



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](mailto:getnic@gmail.com) / [rodrigo.stoeterau@usp.br](mailto: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

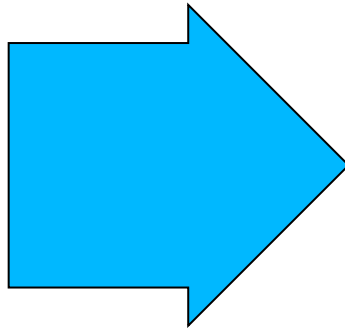


Módulo 5 –Seminários

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

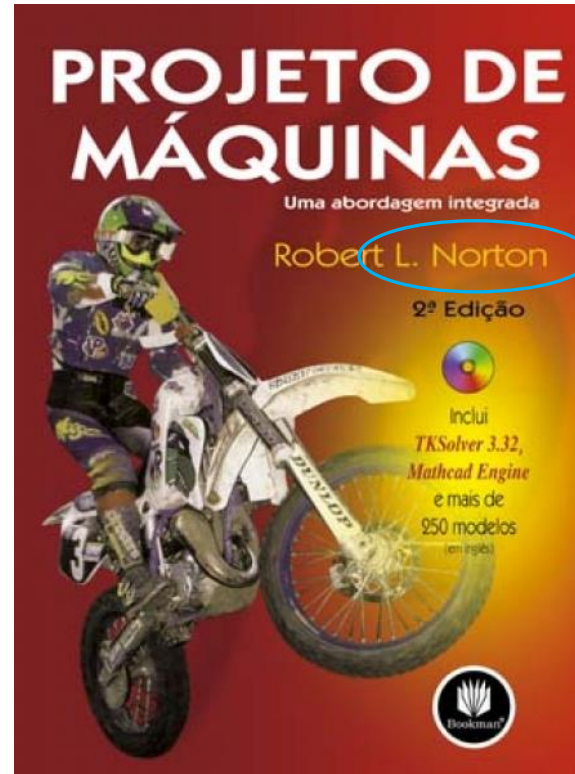
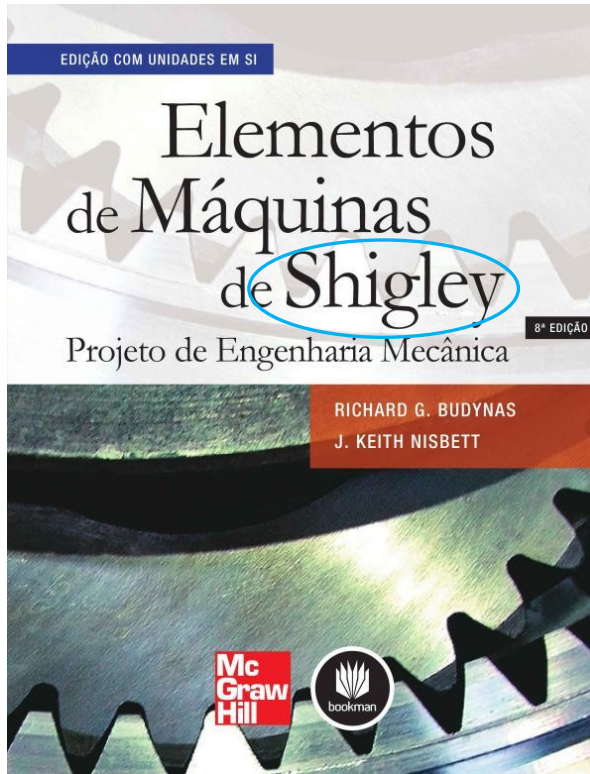


## Cronograma de aulas

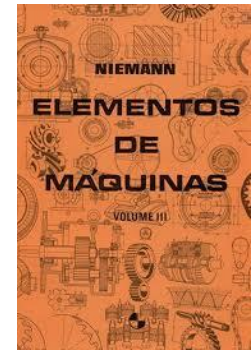
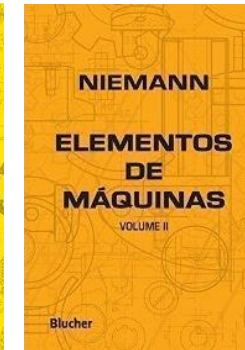
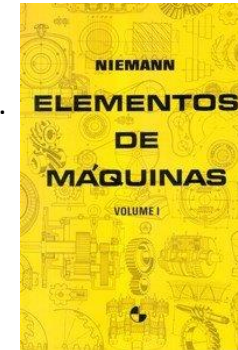
Dia	S	Aula	Tópico	Prof.
18.08	3ª	A1	<b>Introdução a disciplina</b> Modelagem, carregamento e equilíbrio	RS
21.08	6ª	A2	Comportamento mecânico dos materiais	RS
25.08	3ª	A3	Composição de tensões Estado plano de tensões – Círculo de Mohr	RS
28.08	6ª	A4	Teorias de Falha: 1) Falha por deformação excessiva; 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	---	<b>Feriado municipal – Consciência Negra</b>	
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		<b>Encerramento do semestre 2020-2</b>	



## 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 menu items: PRODUCTS, SOLUTIONS, SERVICES, PART, and ABOUT ANSYS. A red arrow points to the 'SERVICES' menu item. Below the navigation bar are four product tiles: 'Discovery Live Student', 'Discovery AIM Student', 'Ansys Student', and 'Ansys SCADE Student'. The 'Ansys Student' tile is highlighted with a red arrow pointing to it from above. Each tile has a red 'X' over it and 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

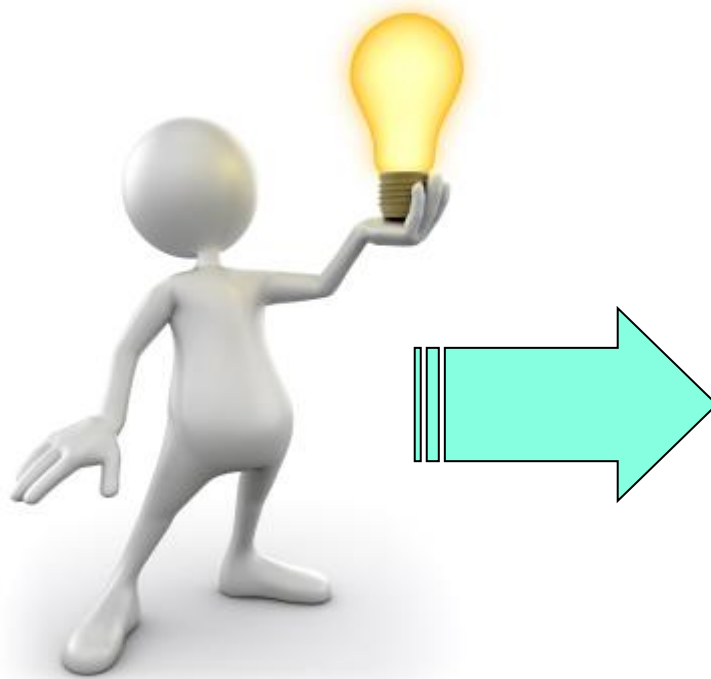


# Introdução

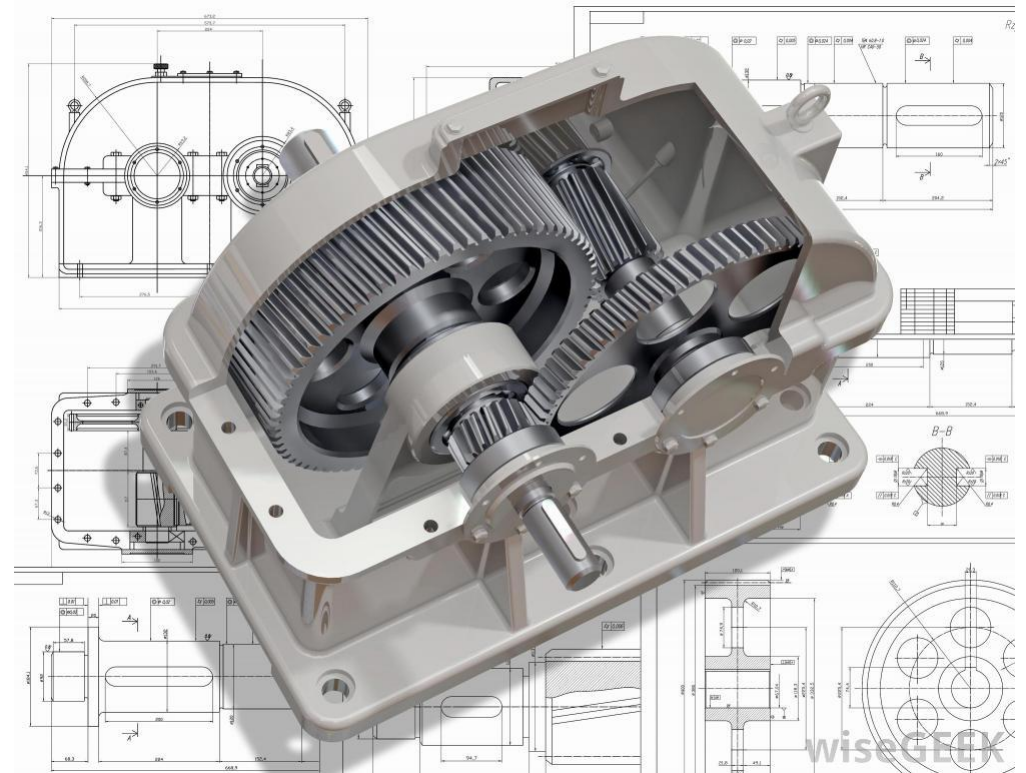




## Processo de desenvolvimento de produto



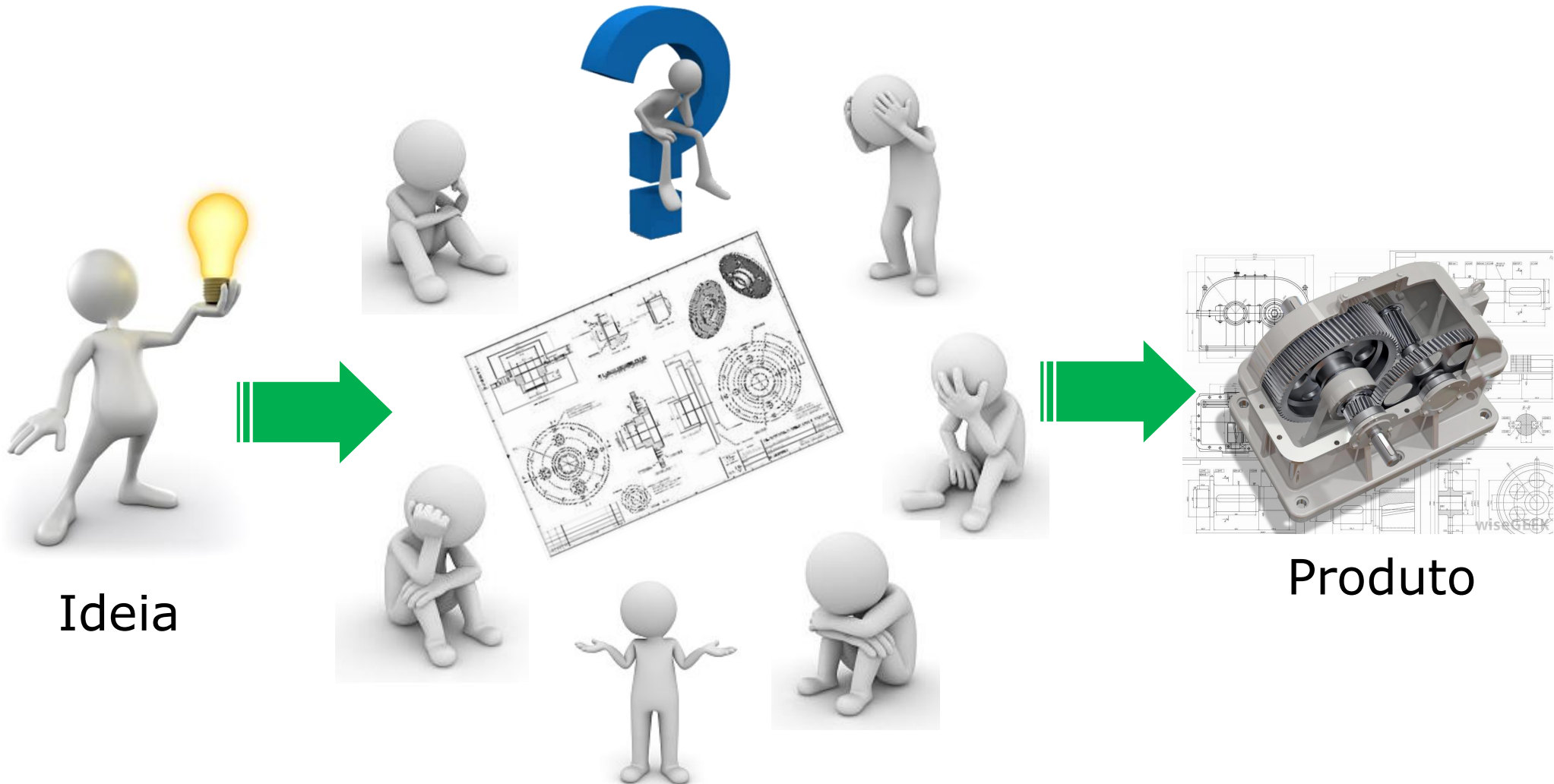
ideia



produto



## Trajetória do Projeto



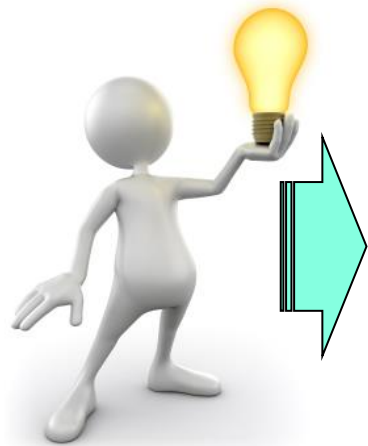
Ideia

Produto

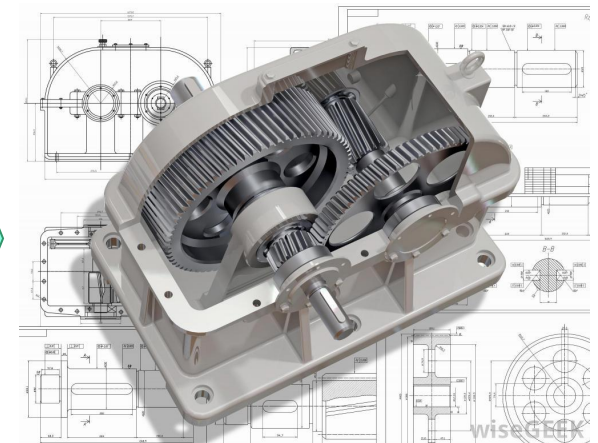
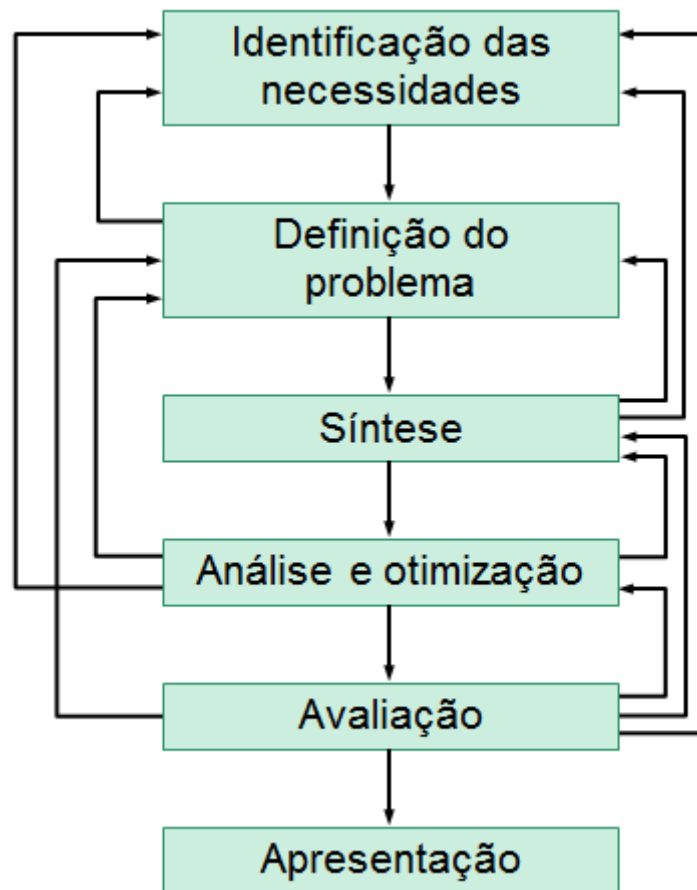


