



# 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: Estruturas integralmente reforçadas

- Definição de estruturas integralmente reforçadas
- Aplicabilidade

## Estruturas aeroespaciais: Estruturas Sandwich

- Definição de estruturas sandwich
- Princípio de funcionamento de estruturas sandwich
- Aplicabilidade





# ESTRUTURAS AEROESPACIAIS

Estruturas  
integralmente  
reforçadas

# ESTRUTURAS INTEGRALMENTE REFORÇADAS

O princípio de construção de estruturas semi-monocoque implica o fabrico e montagem de muitos componentes

- Custo de fabrico de muitos componentes
- Custo logístico de gestão de muitos componentes
- Folgas de montagem

Estruturas integralmente reforçadas têm um princípio de funcionamento semelhante numa única peça

- A estrutura é desenvolvida pela maquinagem de um painel espesso, soldadura de painéis ou moldação de compósitos
- Desenvolvimento de tecnologias de manufatura aditiva cria grande potencial para novas estruturas integralmente reforçadas

# ESTRUTURAS INTEGRALMENTE REFORÇADAS

estruturas de montagem



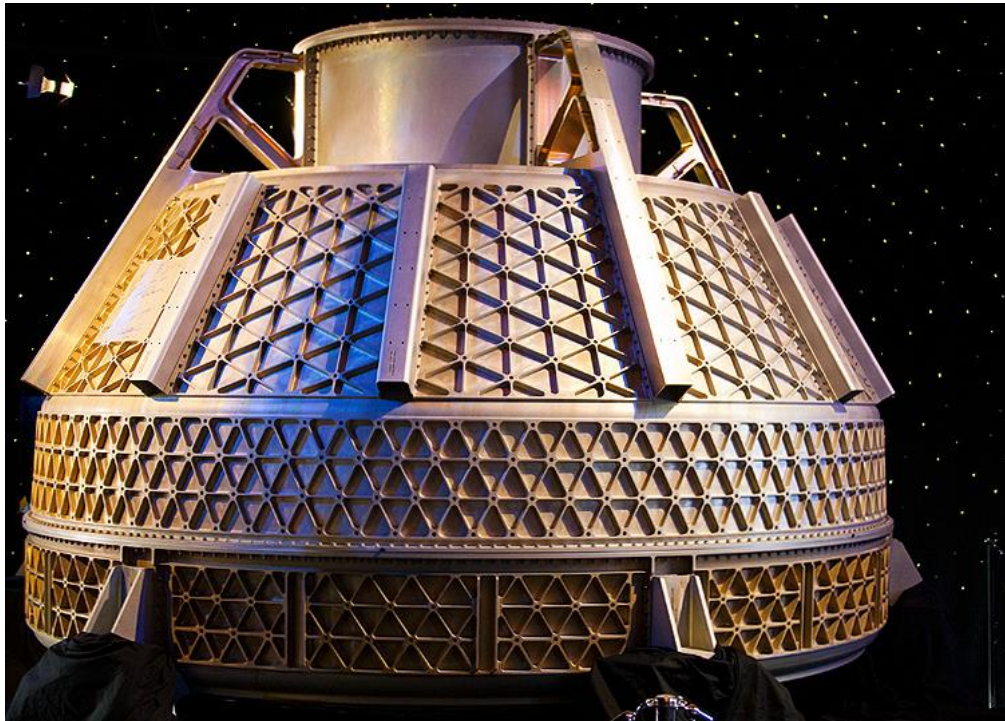
estruturas integralmente reforçada (soldadura laser)





# ESTRUTURAS INTEGRALMENTE REFORÇADAS

estruturas integralmente reforçada (maquinada)



estruturas integralmente reforçada (compósito)



