



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Elementos de Máquinas para Automação

PMR 3307 - 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: getnic@gmail.com / rodrigo.stoeterau@usp.br

Horário: Terças-feiras das 9:20 – 11:00 – A03
Sextas-feiras das 07:30-9:10 – A03



Introdução a disciplina

Estrutura da disciplina

Módulo 1 – Teoria de falha

Rodrigo

Módulo 2 – Elementos de fixação, eixos, polias e mancais

Nicola

Módulo 3 – Engrenagens

Rodrigo

Módulo 4 – Guias

Rodrigo

Módulo 5 – Seminários

Nic+Rod



Módulo 1 – Teorias de falha

Rodrigo

Modelagem, carregamento e equilíbrio

1 aula

Comportamento mecânico dos materiais

1 aula

Estado plano de tensões – Círculo de Mohr

1 aula

Falha por deformações excessivas

1 aula

Falha por deformações permanentes

1 aula

Falha por fadiga – parte 1 / parte 2

2 aula

Falha por instabilidade: flambagem

1 aula

Falha por impacto – parte 1 / parte 2

2 aula

Falha por desgaste excessivo

1 aulas

Total = 11 aulas



Módulo 2 – Elementos de fixação

Nicola

→	Fixação cubo eixo e especificações	1 aula
→	Rebites	1 aula
→	Parafusos – parte 1 / parte 2	2 aula
→	Fusos de potência	1 aula
→	Mancais – parte 1 / parte 2	2 aula
→	Freios e embreagens	1 aula
→	Cabos, correias e correntes	1 aula

Total = 11 aulas



Módulo 3– Engrenagens

Rodrigo

Denominações e leis do engrenamento

1 aula

Esforços sobre os dentes da engrenagem

1 aula

Roteiro de projeto AGMA

1 aula

Fabricação de engrenagens

1 aula

Total = 4 aulas



Módulo 4 – Guias

Rodrigo

Guias de escorregamento

1 aula

Guias de hidrostáticas e de elementos rolantes

1 aula

Total = 2 aulas

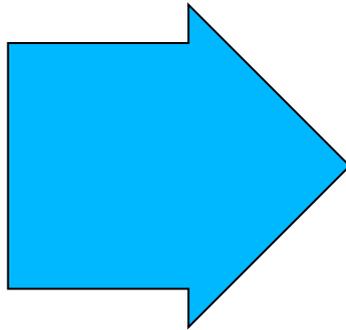


Módulo 5 –Seminários

Ntrab

Nic+Rod

2 aulas



Trabalho em projeto envolvendo os tópicos da disciplina
Preferencialmente computacional
Uso de CAD e outras ferramentas de análise.
Evitar trabalho prático.
Focar em projeto de engenharia.

Nota Projeto



Método de Avaliação

Neste semestre utilizaremos avaliação continuada

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

$$Notafinal = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (Ex_i - Ex_{menor\ nota})}{(n-1)} + Nota_{seminário} \right) / 2$$

- **NF \geq 5,0**
- A frequência mínima é de 75%; alunos que se ausentarem por mais de oito (08) aulas serão **reprovados**.

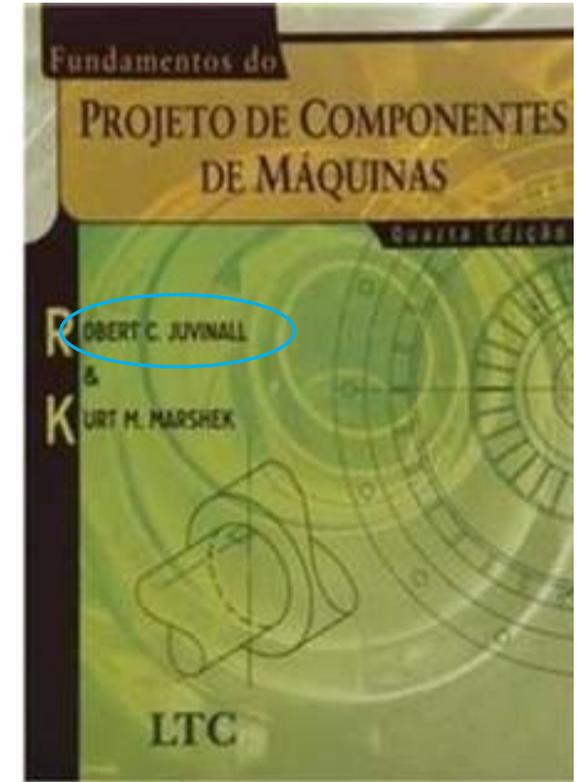
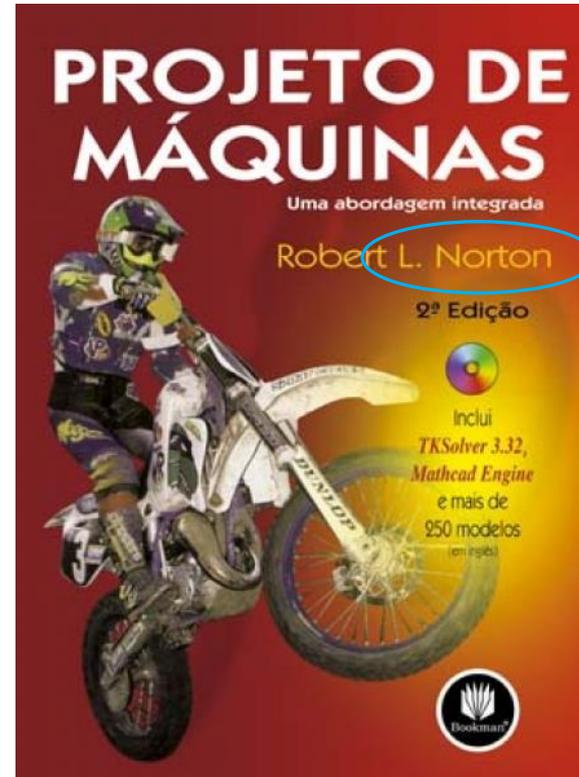
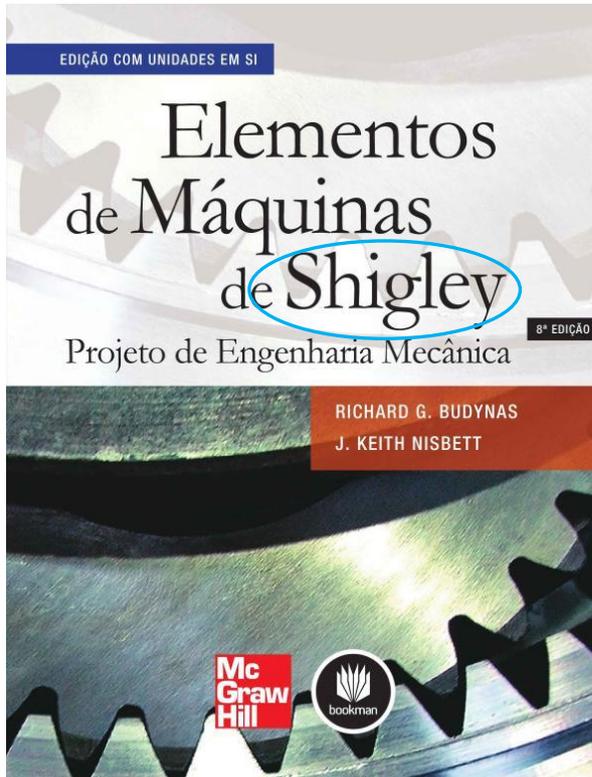


Cronograma de aulas

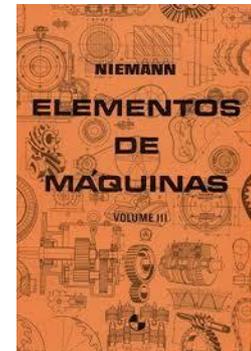
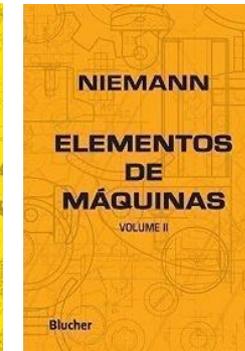
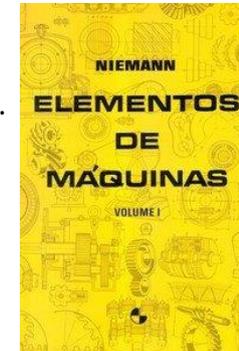
Dia	S	Aula	Tópico	Prof.
18.08	3ª	A1	Introdução a disciplina Modelagem, carregamento e equilíbrio	RS
21.08	6ª	A2	Comportamento mecânico dos materiais	RS
25.08	3ª	A3	Composição de tensões Estado plano de tensões – Círculo de Mohr	RS
28.08	6ª	A4	Teorias de Falha: 1) Falha por deformação excessiva; fundamentos	RS
01.09	3ª	A5	Teorias de Falha: 2) Falha por deformação permanente: von Mises, Tresca, Coulomb-Mohr;	RS
04.09	6ª	A6	Teorias de Falha: 3) Falha por fadiga: Parte - 1	RS
08.09	3ª	A7	Teorias de Falha: 3) Falha por fadiga: Parte - 2	RS
11.09	6ª	A8	Teorias de Falha: 4) Falha por instabilidade: flambagem	RS
15.09	3ª	A9	Teorias de Falha: 5) Falha por impacto: Parte - 1	RS
18.09	6ª	A10	Teorias de Falha: 6) Falha por impacto: Parte - 2	RS
22.09	3ª	A11	Teorias de Falha: 6) Falha por desgaste excessivo	RS
25.09	6ª	A12	Fixações cubo-eixo	NG
29.09	3ª	A13	Especificação e dimensionamento de elementos de fixação: Rebites	NG
02.10	6ª	A14	Especificação e dimensionamento de elementos de fixação: Parafusos: Parte - 1	NG
06.10	3ª	A15	Especificação e dimensionamento de elementos de fixação: Parafusos: Parte - 2	NG
09.10	6ª	A16	Especificação e dimensionamento de elementos de transmissão: Fusos	NG
13.10	3ª	A17	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Mancais: Parte - 1	NG
16.10	6ª	A18	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Mancais: Parte - 2	NG
20.10	3ª	A19	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Molas: Parte - 1	NG
23.10	6ª	A20	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Molas: Parte - 2	NG
27.10	3ª	A21	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Freios e embreagens	NG
30.10	6ª	A22	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Correias e Correntes	NG
03.11	3ª	A23	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Engrenagens: Parte - 1	RS
06.11	6ª	A24	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Engrenagens: Parte - 2	RS
10.11	3ª	A25	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Engrenagens: Parte - 3	RS
13.11	6ª	A26	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Engrenagens: Parte - 4	RS
17.11	3ª	---	Feriado municipal – Consciência Negra	
20.11	6ª	A27	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Guias de escorregamento	RS
24.11	3ª	A28	Análise e dimensionamento de componentes mecânicos: Guias lineares	RS
27.11	6ª	A29	Apresentação dos trabalhos	RS
01.12	3ª	A30	Apresentação dos trabalhos	
04.12	6ª	A29	Apresentação dos trabalhos	
08.12	3ª	A30		
11.12	6ª	A31		
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





Software

<https://www.ansys.com/academic/free-student-products>

The screenshot shows the Ansys website navigation bar with the following items: Ansys logo, PRODUCTS, SOLUTIONS, SERVICES, PART, ABOUT ANSYS, FREE TRIALS, and a search icon. Below the navigation bar are four product tiles: Discovery Live Student, Discovery AIM Student, Ansys Student, and Ansys SCADE Student. The Discovery Live Student and Discovery AIM Student tiles have a large red 'X' over them. The Ansys Student tile has a red arrow pointing to it from above. Each tile has a '>> CLICK HERE' button.

▲ Download Ansys Student 2020 R2

Ansys Student is our Ansys Workbench-based bundle of Ansys Mechanical, Ansys CFD, Ansys Autodyn, Ansys SpaceClaim and Ansys DesignXplorer. Ansys Student is used by hundreds of thousands of students globally. It is a great choice if your professor is already using it for your course or if you are already familiar with the Ansys Workbench platform.

[DOWNLOAD ANSYS STUDENT 2020 R2](#)



For the [free online simulation course from Cornell University](#), Ansys Student 2019 R3 is recommended.



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



Condução do curso

- As sessões consistirão de **WebAulas** 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.



Condução do curso

➤ **Importante**

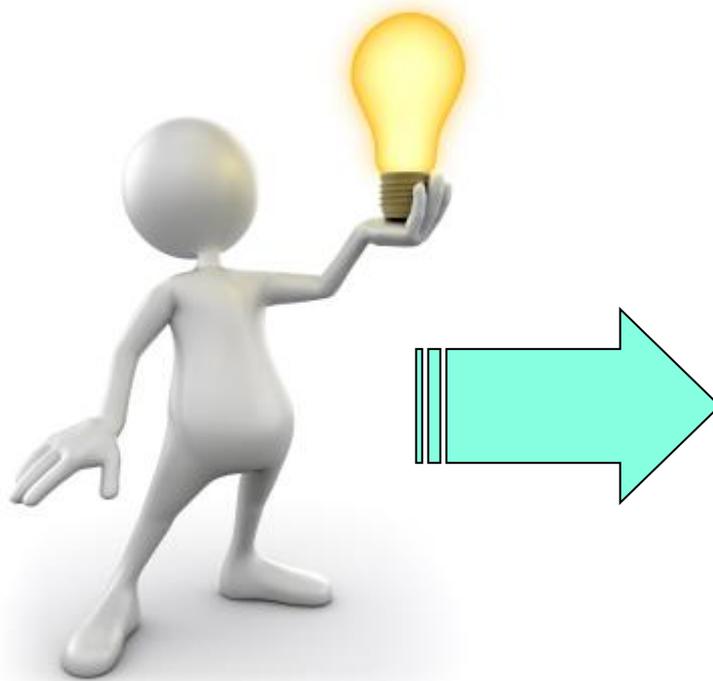
- ✓ ler, pensar, entender, reler, discutir e aplicar.
- ✓ Não separar o curso da sua vida profissional;
- ✓ aplicar ao seu trabalho sempre que possível



