



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Covilhã | Portugal

Métodos de Seleção de Materiais

Materiais de Construção Aeroespacial
(10368/10388/10408)

2015

Pedro V. Gamboa

Departamento de Ciências Aeroespaciais

Tópicos

- Análise de requisitos de projeto.
- Métodos qualitativos e quantitativos.
- Caso de estudo.

1. Introdução

- Existem cerca de 100000 diferentes tipos de materiais que podem ser usados em aplicações de engenharia
- Devem ser adotados procedimentos sistemáticos de seleção de materiais
- A fase de projeto de um componente dita, na maior parte dos casos, qual o material a adotar.
- No desenvolvimento de um novo produto podem colocar-se as seguintes questões:

O que é?

O que faz?

Como faz?

2. Requisitos de Projeto

Fases de Projeto		Fases de selecção de materiais
Projecto conceptual e preliminar: • passar as ideias do marketing para o projecto industrial, conduzindo à descrição do produto: O que é? O que faz? Como faz? • Decompor o produto em sub-componentes e identificar as diferentes partes envolvidas; • Especificar as funções principais de cada parte e identificar os seus requisitos críticos;	↔	Seleção (screening) inicial: • Usar a informação relativa aos requisitos críticos de cada componente para definir as características de desempenho do material. • Começar a análise com todos os materiais disponíveis e filtrar a escolha em etapas sucessivas;
↓		↓
Projecto da configuração: • Desenvolver um esboço qualitativo de cada componente, indicando a ordem de grandeza das suas dimensões relevantes;	↔	Comparar soluções alternativas: • Usar requisitos do material de carácter flexível que permitam estreitar ainda mais a oferta para um número de candidatos com características óptimas;
↓		↓
Projecto detalhado: • Determinar as dimensões de cada componente com base num material específico e processos de fabrico associados; • Tomar em consideração as limitações de projecto, os processos de fabrico, restrições de peso e espaço e análise de custos; • Propor uma solução de projecto alternativa seleccionando um material alternativo.	↔	Seleção da solução óptima: • Usar os materiais ideais e ajustar os processos de fabrico aos imperativos do projecto detalhado; • Comparar combinações alternativas tendo em vista uma optimização dos níveis de custo; • Seleccionar a melhor combinação <i>material-projecto-processo de fabrico</i>.

2. Requisitos de Projeto

Os requisitos de desempenho de um material podem ser divididos em 5 categorias:

- Requisitos funcionais
- Requisitos de processamento
- Custo
- Fiabilidade
- Resistência às condições de serviço

2. Requisitos de Projeto

Requisitos funcionais:

- Os requisitos funcionais estão diretamente relacionados com as características de desempenho do componente (ex.: um cabo de comando deve suportar cargas de tração uniaxiais elevadas).
- Contudo, alguns requisitos podem não ter, à primeira vista, uma correspondência direta com as propriedades do material (ex.: resistência à fadiga, ao desgaste,...).

2. Requisitos de Projeto

Requisitos de processamento:

- Avaliam a capacidade de um dado material poder ser trabalhado até se atingir a forma final do componente (ex.: soldabilidade).
- Características como a ductilidade e a dureza podem ser determinantes para o processo de fabrico utilizado.
- Deve notar-se que muitos dos processos de fabrico induzem alterações nas propriedades do material.

2. Requisitos de Projeto

Custo:

- É, muitas vezes, o critério principal na selecção de um material.
- Por vezes, materiais mais caros podem permitir processos de fabrico menos onerosos...

2. Requisitos de Projeto

Fiabilidade:

- Probabilidade de ocorrência de falha conducente a uma incapacidade do componente cumprir a sua função.
- Vários fatores podem promover a ruína de um componente (projeto inadequado, defeitos de material, processos de fabrico desajustados , más condições de utilização do componente, etc.).
- A fiabilidade de um material é uma propriedade difícil de quantificar!
- Não depende apenas das características intrínsecas do material...

2. Requisitos de Projeto

Resistência às condições de serviço:

- As condições ambientais de funcionamento dos componentes assumem uma importância elevada na seleção do material.
- Ambientes agressivos podem reduzir drasticamente o desempenho do material (ambientes corrosivos, alta temperatura, baixa temperatura, cargas cíclicas, etc.).
- Em aplicações onde existam movimentos relativos entre componentes devem acautelar-se problemas de desgaste e de possível expansão térmica!