# ESTRUTURAS INTEGRALMENTE REFORÇADAS



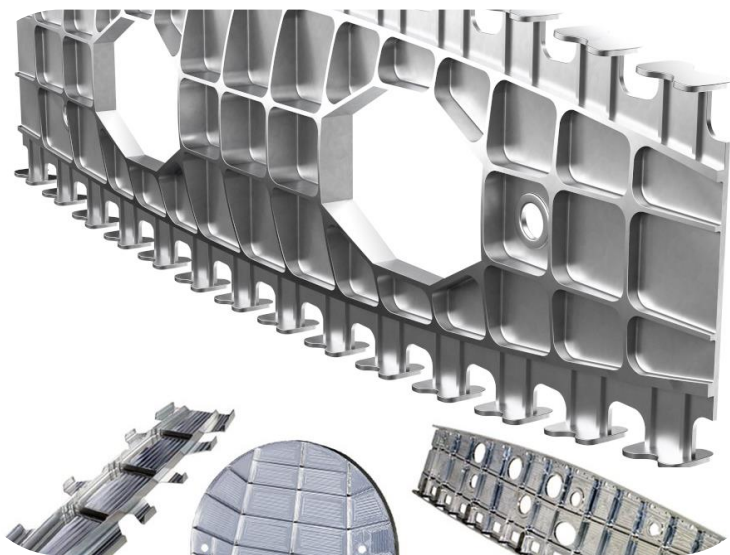
## Vantagens

- Menor custo de produção
- Tolerâncias de fabrico/montagem mais apertadas
- Maior flexibilidade na distribuição de espessura e reforços

## Desvantagens

- Estruturas mais suscetíveis a propagação de danos
- Maior dificuldade de manutenção

# APLICABILIDADE DE ESTRUTURAS INTEGRALMENTE REFORÇADAS



Peças especiais



Componentes de  
grande dimensão



# ESTRUTURAS DE CASCA E ESTRUTURAS INTEGRALMENTE REFORÇADAS







As estruturas de casca permitem suportar uma grande variedade de esforços

- Esforço de tração
- Esforço de compressão → possibilidade de encurvadura
- Esforço de flexão → possibilidade de grandes deformações
- Esforço de torção → possibilidade de grandes deformações

Reforço de cascas e as estruturas integralmente reforçadas aumentam a rigidez (e resistência) da estrutura

- Distribuição de reforços promove um comportamento não uniforme da estrutura
- Reforços aumentam substancialmente a massa da estrutura

# MOTIVO DAS GRANDES DEFORMAÇÕES

SR. NO.	TYPE OF BEAM	MAX. BM	SLOPE	DEFLECTION
1		M	$\theta = \frac{ML}{EI} = \frac{ML}{EI}$	$\delta = \theta \times \frac{L}{2} = \frac{ML^2}{2EI}$
2		WL	$\theta = \frac{ML}{2EI} = \frac{WL^2}{2EI}$	$\delta = \theta \times \frac{2L}{3} = \frac{WL^3}{3EI}$
3		$\frac{WL^2}{2}$	$\theta = \frac{ML}{3EI} = \frac{WL^3}{6EI}$	$\delta = \theta \times \frac{3L}{4} = \frac{WL^4}{8EI}$
4		$\frac{WL^2}{6}$	$\theta = \frac{ML}{4EI} = \frac{WL^3}{24EI}$	$\delta = \theta \times \frac{4L}{5} = \frac{WL^4}{30EI}$
5		$\frac{WL}{4}$	$\theta = \frac{ML}{4EI} = \frac{WL^2}{16EI}$	$\delta = \theta \times \frac{L}{3} = \frac{WL^3}{48EI}$
6		$\frac{WL^2}{8}$	$\theta = \frac{ML}{3EI} = \frac{WL^3}{24EI}$	$\delta = \theta \times \frac{5L}{16} = \frac{5WL^4}{384EI}$

