



universidade de aveiro  
theoria poiesis praxis



# DESIGN DE ESTRUTURAS AEROESPACIAIS

**Daniel Afonso**

Escola Superior Aveiro Norte,  
Universidade de Aveiro

Centro de Tecnologia Mecânica e  
Automação (TEMA)

dan@ua.pt [www.ua.pt/pt/p/16609746](http://www.ua.pt/pt/p/16609746)

# SUMÁRIO

## Estruturas aeroespaciais: Treliças, Vigas e Pórticos

- Definição e tipos de treliças
- Avaliação de treliças
- Avaliação de vigas e pórticos

## Estruturas aeroespaciais: Estruturas de Casca

- Definição de estruturas de casca
- Aplicação de estruturas de casca

## Estruturas aeroespaciais

- Combinação de vigas, treliças e cascas





universidade de aveiro  
theoria poiesis praxis



# ESTRUTURAS AEROESPACIAIS

Treliças

# TRELIÇAS (ESTRUTURAS RETICULADAS)

Estrutura formada por vários elementos ligados entre si



## Barras rígidas (strut)

- Cada barra suporta apenas esforços axiais
- A disposição das barras é responsável pela rigidez da estrutura



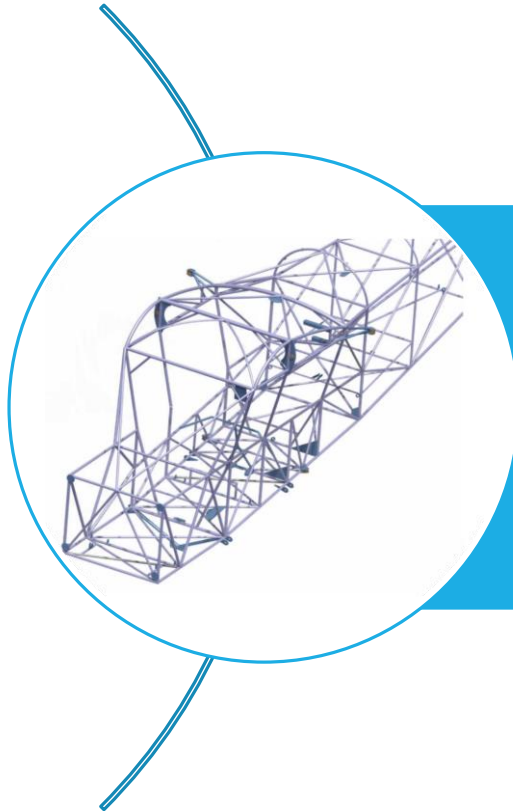
## Ligações articuladas entre as barras: nós (nodes)

- Permitem a rotação livre das barras
- São geralmente articulações simples (2D) ou juntas esféricas (3D)

# TRELIÇAS (ESTRUTURAS RETICULADAS)



# TRELIÇAS (ESTRUTURAS RETICULADAS)

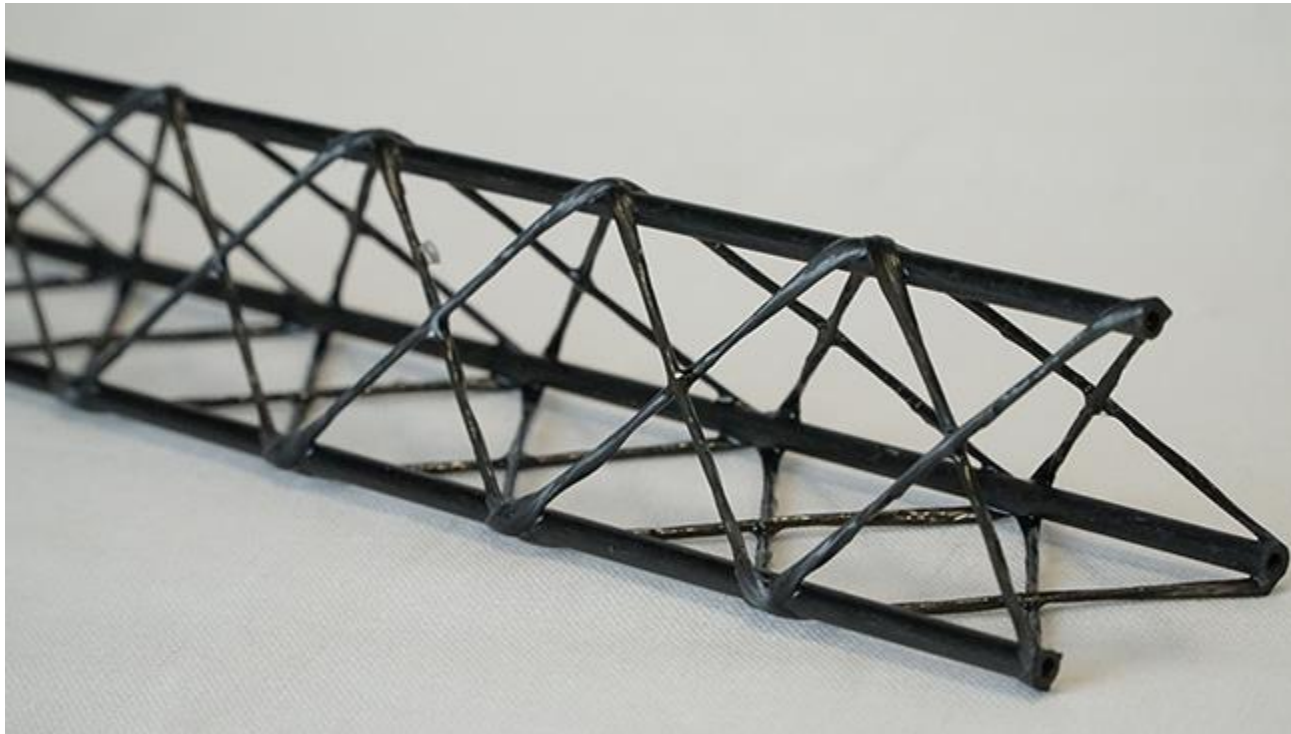


Por motivos construtivos,  
as juntas podem ser substituídas por ligações rígidas