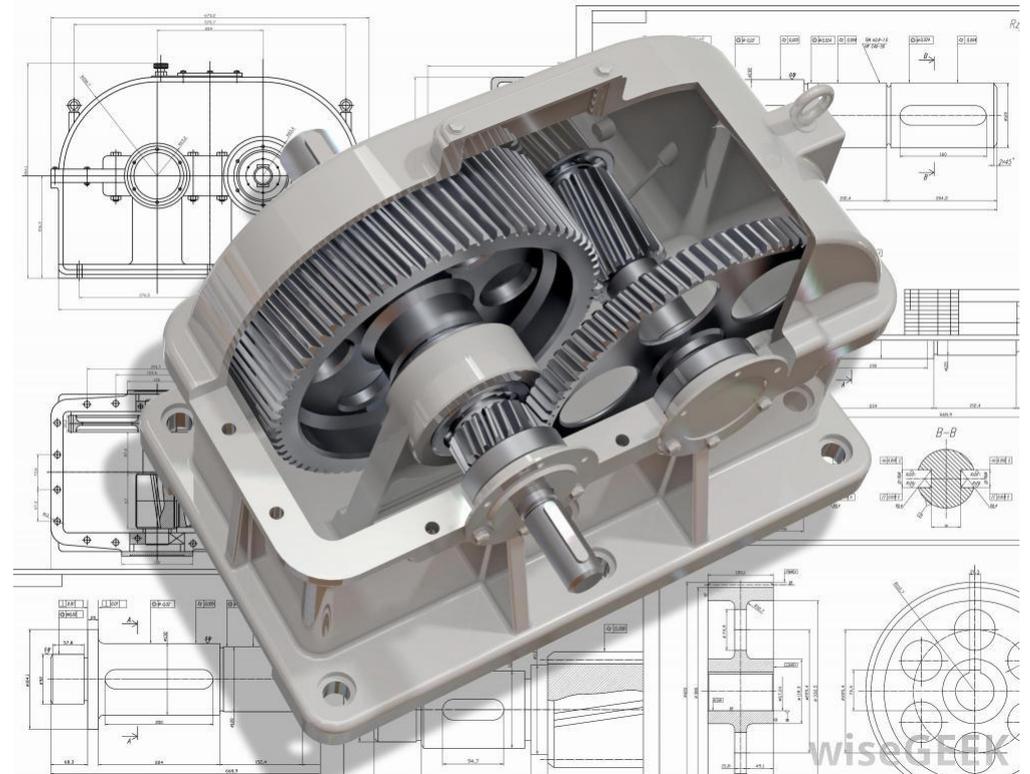
Introdução



Processo de desenvolvimento de produto



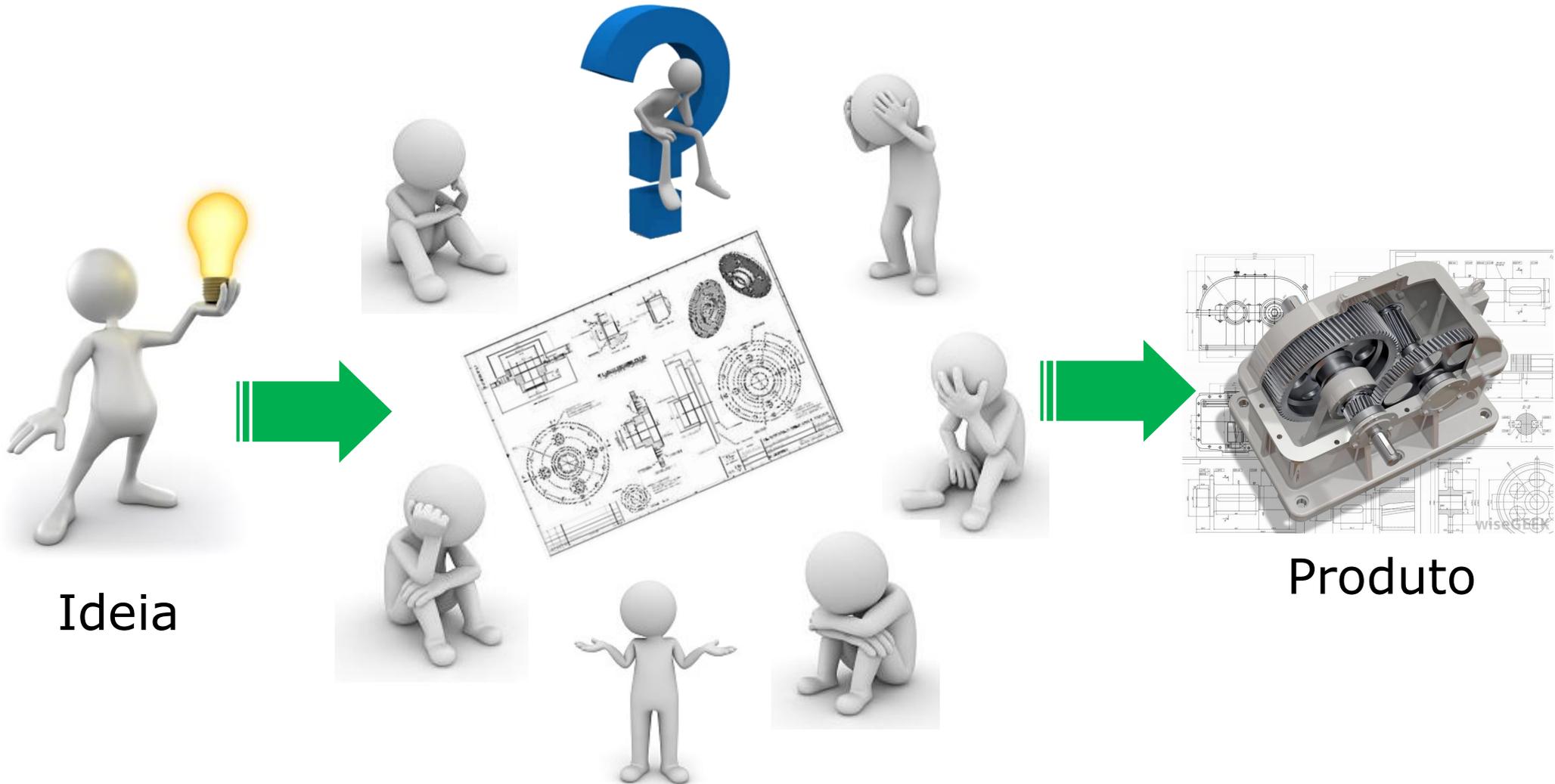
ideia



produto



Trajetória do Projeto



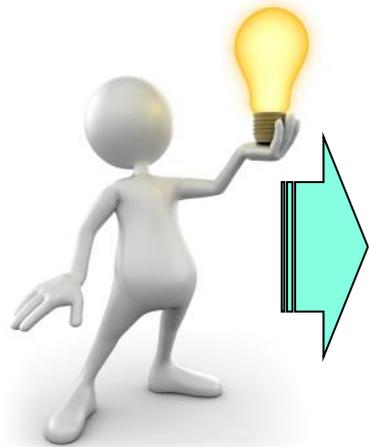
Ideia

Produto

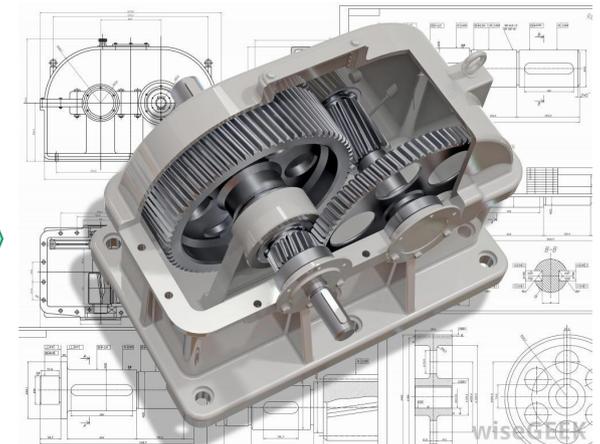
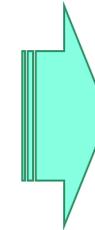
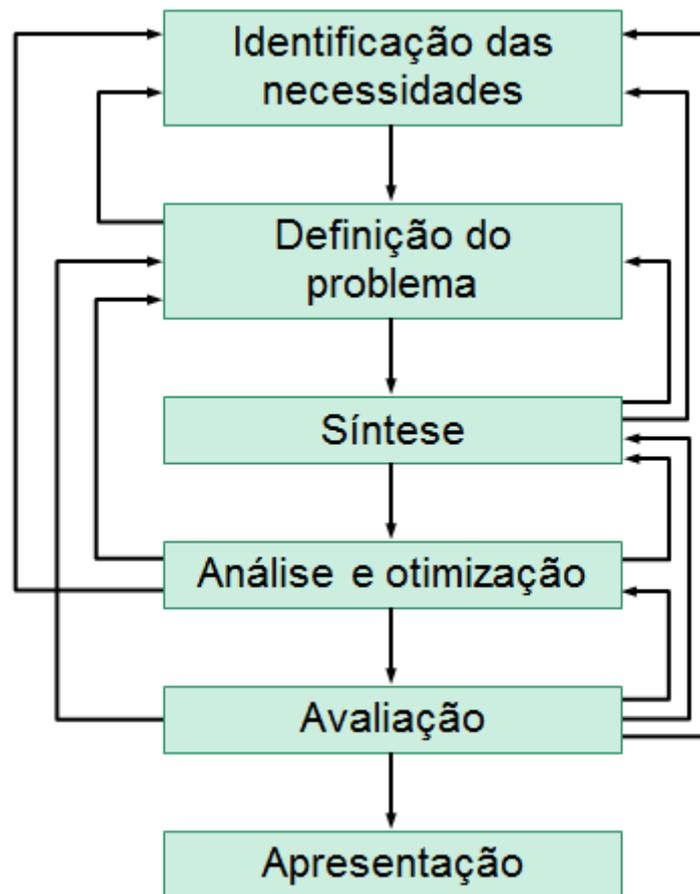


Processo de desenvolvimento de produto

Segundo Shigley



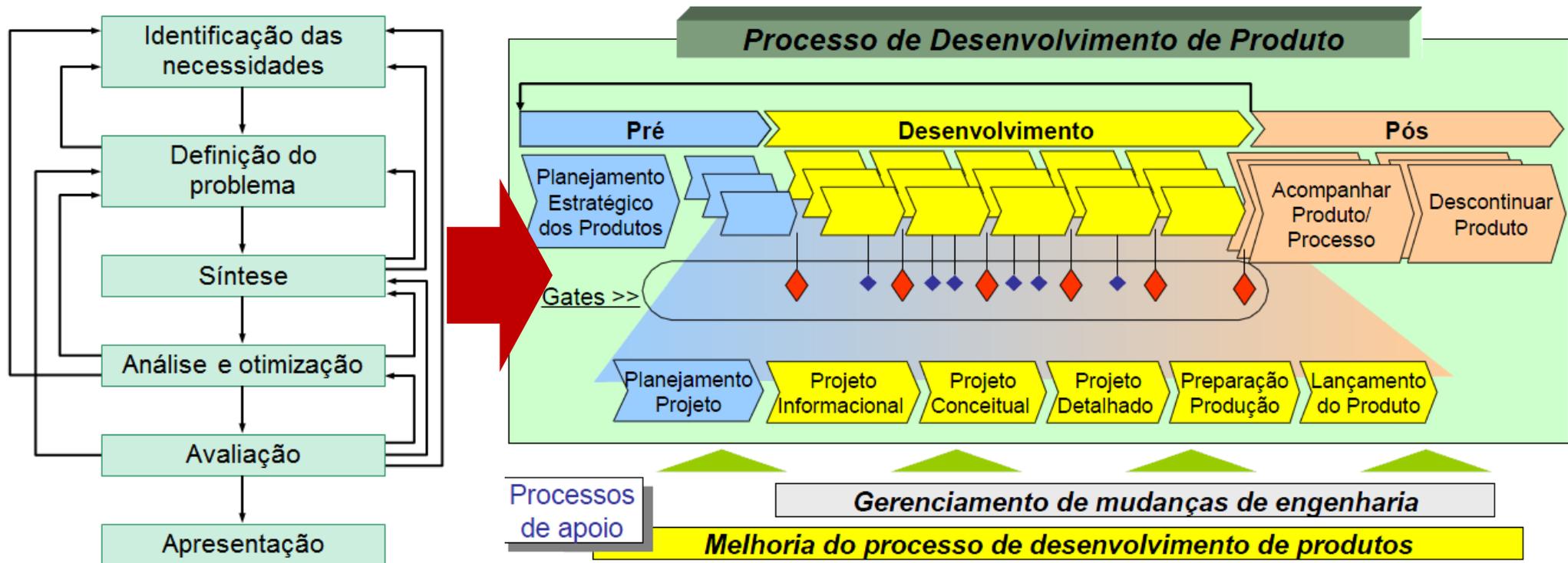
ideia



produto

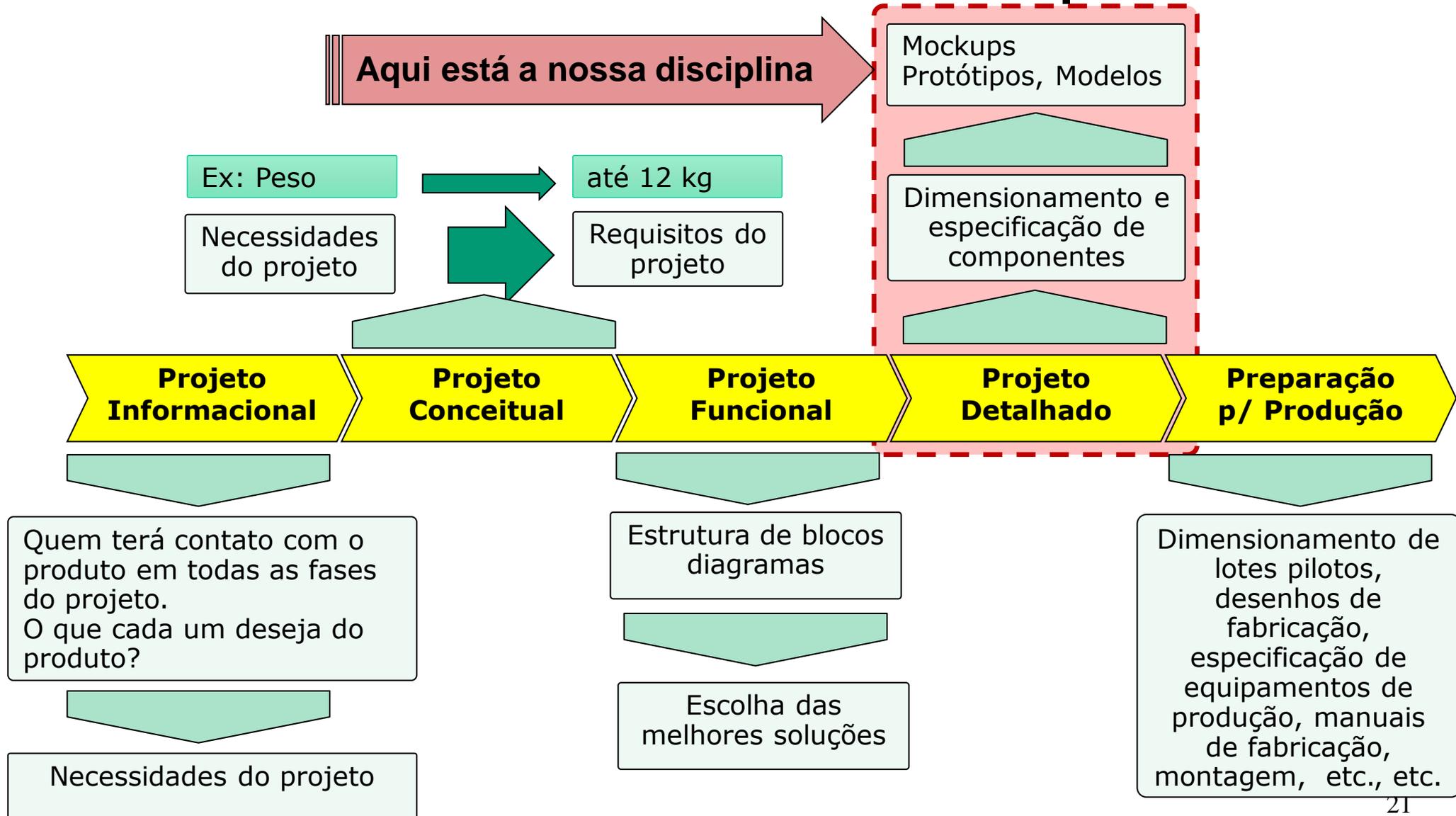


Processo de desenvolvimento de produto



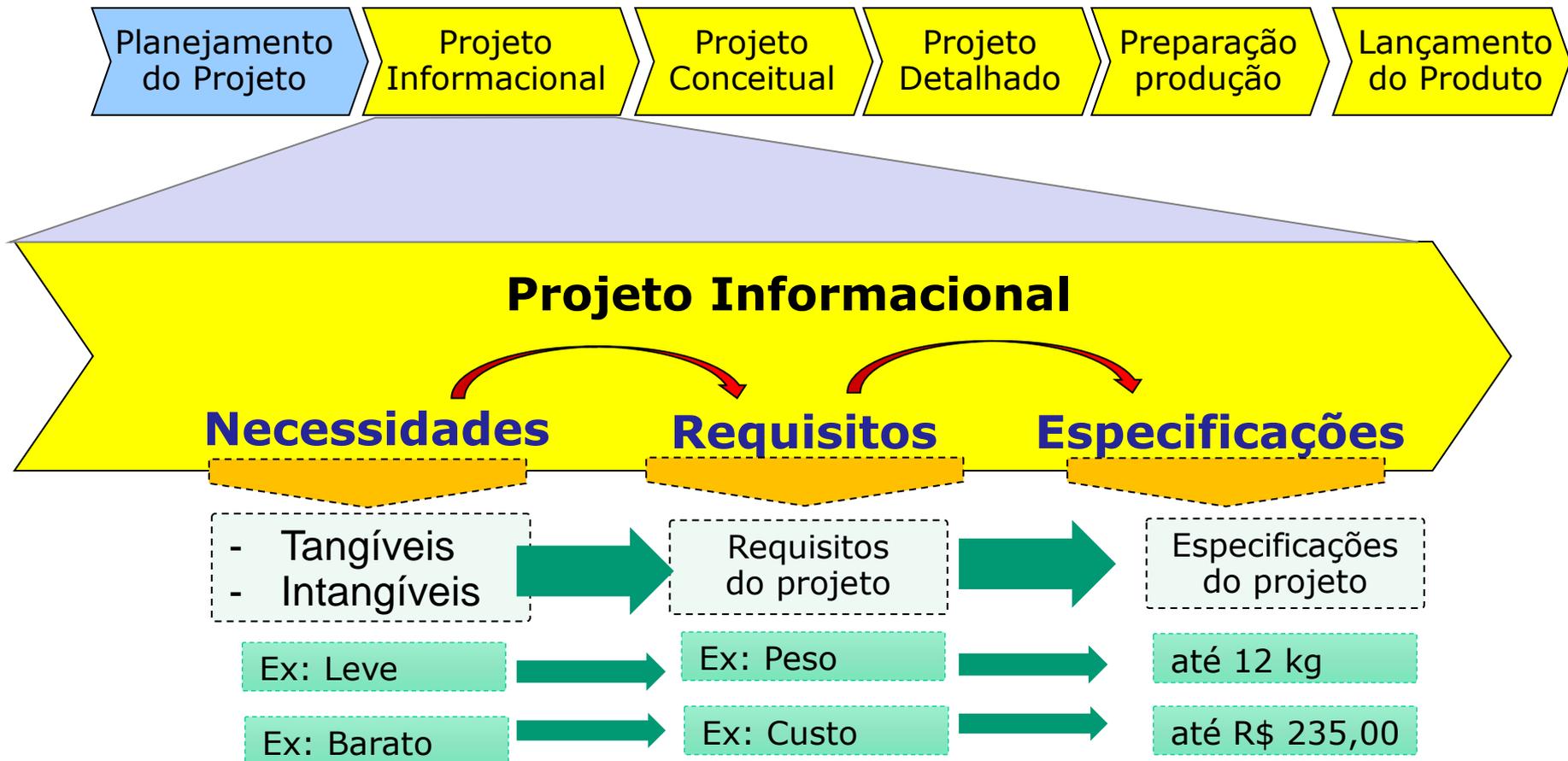


Processo de desenvolvimento de produto



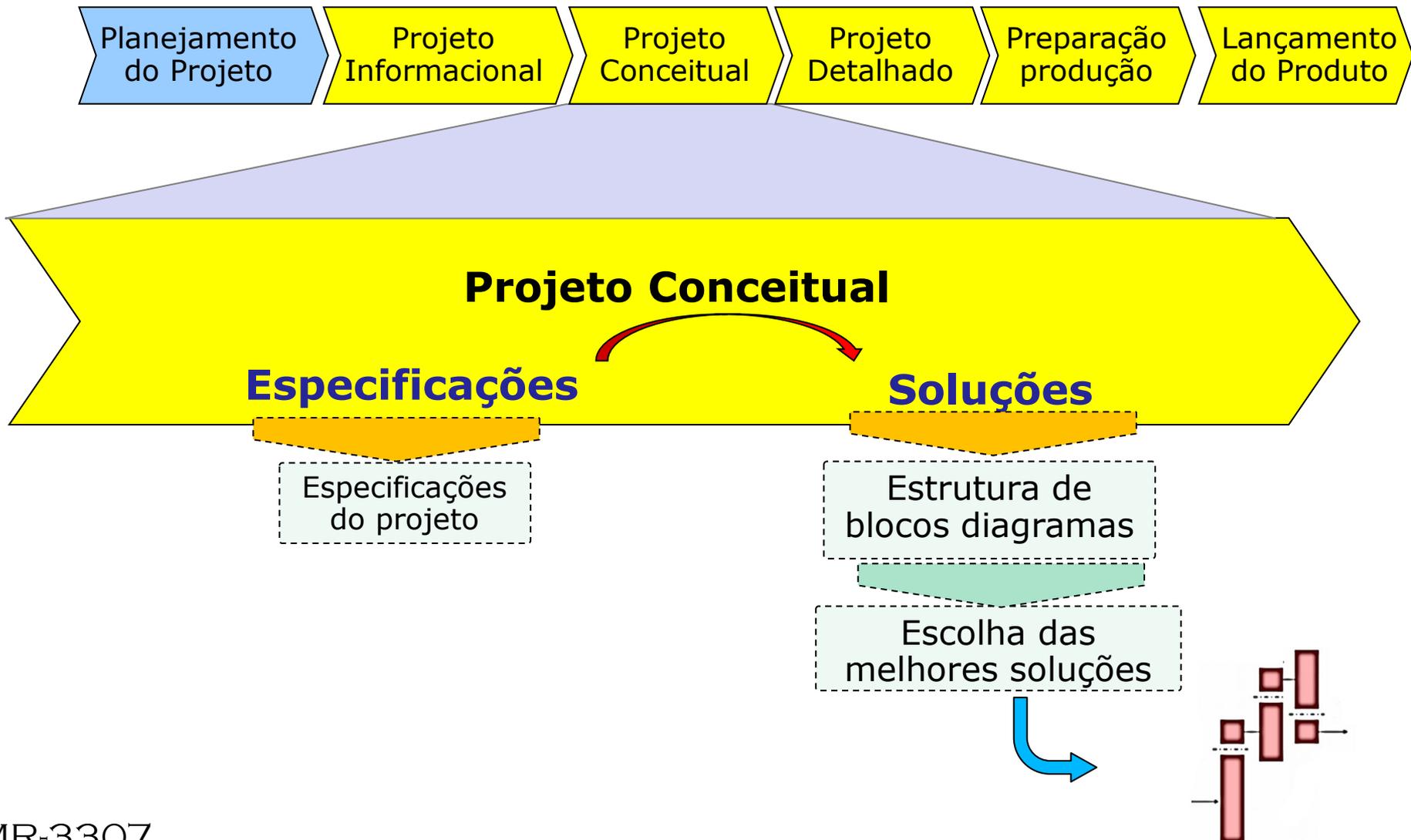


Fases do Projeto





Fases do Projeto





Fases do Projeto





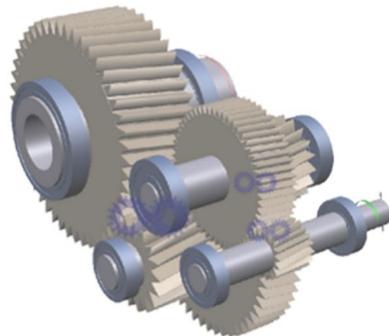
Fases do Projeto



Projeto Detalhado

Projeto de engenharia

Aqui está a nossa disciplina



Dimensionamento e especificação de componentes

Desenhos de engenharia

Mockups
Protótipos

- Computacionais
- Analíticos
- Funcionais

Desenhos de fabricação

Documentação total
(montagem, manutenção, manuais, testes, etc.)

