
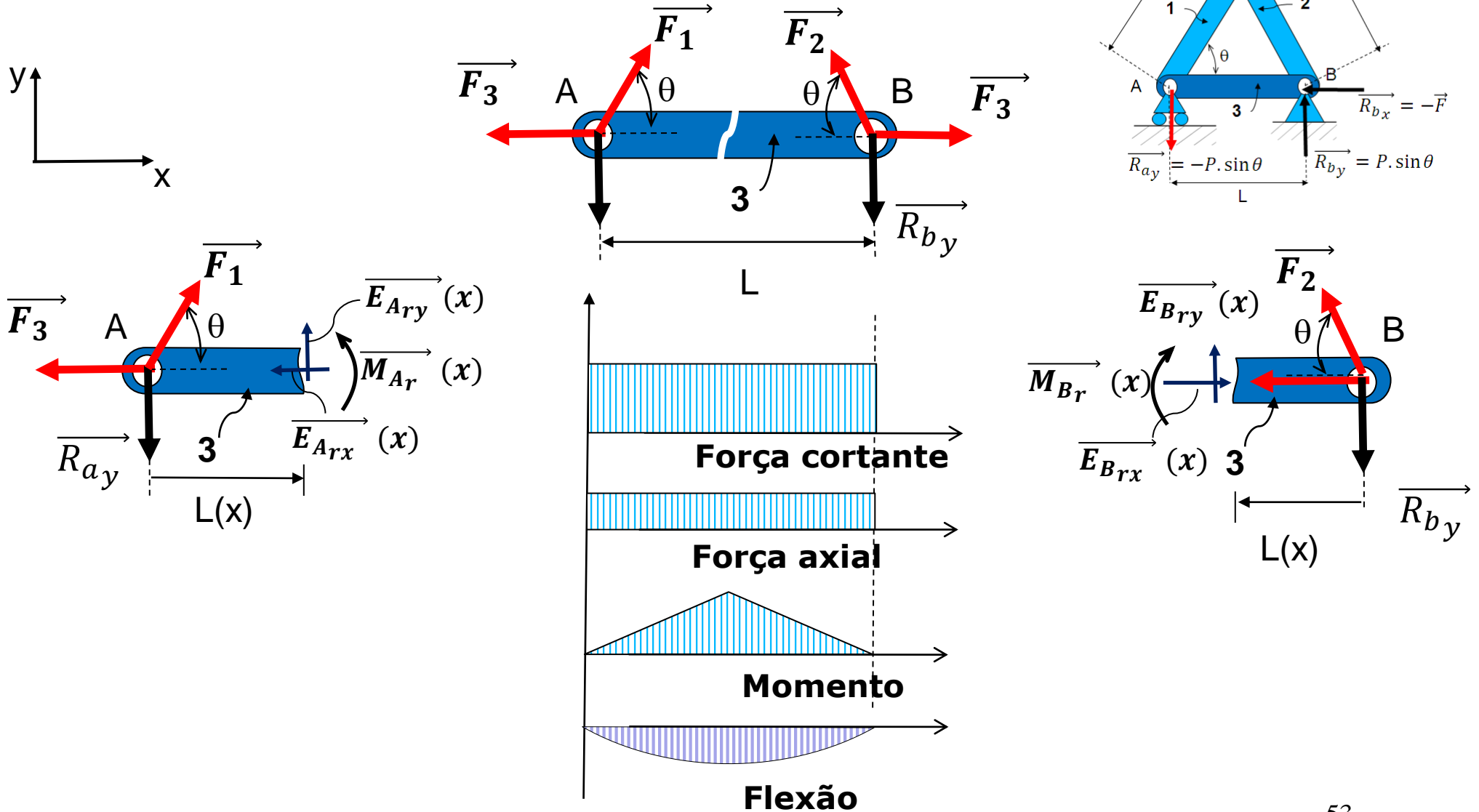


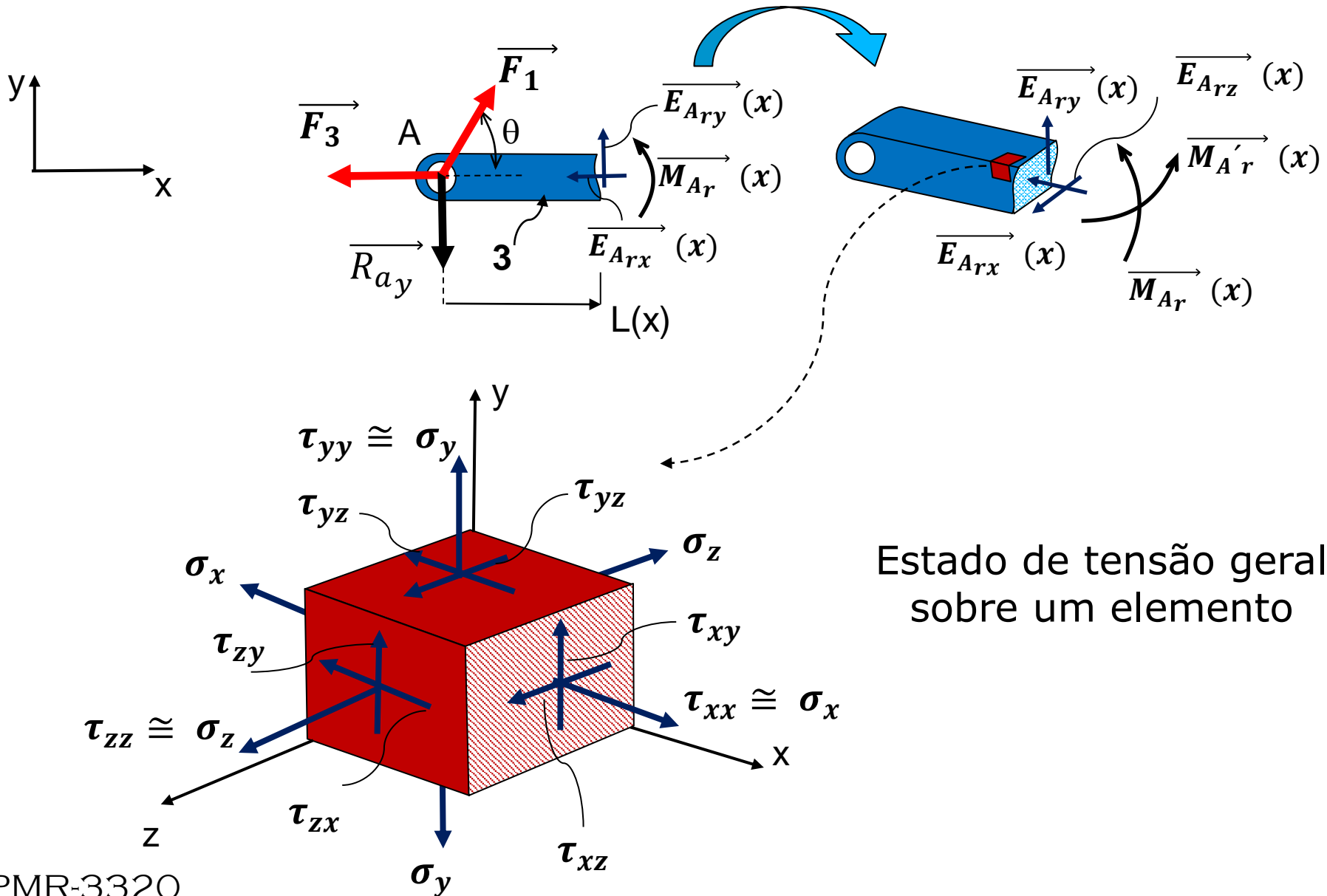


Diagrama de Esforços





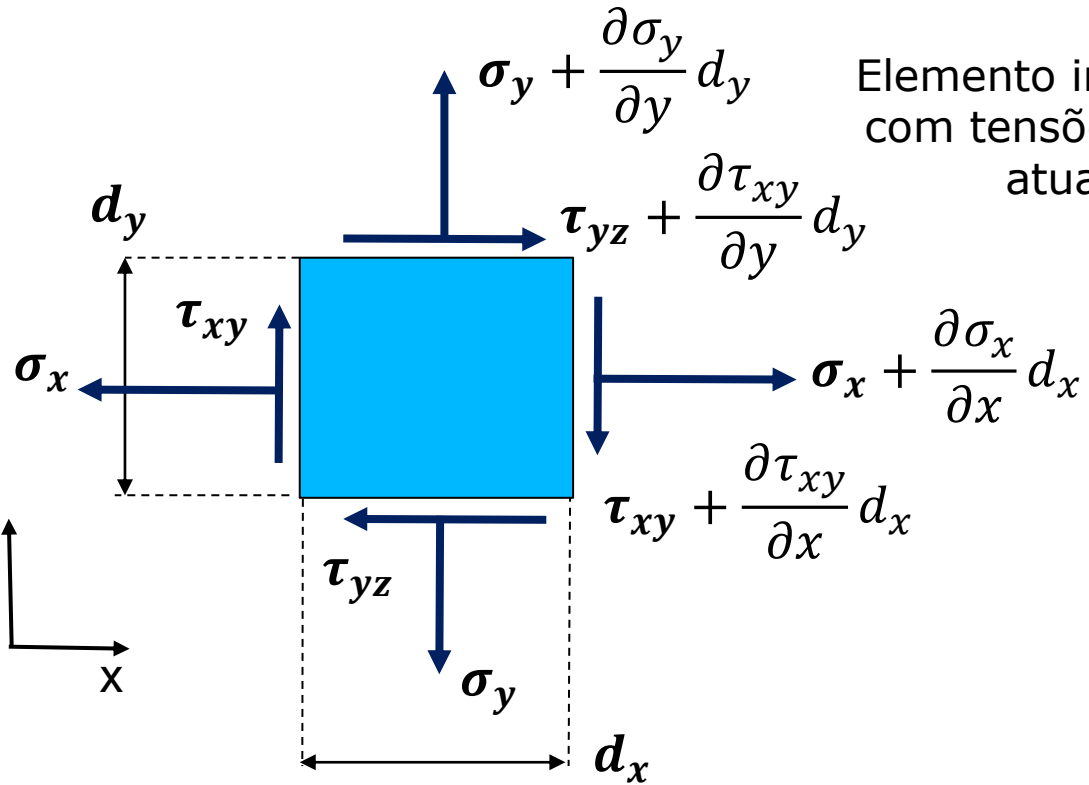
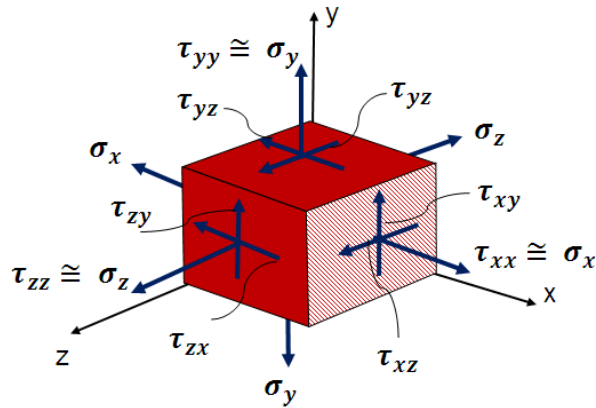
Estado de tensão geral sobre um elemento



Estado de tensão geral sobre um elemento



Equações diferenciais de equilíbrio



Elemento infinitesimal com tensões e forças atuando

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + X = 0$$

$$\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + Y = 0$$

$$\sum M_z = 0 \Rightarrow \tau_{xy} = \tau_{yx}$$

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + X = 0$$



FIM DA AULA 01