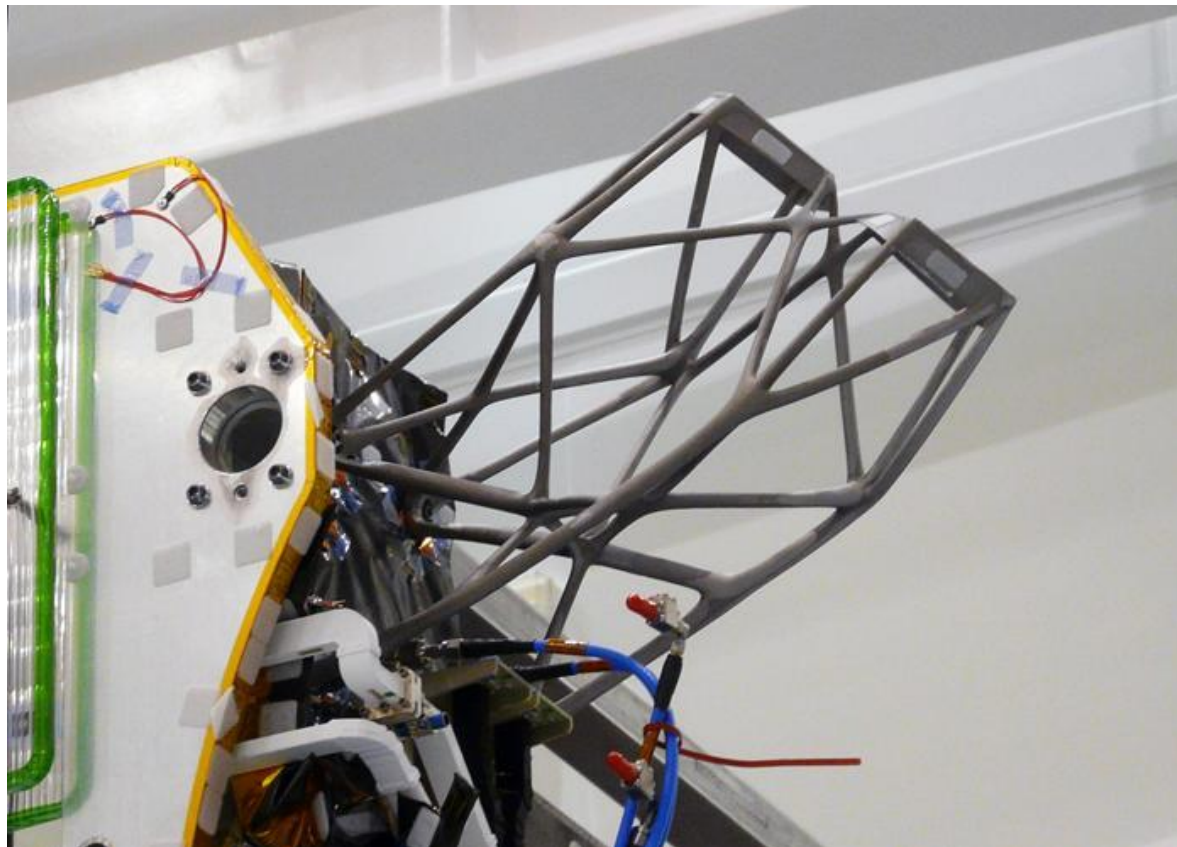
- Fabrico de várias barras num único componentes
- Facilidade de ligação mecânica
- Apesar da ligação rígida a tornar num pórtico, a escala entre comprimentos de barras e ligações mantém o seu comportamento estrutural próximo de uma treliça