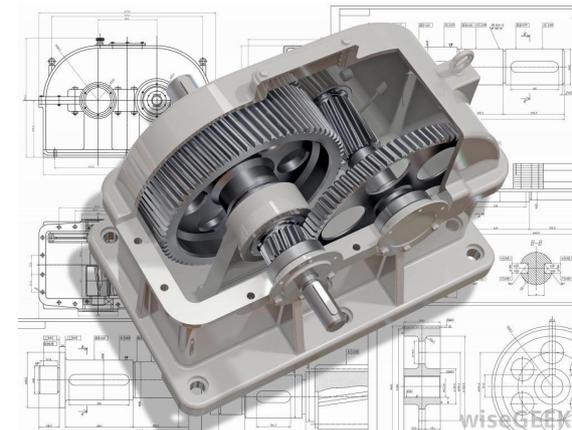
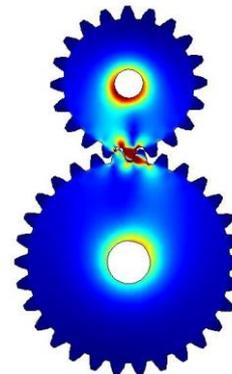
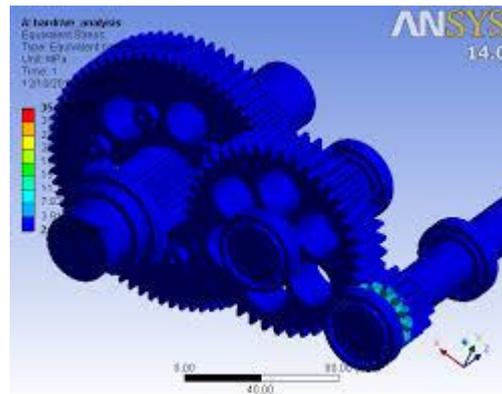
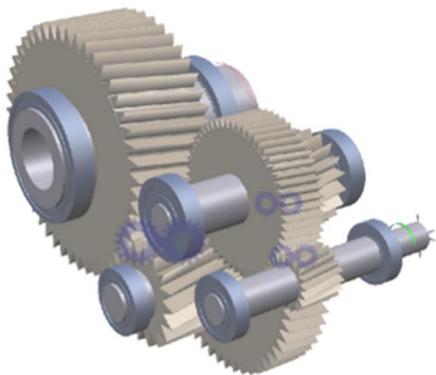


Fases do Projeto



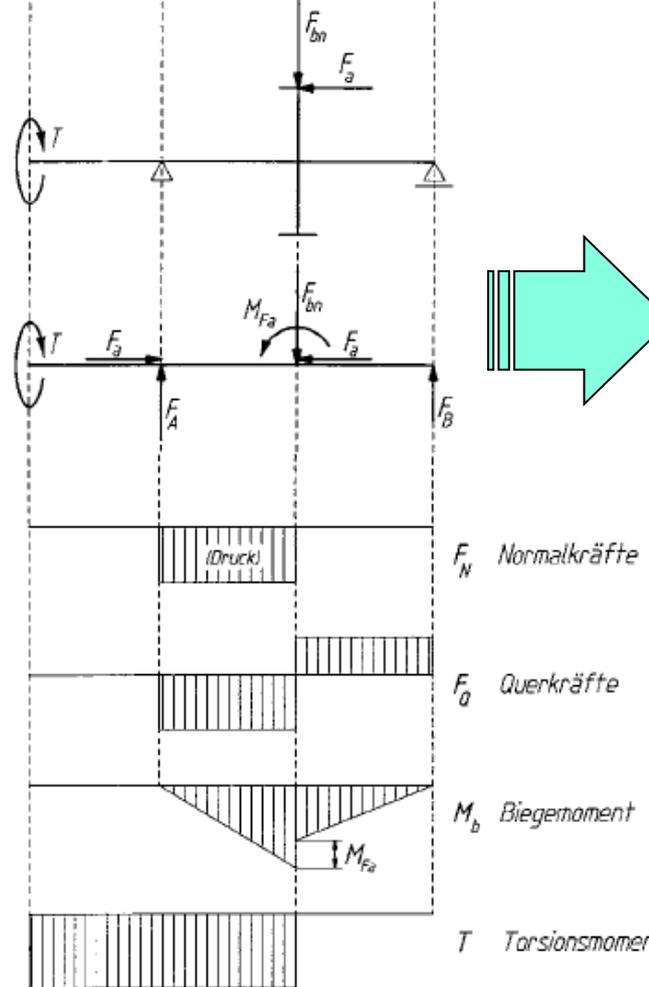
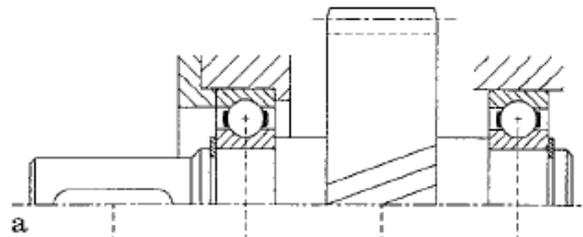
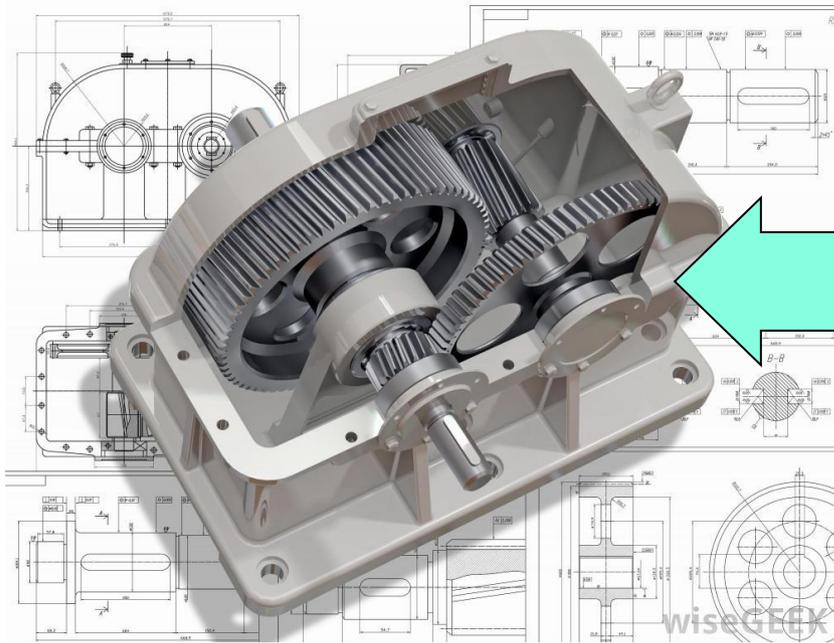
Projeto Detalhado

Projeto de engenharia





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

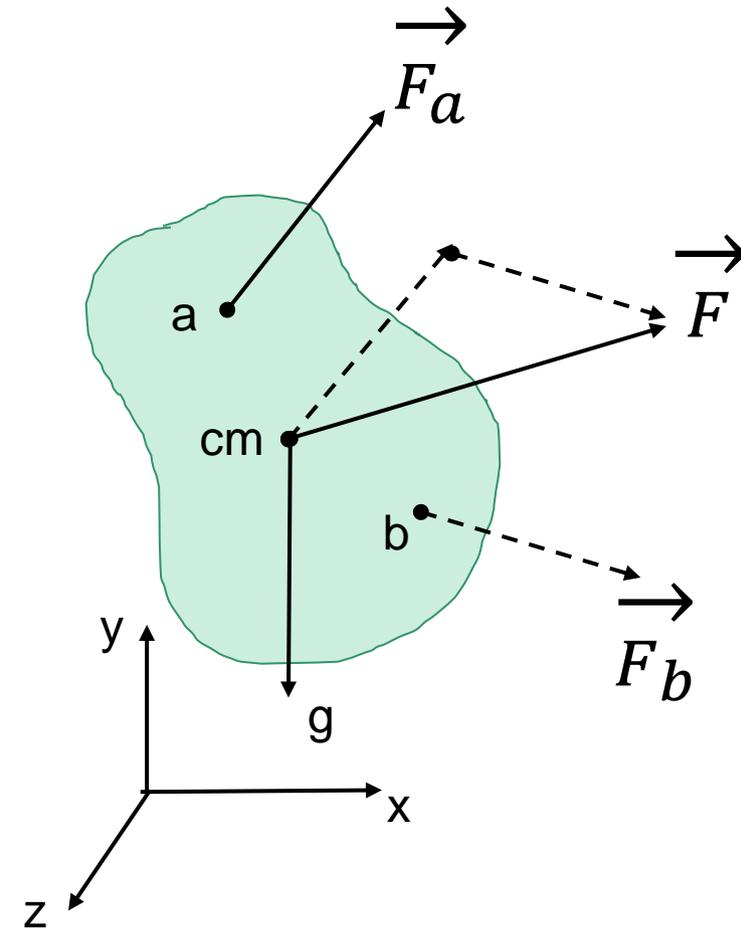
- Somente unidades no SI
- Faça bons desenhos de rascunhos
 - Identifique o sistema de coordenadas
 - Nomeie dimensões e forças
 - Bons diagramas de corpo livre são bons auxiliares na solução
- Mostre de forma organizada seu raciocínio
- Siga as convenções
- Desenvolva o raciocínio simbolicamente. ***Deixem 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



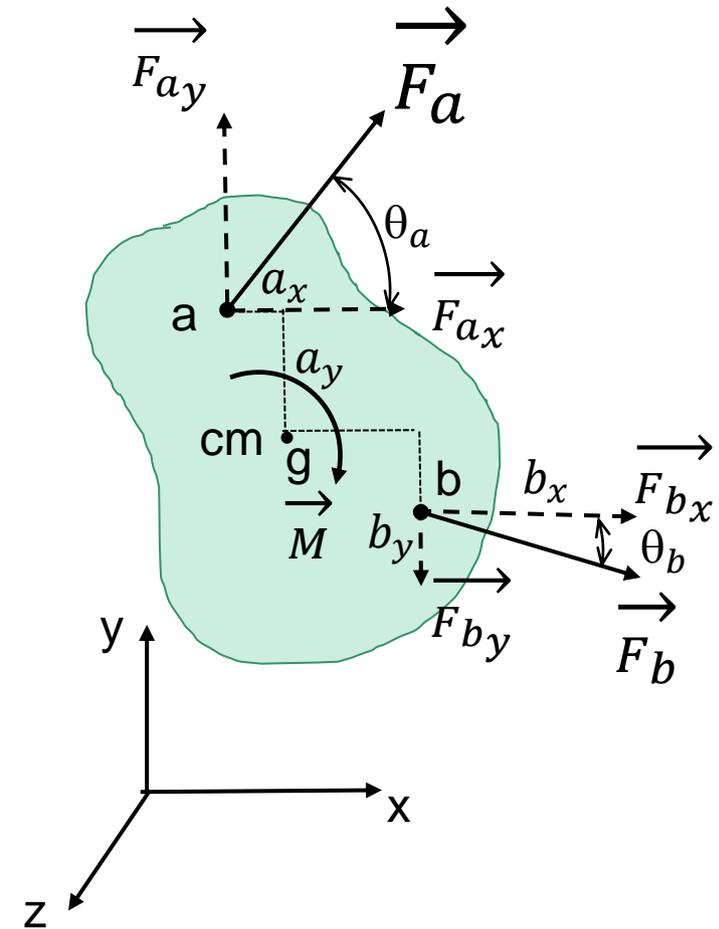
$$\vec{F}_a = F_{a_x} \hat{i} + F_{a_y} \hat{j} + F_{a_z} \hat{k}$$
$$\vec{F} = \vec{F}_a + \vec{F}_b$$



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



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

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



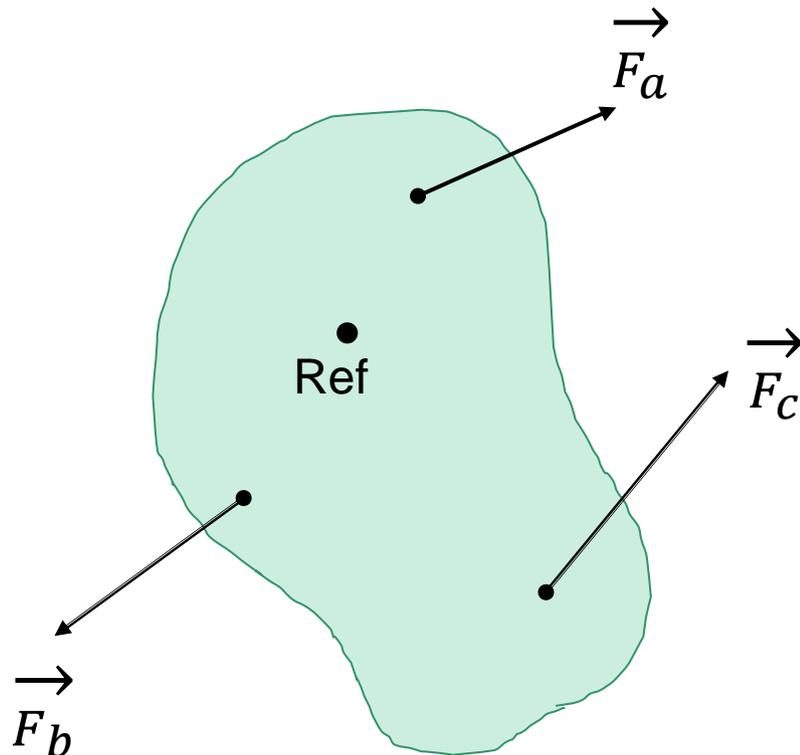
Exemplo

- 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

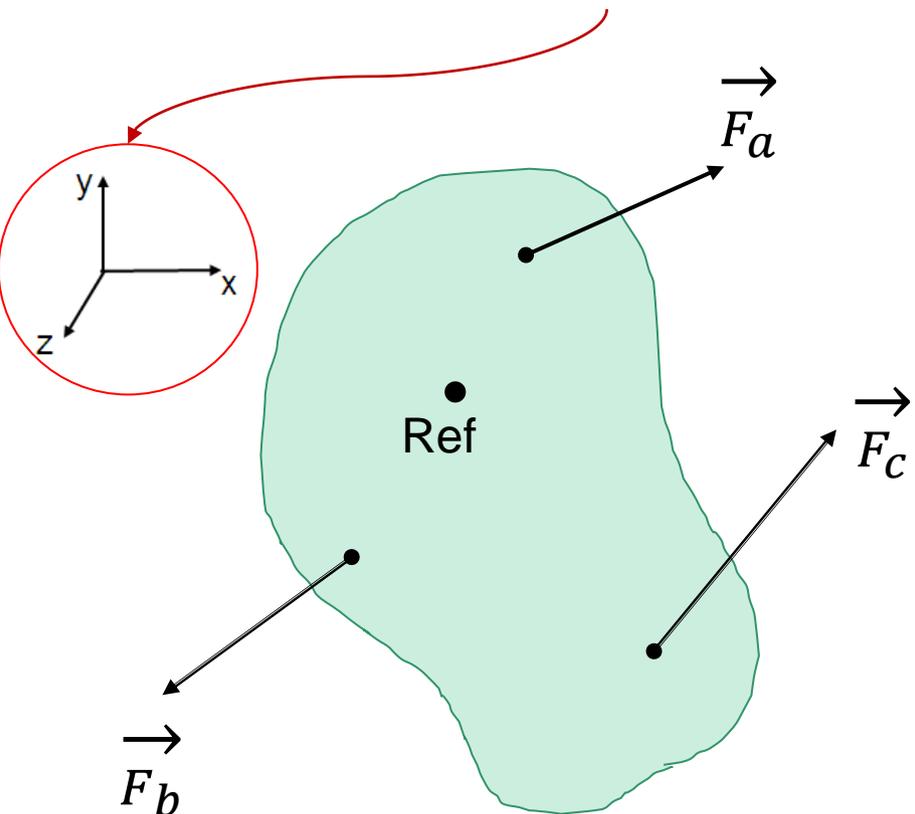


Exemplo

➤ Determine os esforços resultantes no ponto Referencia

➤ Identifique o sistema de coordenadas

Condições de equilíbrio



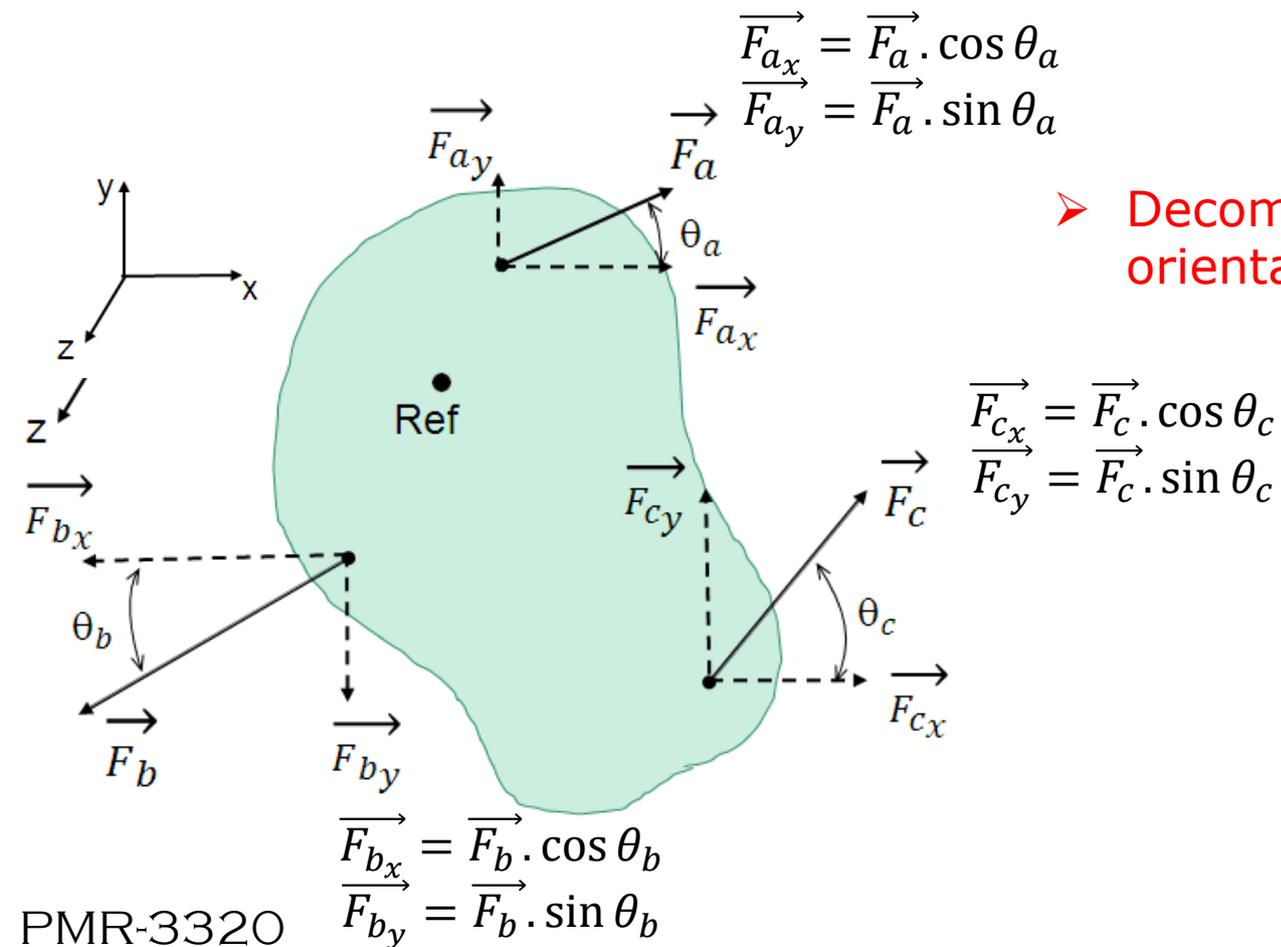
$$\sum_{Ref} \vec{F}_n = 0$$
$$\sum \vec{F}_{ref_x} = 0 \quad \xrightarrow{X(+)}$$
$$\sum \vec{F}_{ref_y} = 0 \quad \uparrow Y(+)$$