## Processo de desenvolvimento de produto

*Segundo Shigley*



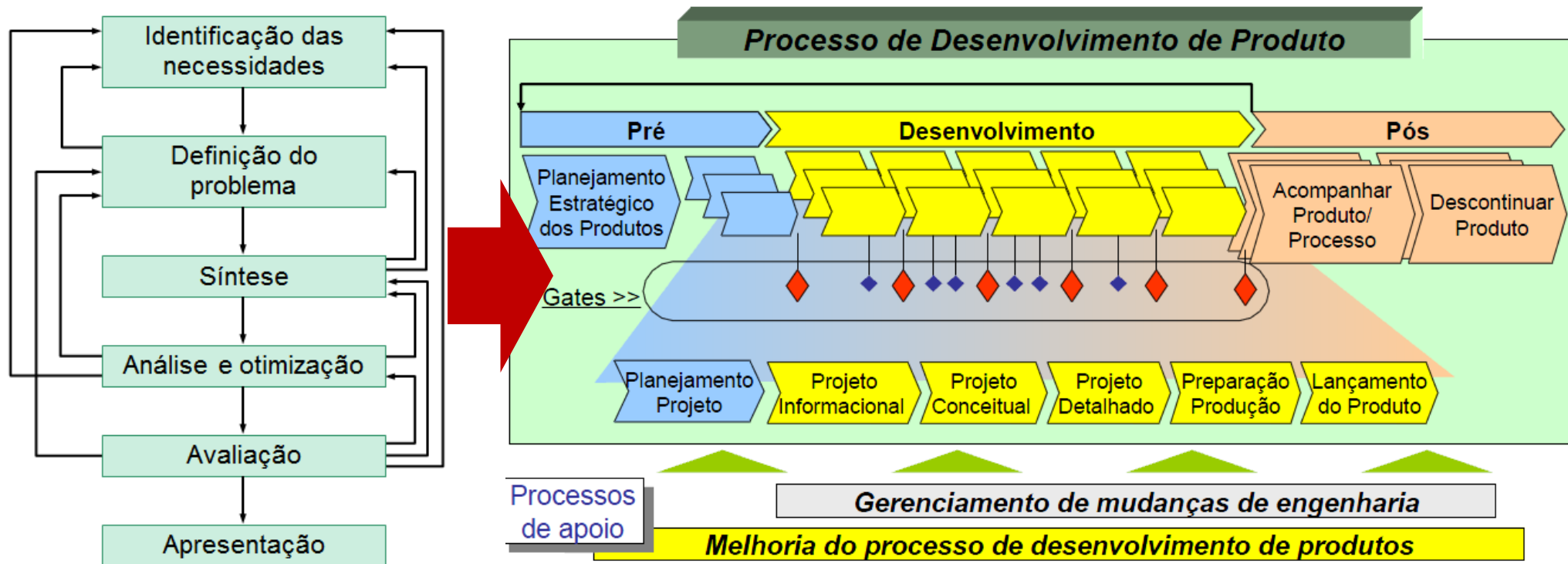
ideia



produto

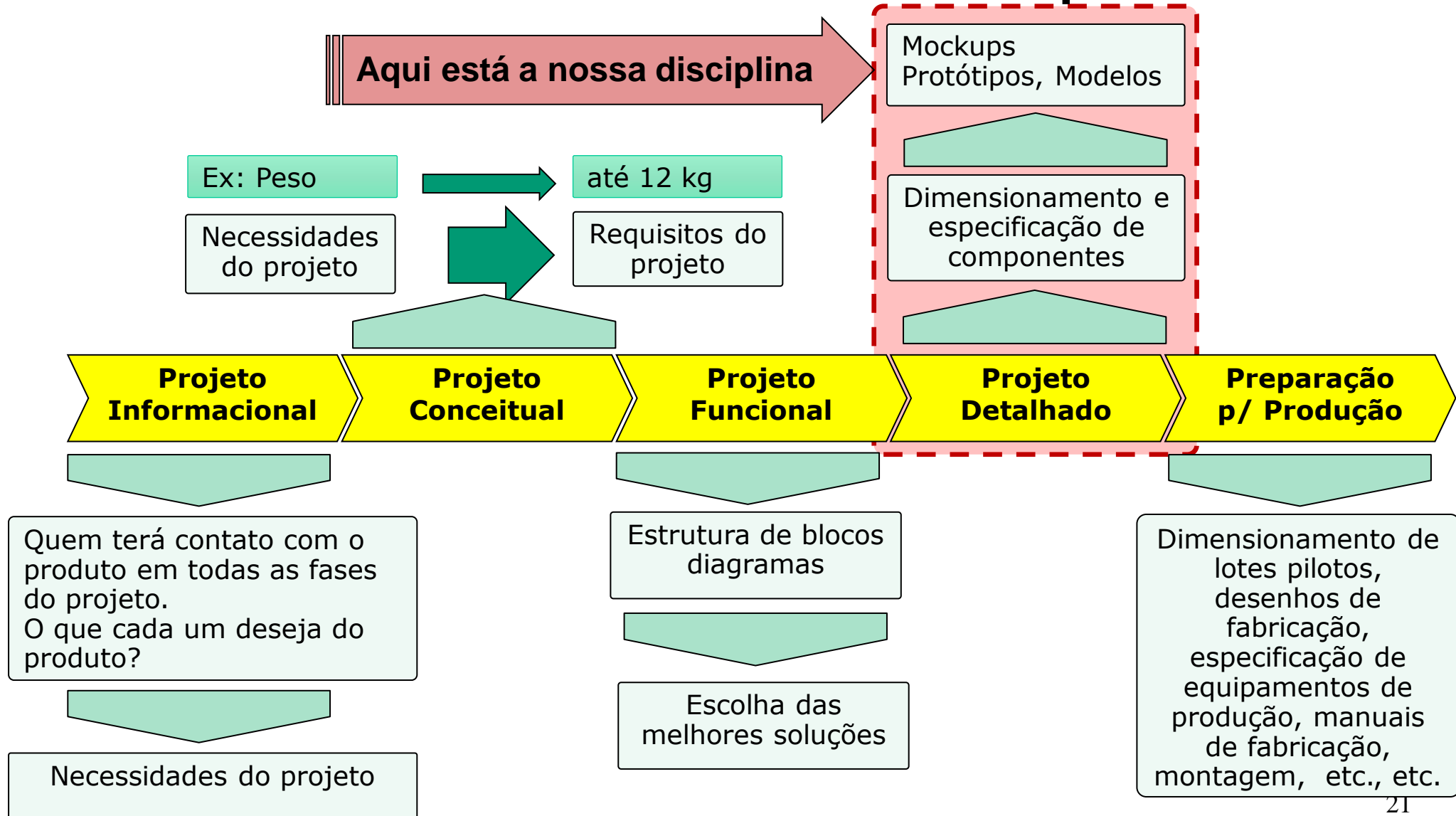


## Processo de desenvolvimento de produto



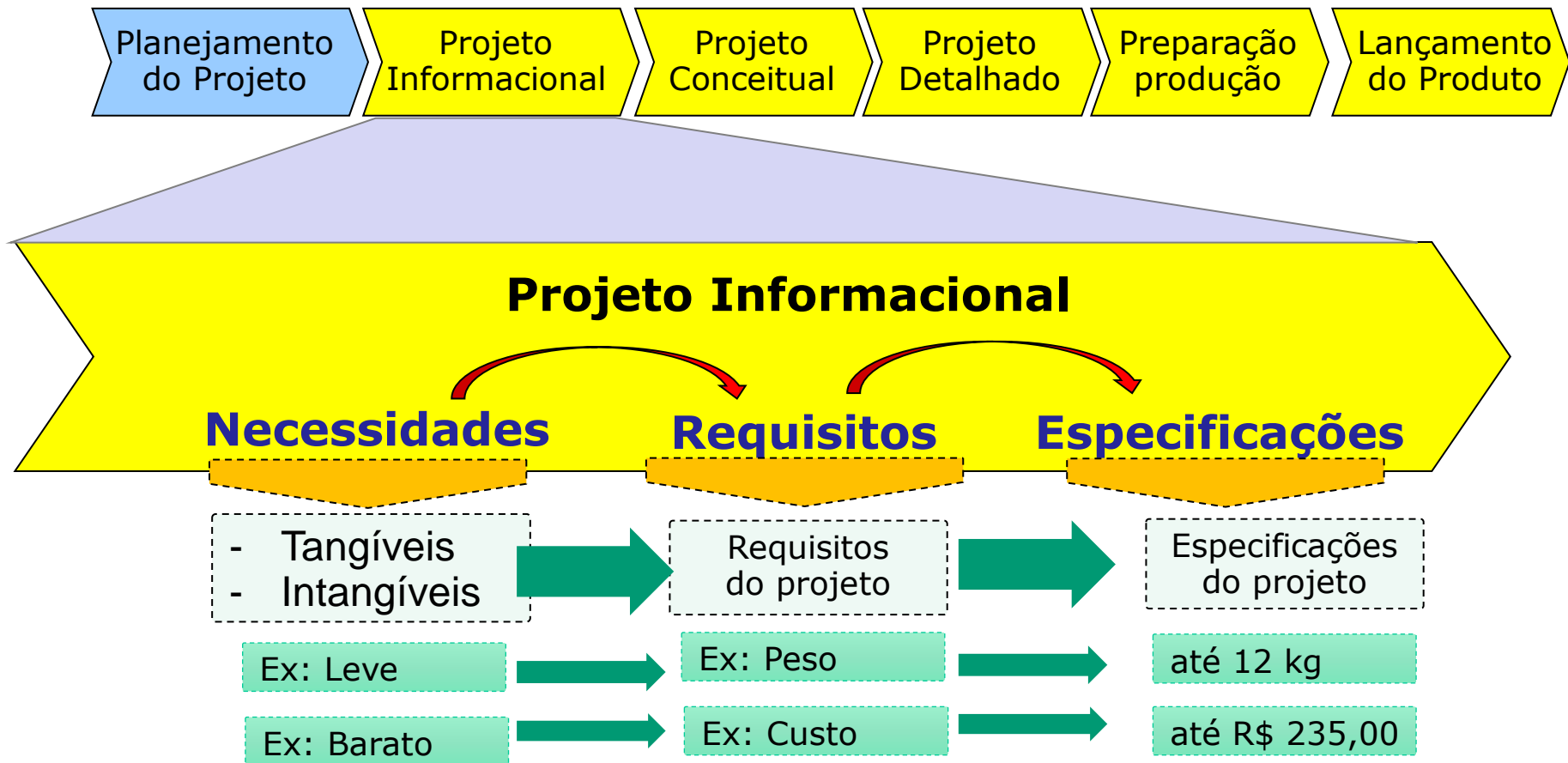


## Processo de desenvolvimento de produto



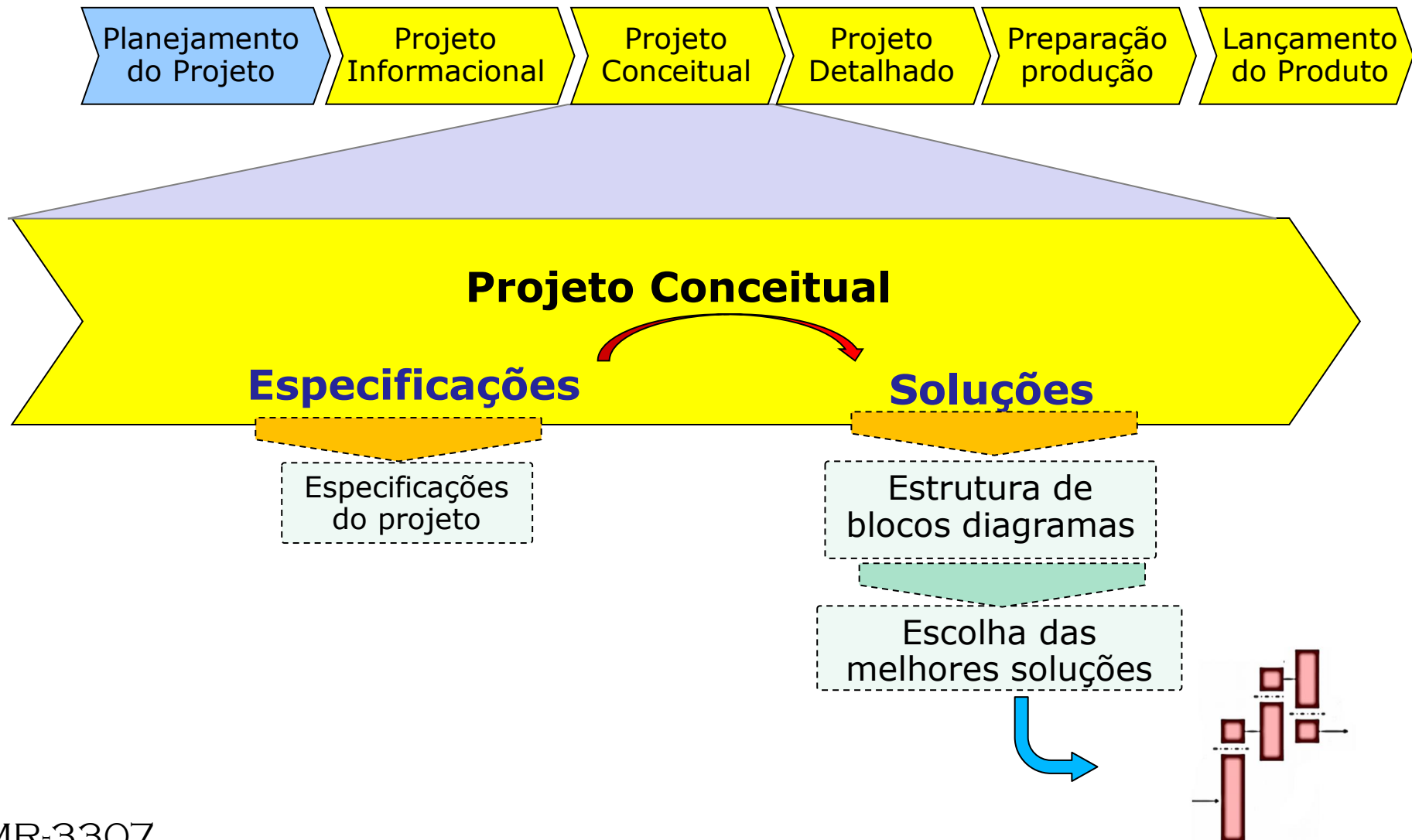


## Fases do Projeto





## Fases do Projeto





## Fases do Projeto





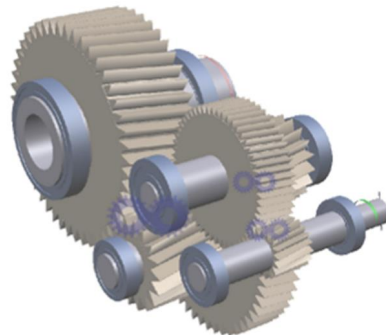
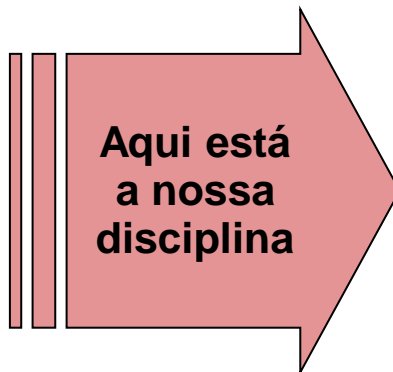


## Fases do Projeto



### Projeto Detalhado

#### Projeto de engenharia



Dimensionamento e especificação de componentes

Desenhos de engenharia

Mockups  
Protótipos  
- Computacionais  
- Analíticos  
- Funcionais

Desenhos de fabricação

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

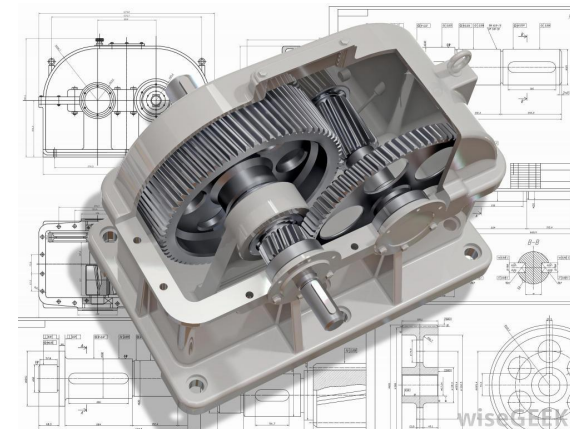
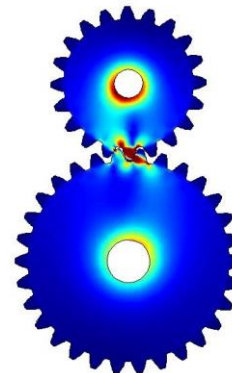
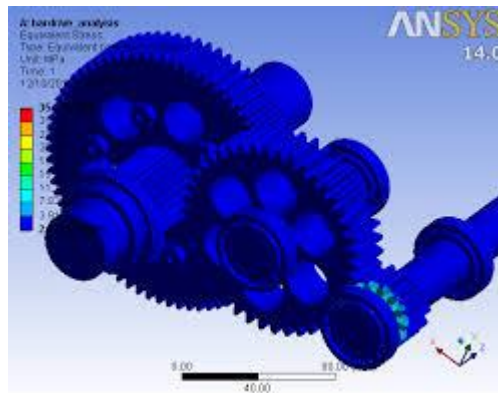
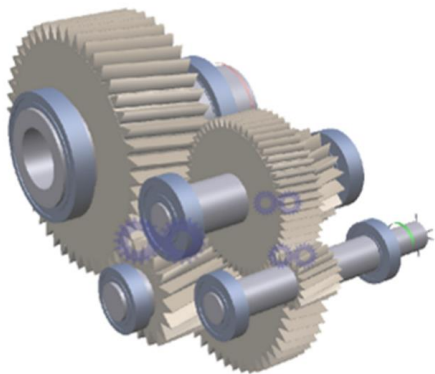


## Fases do Projeto



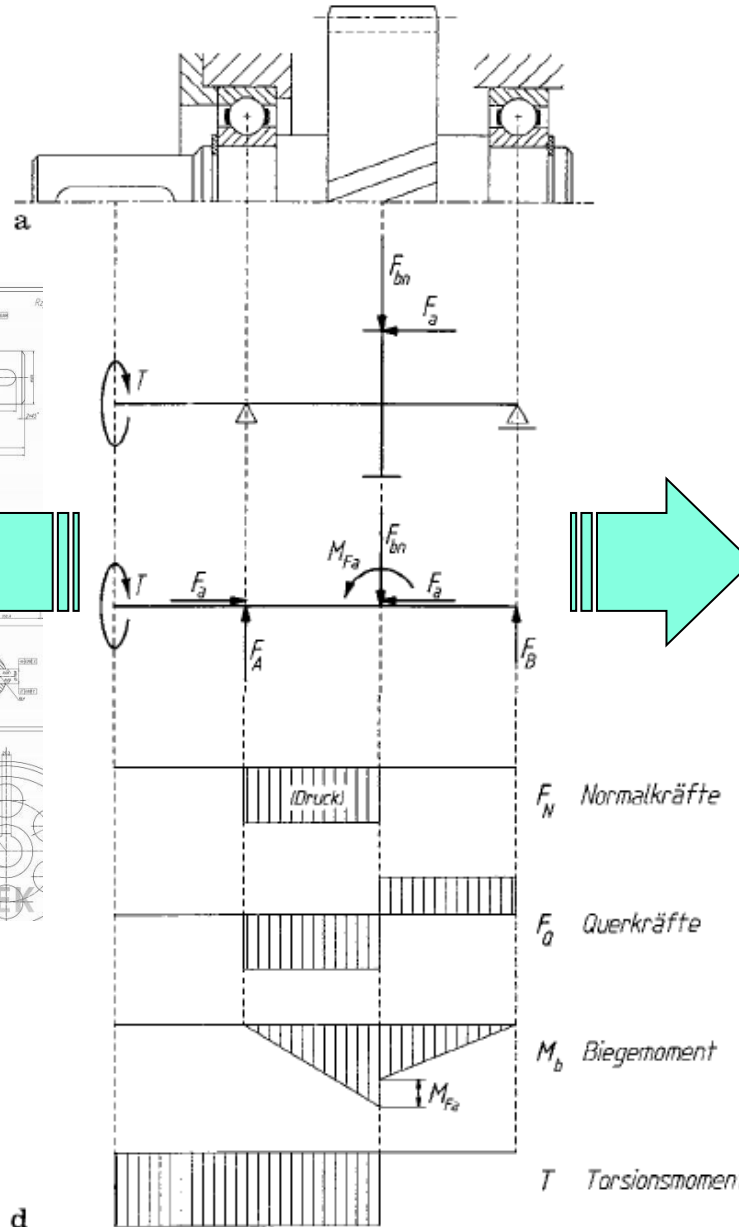
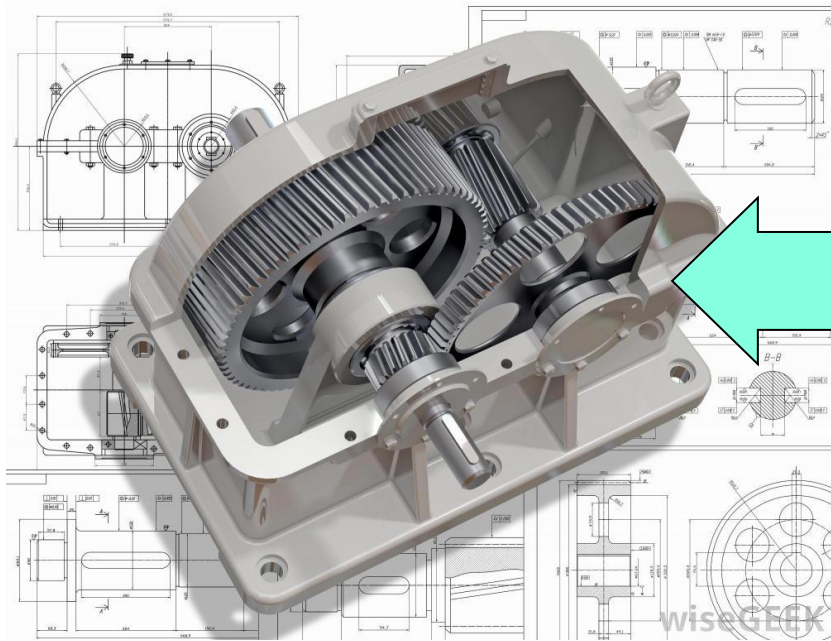
### Projeto Detalhado