# TRELIÇAS (ESTRUTURAS RETICULADAS)



# TRELIÇAS (ESTRUTURAS RETICULADAS)

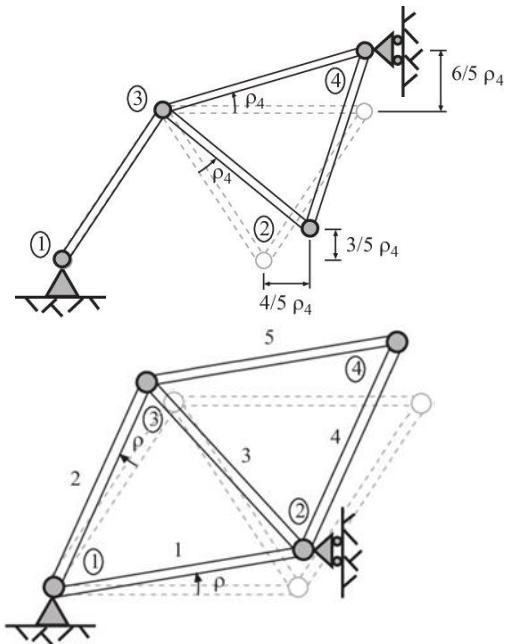




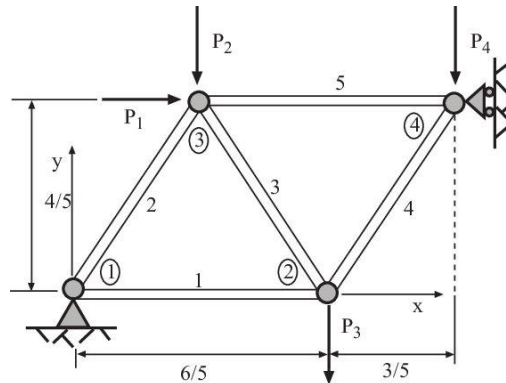
# ANÁLISE DE TRELIÇAS

## Treliças Estaticamente Determinadas

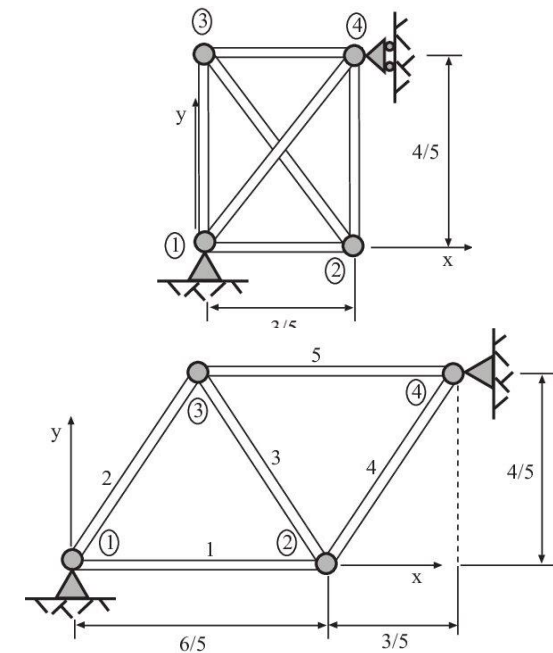
- hipostática



- isoestática



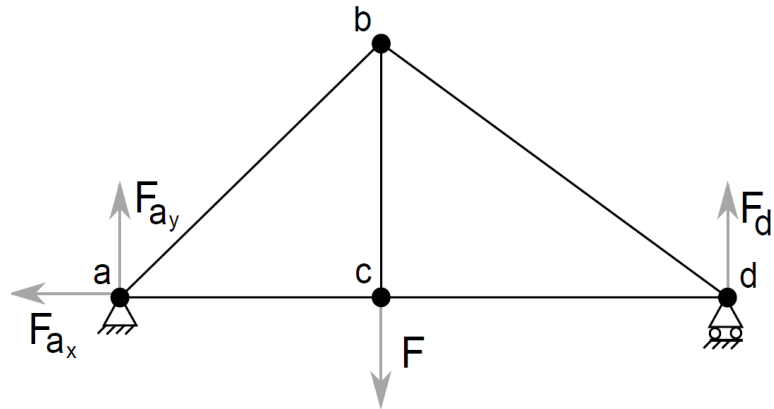
- hiperestática



# ANÁLISE ESTRUTURAS ISOSTÁTICAS

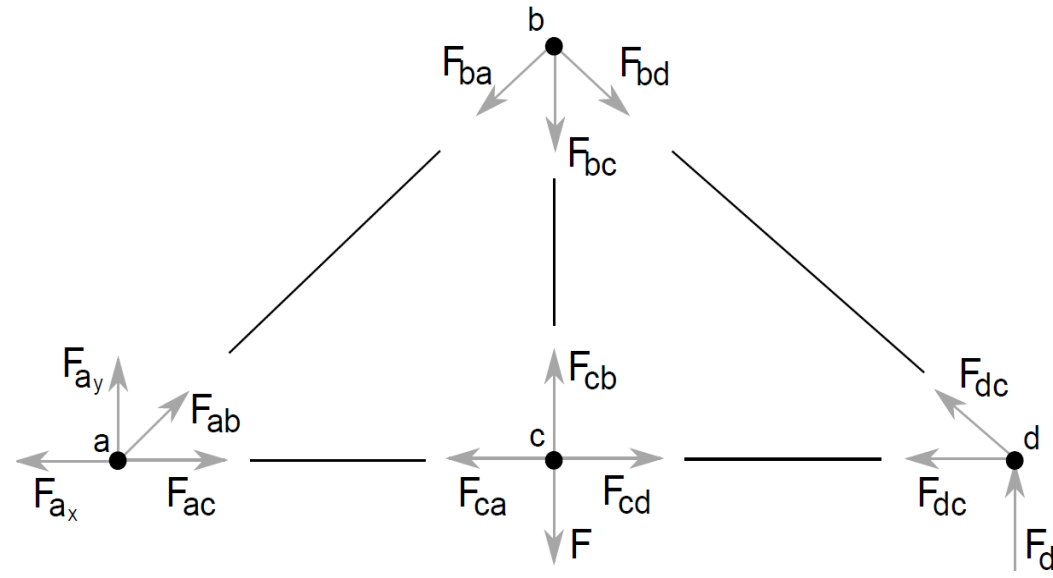
## Cálculo de forças externas

$$\sum \vec{F} = \vec{0}$$
$$\sum \vec{M}_o = \vec{0}$$



# ANÁLISE ESTRUTURAS RETICULADAS ISOSTÁTICAS

## Cálculo de forças internas



$$\sum \vec{F} = \vec{0}$$
$$\vec{F}_{ij} = \vec{F}_{ji}$$

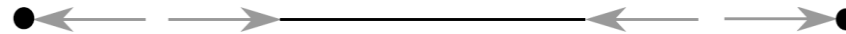


# ANÁLISE ESTRUTURAS RETICULADAS ISOSTÁTICAS

Barras à tração



Barras à compressão







# ANÁLISE ESTRUTURAS RETICULADAS ISOSTÁTICAS

Limite de barra à tração depende da tensão de cedência do material

$$\sigma_{cr\_tensão} = \frac{F_{cr}}{A} = \sigma_c$$

Limite da barra à compressão depende da tensão crítica, evitando encurvamento

$$\sigma_{cr\_compressão} = \frac{F_{cr}}{A} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\pi^2 \cdot E}{\left(K \cdot \frac{L}{r}\right)^2} \\ \sigma_c \end{array} \right.$$

End Condition:	Pinned-Pinned	Fixed-Fixed	Fixed-Pinned	Fixed-Free
Illustration:				
Theoretical Effective Length Factor, $K$ :	1	0.5	0.699	2
Recommended Effective Length Factor, $K$ :	1	0.9	0.9	2.1

# DESIGN DE ESTRUTURAS RETICULADAS ISOSTÁTICAS

Os apoios devem impedir o movimento como corpo rígido uma vez por grau de liberdade

- Restrição de 3 DoF em 2D
- Restrição de 6 DoF em 3D
- Número de apoios depende do número e disposição de barras

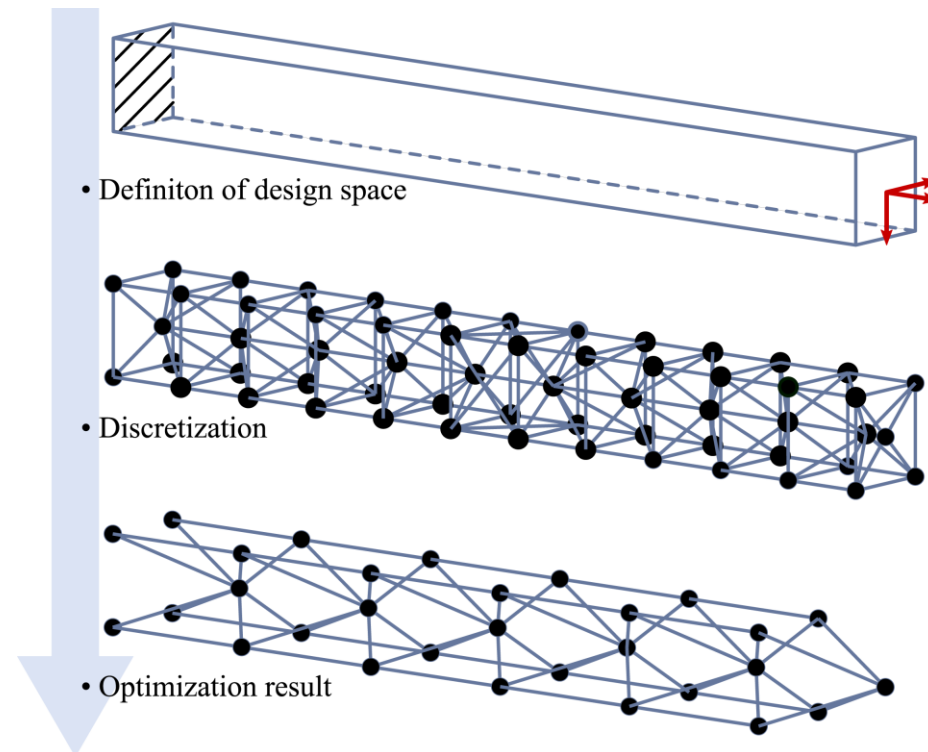
O movimento (rotação) de cada barra deve ser restrito apenas uma vez pelas restantes barras