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



Exemplo

- Determine os esforços resultantes no ponto Referencia

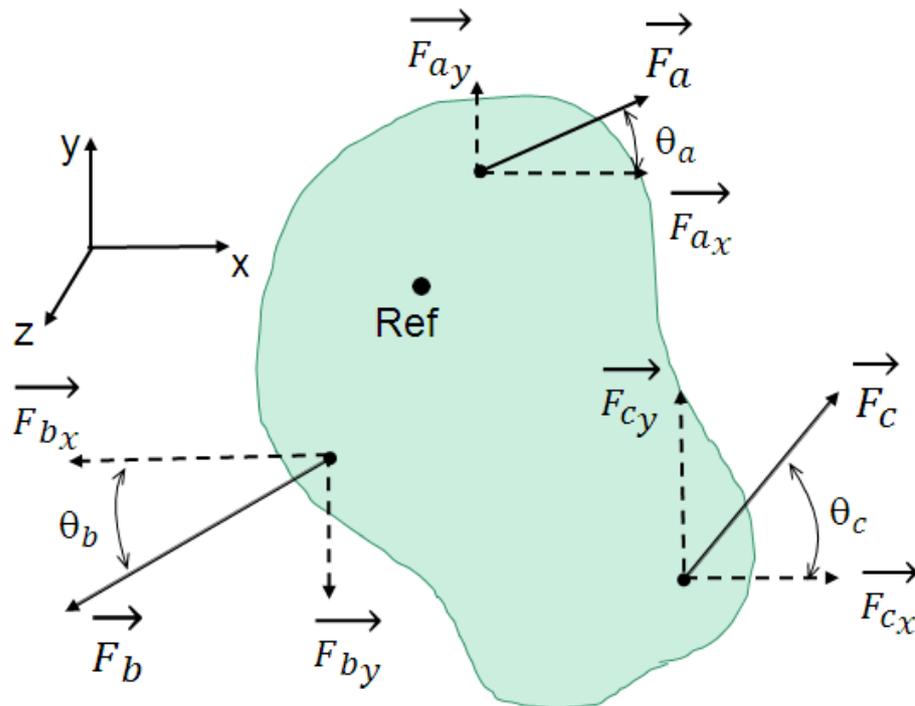


- Decomposição das forças segundo a orientação do sistema de coordenadas



Exemplo

- Determine os esforços resultantes no ponto Referencia
- Determinar a condição de equilíbrio $\sum \vec{F}_{ref} = 0$



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

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

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

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

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

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

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



Exemplo

- Determine os esforços resultantes no ponto Referencia

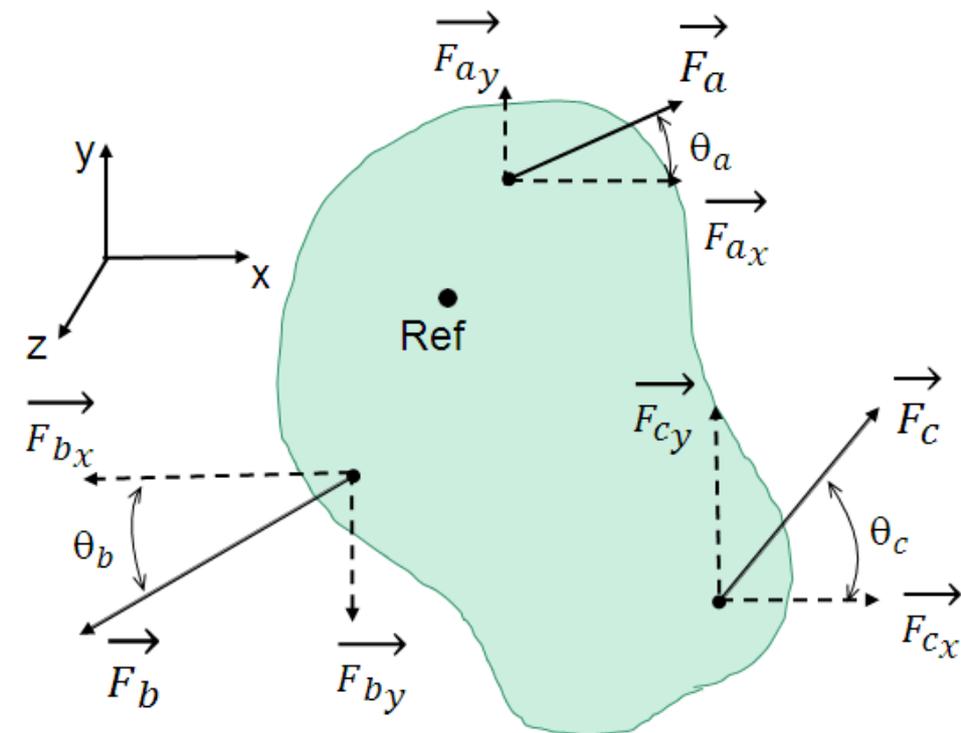
$\sum \vec{F}_{ref} = 0$ ➤ Como: $\vec{F}_b = 2 \cdot \vec{F}_a$
 $\vec{F}_c = 3/2 \cdot \vec{F}_a$

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

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

$\sum \vec{F}_{ref_x} = 0 \quad \rightarrow X(+)$

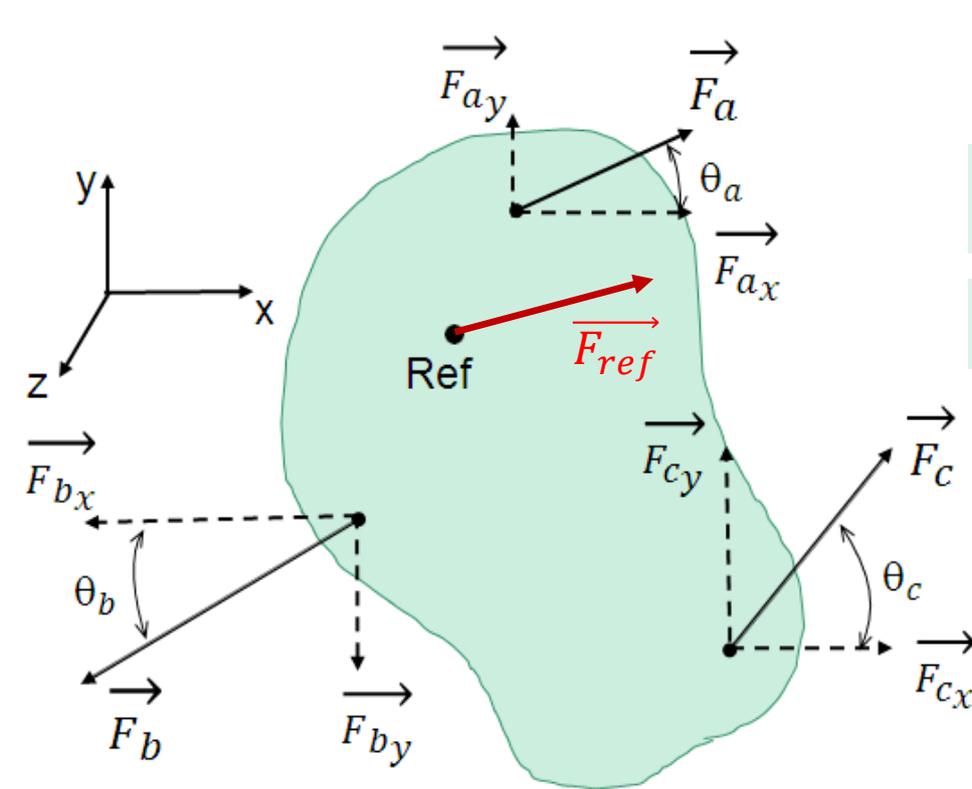
$\sum \vec{F}_{ref_x} = \vec{F}_a \cdot \cos \theta_a + \vec{F}_c \cdot \cos \theta_c - \vec{F}_b \cdot \cos \theta_b = 0$
 $\sum \vec{F}_{ref_x} = \vec{F}_a \cdot \cos \theta_a - 2 \vec{F}_a \cdot \cos \theta_b + (3/2) \vec{F}_a \cdot \cos \theta_c = 0$