3. Métodos Quantitativos de Seleção Inicial

- Os métodos quantitativos podem ser usados para facilitar o processo de triagem inicial, permitindo estreitar a gama de oferta de materiais para uma dada aplicação
- Alguns métodos possíveis:
 - Limites às propriedades dos materiais
 - Custo por unidade de material
 - Gráficos de seleção
 - Propriedades ponderadas

3. Métodos Quantitativos de Seleção Inicial

3.1. Limites às propriedades dos materiais

- Os requisitos de desempenho de um componente podem ser agrupados em 2 categorias:
 - Rígidos ou
 - Flexíveis
- Os requisitos rígidos têm carácter eliminatório relativamente à escolha de certos materiais (ex.: a *canópia* de uma aeronave deve ser transparente!).
- Os requisitos flexíveis são mais permissíveis, resultando sempre numa solução de compromisso (ex.: custo, densidade, etc.).

3. Métodos Quantitativos de Seleção Inicial

3.1. Limites às propriedades dos materiais



3. Métodos Quantitativos de Seleção Inicial

3.2. Custo por unidade de propriedade

- Este método é indicado quando uma propriedade do material se destaca em relação às demais no respeitante a alguma condição crítica de funcionamento

Exemplo:

- Considere-se uma viga de comprimento L que deve suportar uma força F . Considerando que o material suporta uma tensão limite S , a secção transversal da viga pode ser determinada através da expressão

$$A = \frac{F}{S} \quad (2.01)$$

3. Métodos Quantitativos de Seleção Inicial

3.2. Custo por unidade de propriedade

- O custo da viga (C') é dado por

$$C' = C\rho AL = \frac{C\rho FL}{S} \quad (2.02)$$

- Neste caso, C é o custo do material por unidade de massa e ρ é a sua densidade.
- Uma vez que F e L são constantes e independentes do tipo de material considerado, a quantidade $[(C.\rho)/S]$ pode ser usada para efeitos comparativos de modo a averiguar quais os materiais que apresentem menor custo por unidade de resistência.
- Outros parâmetros idênticos poderão ser considerados em função das propriedades críticas presentes em cada situação, tal como indicado na tabela abaixo

3. Métodos Quantitativos de Seleção Inicial

3.2. Custo por unidade de propriedade

- Outros parâmetros idênticos poderão ser considerados em função das propriedades críticas presentes em cada situação, tal como indicado na tabela abaixo

Table 1 Formulas for Estimating Cost per Unit Property¹

Cross Section and Loading Condition	Cost per Unit Strength	Cost per Unit Stiffness
Solid cylinder in tension or compression	$C\rho/S$	$C\rho/E$
Solid cylinder in bending	$C\rho/S^{2/3}$	$C\rho/E^{1/2}$
Solid cylinder in torsion	$C\rho/S^{2/3}$	$C\rho/G^{1/2}$
Solid cylindrical bar as slender column	—	$C\rho/E^{1/2}$
Solid rectangle in bending	$C\rho/S^{1/2}$	$C\rho/E^{1/3}$
Thin-walled cylindrical pressure vessel	$C\rho/S$	—