Baixo momento de inercia provoca grandes deformações



universidade de aveiro  
theoria poiesis praxis

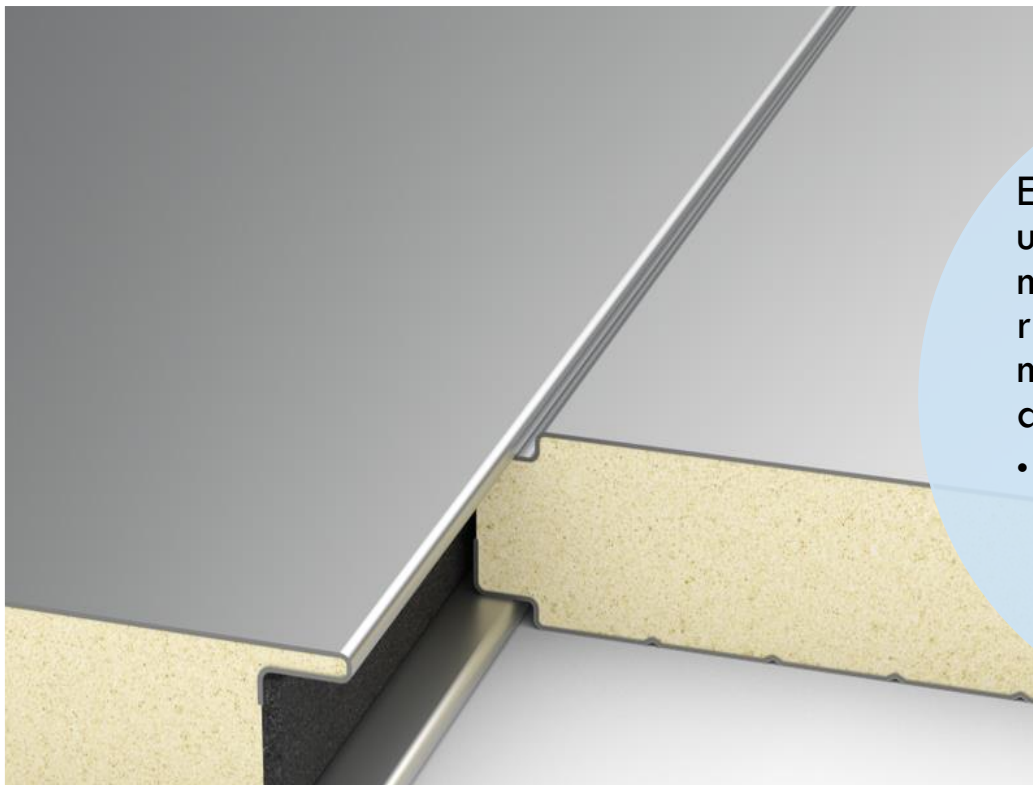


# ESTRUTURAS AEROESPACIAIS

Estruturas  
Sandwich



# ESTRUTURAS SANDWICH

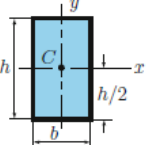
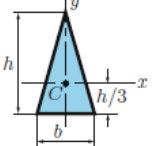
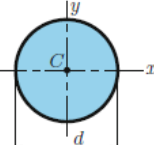
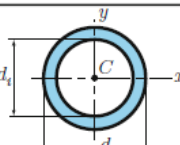
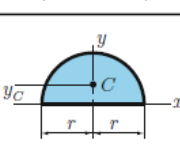


Estrutura formada por uma montagem de materiais de elevada rigidez/resistência e materiais de baixa densidade

- A distribuição eficaz de massa promove o aumento do momento de inércia da secção, contribuindo para o aumento da rigidez da estrutura