Exemplo

- Determine os esforços resultantes no ponto Referencia



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

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

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

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

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



Exemplo

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

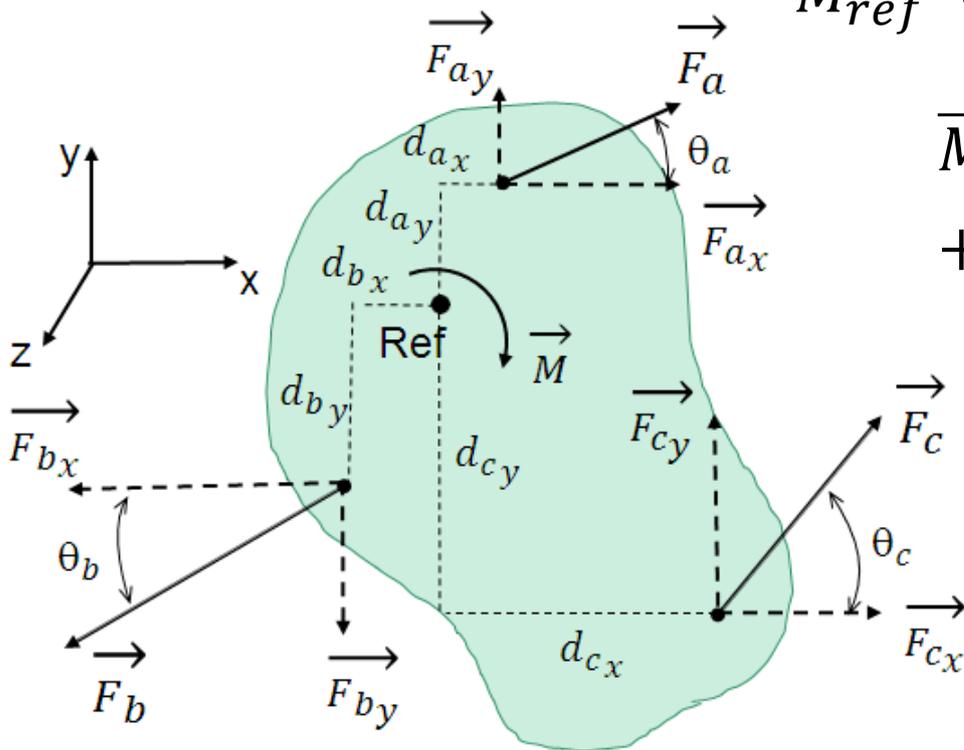
$$\sum_{Ref} \vec{M}_n = 0$$



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

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

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

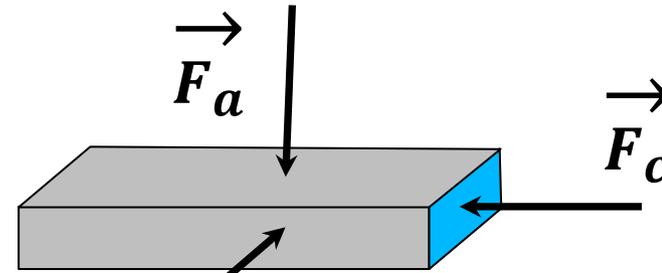




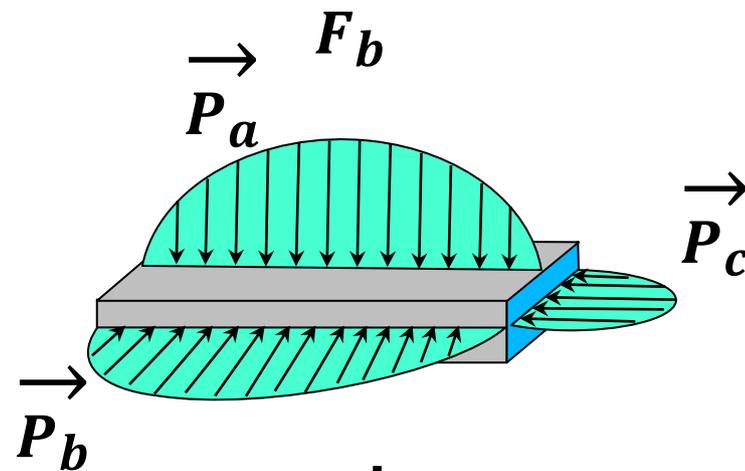
Carregamentos

➤ Forças

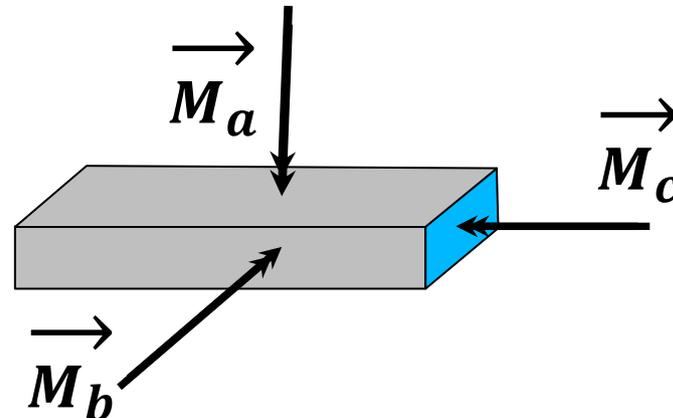
- Concentrados



- Distribuídos



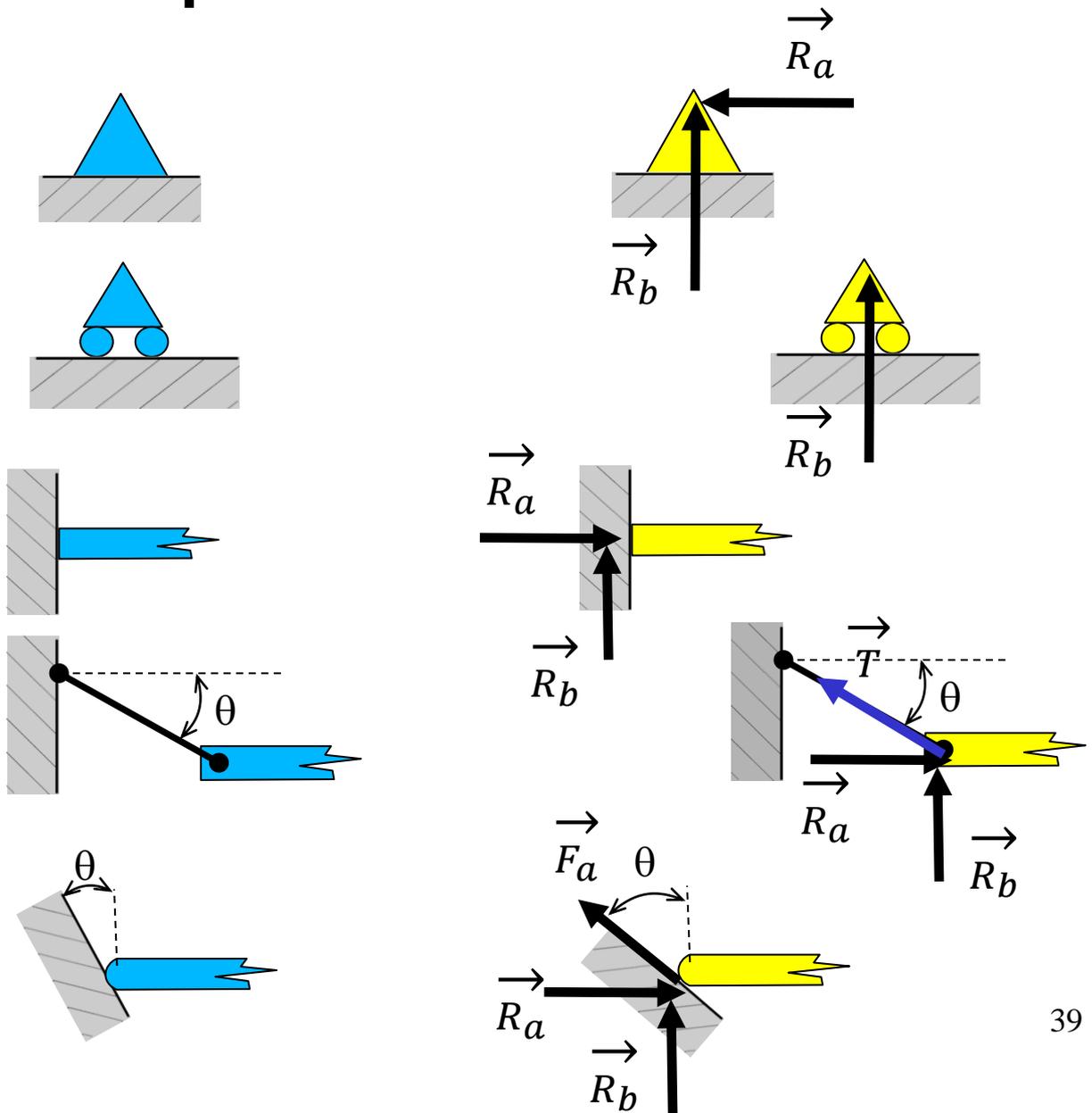
➤ Momentos





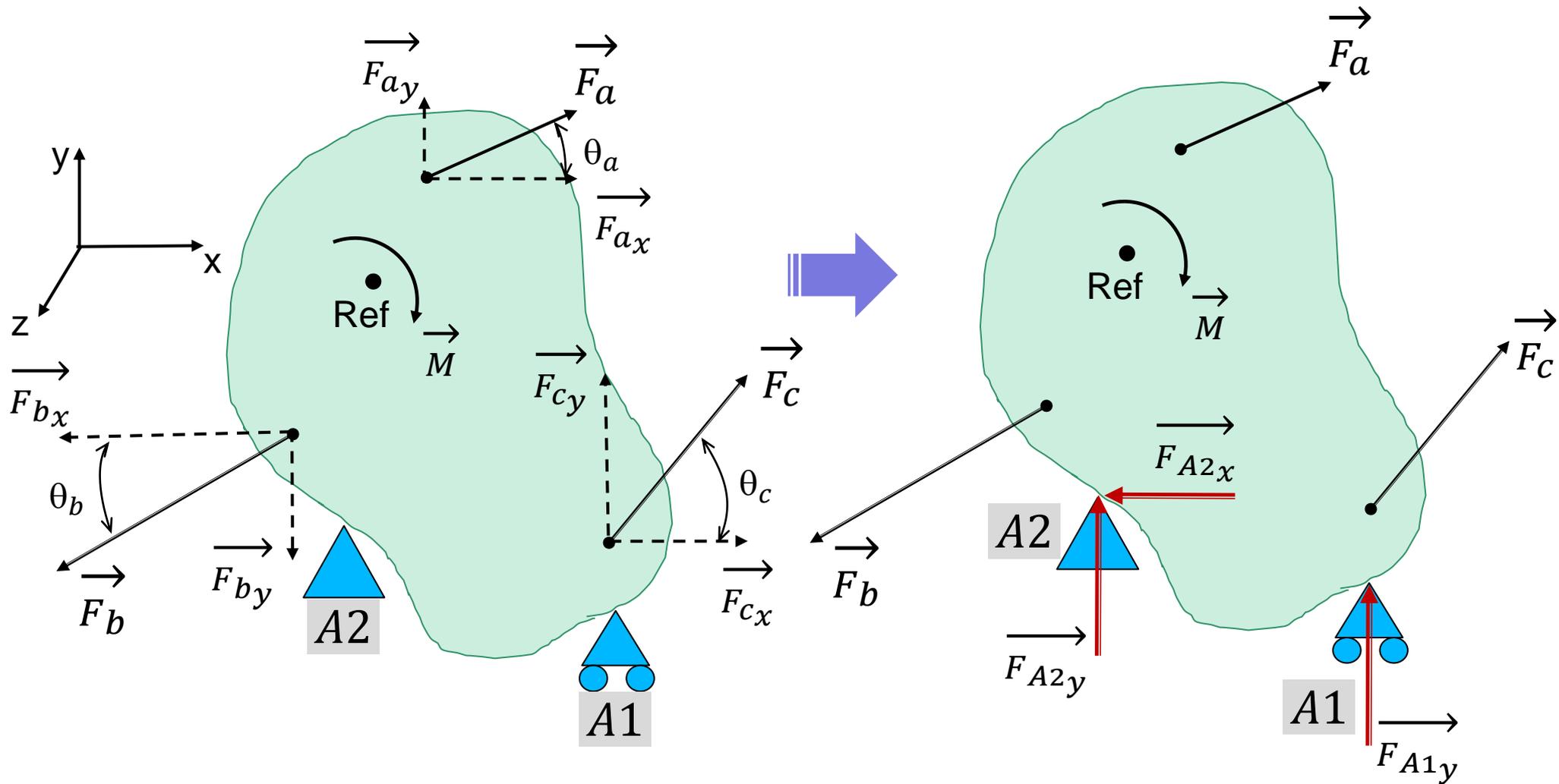
Apoios

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



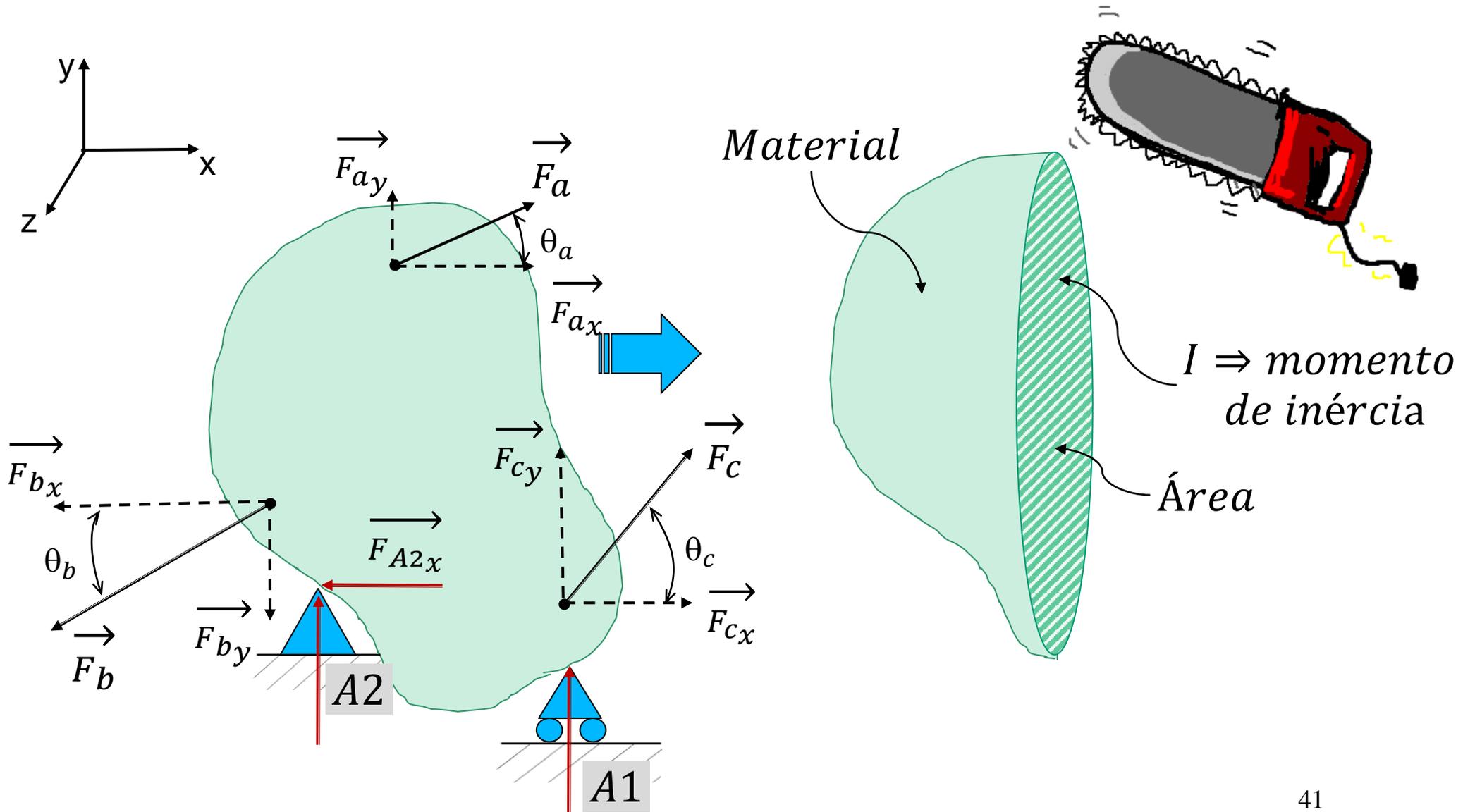


Apoios e reações



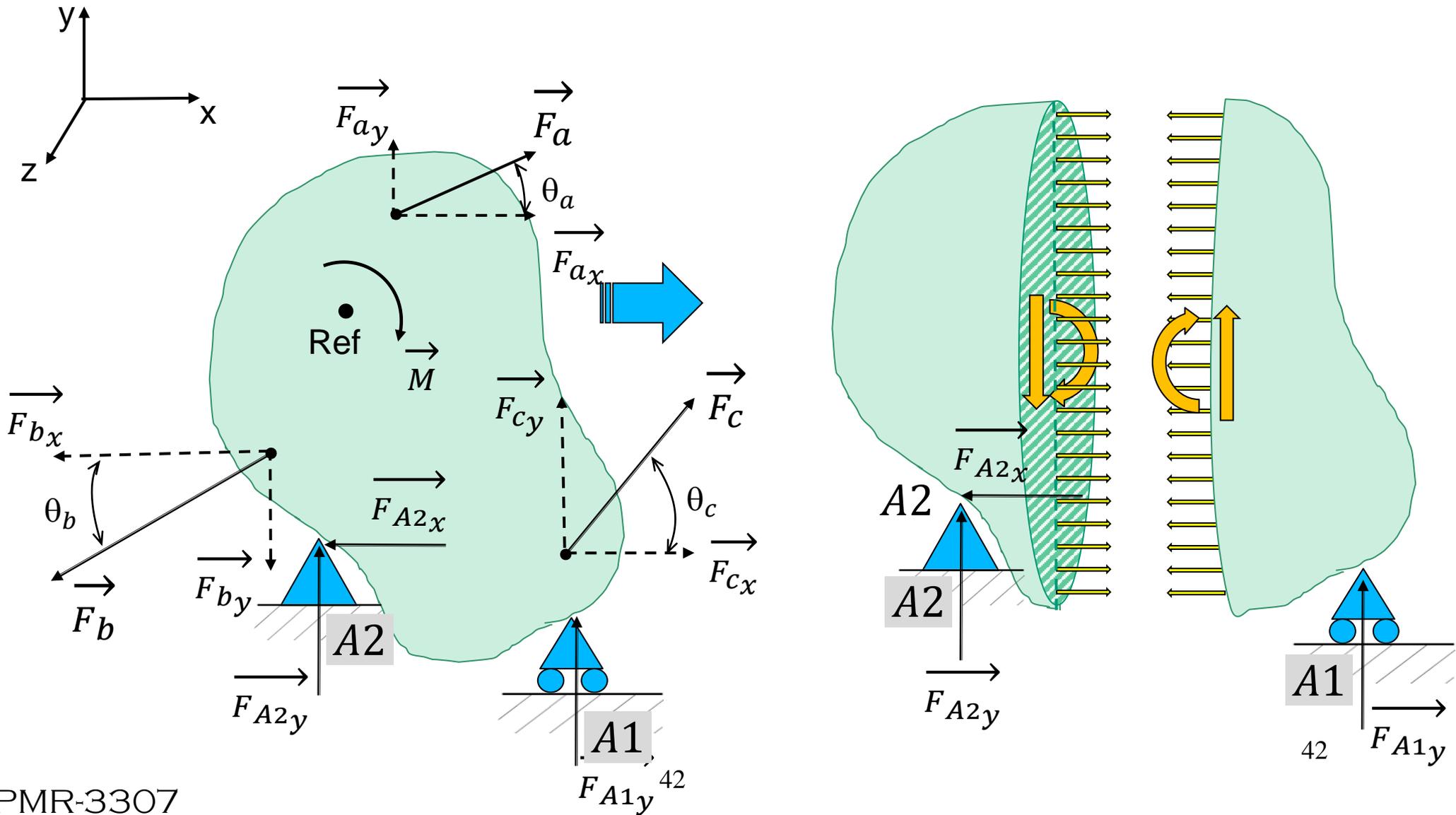


Apoios, reações e modelo de viga



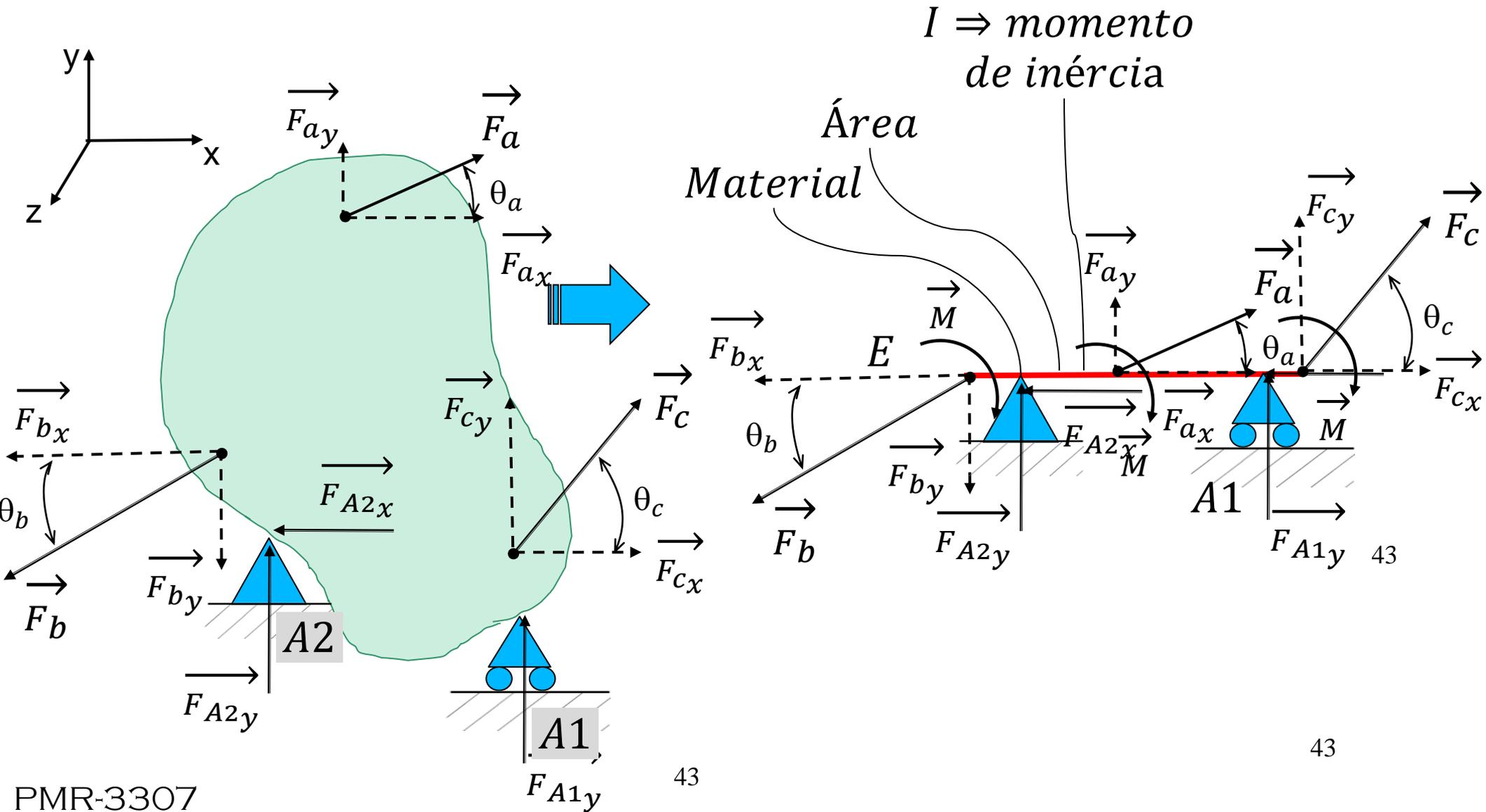


Apoios, reações e esforços internos



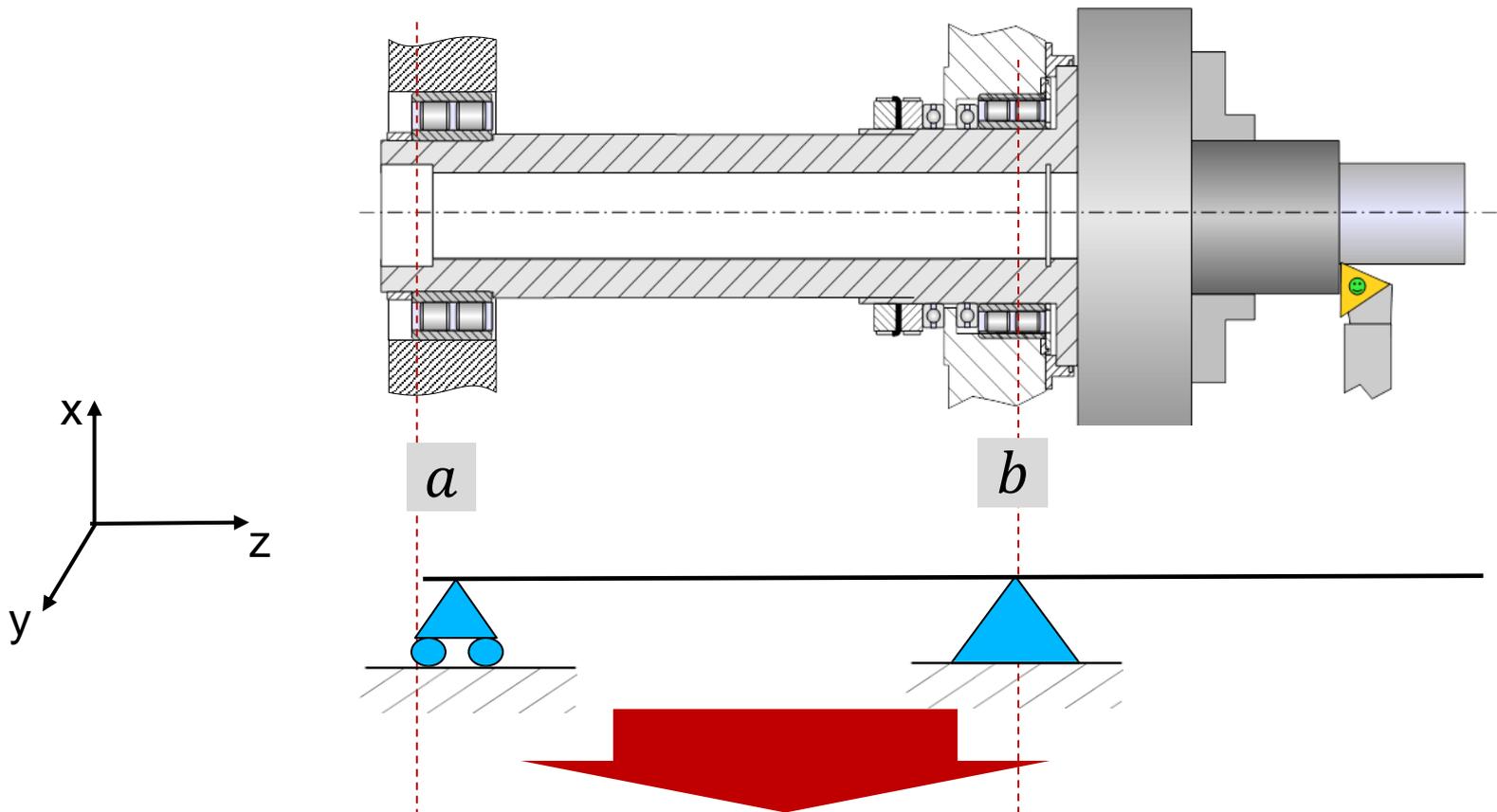


Apoios, reações e modelo de viga





No projeto

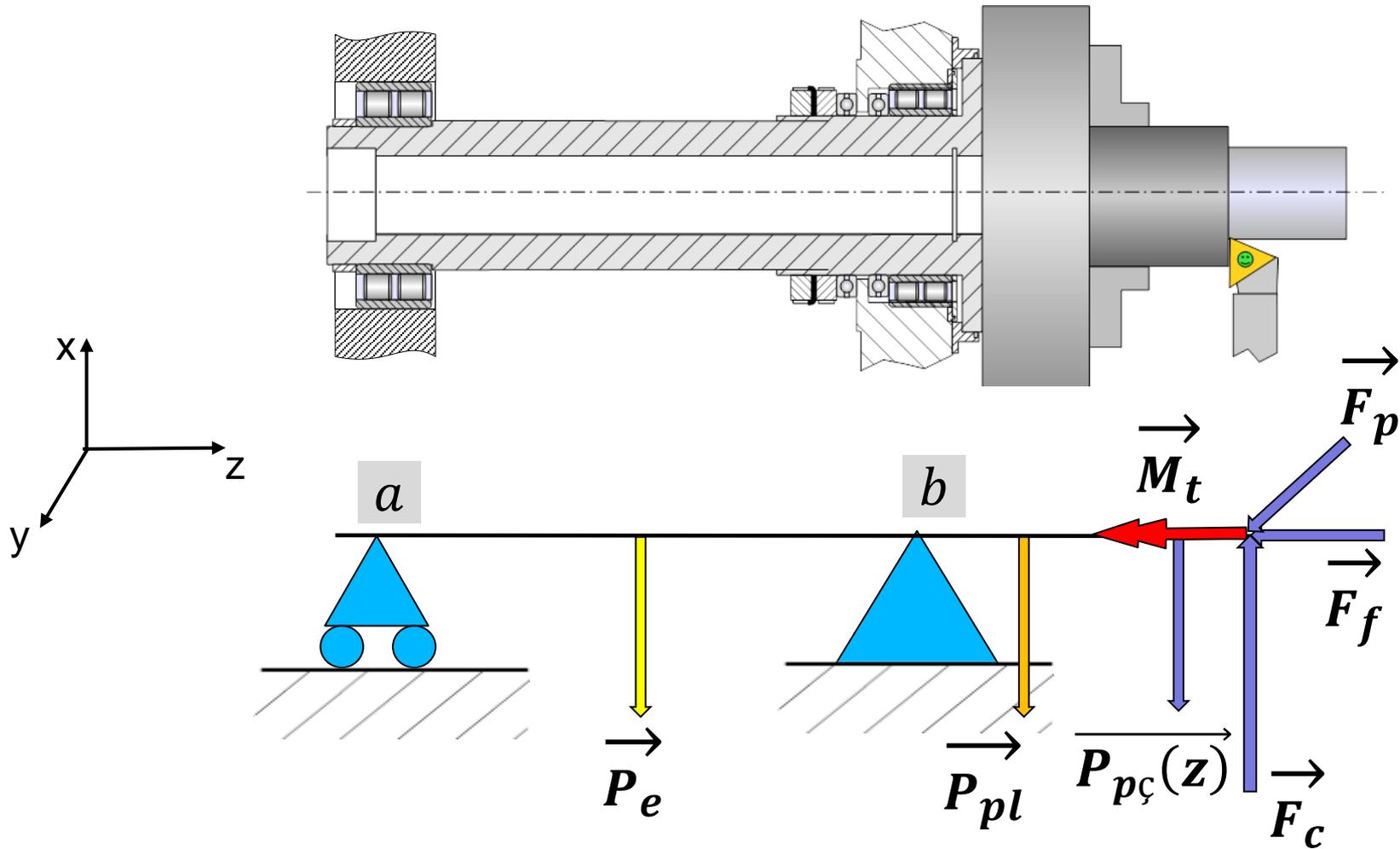


$$\overline{F}_{ref} = \sqrt{(\overline{F}_{ref_x})^2 + (\overline{F}_{ref_y})^2}$$