UBI
Covilhã
Portugal

3. Métodos Quantitativos de Seleção Inicial

3.3. Gráficos de seleção (método de Ashby)

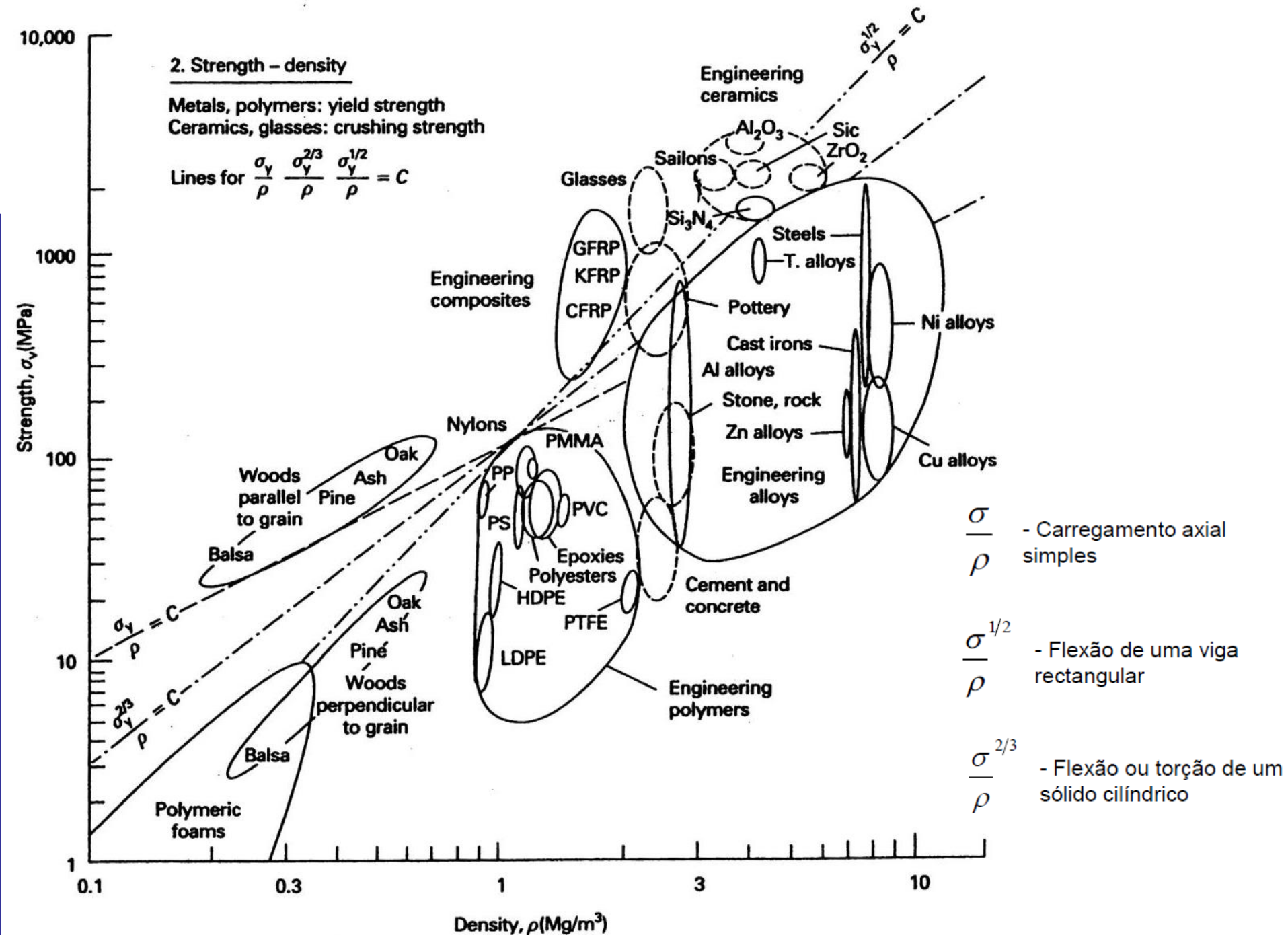
- Por vezes recorre-se a gráficos que relacionam as propriedades fundamentais para uma gama de materiais distintos.
- O gráfico seguinte relaciona a resistência do material com a sua densidade, considerando diferentes condições de carregamento