### 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

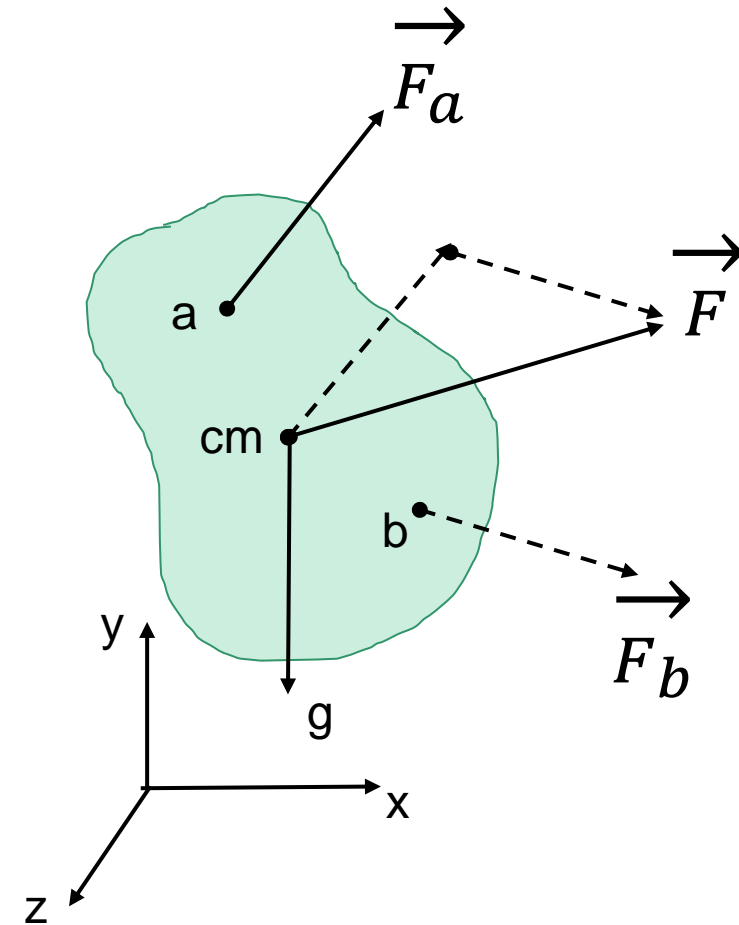
- Somente unidades no SI
- Faça bons desenhos de rascunhos
  - Identifique o sistema de coordenadas
  - Nomeie dimensões e forças
  - Bons diagramas de corpo livre são bons auxiliares na solução
- Mostre de forma organizada seu raciocínio
- Siga as convenções
- Desenvolva o raciocínio simbolicamente.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



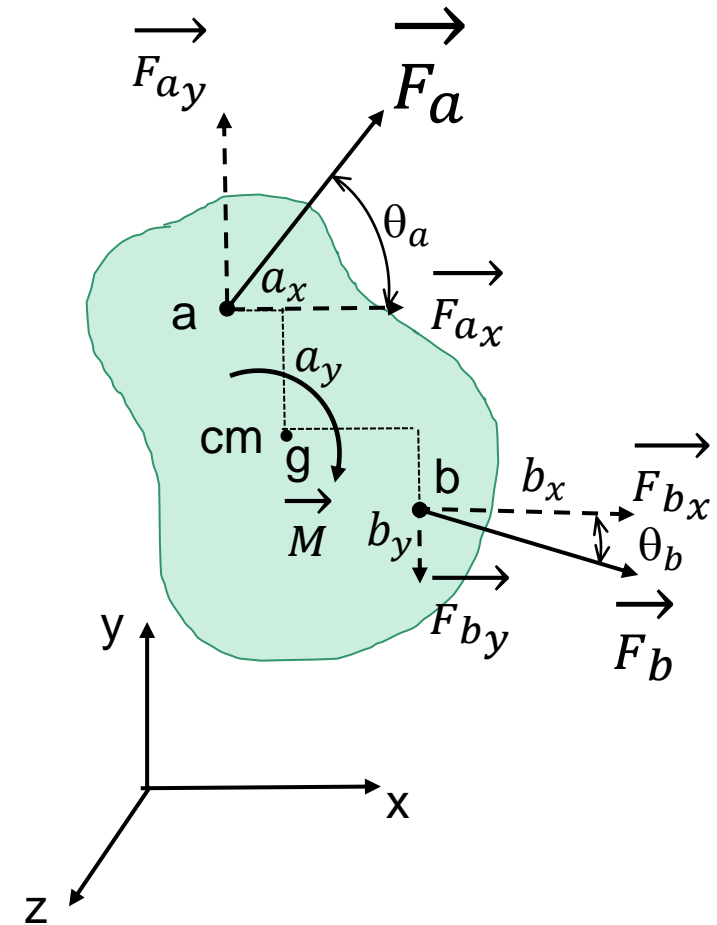
$$\vec{F}_a = F_{a_x} \hat{i} + F_{a_y} \hat{j} + F_{a_z} \hat{k}$$
$$\vec{F} = \vec{F}_a + \vec{F}_b$$



## 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



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

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



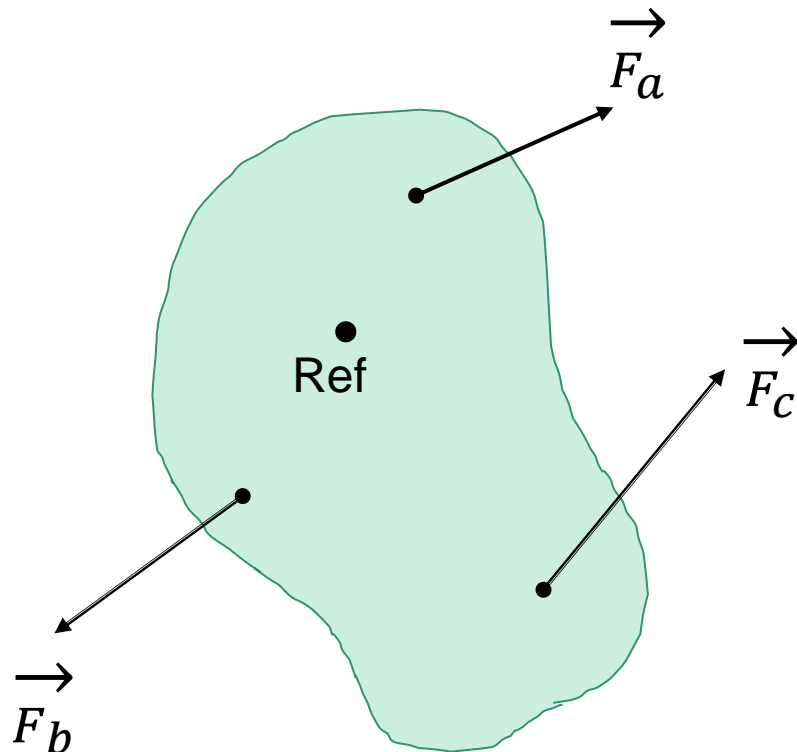
## Exemplo

- 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

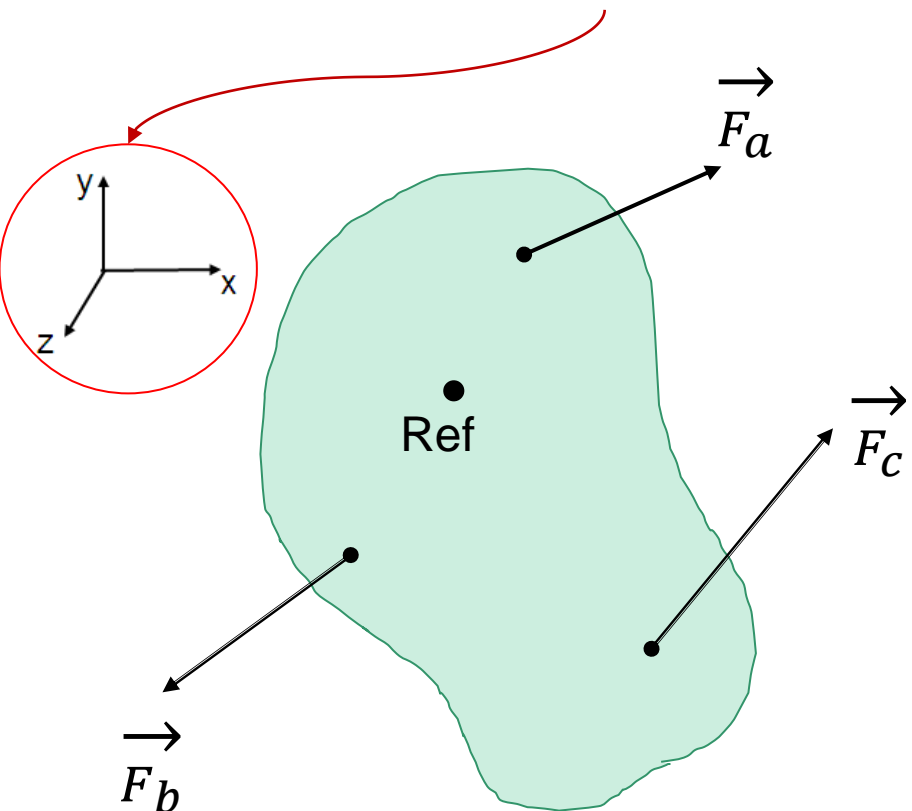


## Exemplo

➤ Determine os esforços resultantes no ponto Referencia

➤ Identifique o sistema de coordenadas

Condições de equilíbrio



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

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

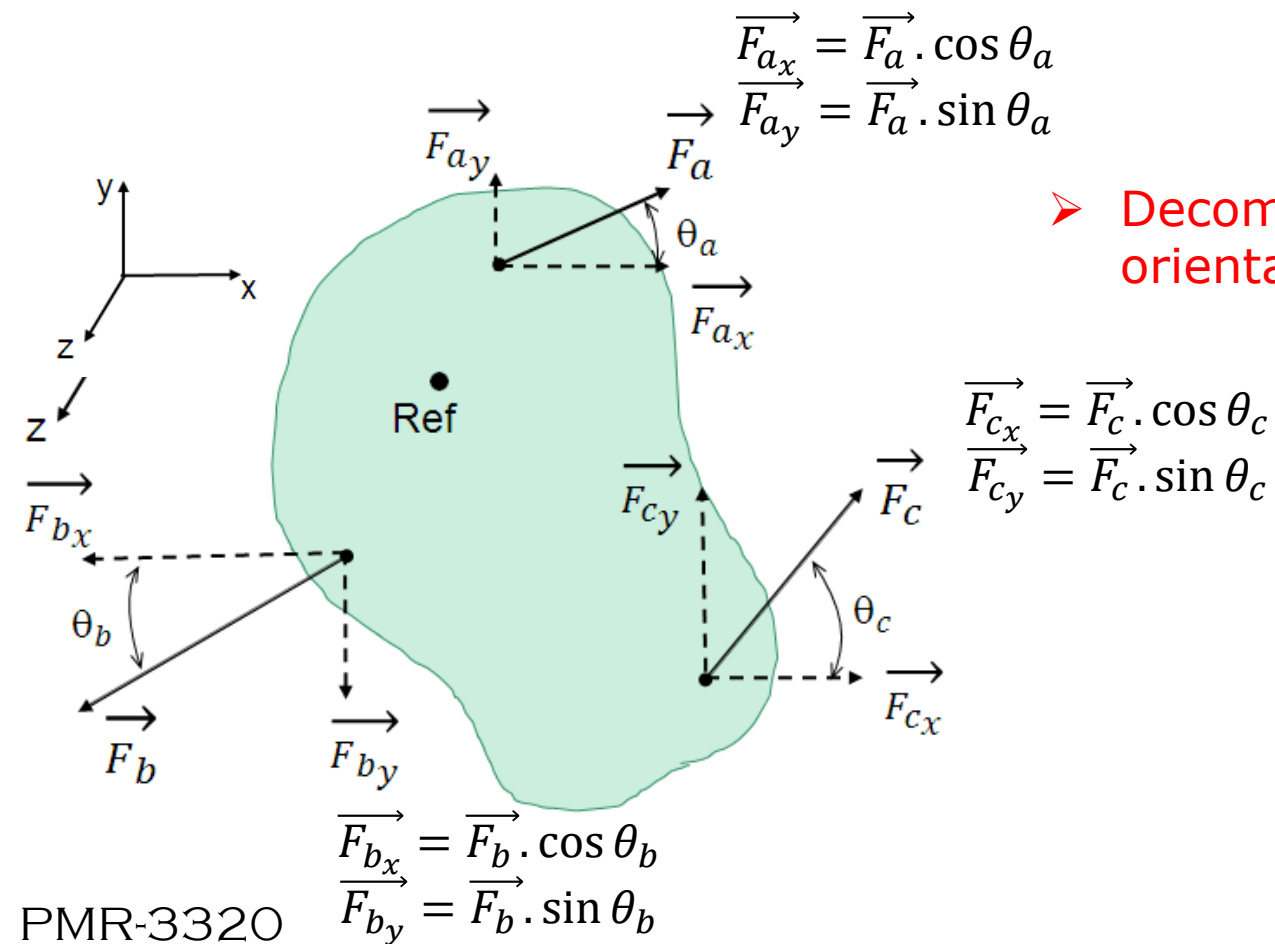
+





## Exemplo

- Determine os esforços resultantes no ponto Referencia

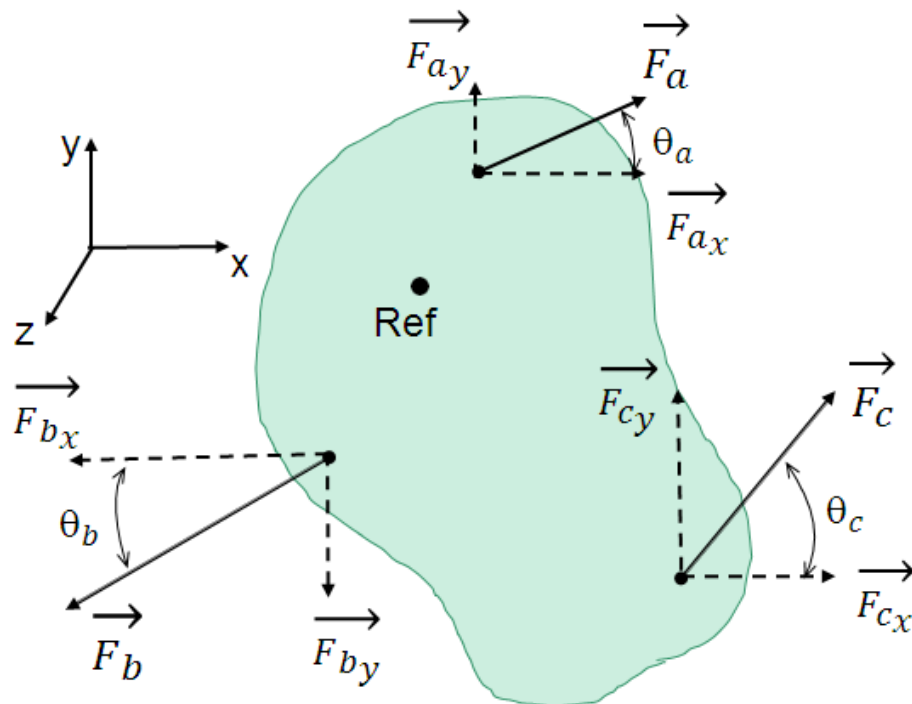


- Decomposição das forças segundo a orientação do sistema de coordenadas



## Exemplo

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



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

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

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

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

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

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

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



## Exemplo

- Determine os esforços resultantes no ponto Referencia

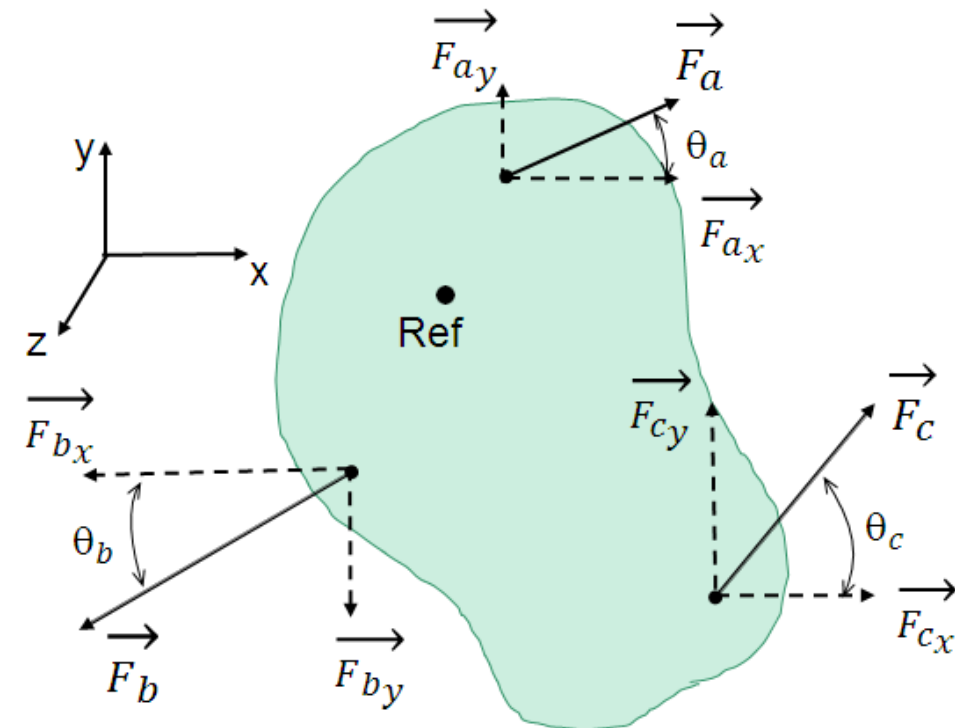
$$\sum \vec{F}_{ref} = 0 \quad \text{➤ Como: } \begin{cases} \vec{F}_b = 2 \cdot \vec{F}_a \\ \vec{F}_c = 3/2 \cdot \vec{F}_a \end{cases}$$