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

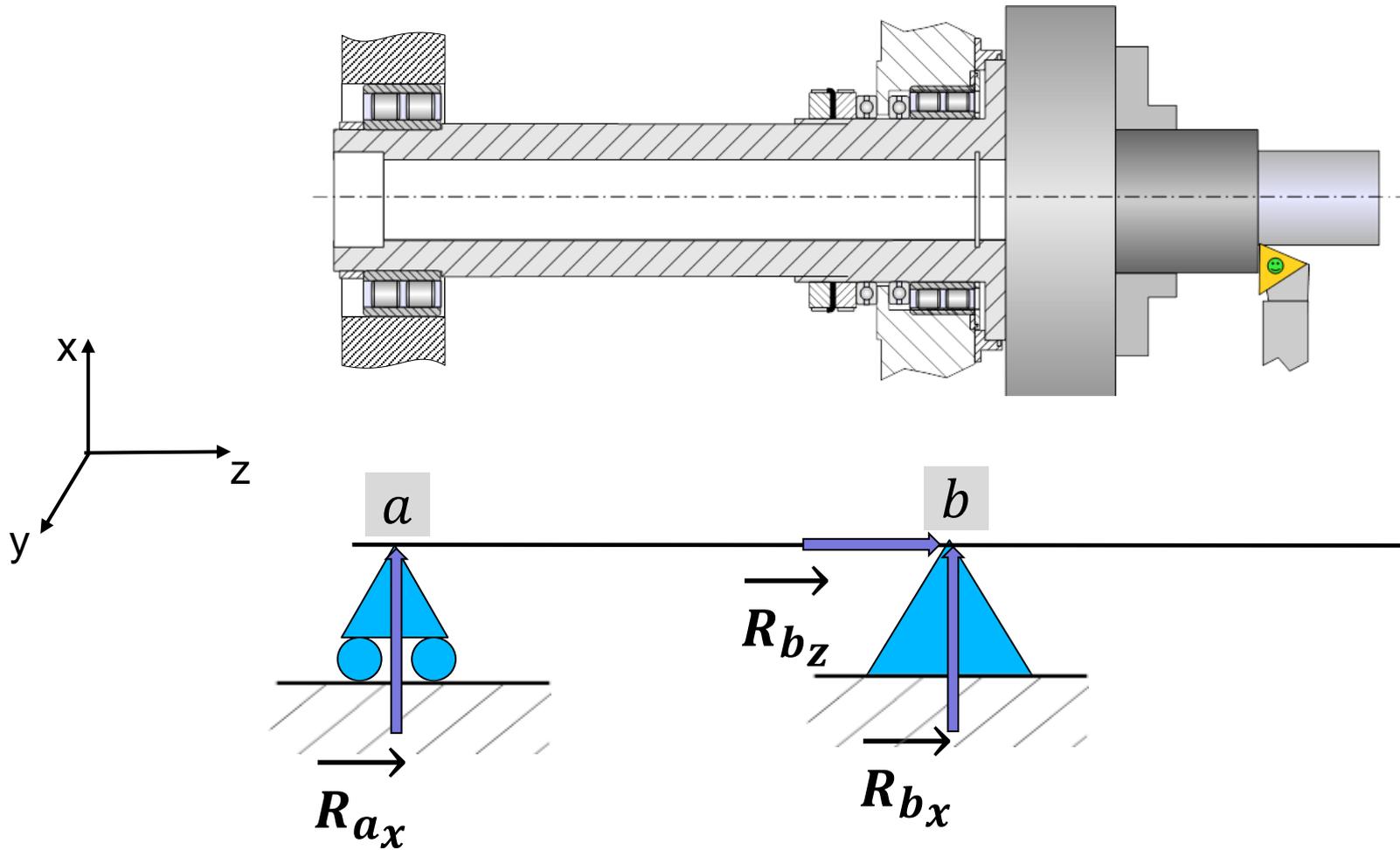


Forças e momentos atuantes





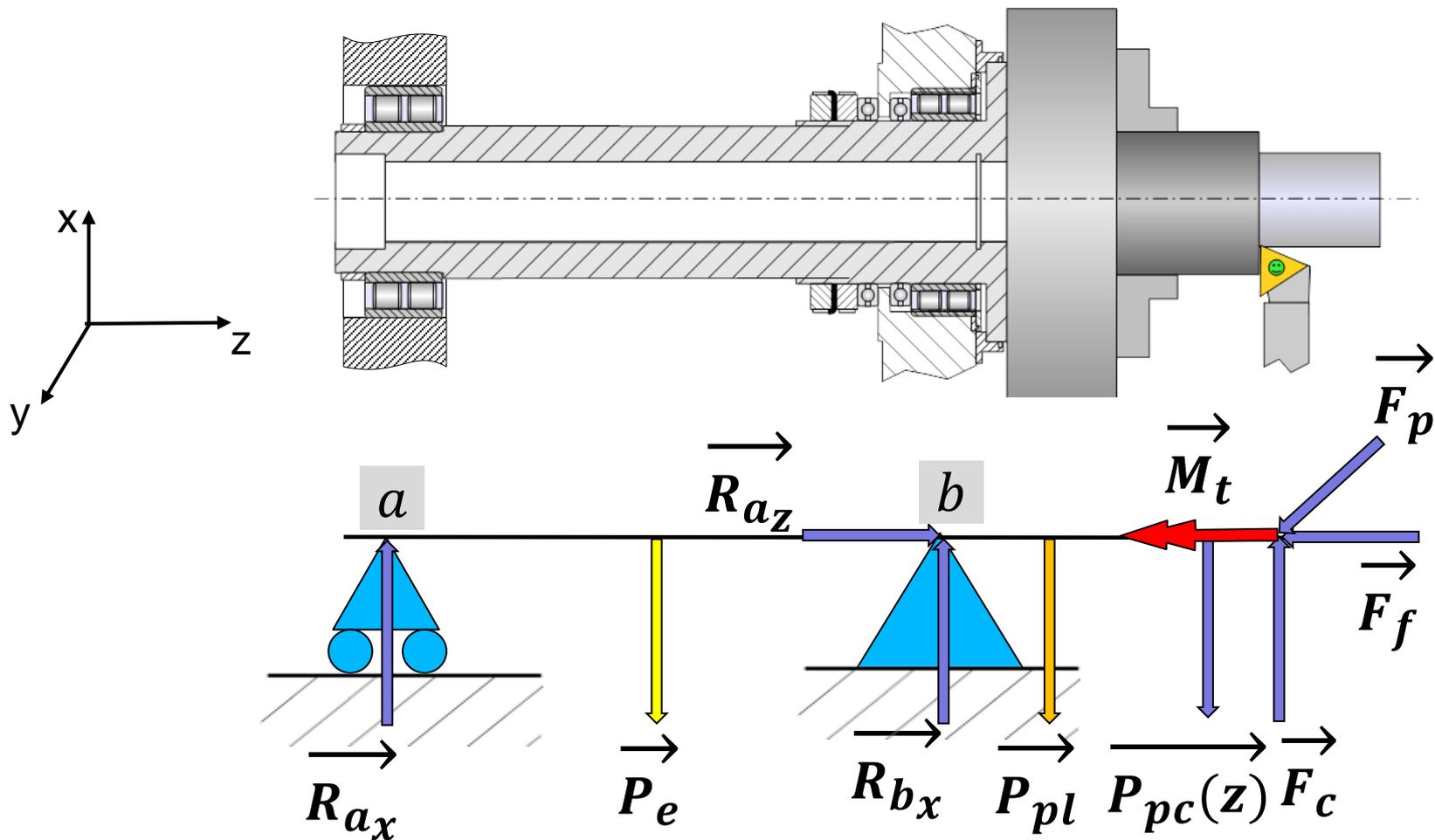
Reações - Bidimensional -





Diagramas de corpo livre

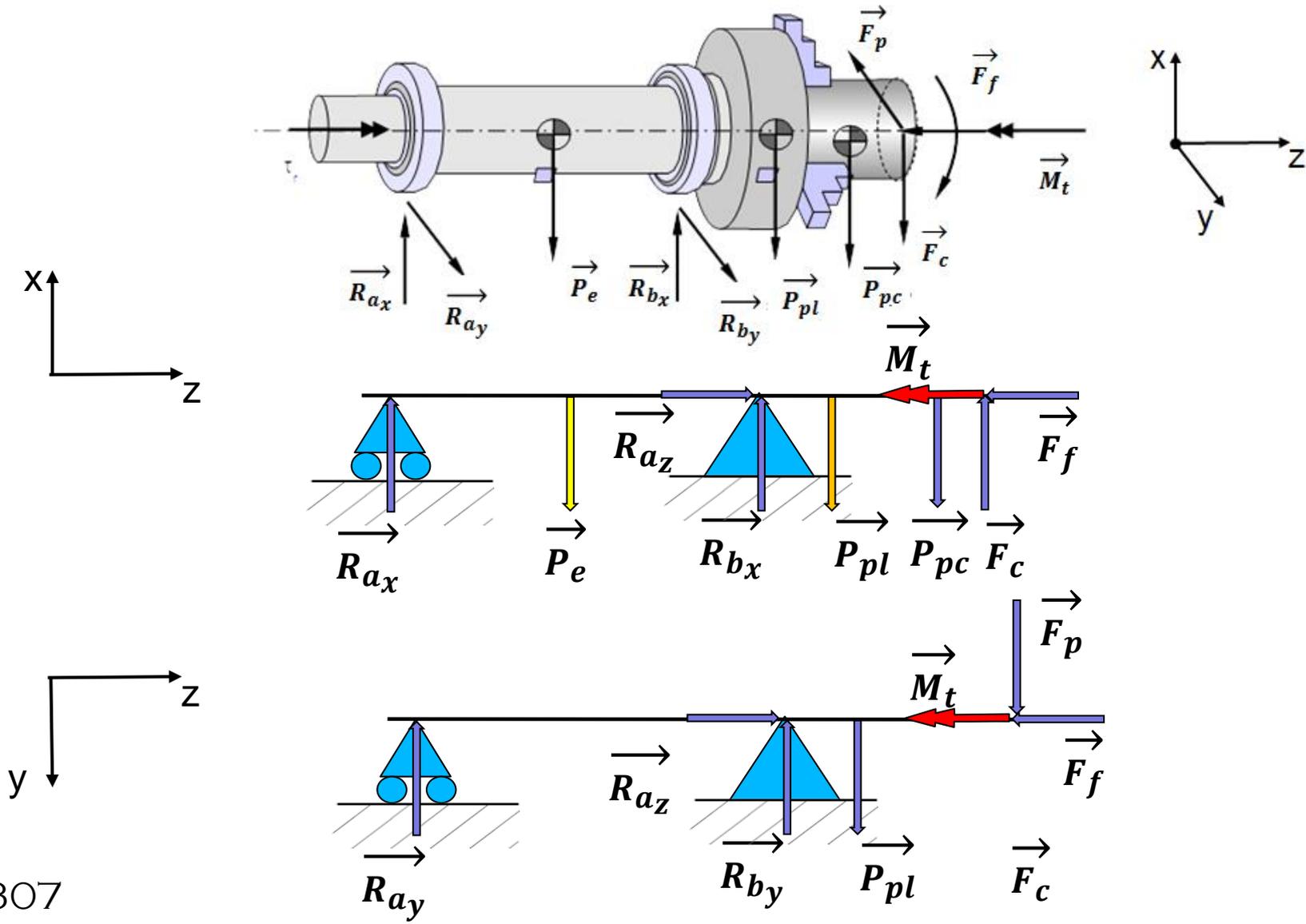
- Bidimensional -





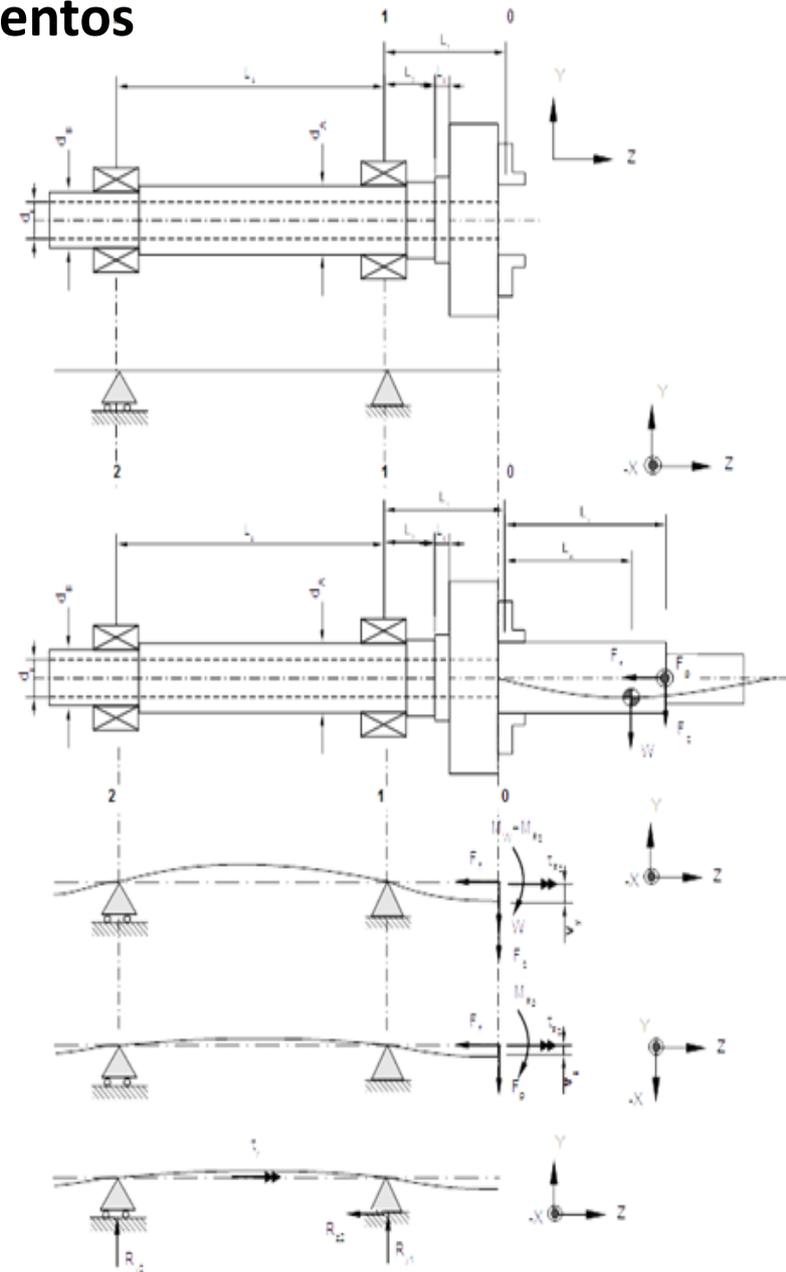
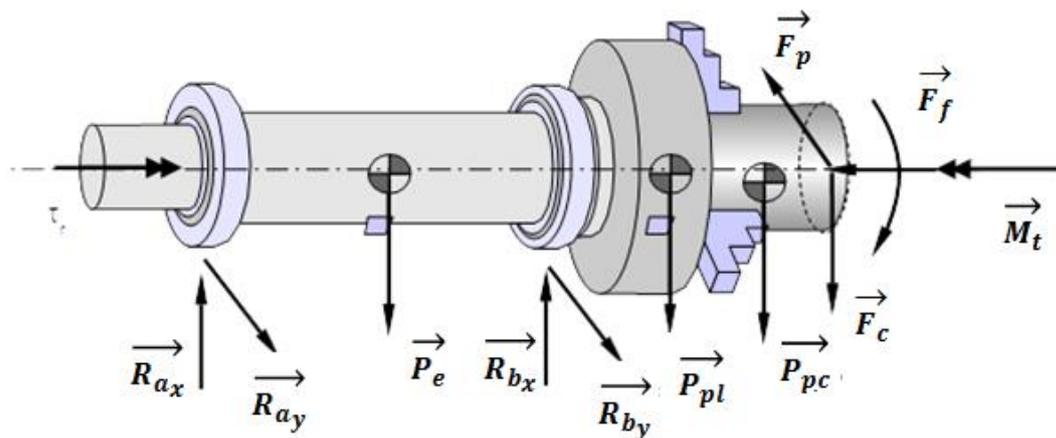
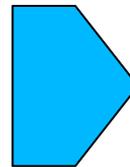
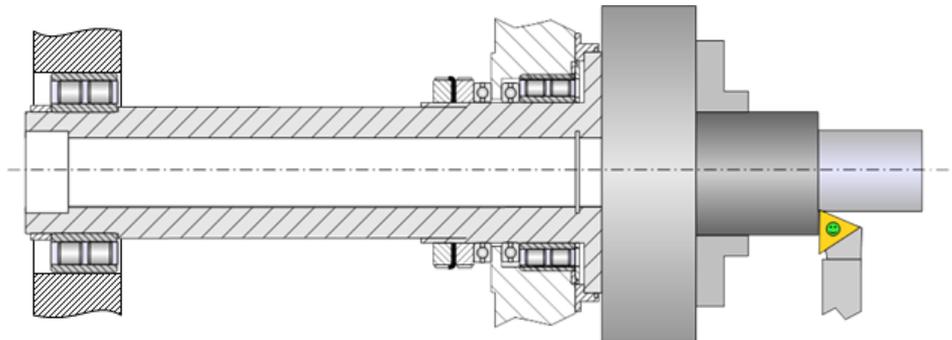
Diagramas de corpo livre