- A organização espacial de barras promove a rigidez da estrutura
- Barras apenas sujeitos a tração podem ser substituídos por elementos flexíveis
- Barras sujeitas a compressão podem (por vezes) ser substituídas pela diagonal oposta (à tração)



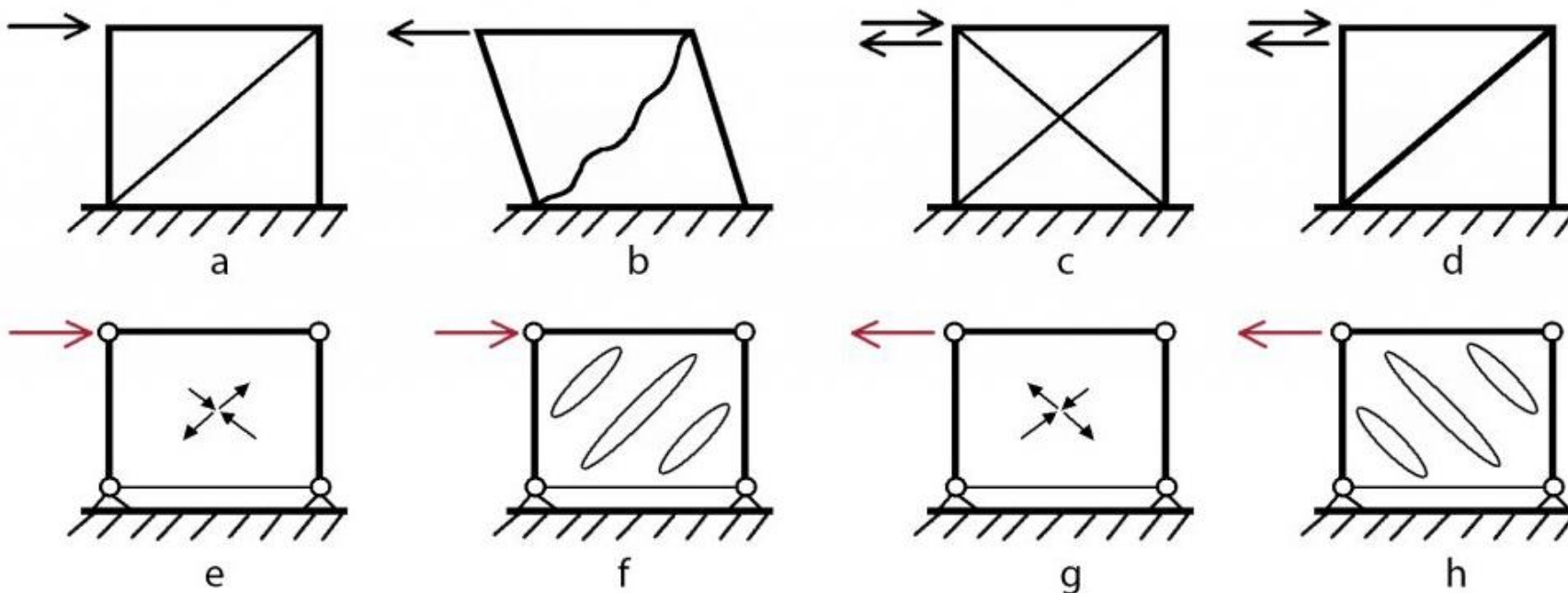
# DESIGN DE ESTRUTURAS RETICULADAS ISOSTÁTICAS