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

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

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

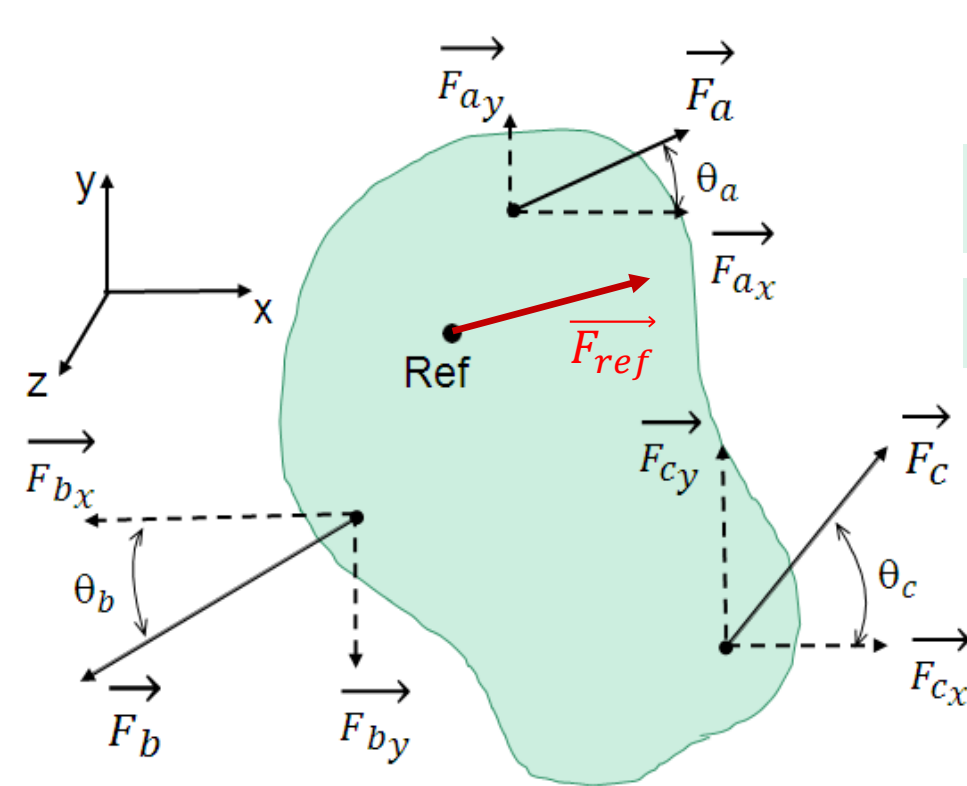
$$\begin{aligned} \sum \vec{F}_{ref_x} &= \vec{F}_a \cdot \cos \theta_a + \vec{F}_c \cdot \cos \theta_c - \vec{F}_b \cdot \cos \theta_b = 0 \\ \sum \vec{F}_{ref_x} &= \vec{F}_a \cdot \cos \theta_a - 2 \vec{F}_a \cdot \cos \theta_b + (3/2) \vec{F}_a \cdot \cos \theta_c = 0 \end{aligned}$$