- Tridimensional -





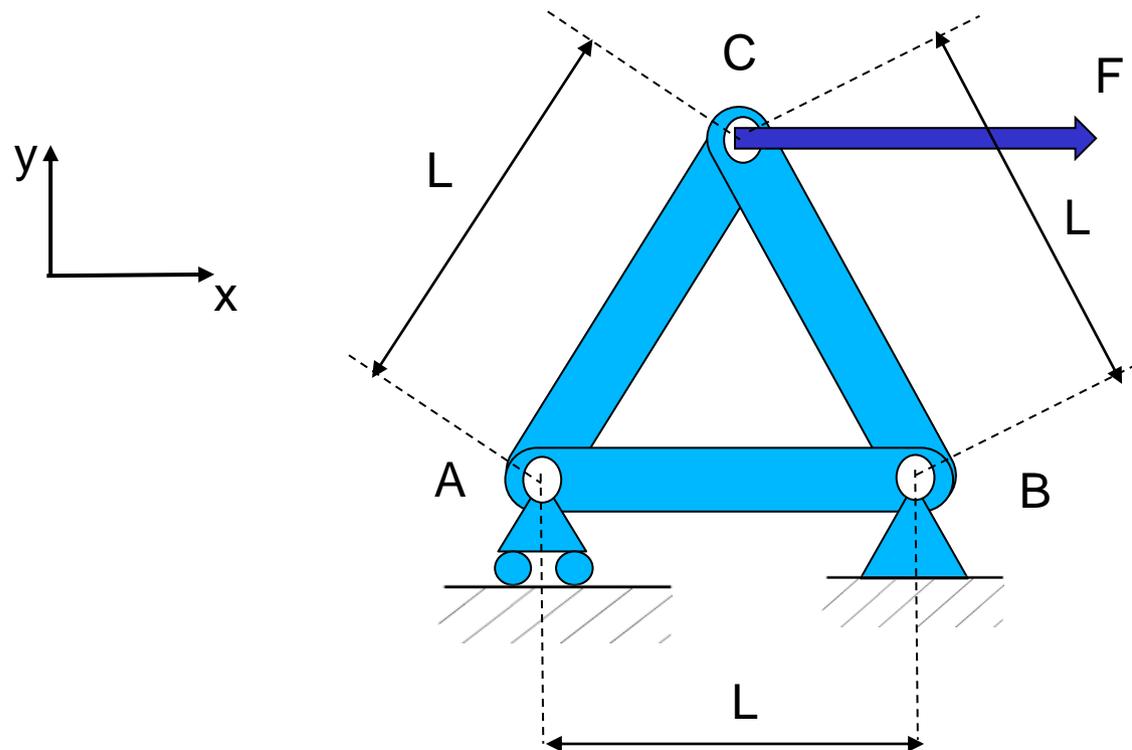
Carregamentos





Estado de tensão geral sobre um elemento

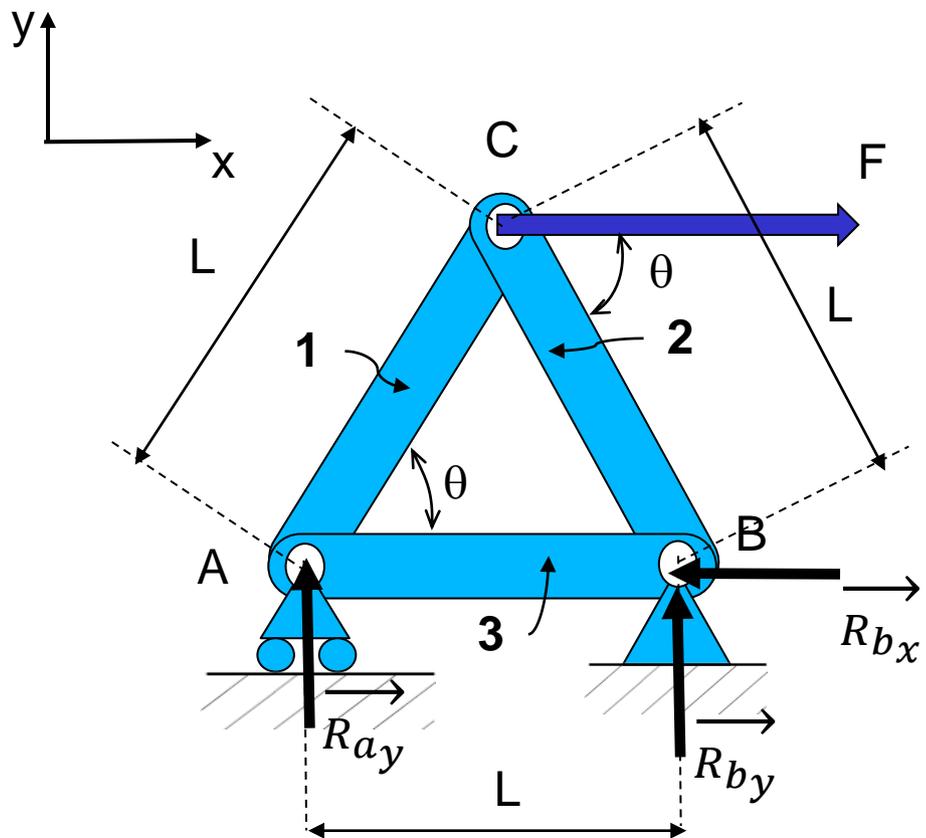
- Desenvolvendo as equações de equilíbrio estático para o corpo rígido abaixo





Estado de tensão geral sobre um elemento

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



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

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

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

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

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

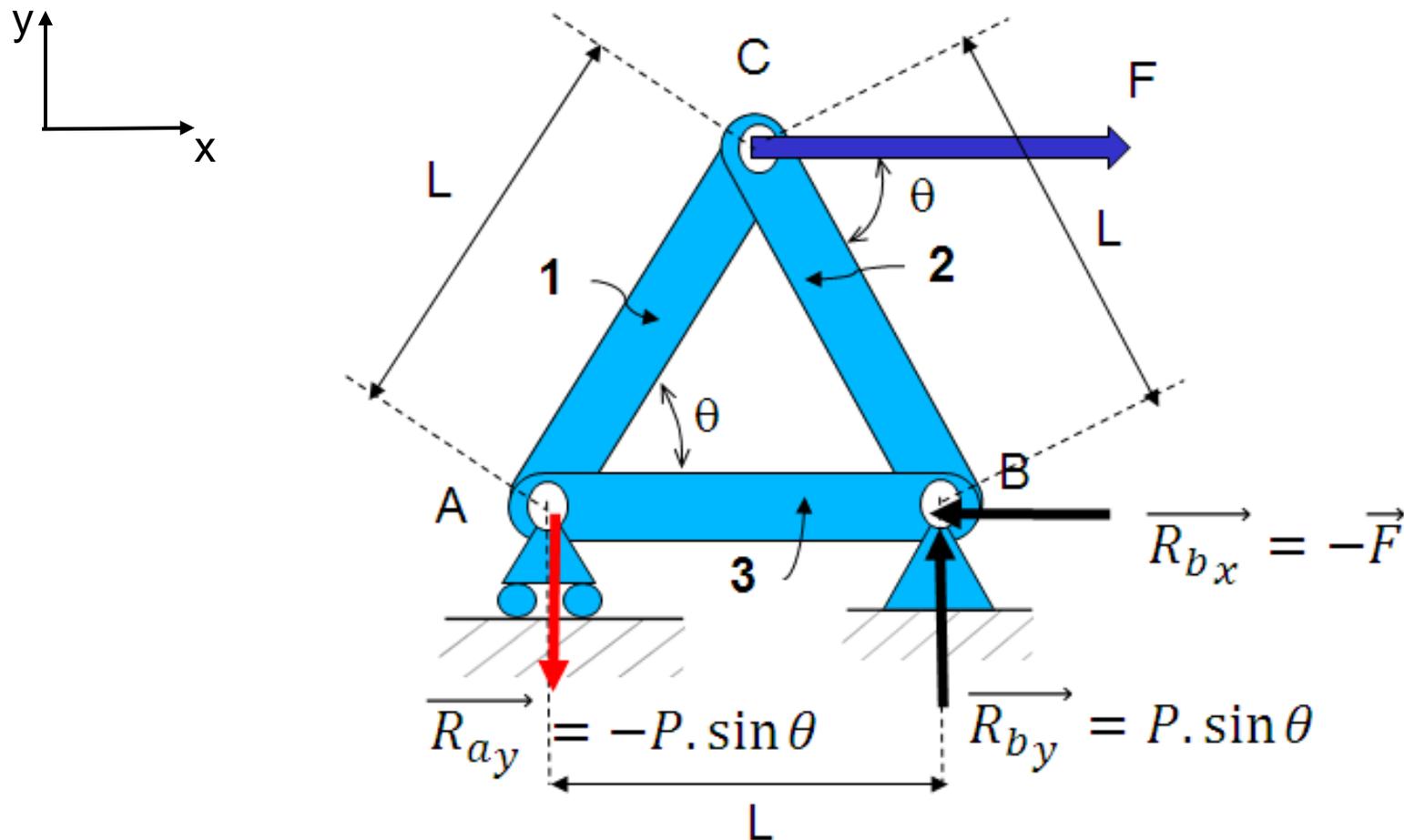
$$\sum \vec{M}_A = 0 \quad \vec{R}_{by} \cdot L + \vec{F} \cdot \sqrt{\left(\frac{3}{4}L^2\right)} = 0$$

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



Estado de tensão geral sobre um elemento

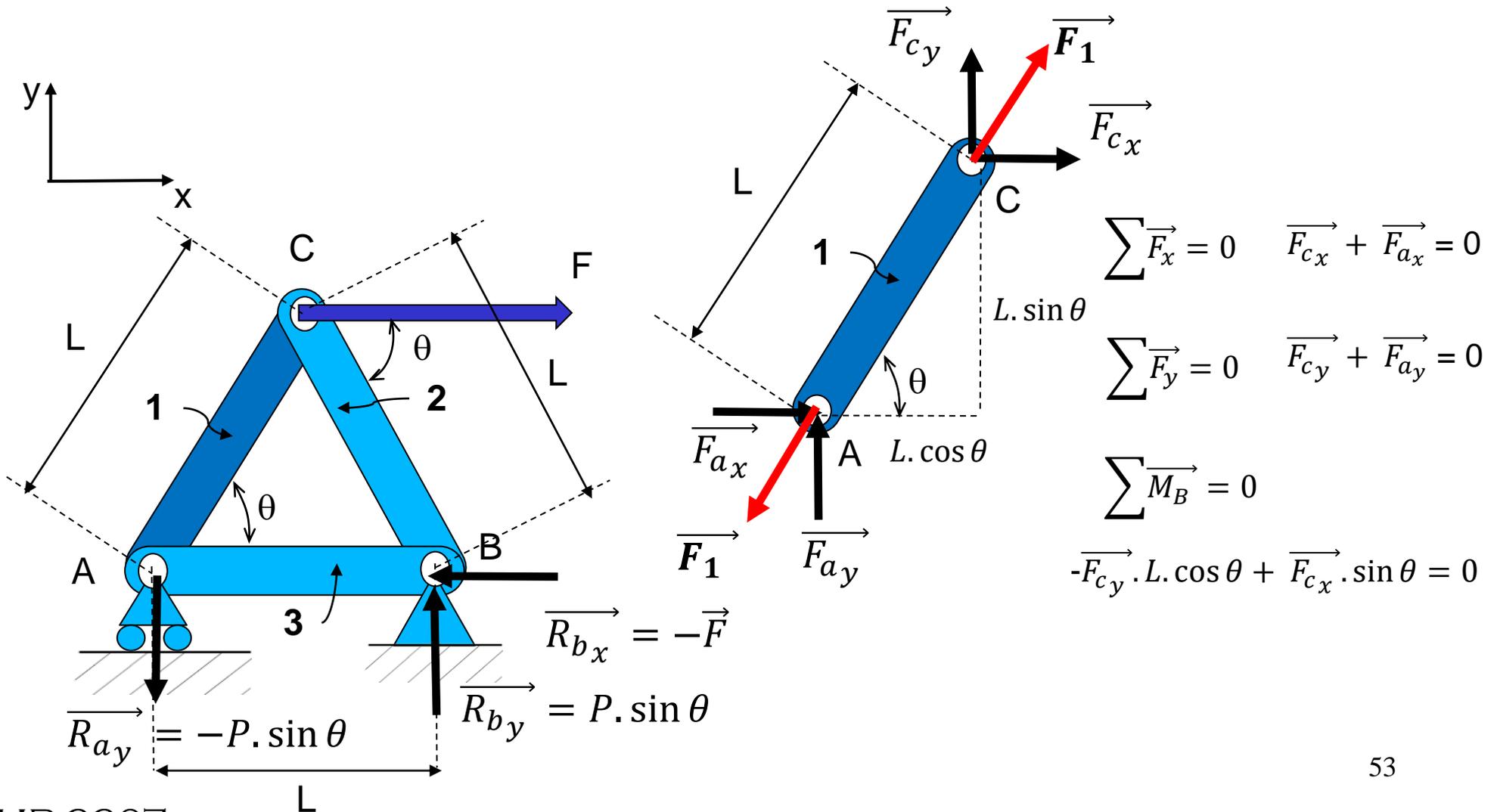
- Desenvolvendo as equações de equilíbrio estático para o corpo rígido abaixo





Resultantes Internas

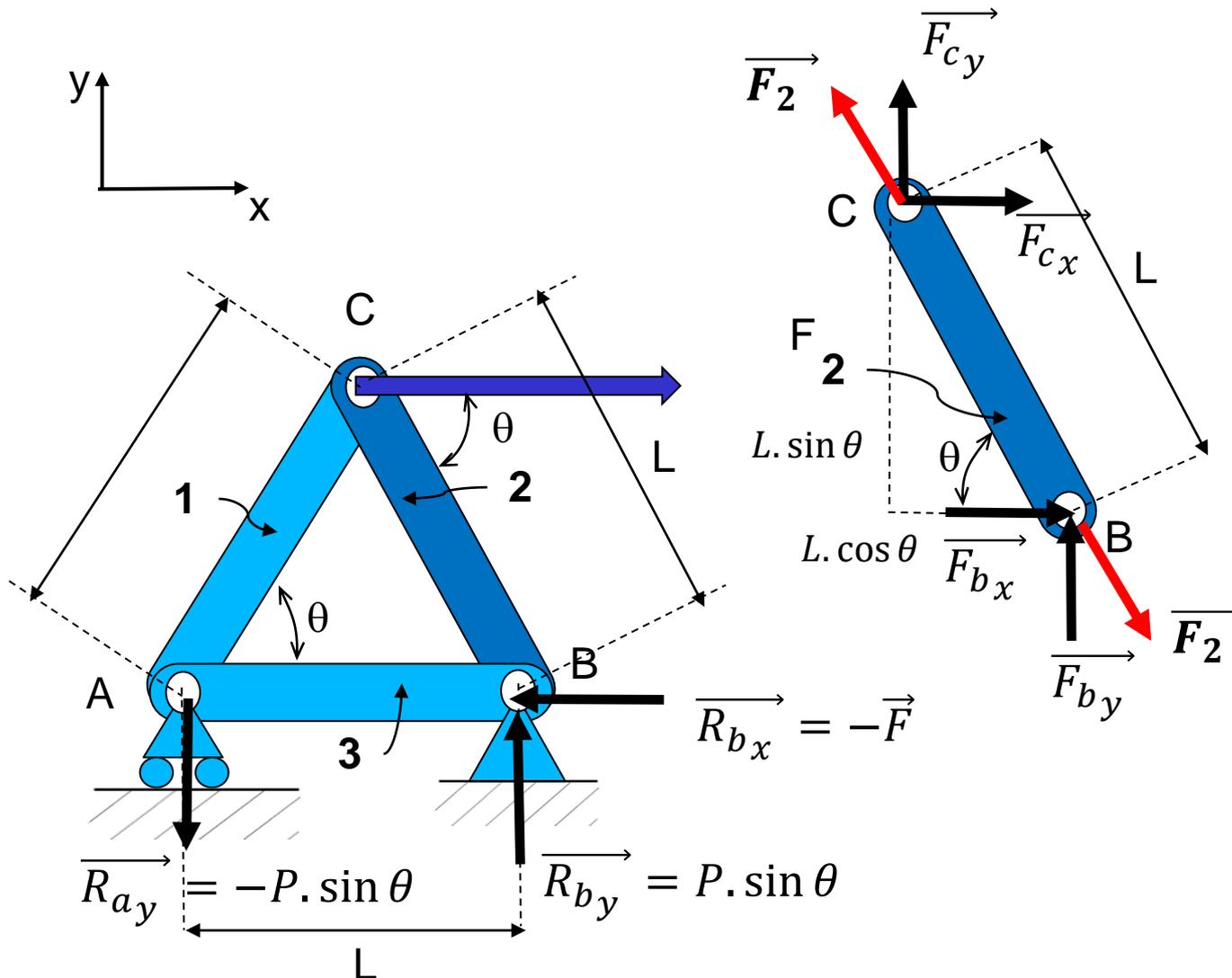
Análise individual dos esforços





Resultantes Internas

Análise individual dos esforços



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

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

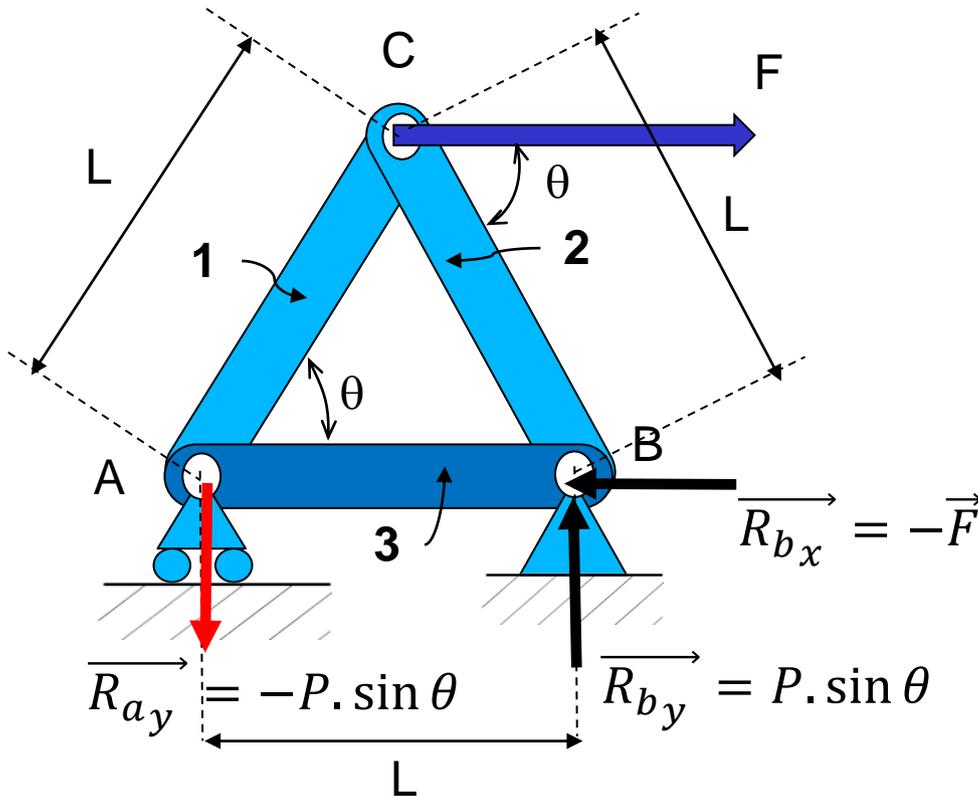
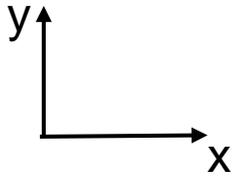
$$\sum \vec{M}_B = 0$$