## Definição e otimização da geometria



# DESIGN DE ESTRUTURAS RETICULADAS ISOSTÁTICAS

Definição e otimização da geometria



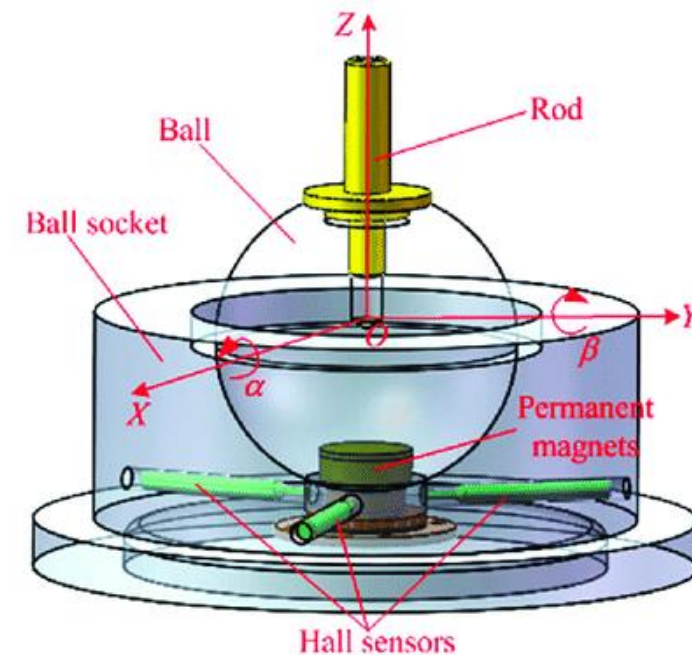
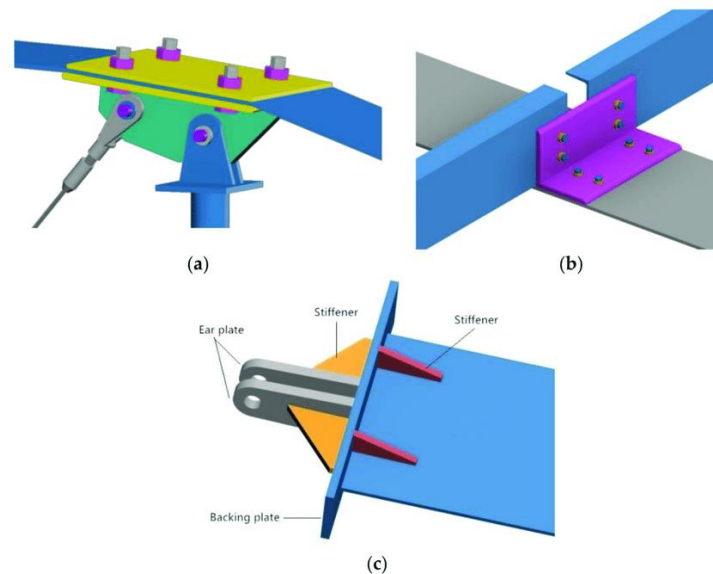
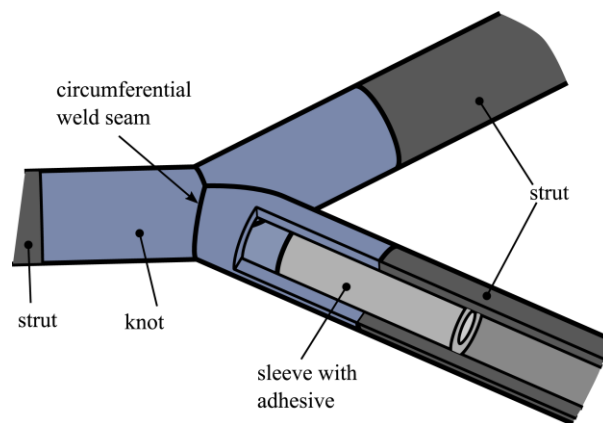
a - c  
elementos  
flexíveis

d  
diagonal  
rígida

e - h  
diagonal  
substituída  
por chapa

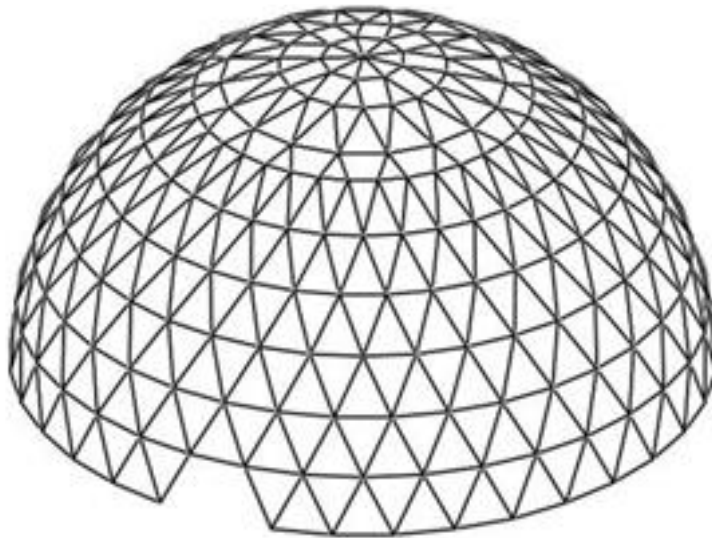
# DESIGN DE ESTRUTURAS RETICULADAS ISOSTÁTICAS

Seleção de materiais e definição do método de construção

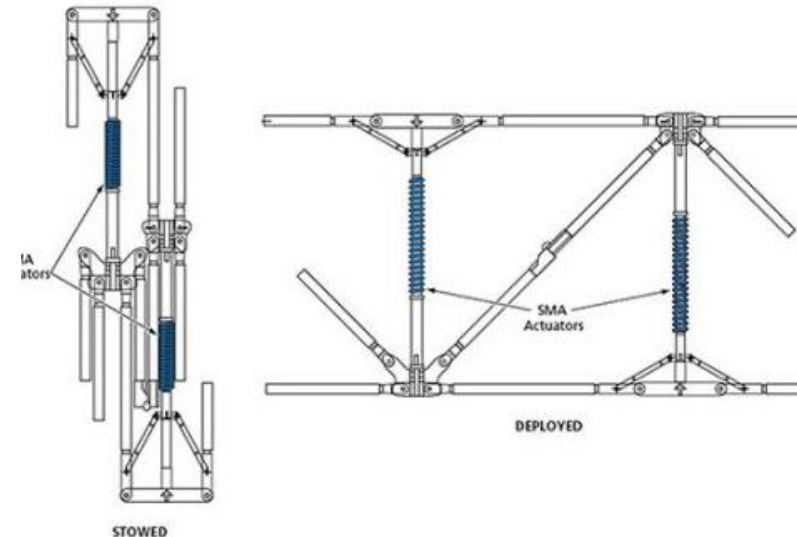




# APLICABILIDADE DE ESTRUTURAS RETICULADAS



Estruturas de  
baixo peso



Estruturas  
reconfiguráveis



# ESTRUTURAS AEROESPACIAIS

Vigas e Pórticos

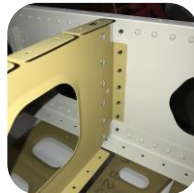
# VIGAS E PÓRTICOS

Estrutura formada por vários elementos ligados entre si



## Vigas rígidas (beam)

- Cada viga suporta apenas esforço axiais, transversais e momentos fletores e torsões
- A secção das vigas é principal responsável pela rigidez da estrutura
- A disposição das vigas contribui para a rigidez da estrutura