# MOMENTO DE INERCIA (DE UMA ÁREA)

Table: Area inertia properties for some common cross sections

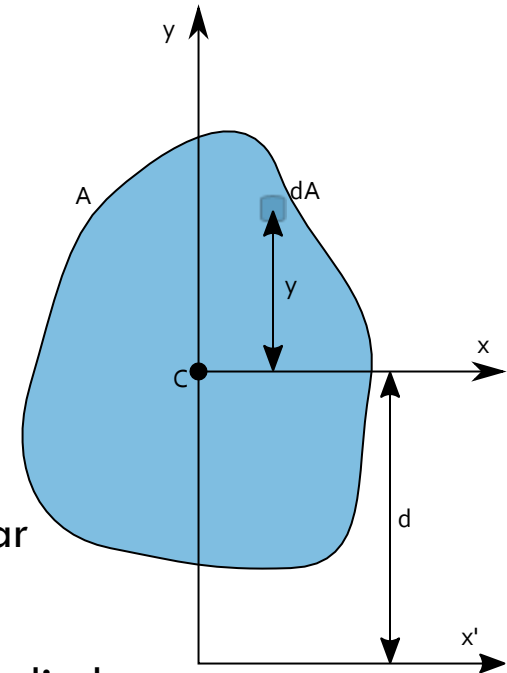
	$A = bh$ $I_{xx} = \frac{bh^3}{12}$ $I_{yy} = \frac{b^3h}{12}$ $I_C = \frac{bh}{12}(b^2 + h^2)$
	$A = \frac{bh}{2}$ $I_{xx} = \frac{bh^3}{36}$ $I_{yy} = \frac{b^3h}{36}$ $I_C = \frac{bh}{36}(b^2 + h^2)$
	$A = \frac{\pi d^2}{4}$ $I_{xx} = I_{yy} = \frac{\pi d^4}{64}$ $I_C = \frac{\pi d^4}{32}$
	$A = \frac{\pi}{4}(d^2 - d_i^2)$ $I_{xx} = I_{yy} = \frac{\pi}{64}(d^4 - d_i^4)$ $I_C = \frac{\pi}{32}(d^4 - d_i^4)$
	$A = \frac{\pi r^2}{2}$ $I_{xx} = I_{yy} = \frac{\pi r^4}{8}$ $y_C = \frac{4r}{3\pi}$

$$I_x = \int y^2 dA$$

momento de inercia em torno de x que passa no centroide da secção

elemento da área da secção

distancia do elemento da área ao eixo x medida na perpendicular



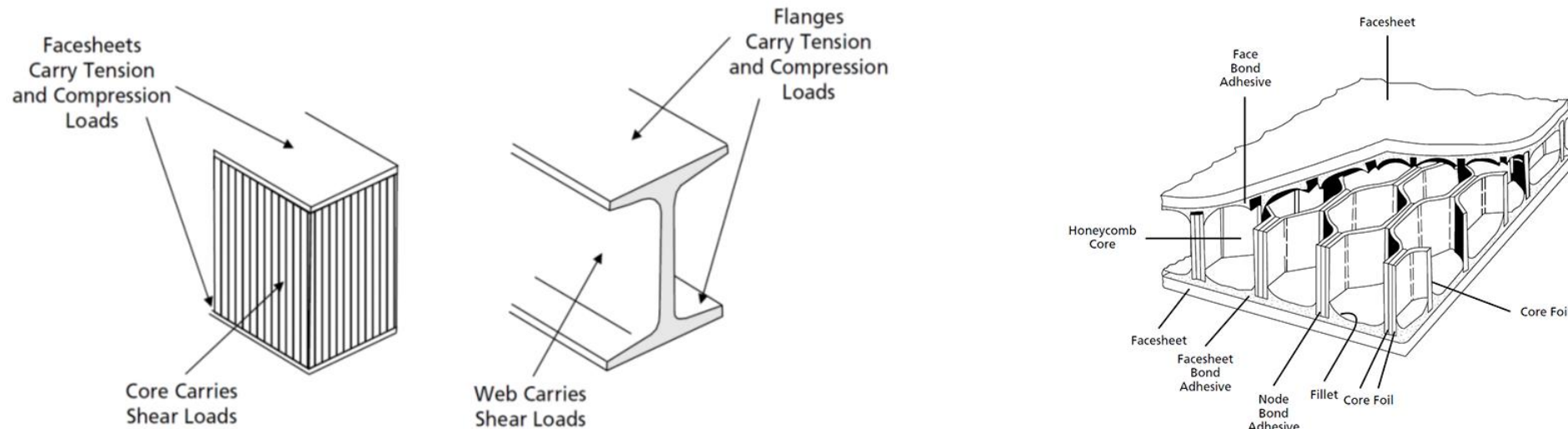
$$I_{x'} = I_x + A \cdot d^2$$

momento de Inercia em torno de um eixo paralelo

distância perpendicular entre eixos

área da secção

# ESTRUTURA SANDWICH


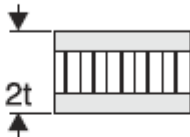
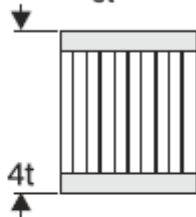