2. Strength – density

Metals, polymers: yield strength

Ceramics, glasses: crushing strength

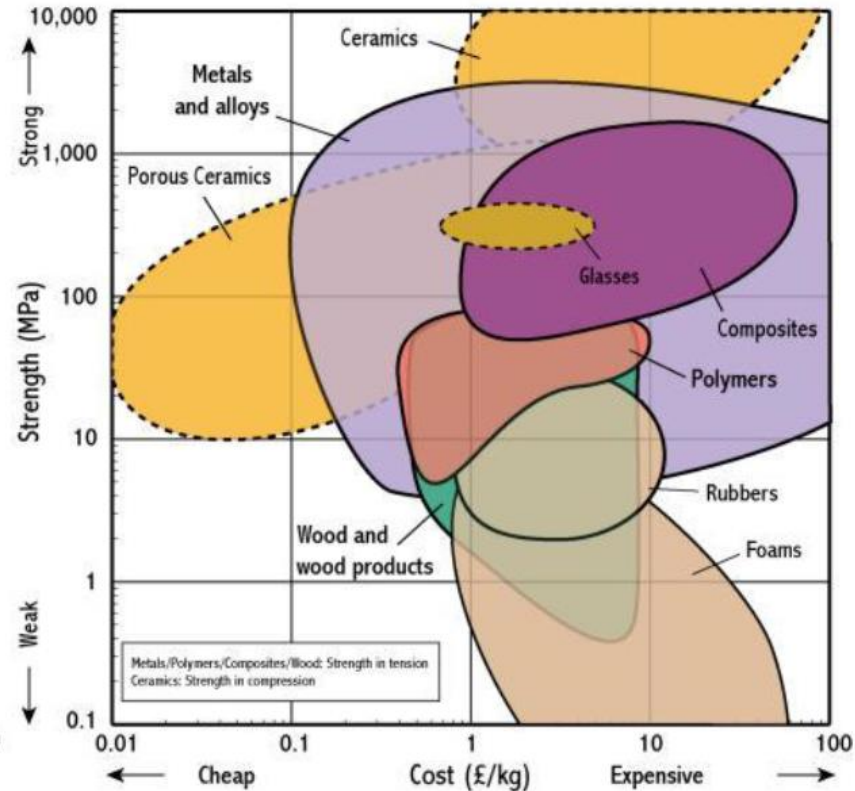
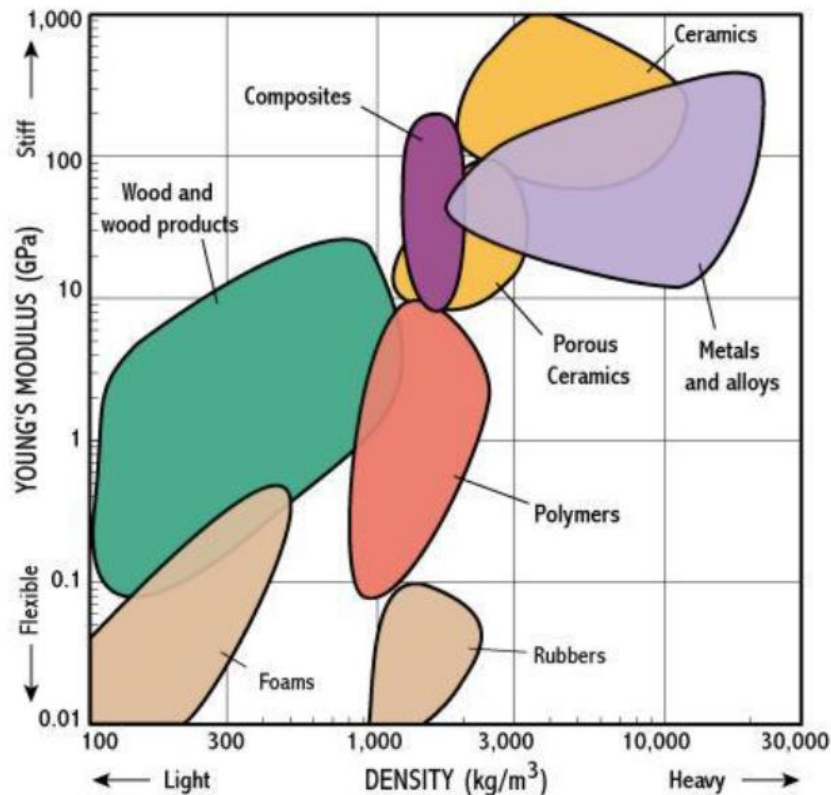
Lines for $\frac{\sigma_y}{\rho} = C$ $\frac{\sigma_y^{2/3}}{\rho} = C$ $\frac{\sigma_y^{1/2}}{\rho} = C$



3. Métodos Quantitativos de Seleção Inicial

3.3. Gráficos de seleção (método de Ashby)

- Outros exemplos de gráficos de selecção:





3. Métodos Quantitativos de Seleção Inicial

3.4. Método das propriedades ponderadas

- Neste caso, é atribuído um certo “peso” a cada propriedade do material, dependendo da sua importância no desempenho do componente
- O resultado do peso ponderado correspondente a cada propriedade é obtido através da multiplicação do valor numérico da propriedade por um fator de peso (α).
- Os valores ponderados assim obtidos para cada propriedade do material são, então, adicionados de modo a fornecerem um índice de desempenho do material de carácter global (γ).
- Quanto maior for o valor de γ mais adequado é o material para a aplicação em análise.