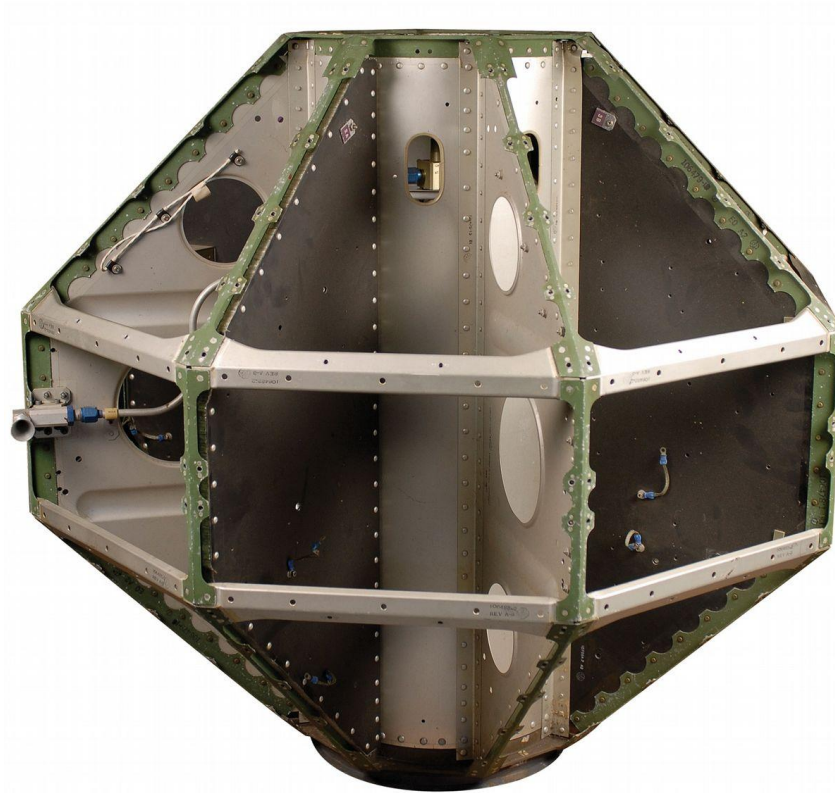


## Ligações fixas entre as vigas

- Suportam momento
- Podem ligar diretamente vigas ou utilizar elementos adicionais



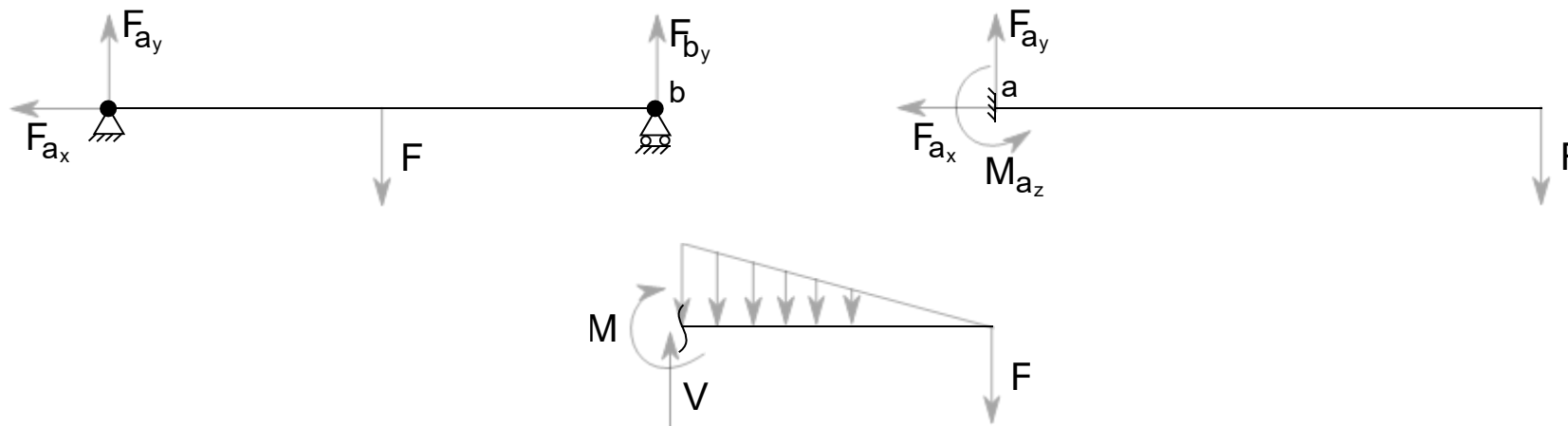
# VIGAS E PÓRTICOS



# ANÁLISE DE VIGAS

## Vigas Estaticamente Determinadas

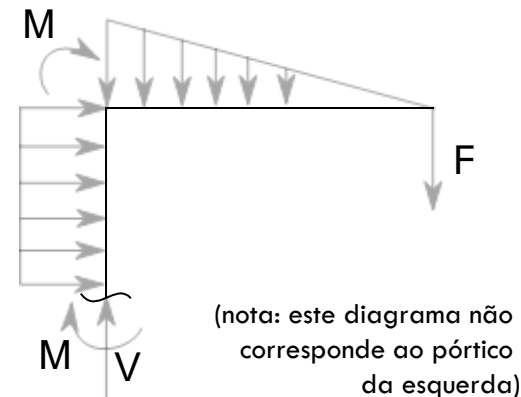
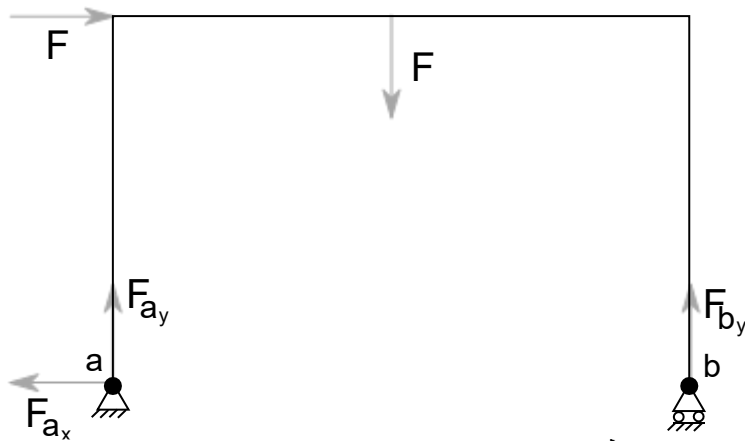
- Determinação de reações nos apoios (forças e momentos)
- Cálculo de esforços transversos e momentos fletores/torsores



# ANÁLISE DE PÓRTICOS

## Pórticos Estaticamente Determinadas

- Cálculo equivalente, possibilidade de cálculo de cada viga de forma independente
- Ligações entre vigas preservam esforços transversos e momentos