## 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**

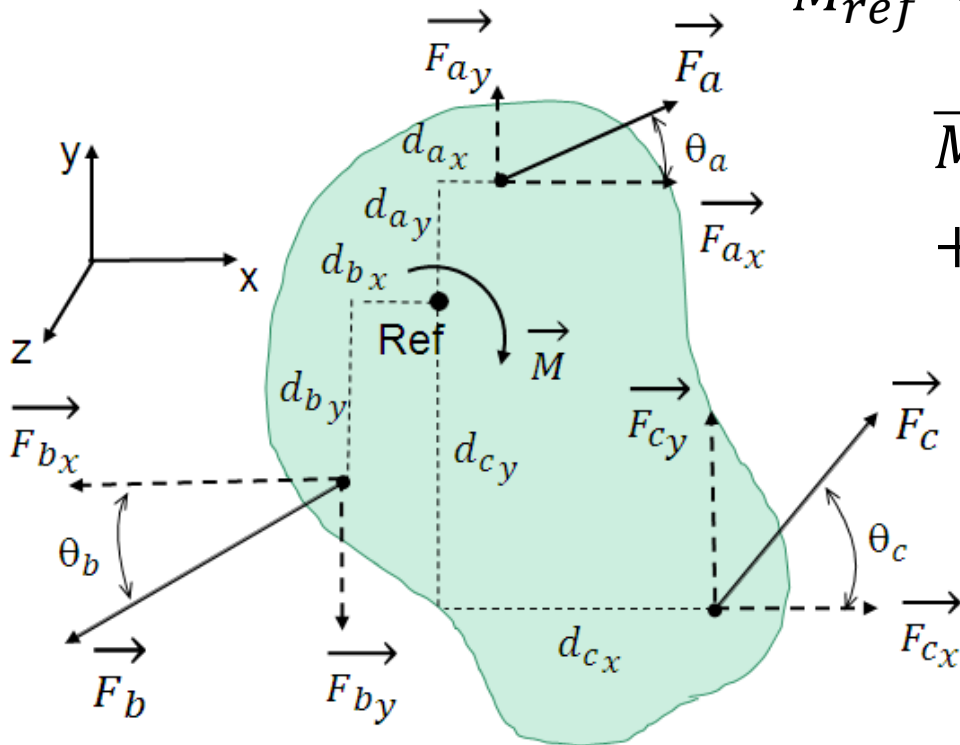
$$\sum_{Ref} \vec{M}_n = 0$$



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

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

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

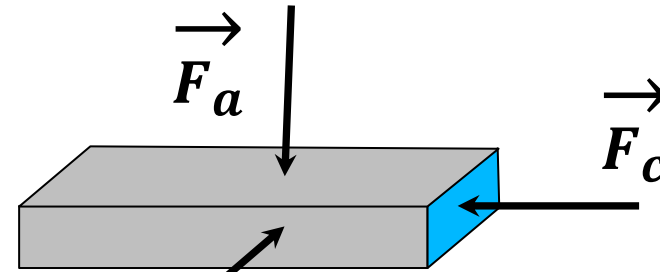




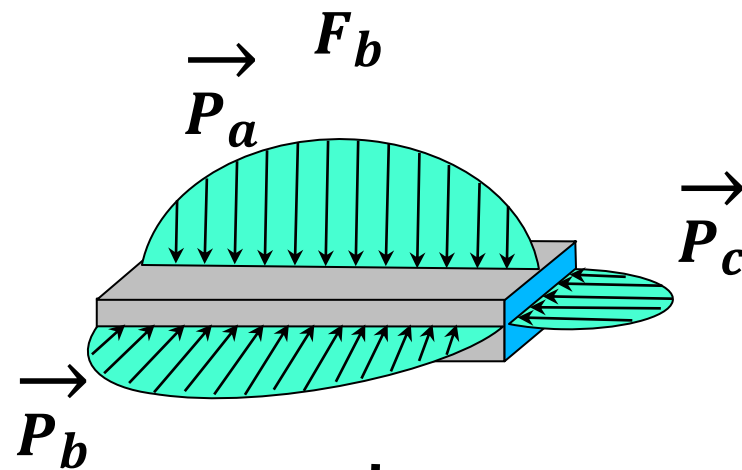
## Carregamentos

### ➤ Forças

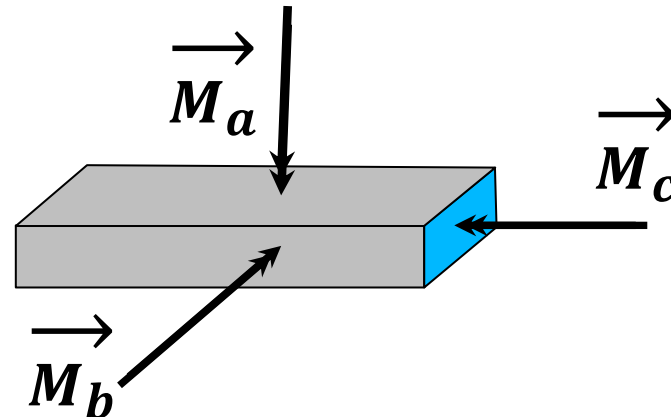
- Concentrados



- Distribuídos



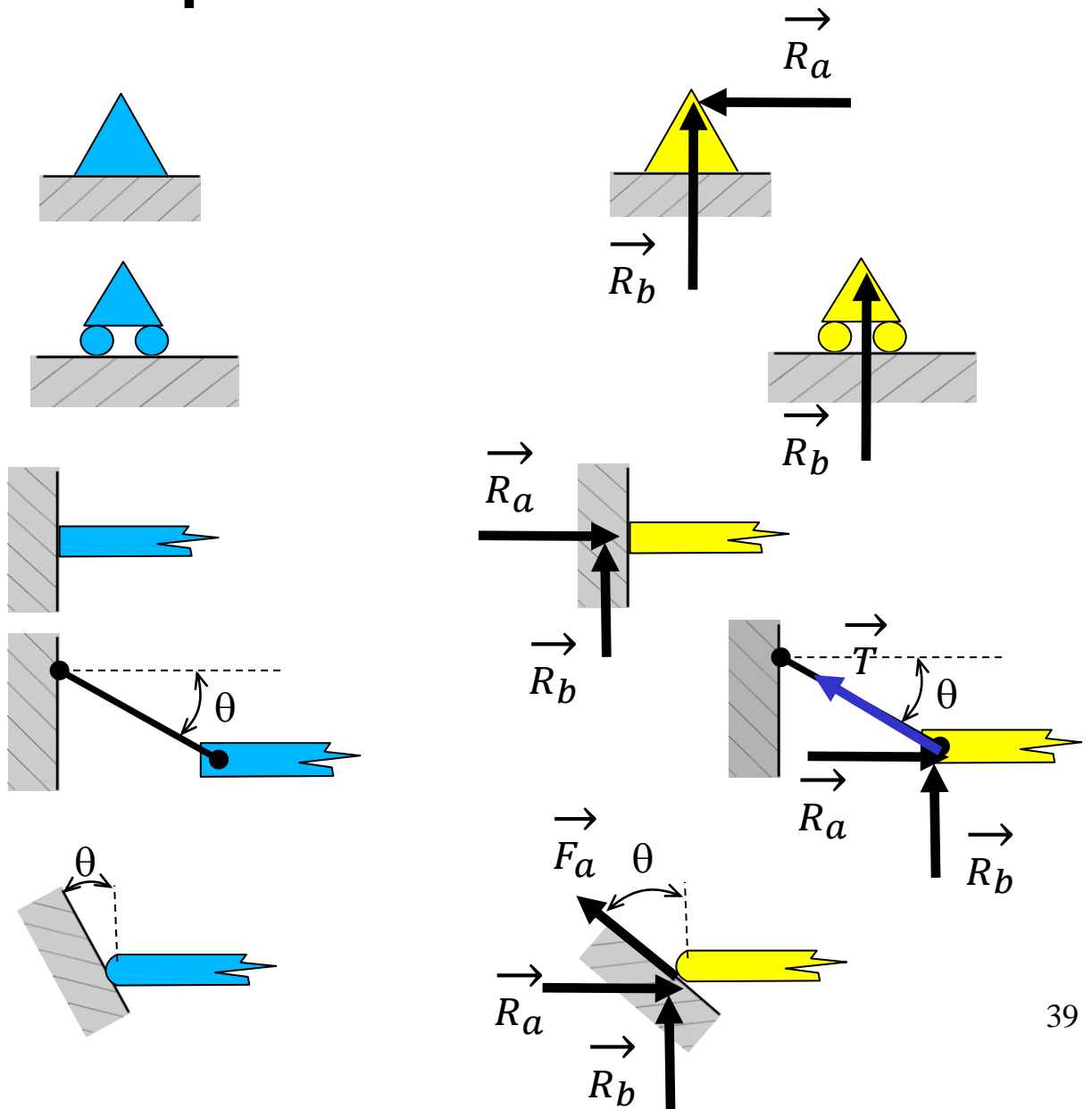
### ➤ Momentos





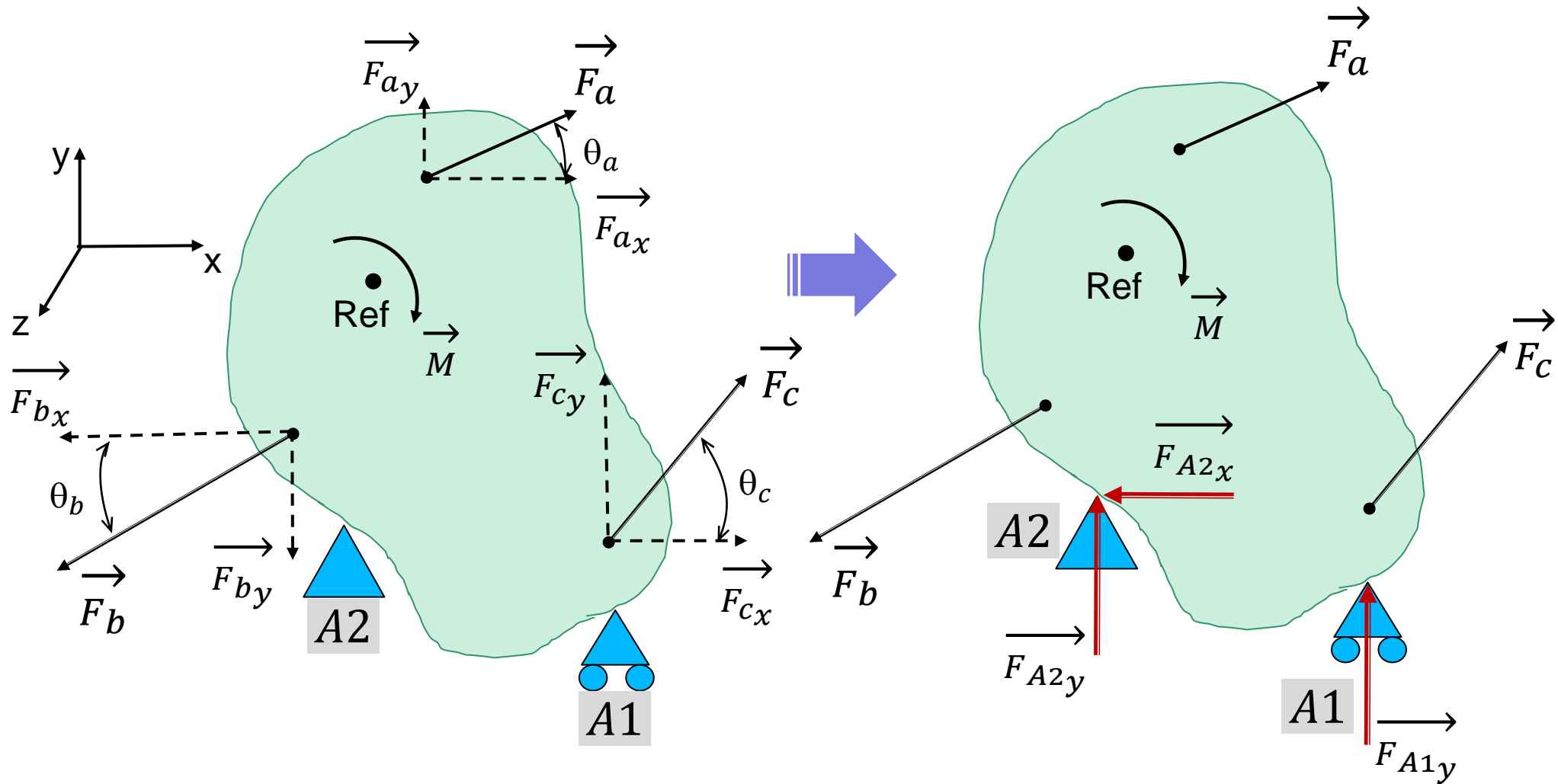
## Apoios

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





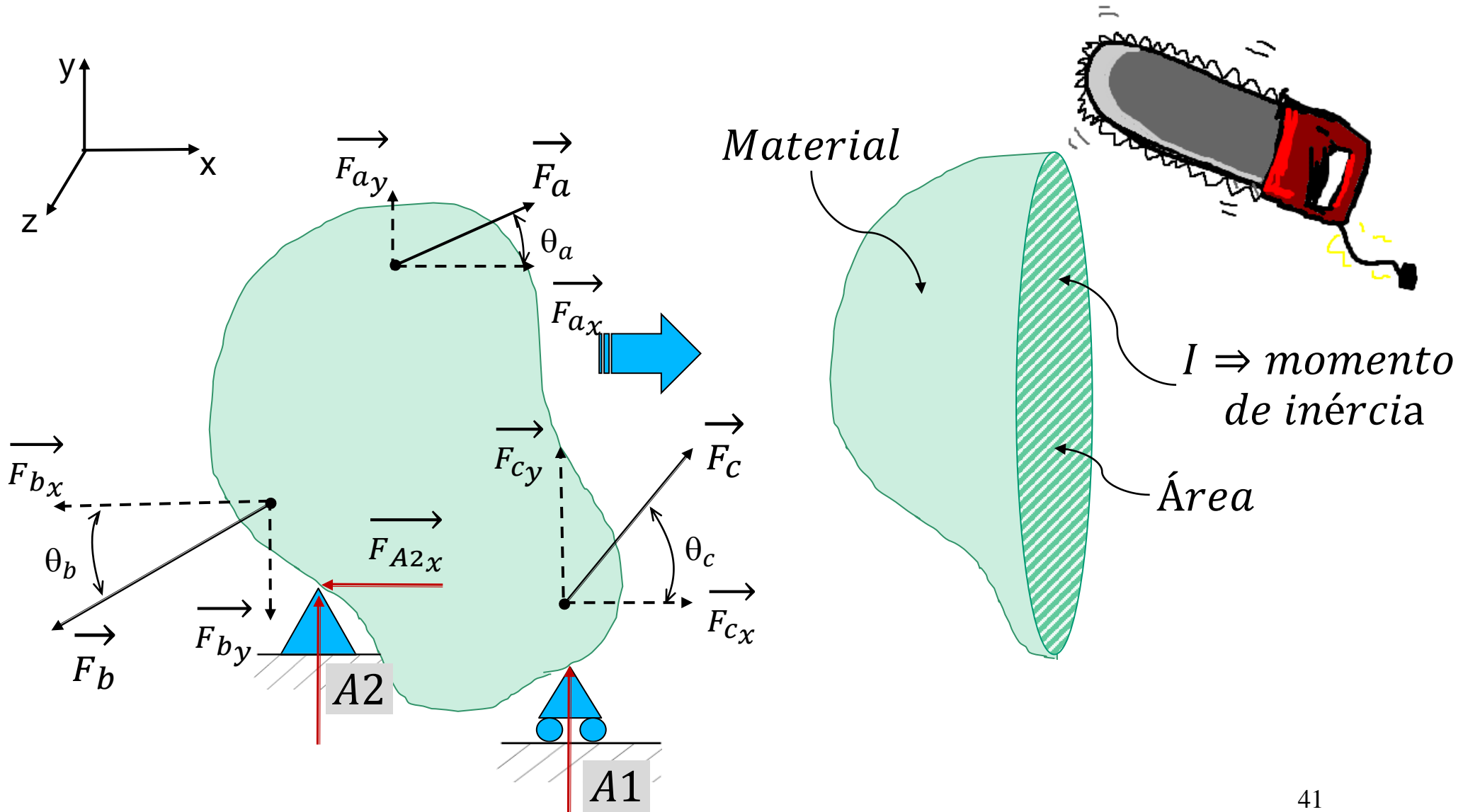
## Apoios e reações





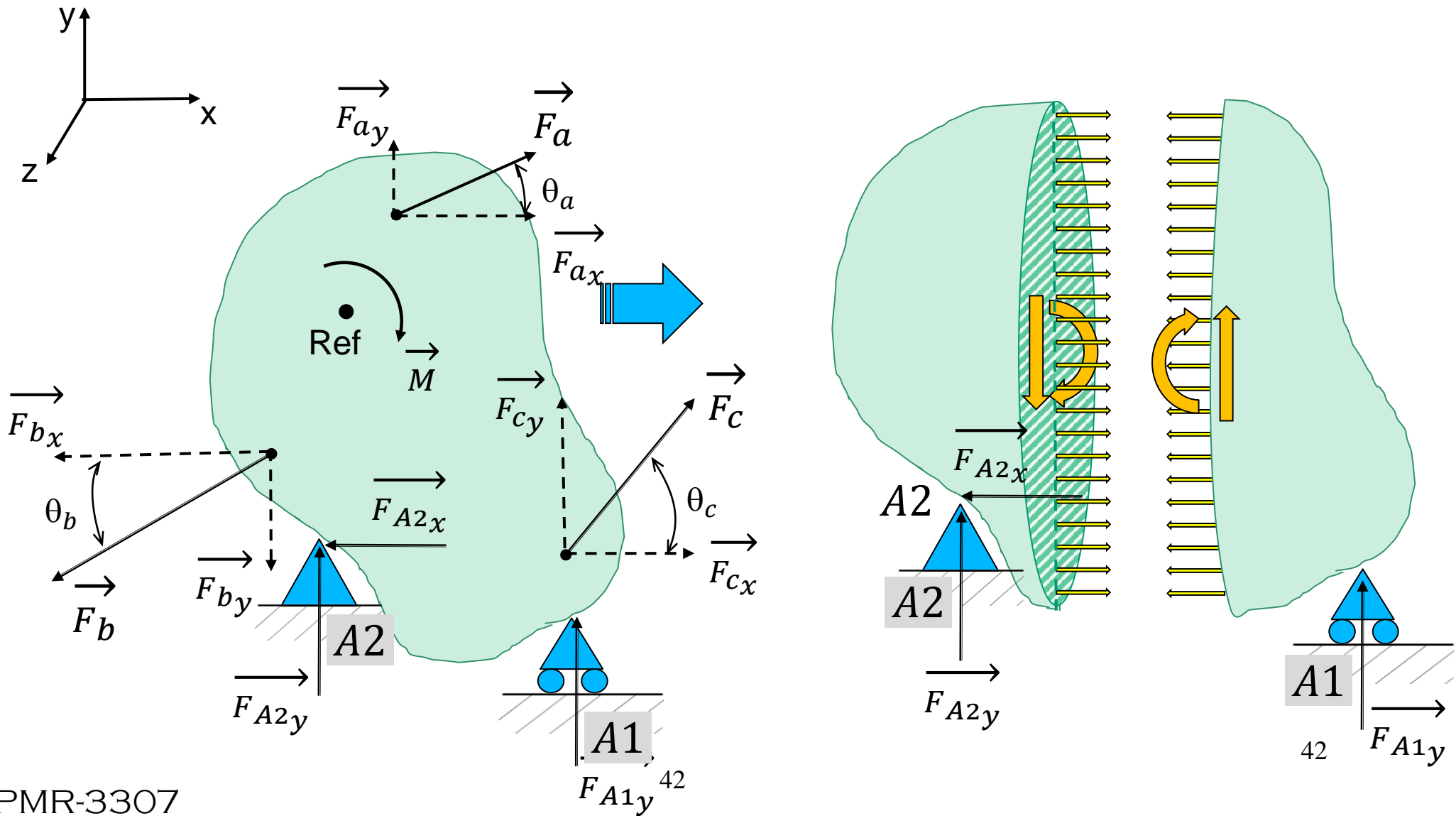


## Apoios, reações e modelo de viga



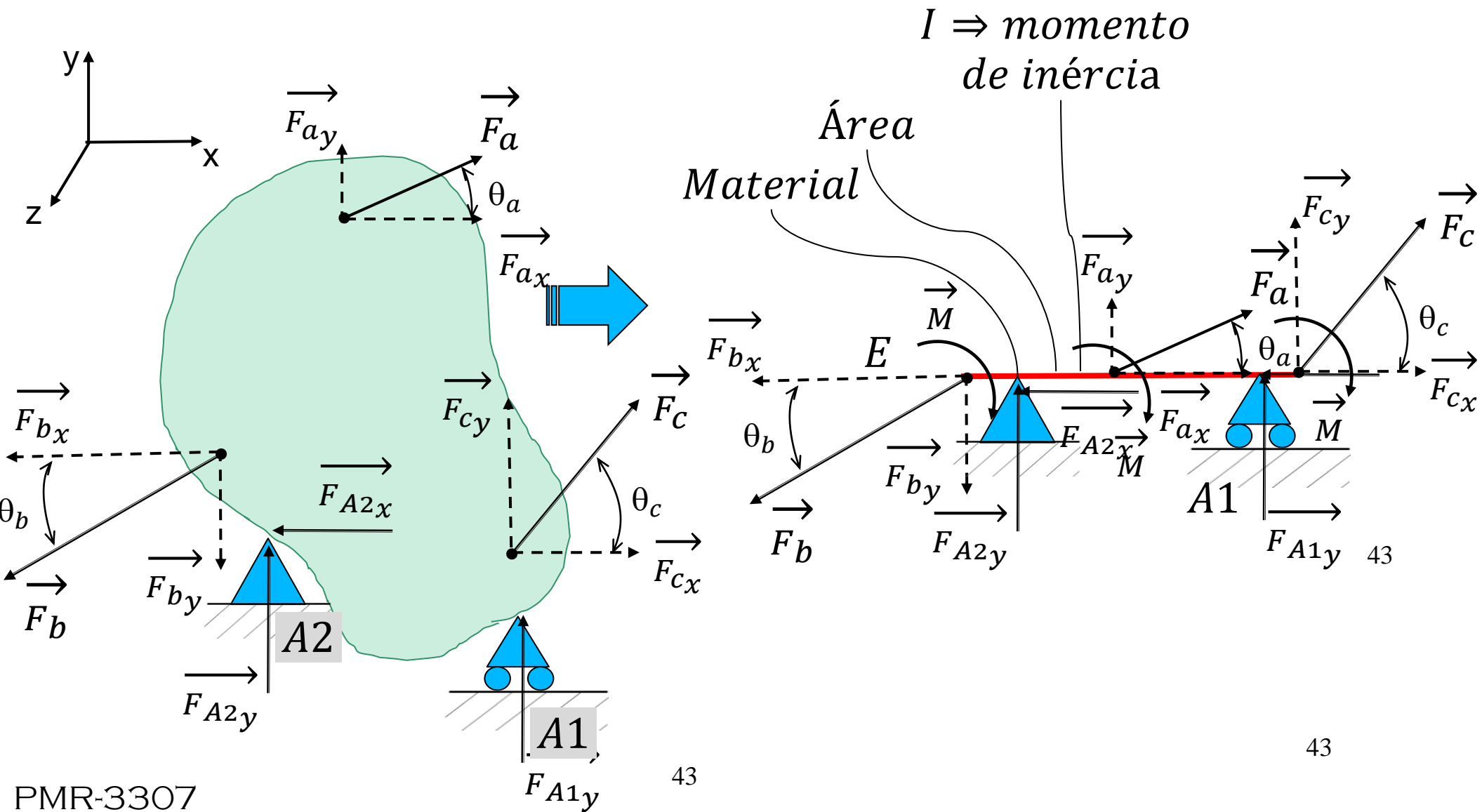