Estrutura formada por:

- Casca rígida dupla
- Núcleo de baixa densidade
- Ligação colada entre cascas e núcleo

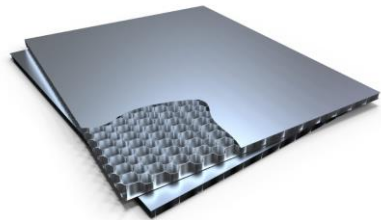


# ESTRUTURA SANDWICH

	Solid Material	Core Thickness $t$	Core Thickness $3t$
			
Stiffness	1.0	7.0	37.0
Flexural Strength	1.0	3.5	9.2
Weight	1.0	1.03	1.06

# ESTRUTURA SANDWICH

Núcleo de favo de abelha



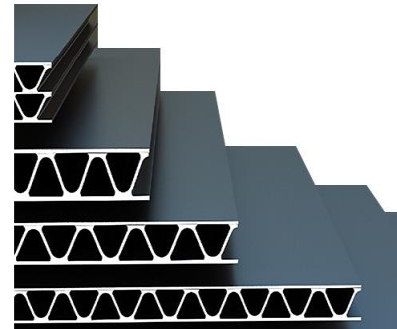
- Metal e compósito
- Elevada rigidez específica (muitos vazios)

Núcleo de espuma



- Metal ou polímero
- Facilidade de produção
- Com espuma de célula aberta ou fechada

Núcleo corrugado



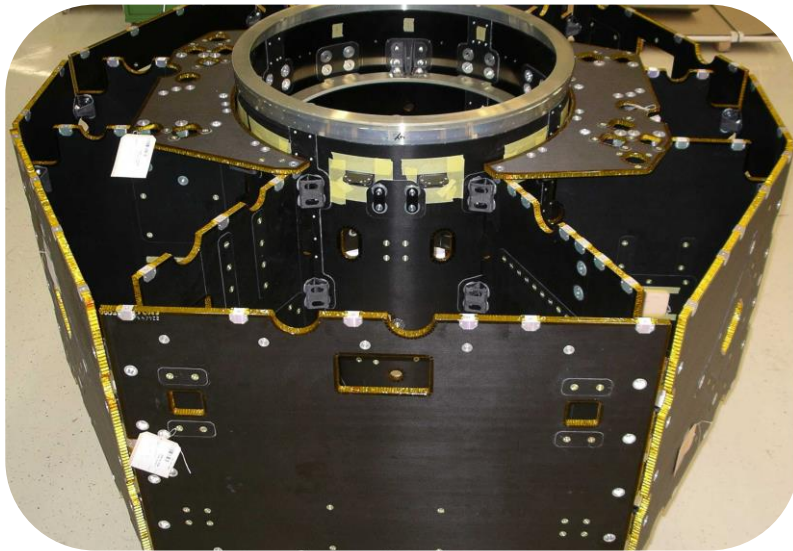
- Metal ou polímero
- Baixo custo de produção
- Comportamento anisotrópico

Núcleo têxtil ou de treliças



- Metal, polímero ou compósito
- Abertura lateral
- Elevada rigidez específica

# APLICABILIDADE DE ESTRUTURAS SANDWICH



Estruturas e fixação  
de componentes



Fuselagens



# LIMITAÇÕES DE ESTRUTURAS SANDWICH

## Restrições construtivas

- Maior dificuldade na ligação entre painéis
- Impossibilidade de ligações aparafusadas ou rebitadas (baixa rigidez do núcleo)

## Durabilidade

- Estrutura sujeita a maior envelhecimento
- Estrutura sujeita a maior absorção de humidade

## Necessidade de insertos para montagem

- Introdução de insertos no interior ou laterais para montagem de painéis e componentes
- Utilização de cascas duplas para reforço local

# MONTAGEM DE ESTRUTURAS SANDWICH



Insertos standard



Insertos especiais



Cascas duplas



universidade de aveiro  
theoria poiesis praxis



# ESTRUTURAS AEROESPACIAIS

Considerações  
para o design de  
estruturas



# CONSIDERAÇÕES COM O DESIGN DE UMA ESTRUTURA