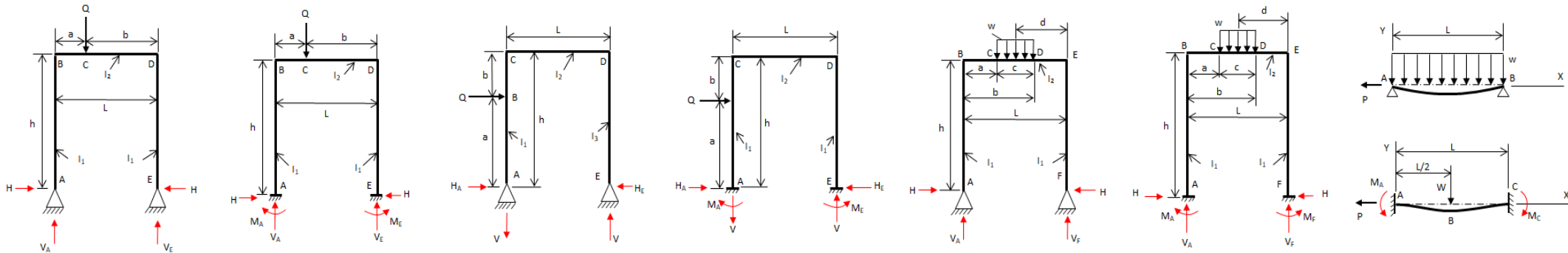




# ANÁLISE DE VIGAS E PÓRTICOS

## Vigas e Pórticos Estaticamente Indeterminados

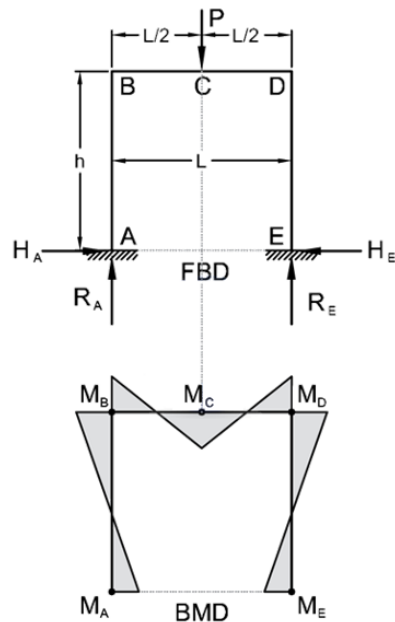
- Consulta de formulário para distribuição de esforços externos
- Cálculo de esforços transversos e momentos fletores/torsores



Richard Abbott, Analysis and Design of Composites and Metallic Flight Vehicle Structures, Abbott Aerospace SEZC Technical Library, 2019

# ANÁLISE DE VIGAS E PÓRTICOS

## Vigas e Pórticos Estaticamente Indeterminados



### Important Values

$$e \dots \dots \dots = \frac{h}{L}$$

$$\beta \dots \dots \dots = \frac{I_h}{I_v}$$

### Support Reactions

$$R_A = R_E \dots \dots \dots = \frac{P}{2}$$

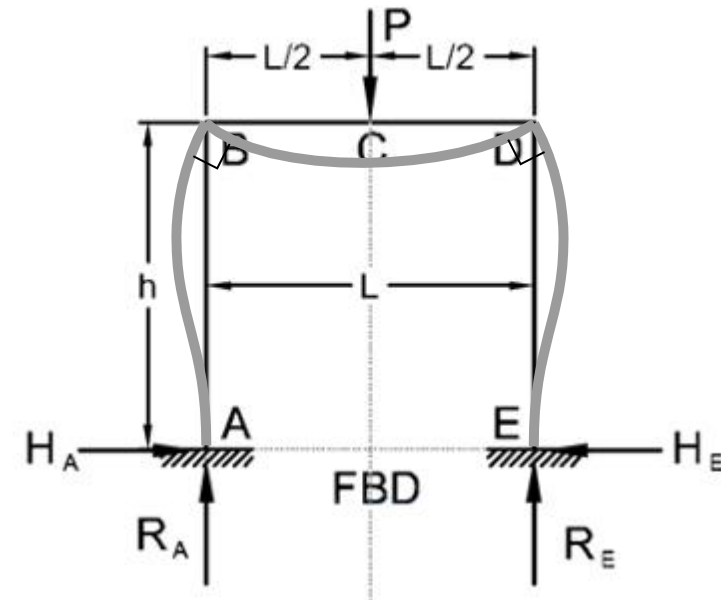
$$H_A = H_E \dots \dots \dots = \frac{3PL}{8h(\beta e + 2)}$$

### Bending Moments

$$M_A = M_E \dots \dots \dots = \frac{PL}{8(\beta e + 2)}$$

$$M_B = M_D \dots \dots \dots = \frac{PL}{4(\beta e + 2)}$$

$$M_C \dots \dots \dots = \frac{PL}{4} \left( \frac{\beta e + 1}{\beta e + 2} \right)$$



# APLICABILIDADE DE ESTRUTURAS RETICULADAS



Estruturas de  
elevada  
rigidez/resistência



Estruturas com  
espaço disponível no  
interior



# ESTRUTURAS AEROESPACIAIS

Estruturas de  
casca

# ESTRUTURAS DE CASCA

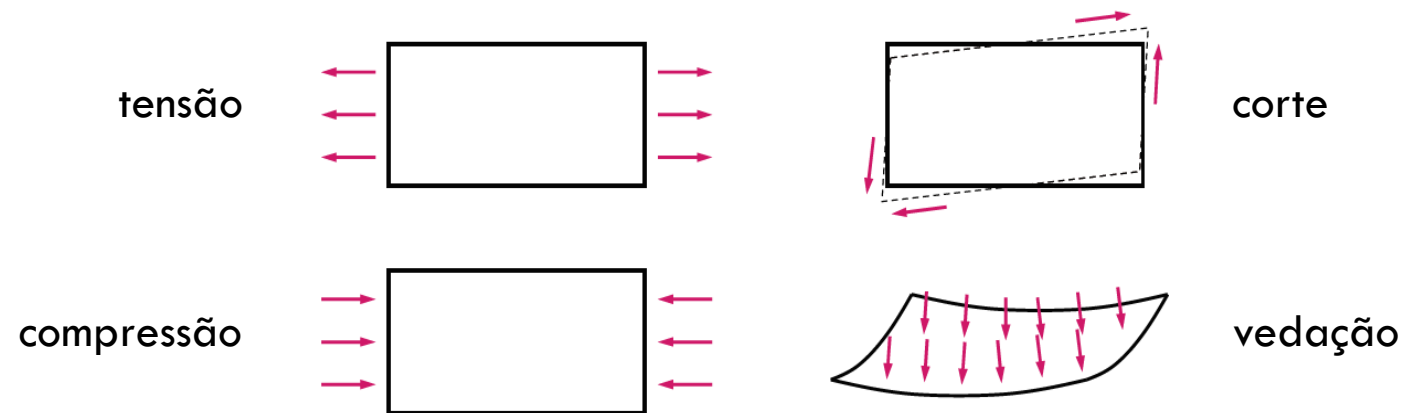
A utilização de metal e compósitos promove o desenho de estruturas tipo casca