## Apoios, reações e esforços internos



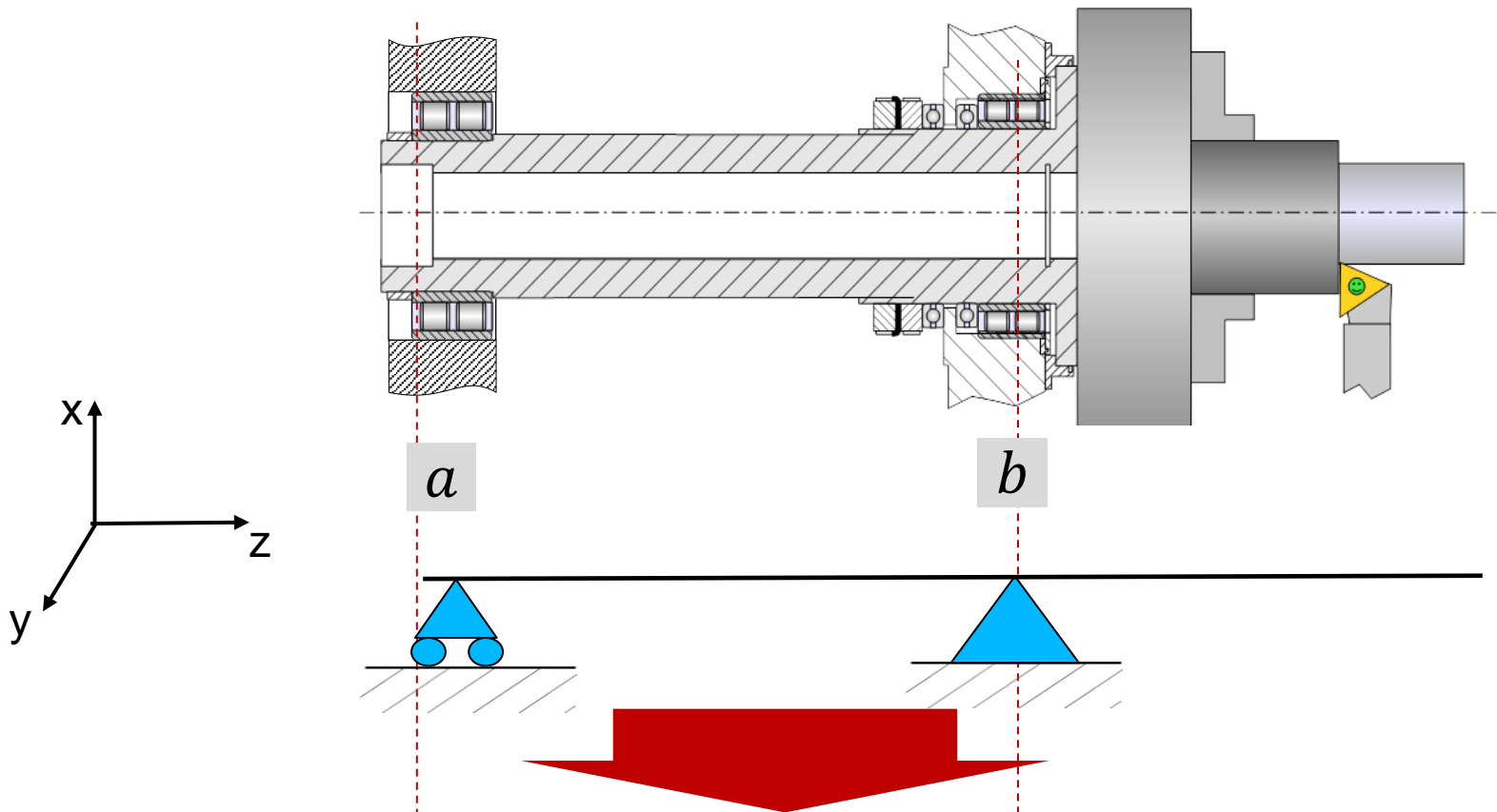


## Apoios, reações e modelo de viga





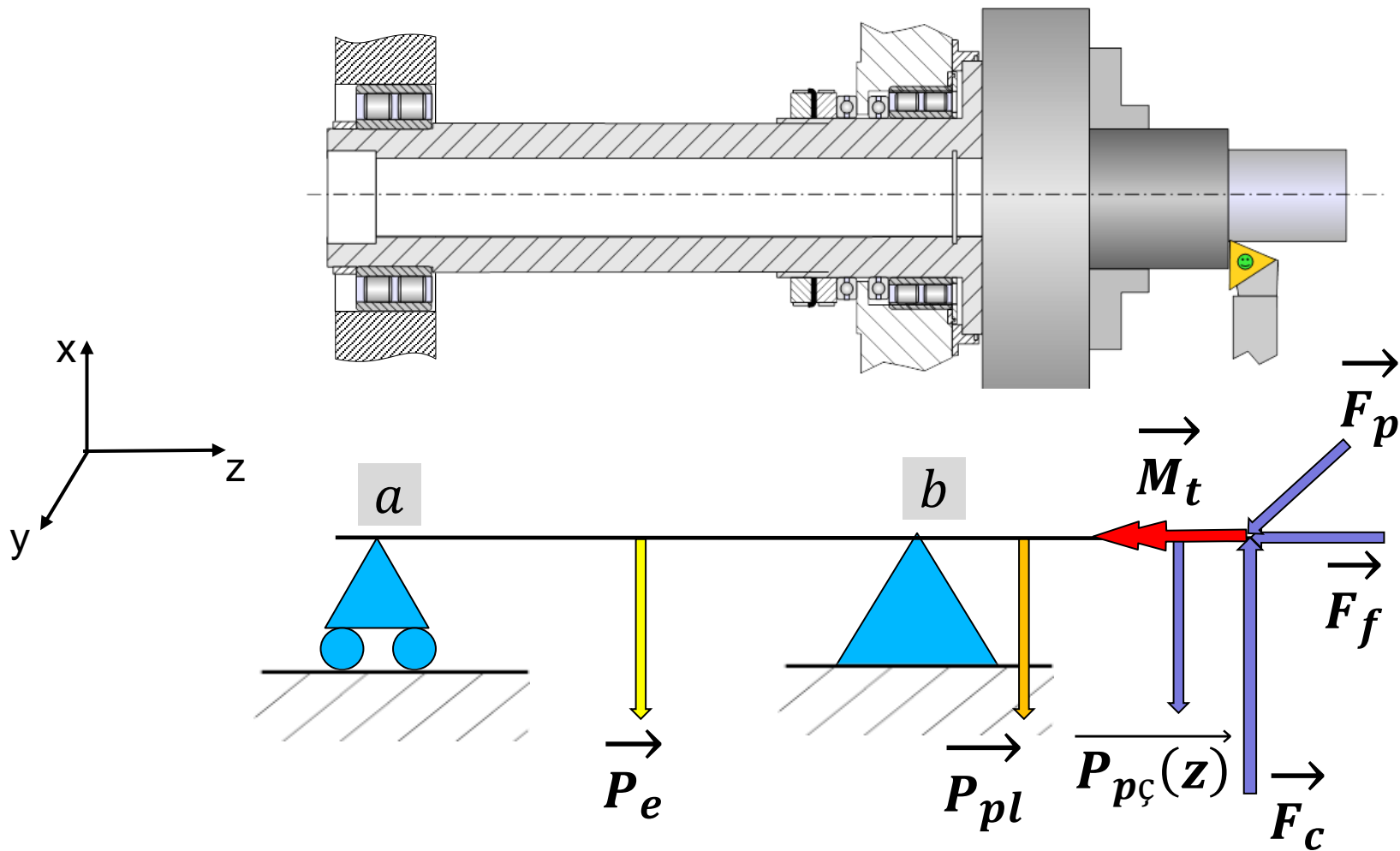
## No projeto



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

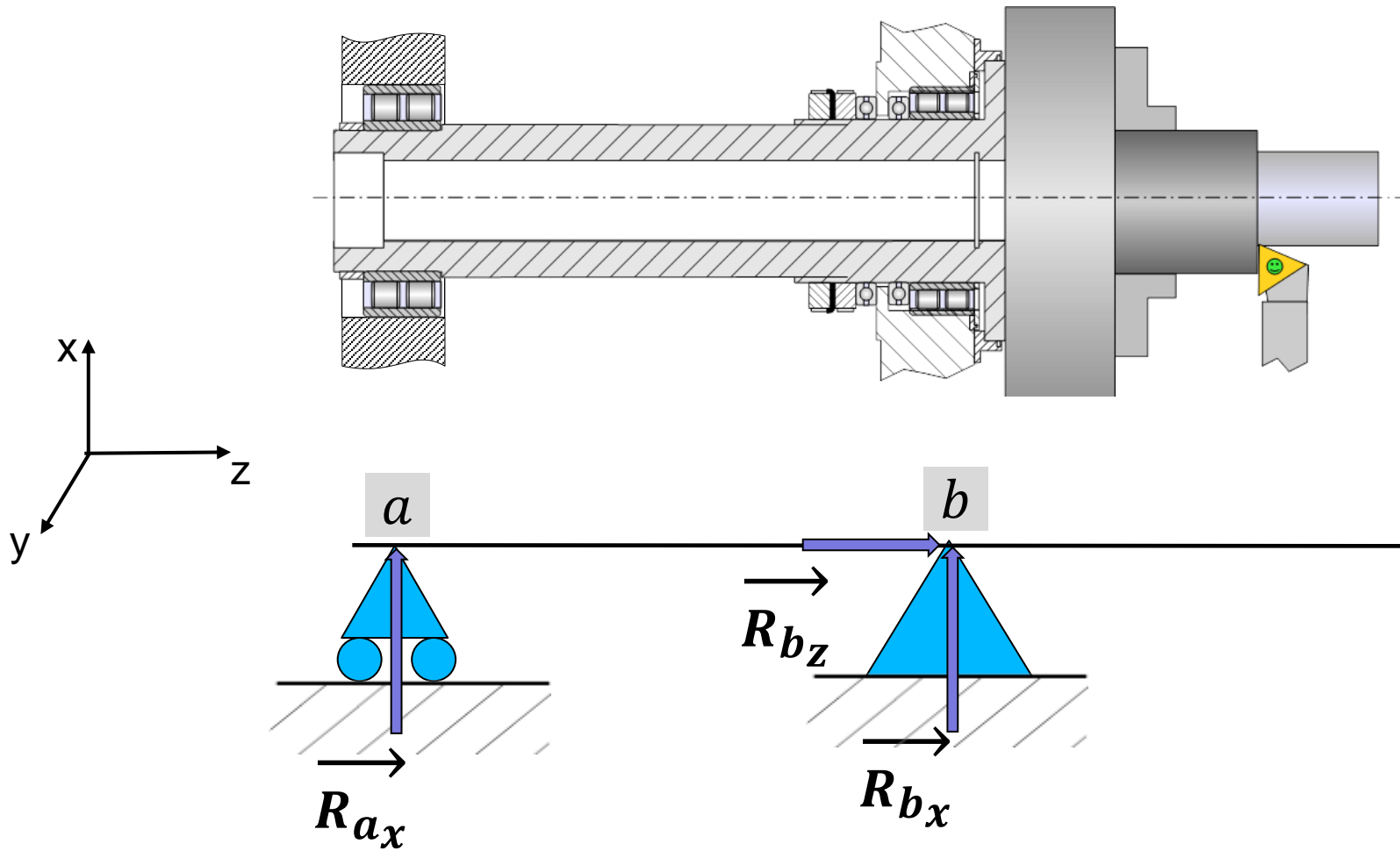


## Forças e momentos atuantes





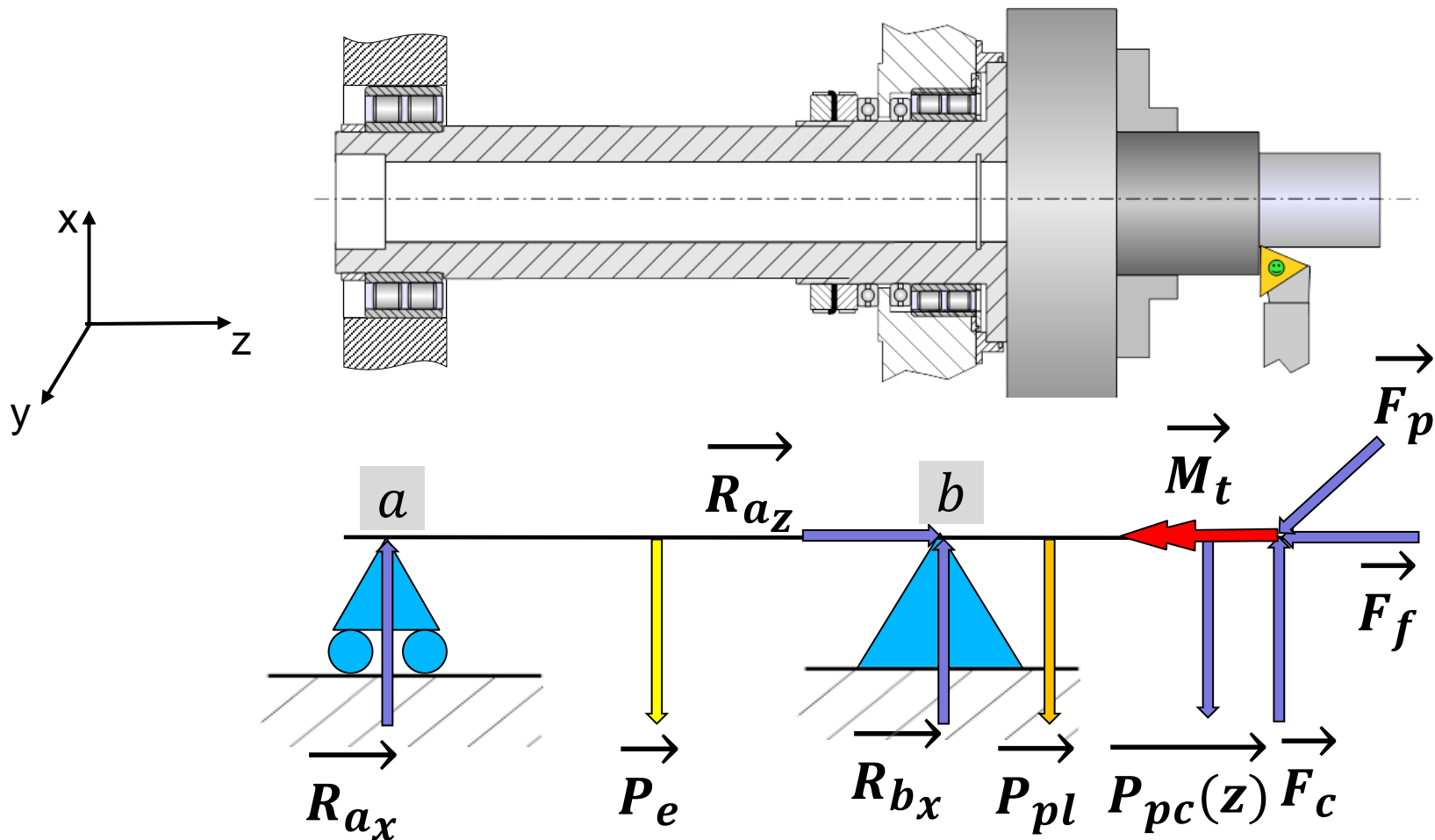
## Reações - Bidimensional -





## Diagramas de corpo livre

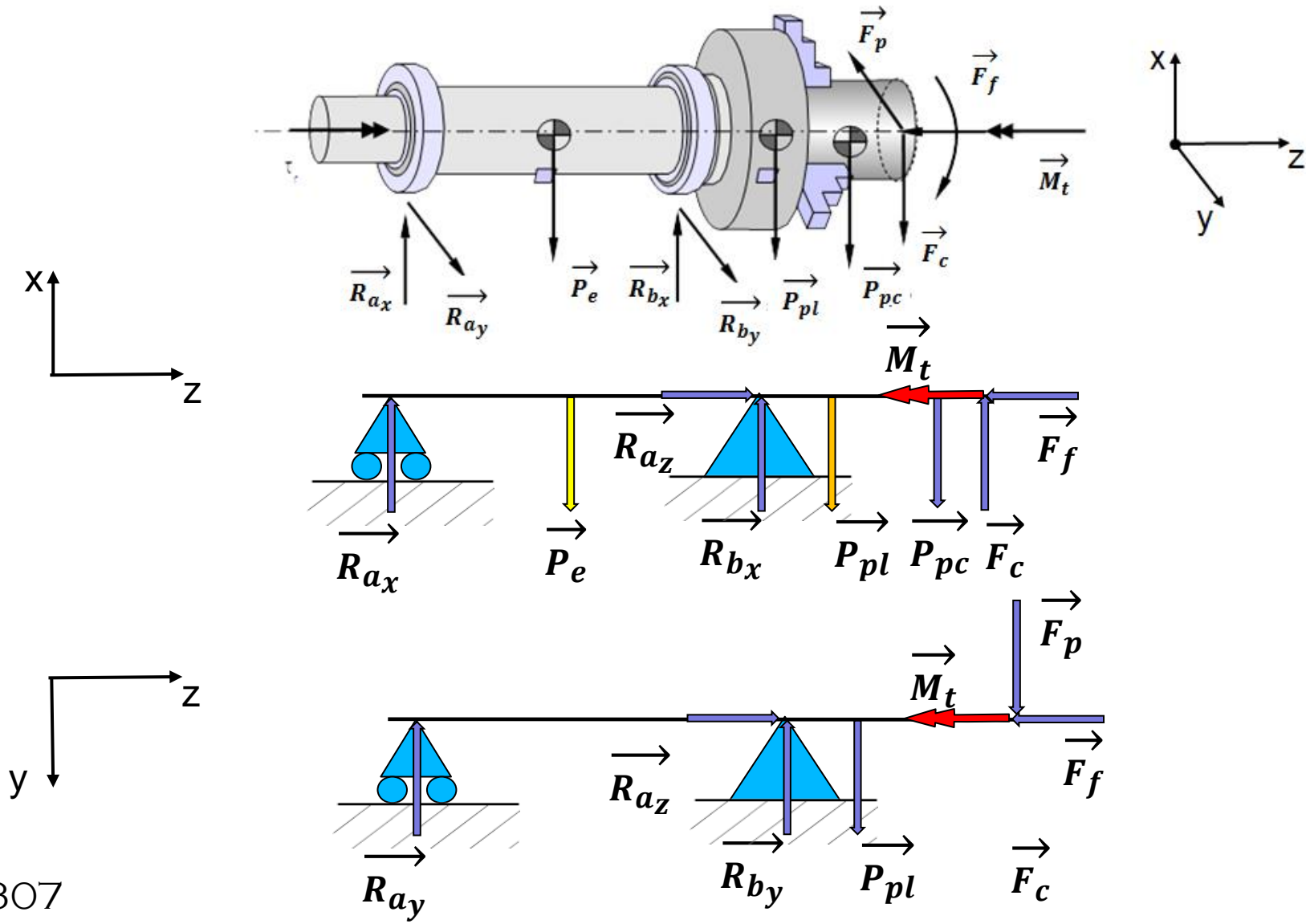
- Bidimensional -





## Diagramas de corpo livre

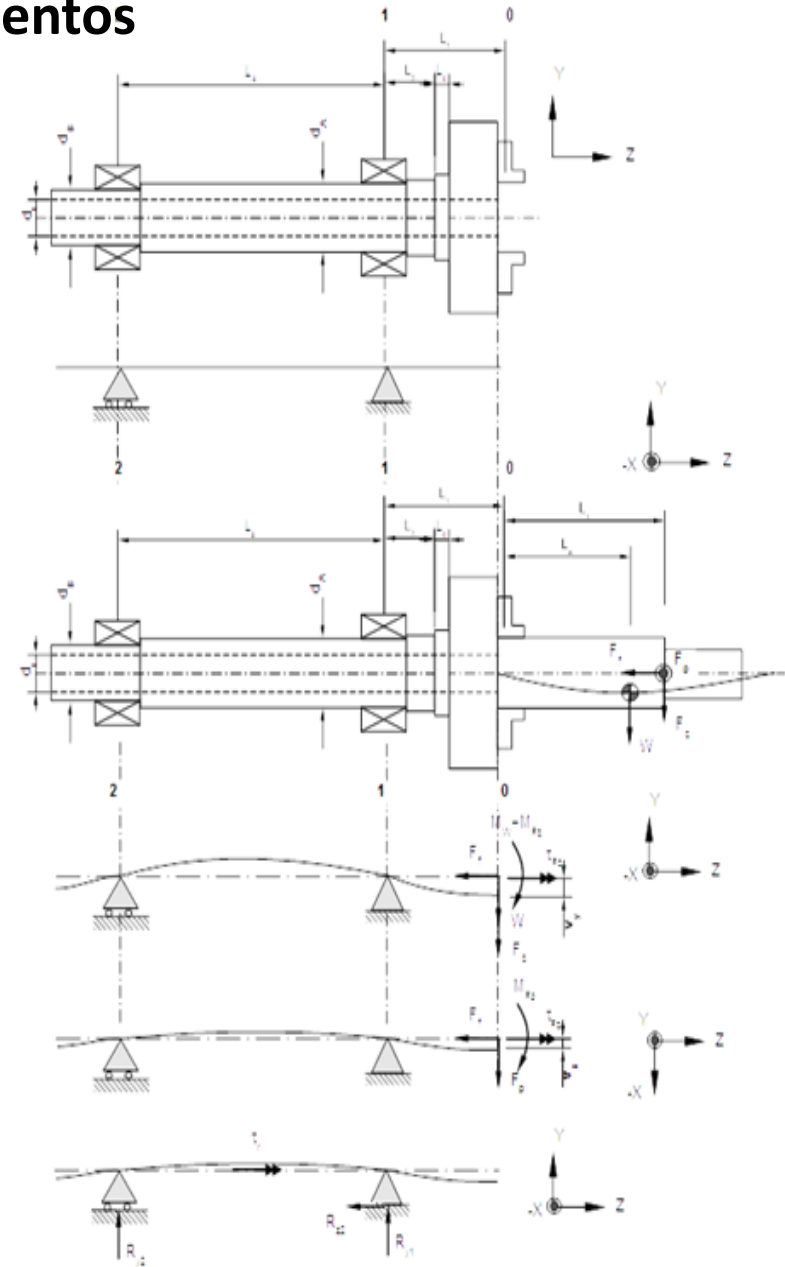
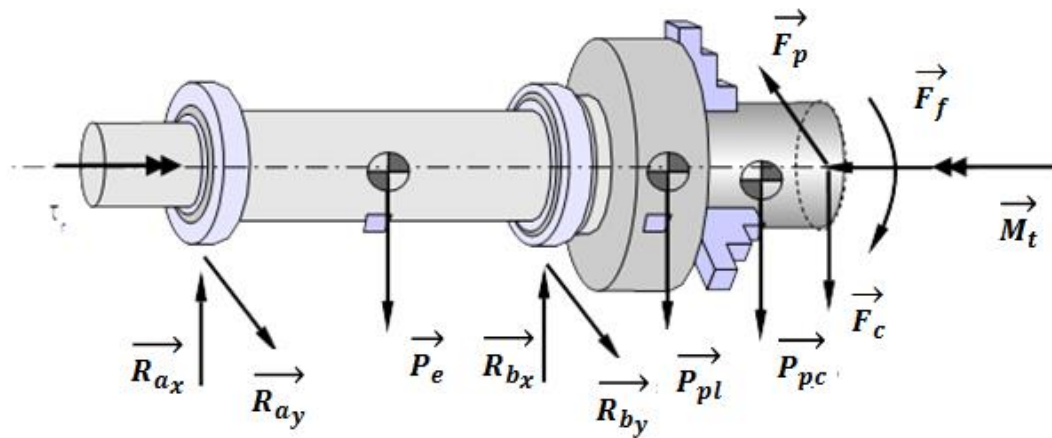
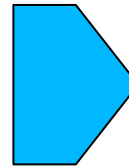
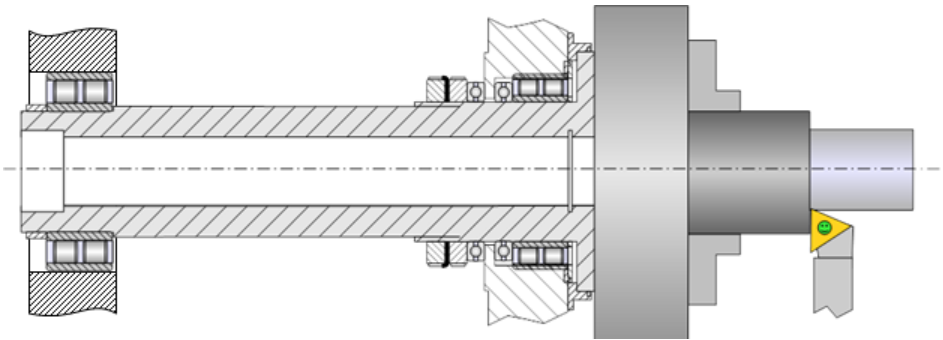
- Tridimensional -







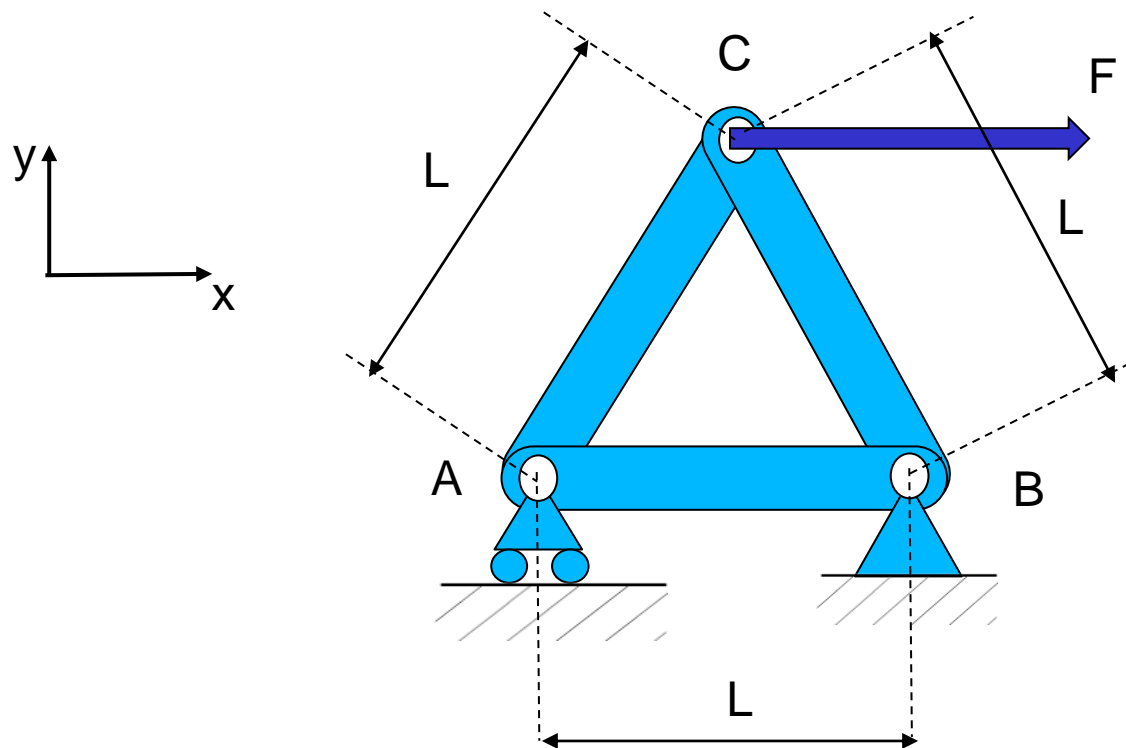
## Carregamentos





## Estado de tensão geral sobre um elemento

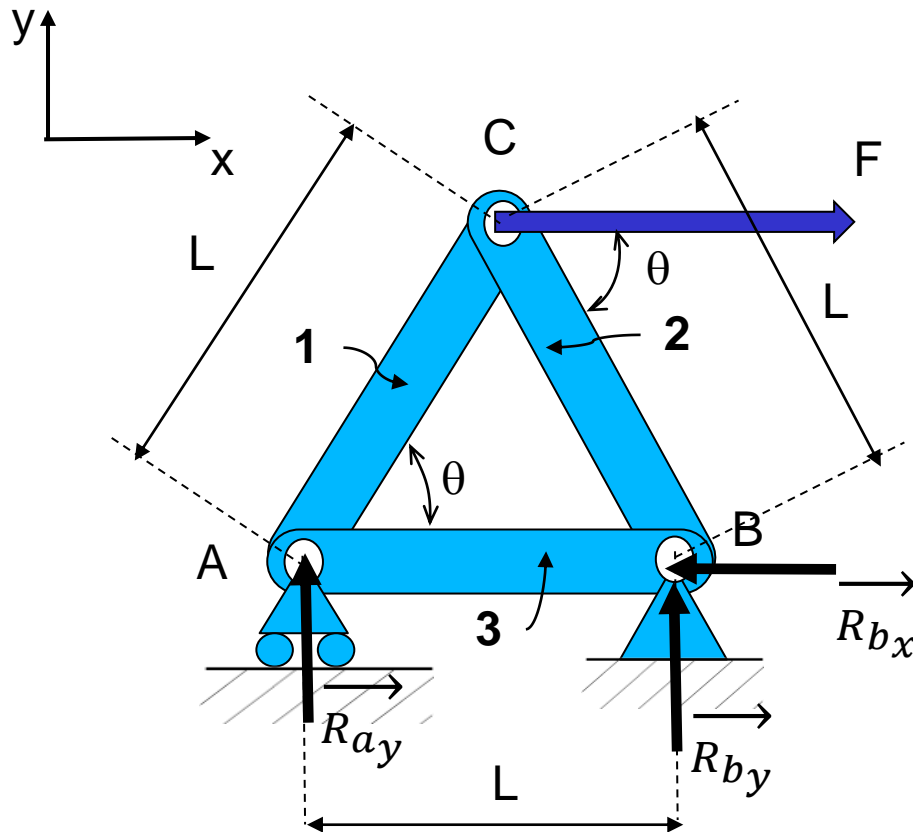
- Desenvolvendo as equações de equilíbrio estático para o corpo rígido abaixo