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



Resultantes Internas

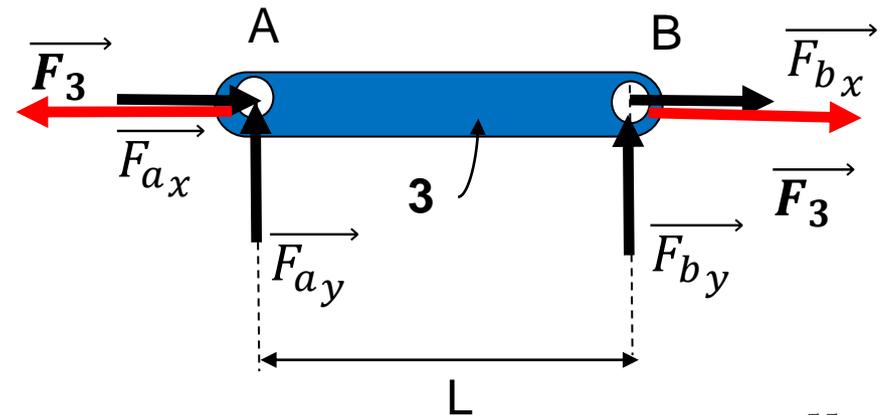
Análise individual dos esforços



$$\sum \vec{F}_x = 0 \quad \vec{F}_{c_x} + \vec{F}_{a_x} = 0$$

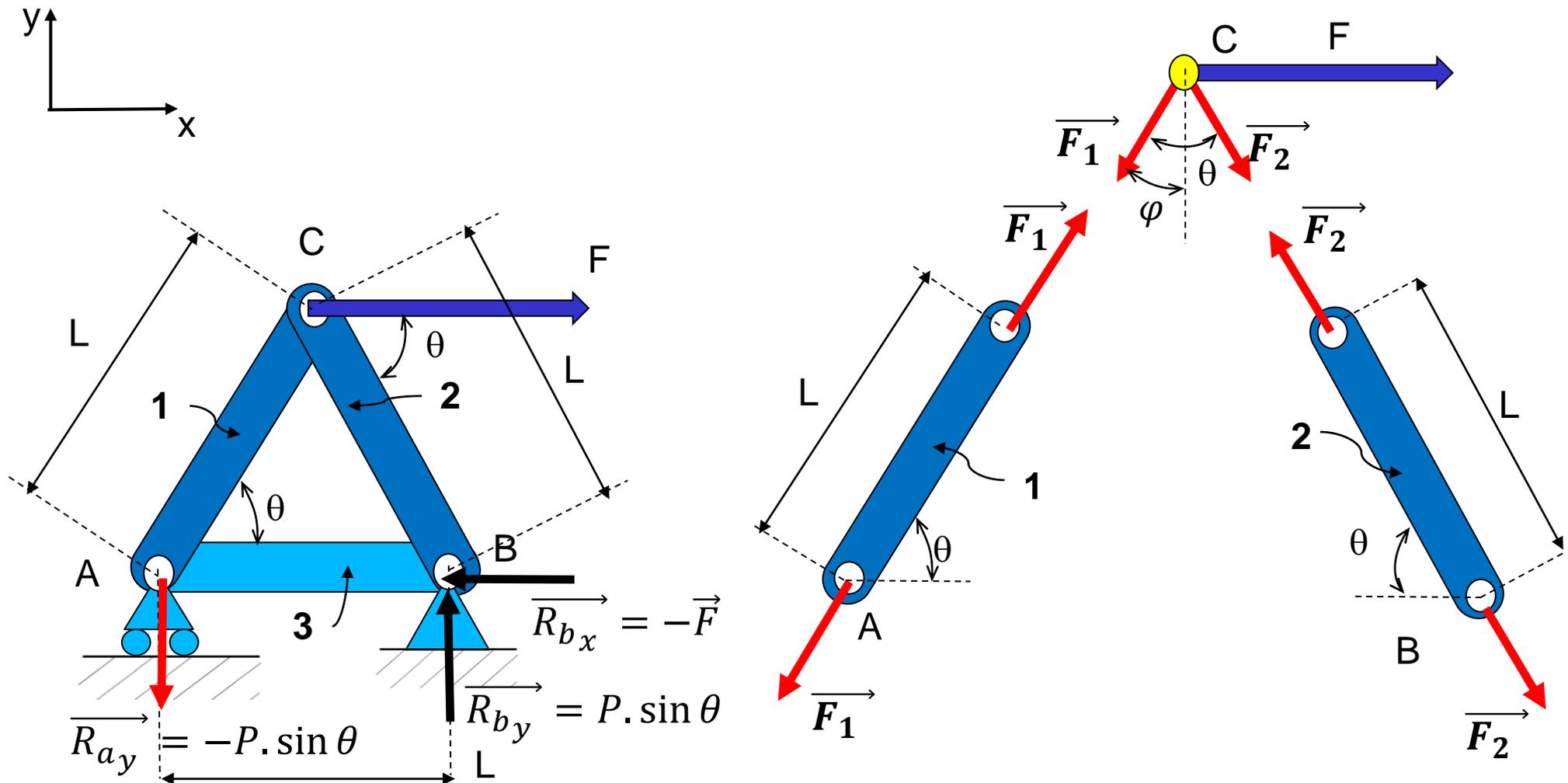
$$\sum \vec{F}_y = 0 \quad \vec{F}_{c_y} + \vec{F}_{a_y} = 0$$

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





Esforços combinados (\neq Tensões combinadas)





Esforços combinados

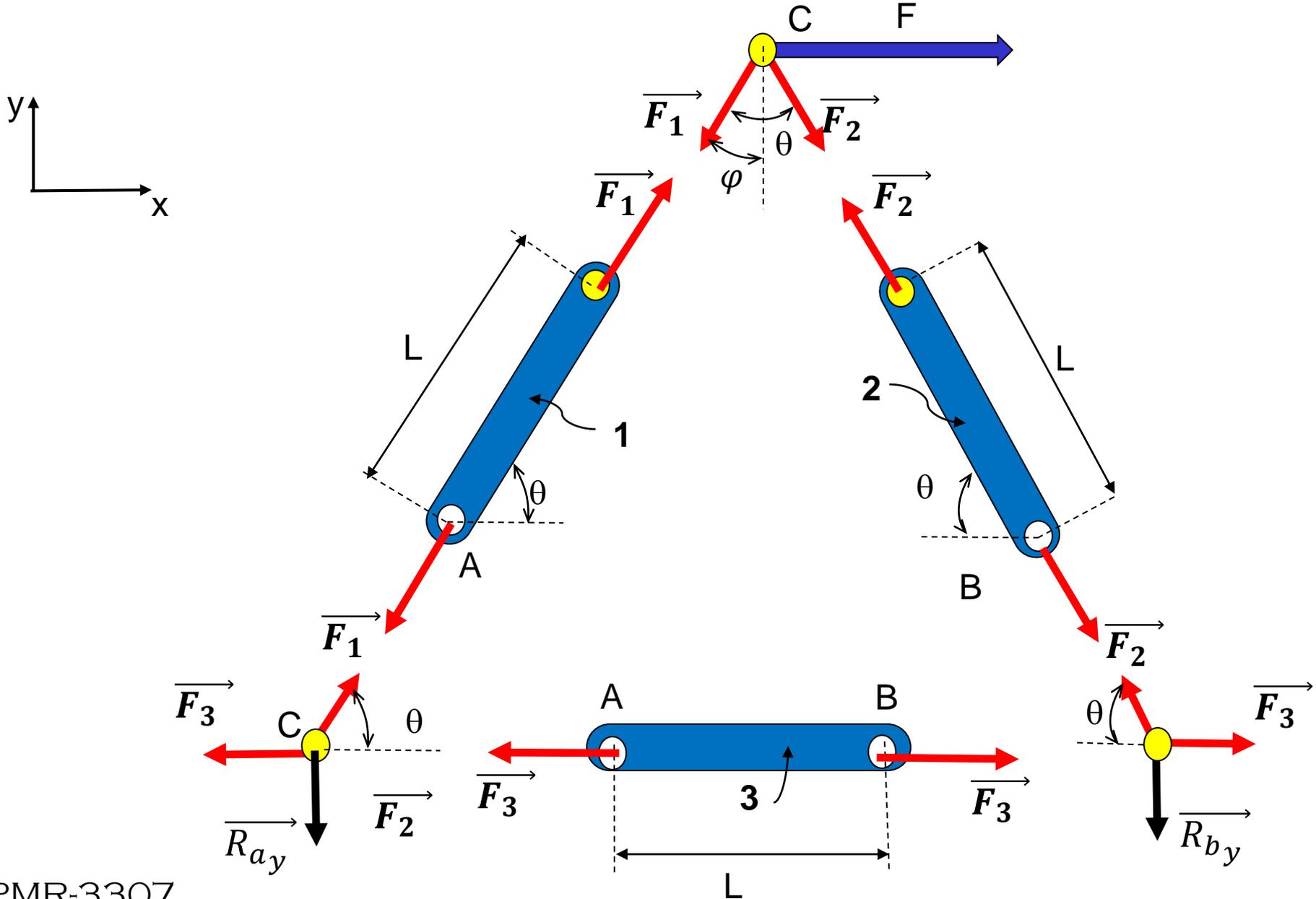
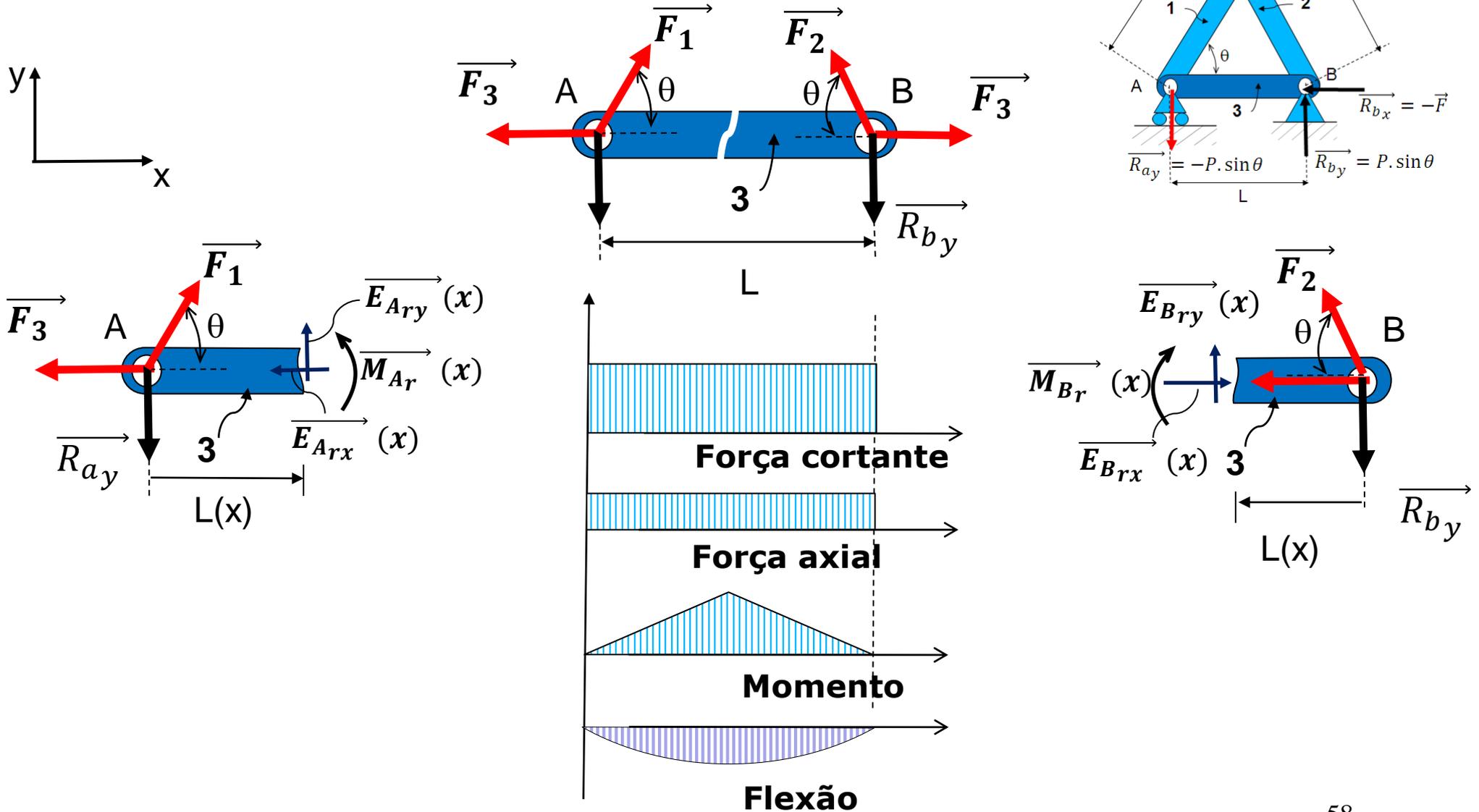


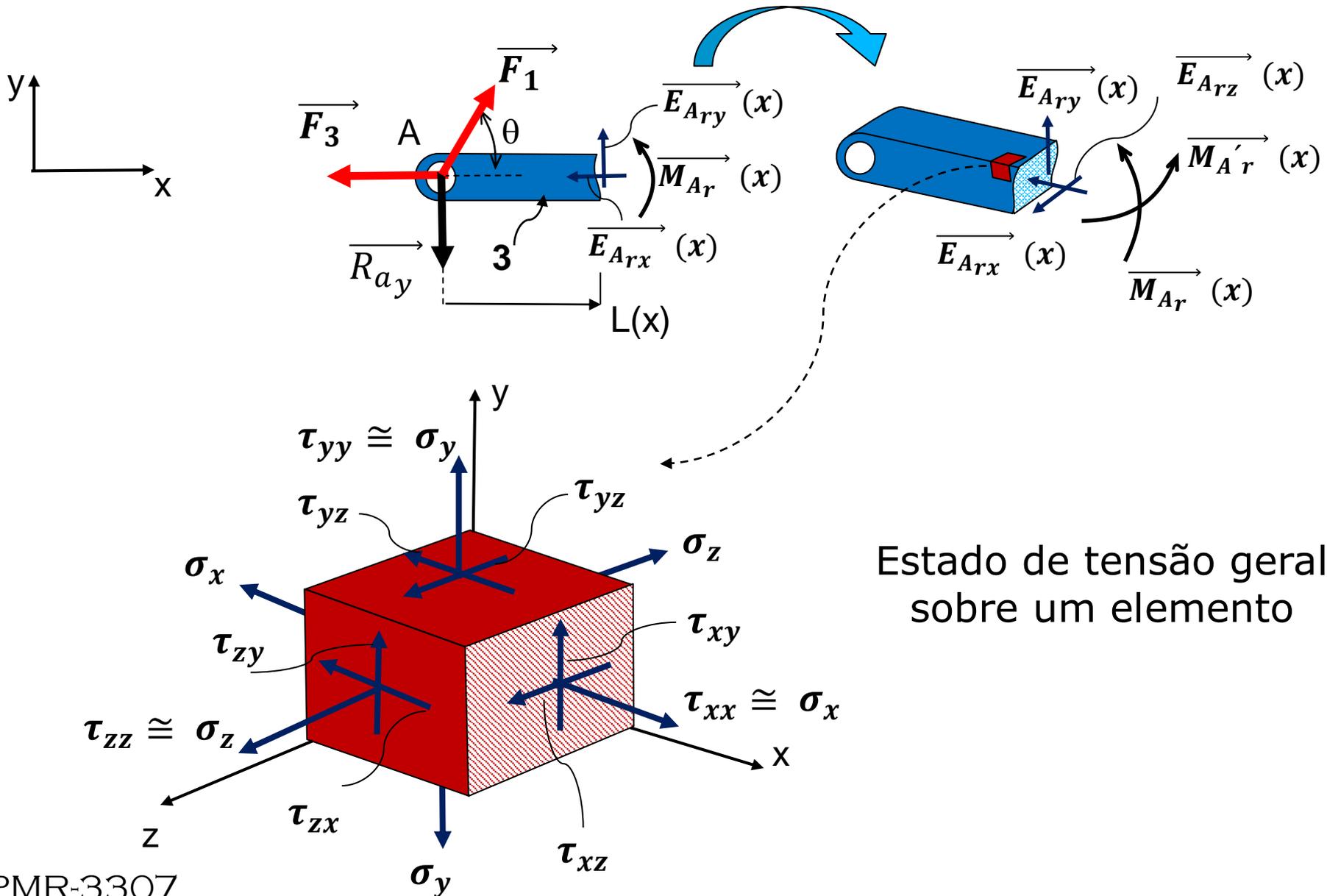


Diagrama de Esforços



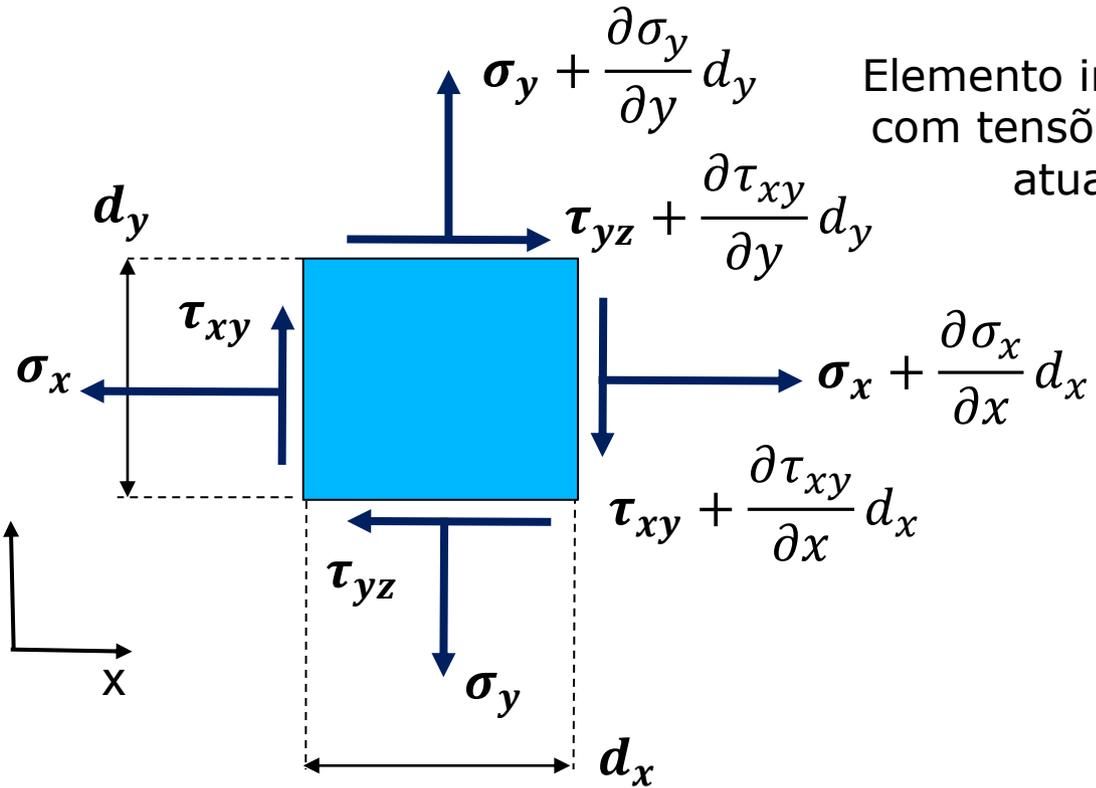
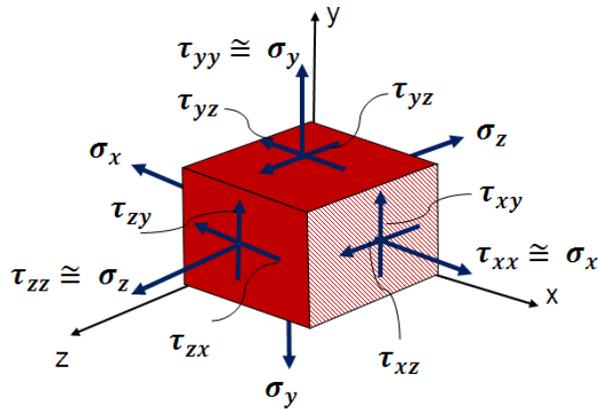


Estado de tensão geral sobre um elemento





Equações diferenciais de equilíbrio



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

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

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

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



FIM DA AULA 01