- Reforço dos esforço de corte (em substituição de barras e cabos em treliças)
- Reforço do esforço de corte em vigas e pórticos
- Suporte de esforços perpendiculares ao plano

Uma treliça ou pórtico reforçado com uma chapa é considerada uma estrutura de casca

- Considerada estrutura de paredes finas
- Possibilidade de estruturas de casca simples ou reforçadas

# ESFORÇO SUPORTADO POR UMA CASCA





# ESFORÇO SUPORTADO POR UMA CASCA

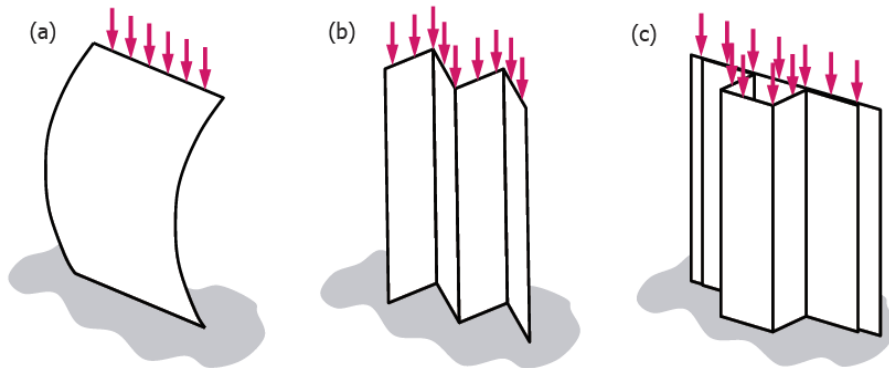
Esforços de tração são facilmente suportados por cascas simples

Esforços de compressão e de corte necessitam o reforço da casca

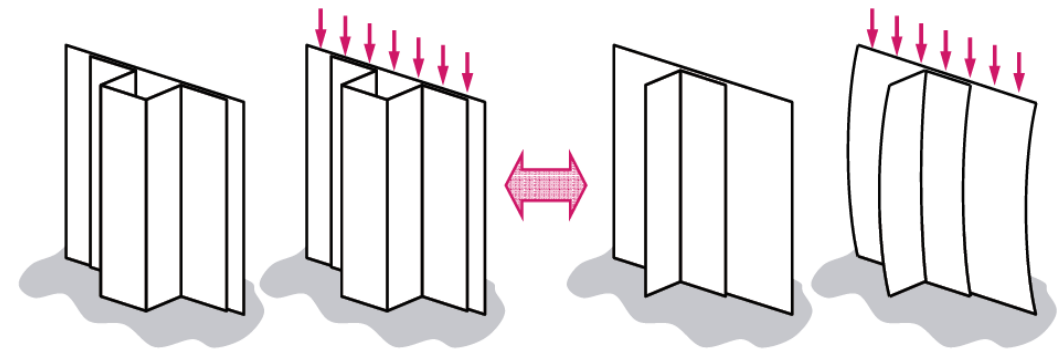
- Reforço com base na geometria da casca
- Reforço com base em elementos adicionais

# ESFORÇO SUPORTADO POR UMA CASCA

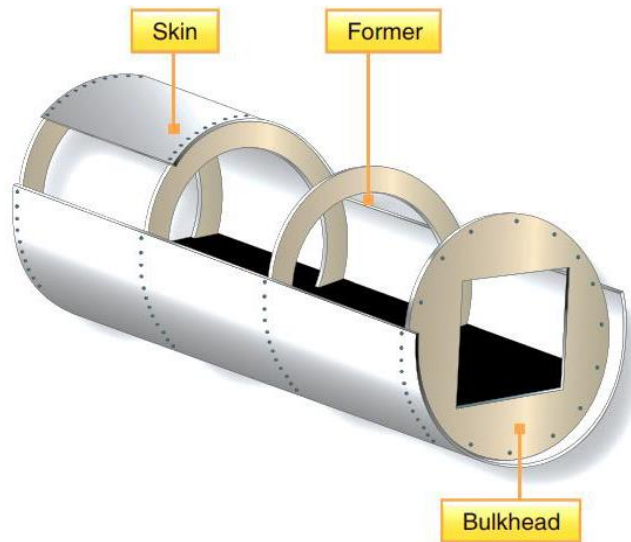
Reforço com base na geometria da casca



Reforço com base em elementos adicionais

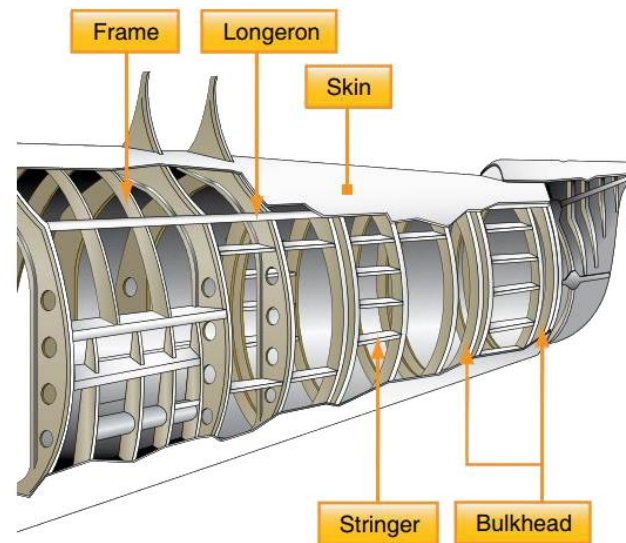


# ESTRUTURAS DE CASCA



## Estrutura monocoque

- Estrutura de casca simples, apenas com elementos de apoio à forma



## Estrutura semi-monocoque

- Estrutura de casca reforçada por vigas

# APLICABILIDADE DE ESTRUTURAS DE CASCA



Tanques e depósitos  
(ar ou líquidos)



Fuselagem e outras  
estruturas