## Estado de tensão geral sobre um elemento

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



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

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

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

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

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

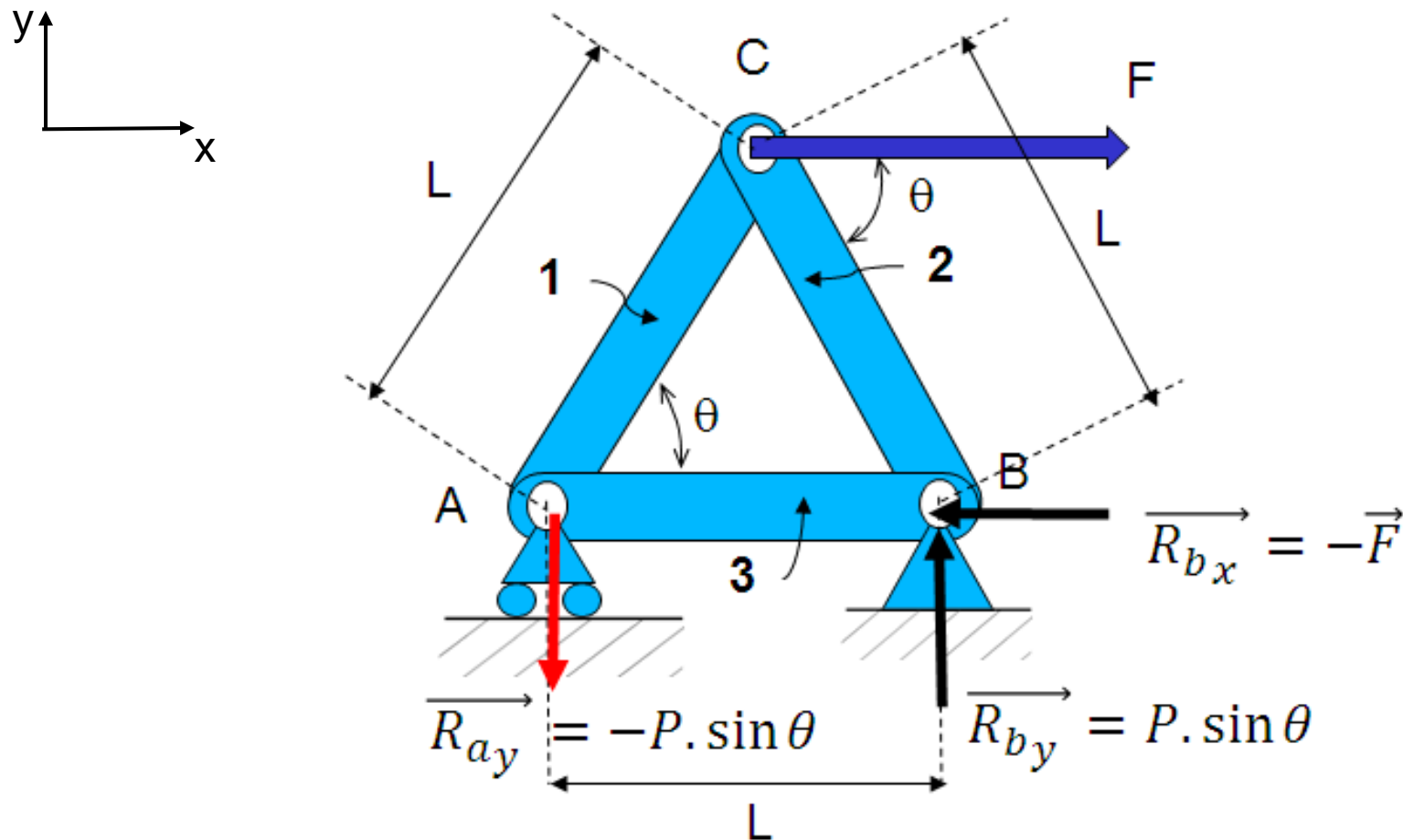
$$\sum \vec{M}_A = 0 \quad \vec{R}_{by} \cdot L + \vec{F} \cdot \sqrt{\left(\frac{3}{4}L^2\right)} = 0$$

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



## Estado de tensão geral sobre um elemento

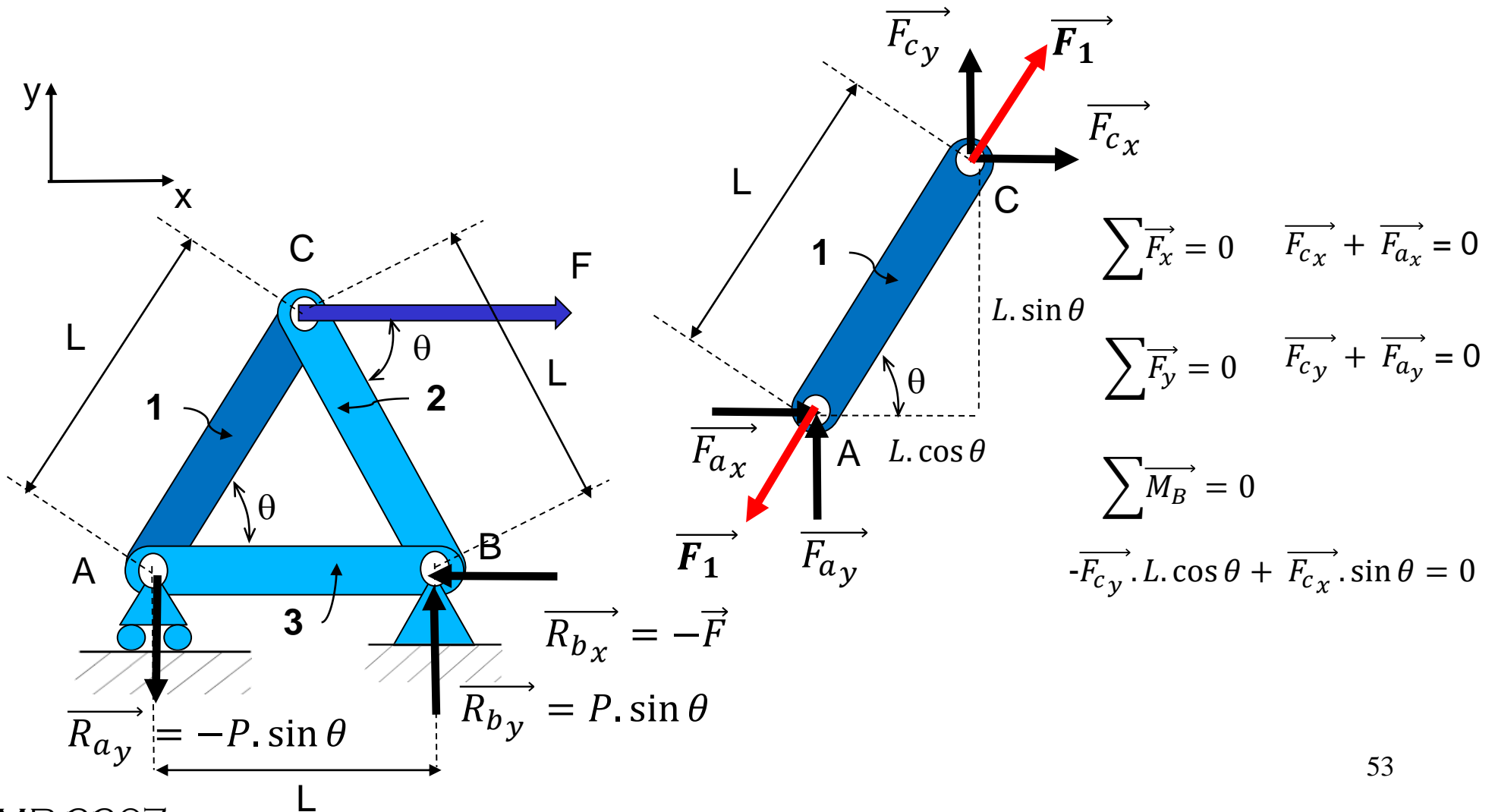
- Desenvolvendo as equações de equilíbrio estático para o corpo rígido abaixo





## Resultantes Internas

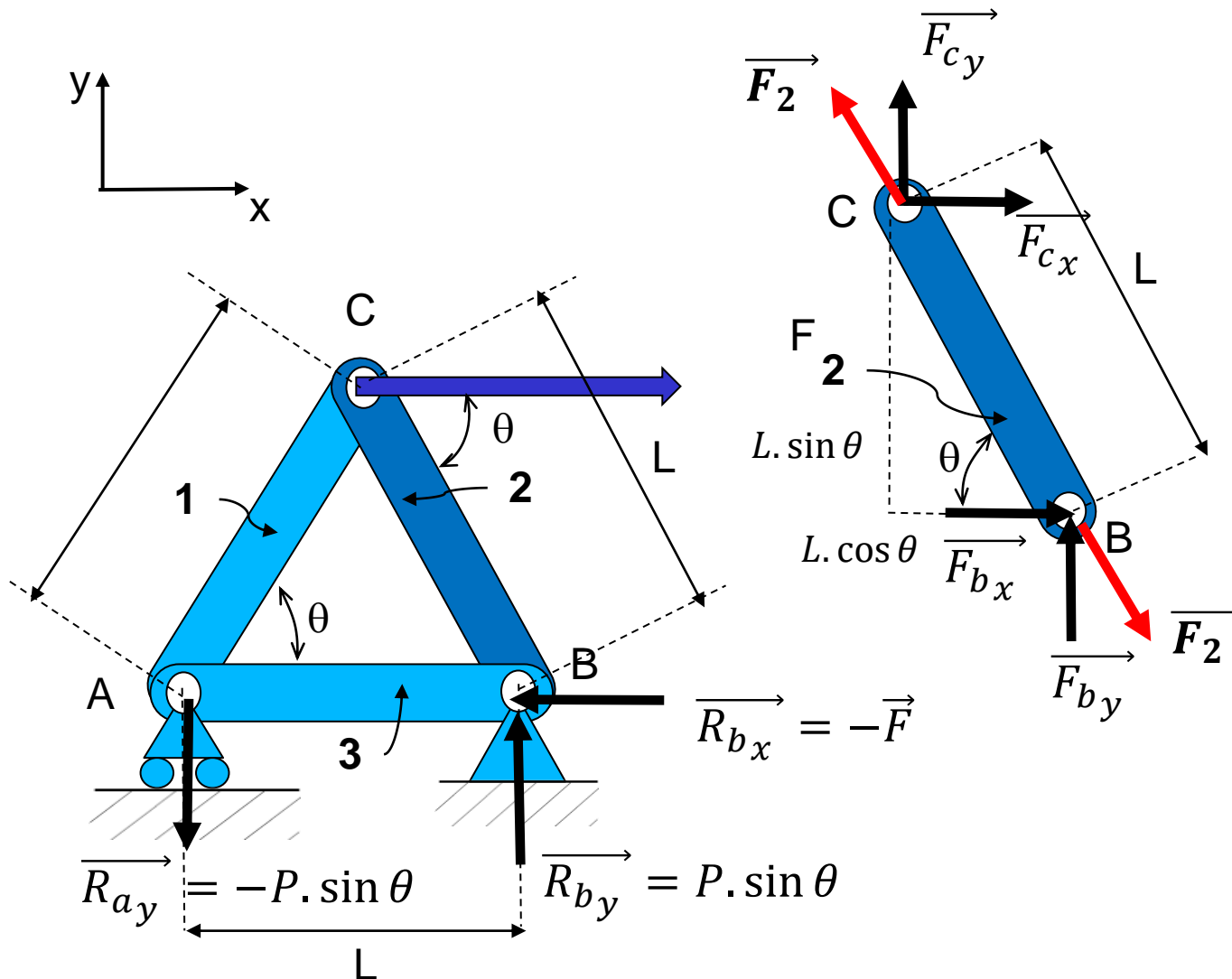
### Análise individual dos esforços





## Resultantes Internas

### Análise individual dos esforços



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

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

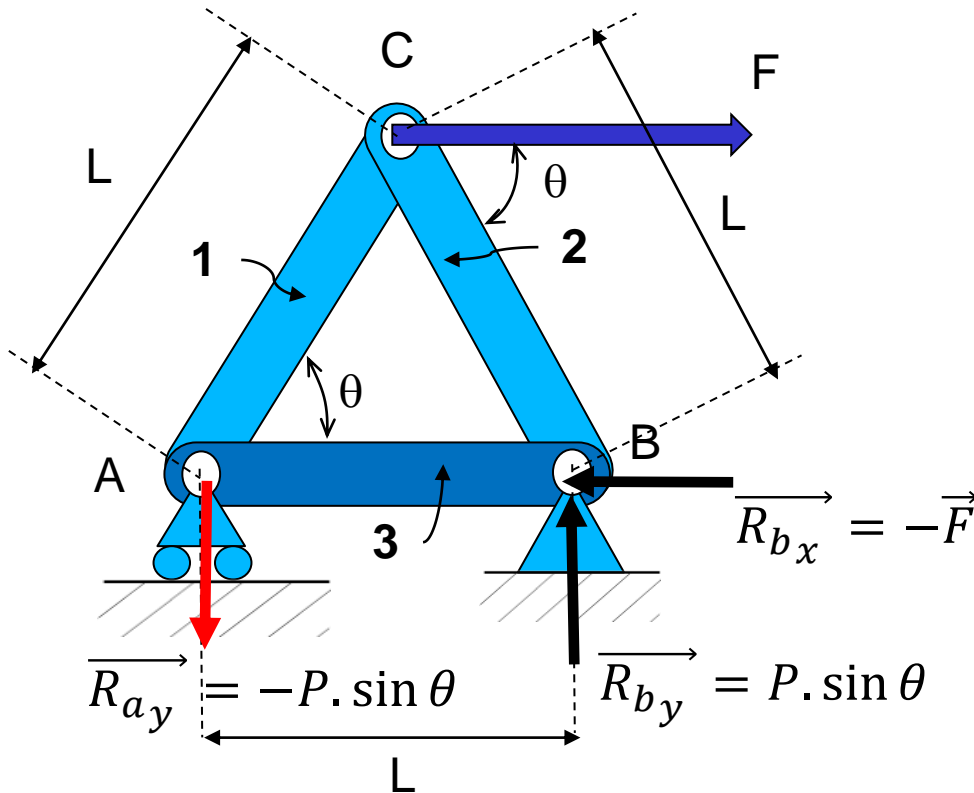
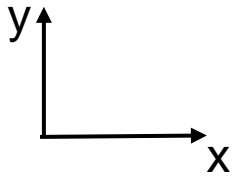
$$\sum \vec{M}_B = 0$$

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



## Resultantes Internas

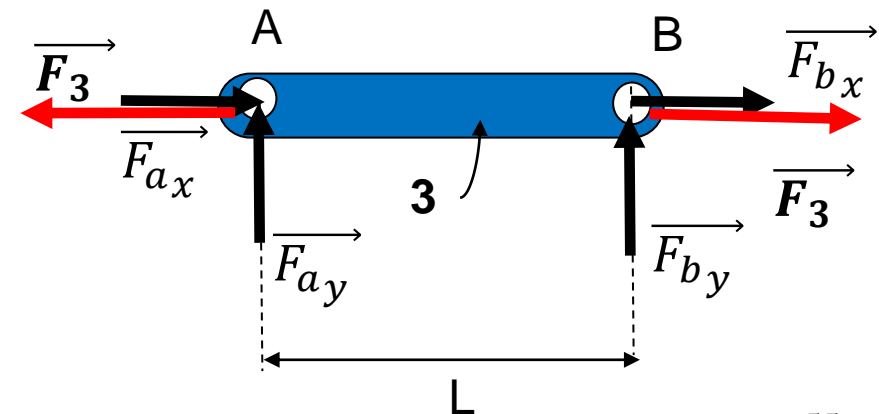
### Análise individual dos esforços



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

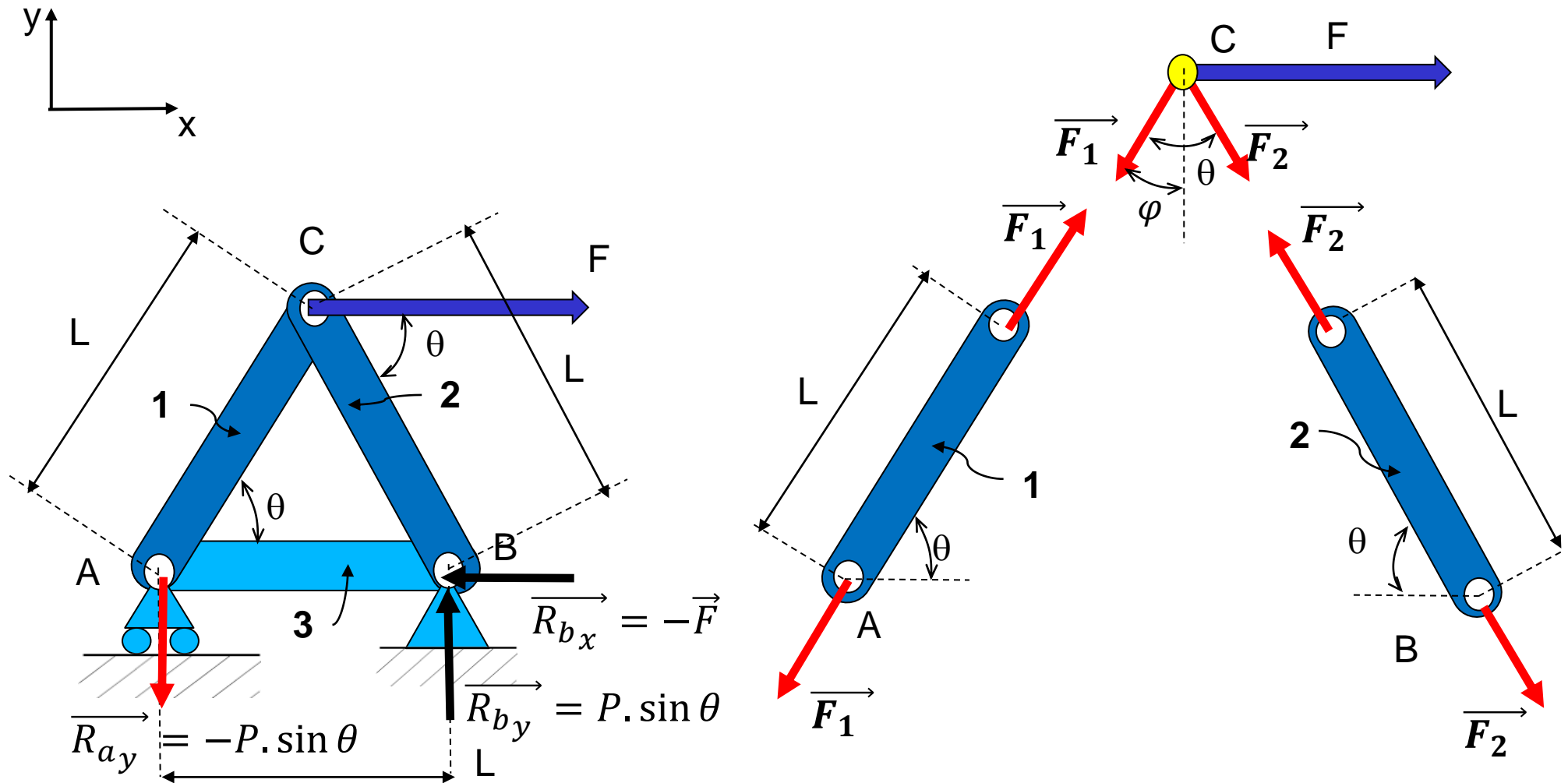
$$\sum \vec{F}_y = 0 \quad \vec{F}_{cy} + \vec{F}_{ay} = 0$$

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





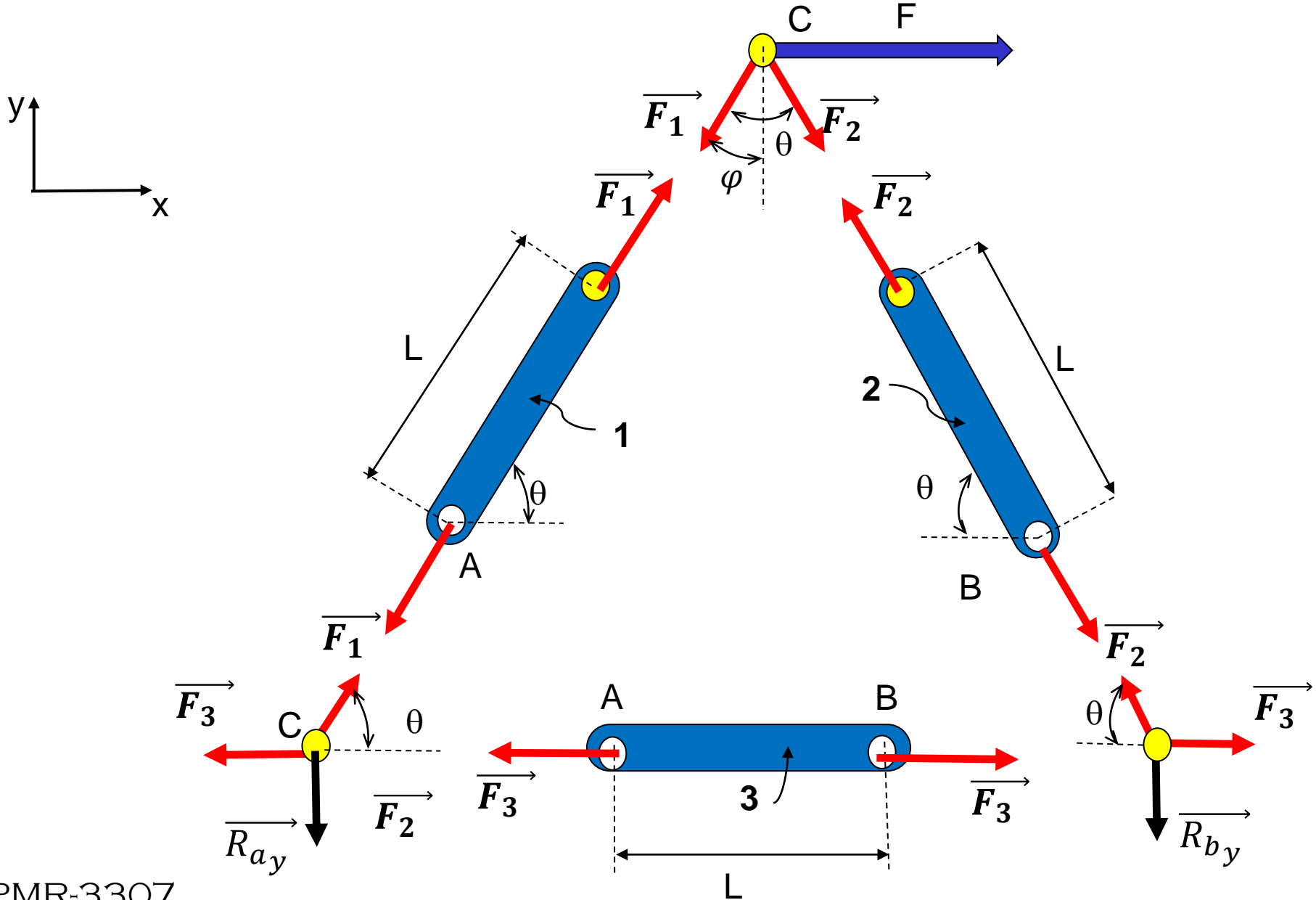
## Esforços combinados ( $\neq$ Tensões combinadas)





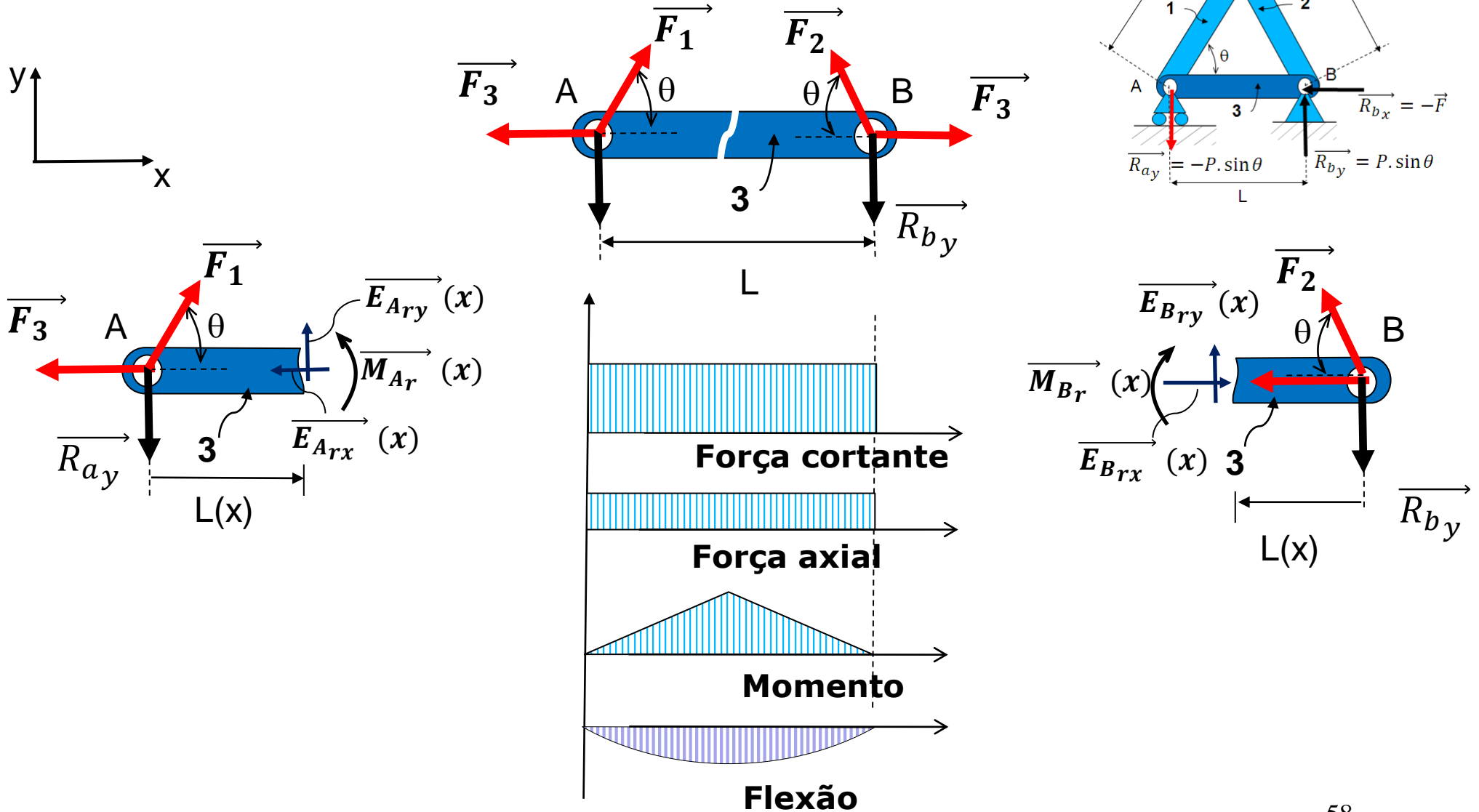


## Esforços combinados



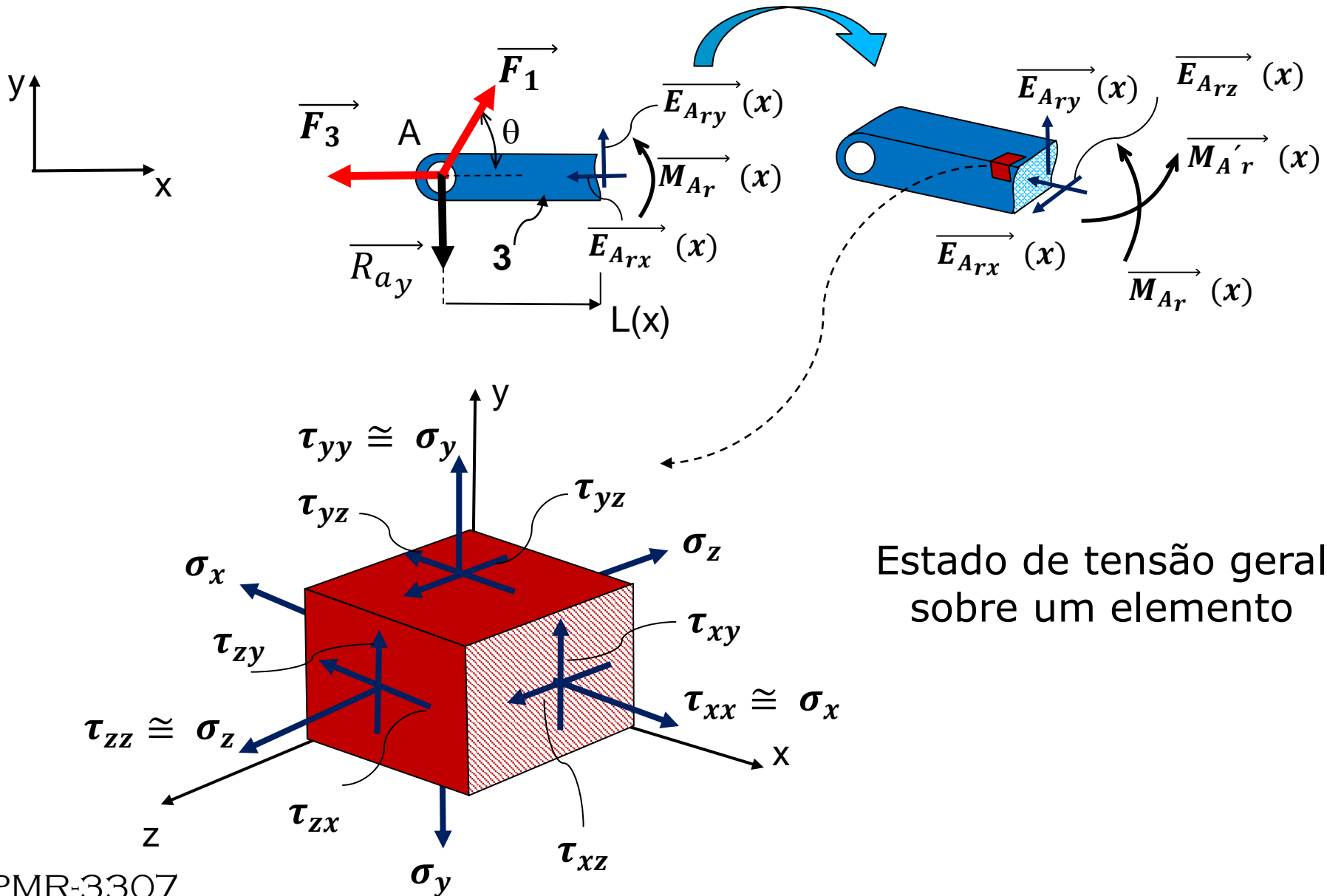


## Diagrama de Esforços





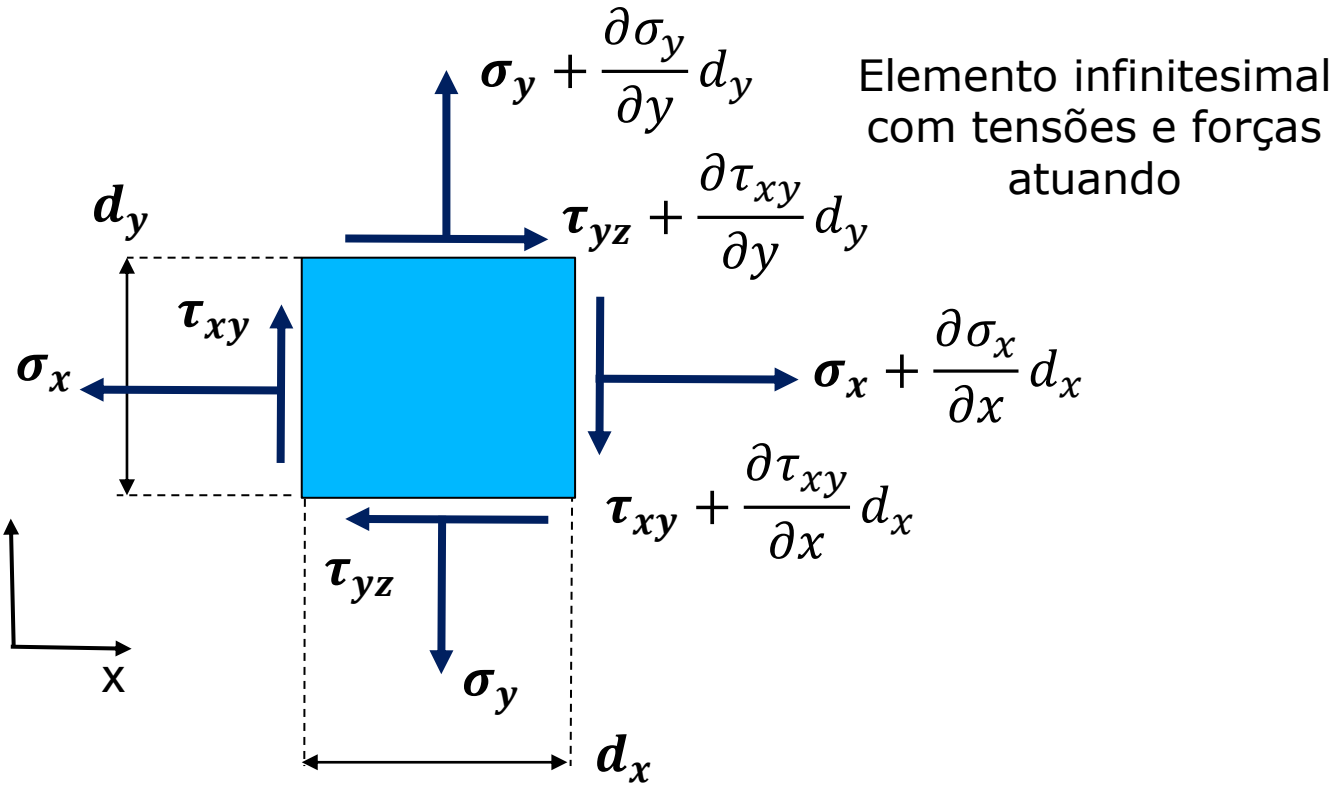
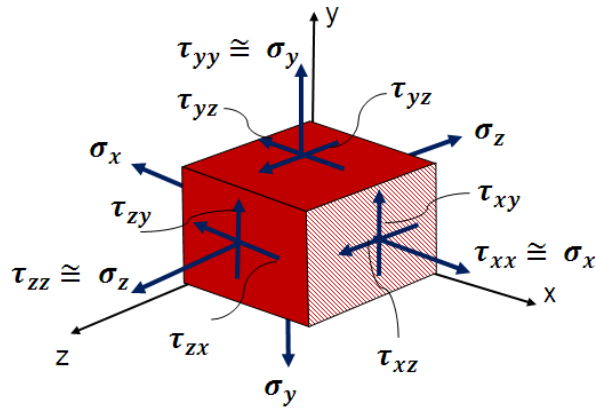
## Estado de tensão geral sobre um elemento



Estado de tensão geral sobre um elemento



## Equações diferenciais de equilíbrio



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

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

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

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



**FIM DA AULA 01**