3. Métodos Quantitativos de Seleção Inicial

3.4. Método das propriedades ponderadas

- A desvantagem deste método reside no facto de implicar a combinação de propriedades com diferentes unidades e ordens de grandeza díspares!
- Para evitar este problema, introduzem-se fatores de escala de forma a que o maior peso (100%) corresponda ao maior valor de uma dada propriedade relativa a uma lista de materiais.
- O valor compensado por este fator de escala pode ser definido como:

$$B = \frac{\text{Valor numérico da propriedade} \times 100}{\text{Máximo valor existente na lista}}$$



Quando se deseja um valor máximo

(Ex.: resistência limite, tenacidade à fractura, etc)

$$B = \frac{\text{Mínimo valor existente na lista} \times 100}{\text{Valor numérico da propriedade}}$$



Quando se deseja um valor mínimo

(Ex.: custo, densidade, etc)

3. Métodos Quantitativos de Seleção Inicial

3.4. Método das propriedades ponderadas

- O índice de desempenho do material é dado pela expressão

$$\gamma = \sum_{i=1}^n B_i \alpha_i \quad (2.03)$$

4. Caso de Estudo

- Selecção de um material para aplicação estrutural num montante com geometria cilíndrica de um trem de aterragem de um hidroavião.
- Requisitos:
 - Comprimento: 1000mm
 - Cargas de compressão aplicadas: 153 kN
 - Diâmetro externo do tubo: <100mm
 - Diâmetro interno do tubo: >84mm
 - Massa: < 3kg
 - Custo: menor possível!
 - O componente estará sujeito a impactos e a ambientes molhados
 - Deve permitir a fixação de componentes através de furos de pequeno diâmetro



4. Caso de Estudo

Os possíveis modos de ruína associados às características operacionais deste componente (e consequentes propriedades desejáveis para o material) podem incluir:

- Fratura catastrófica devido a cargas de impacto (especialmente junto aos furos de fixação) —> **alta tenacidade à fratura do material** (**propriedade rígida**)
- Deformação plástica devido a elevados esforços axiais —> **elevada tensão de cedência** (esta é uma **propriedade flexível**, mas existirá um valor mínimo admissível imposto pela limitação ao diâmetro externo!)

4. Caso de Estudo

- Flambagem (encurvadura) localizada e global → **elevado módulo de elasticidade** (esta é uma **propriedade flexível**, mas existirá um valor mínimo admissível imposto pela limitação ao diâmetro externo!)
- No caso de se recorrer a materiais compósitos, pode ocorrer instabilidade das fibras internas → **elevado módulo de elasticidade da matriz e elevada fração volumétrica das fibras na direção do carregamento** (esta é uma **propriedade flexível**, mas existirá um valor mínimo admissível imposto pela limitação ao diâmetro externo!)

4. Caso de Estudo

- Propriedades dos materiais candidatos:

Material	Yield Strength (MPa)	Elastic Modulus (GPa)	Specific Gravity	Corrosion Resistance ^a	Cost Category ^b
AISI 1020 (UNS G10200)	280	210	7.8	1	5
AISI 1040 (UNS G10400)	400	210	7.8	1	5
ASTM A242 type 1 (UNS K11510)	330	212	7.8	1	5
AISI 4130 (UNS G41300)	1520	212	7.8	4	3
AISI 316 (UNS S31600)	205	200	7.98	4	3
AISI 416 heat treated (UNS S41600)	440	216	7.7	4	3
AISI 431 heat treated (UNS S43100)	550	216	7.7	4	3
AA 6061 T6 (UNS A96061)	275	69.7	2.7	3	4
AA 2024 T6 (UNS A92024)	393	72.4	2.77	3	4
AA 2014 T6 (UNS A92014)	415	72.1	2.8	3	4
AA 7075 T6 (UNS A97075)	505	72.4	2.8	3	4
Ti-6Al-4V	939	124	4.5	5	1
Epoxy-70% glass fabric	1270	28	2.1	4	2
Epoxy-63% carbon fabric	670	107	1.61	4	1
Epoxy-62% aramid fabric	880	38	1.38	4	1

^a 5 Excellent, 4 Very good, 3 Good, 2 Fair, 1 Poor.

^b 5 Very inexpensive, 4 Inexpensive, 3 Moderate price, 2 Expensive, 1 Very expensive.

4. Caso de Estudo

- Propriedades dos materiais candidatos:

Material	Specific Strength (MPa)	Specific Modulus (GPa)	Corrosion Resistance ^a	Cost Category ^b
AISI 1020 (UNS G10200)	35.9	26.9	1	5
AISI 1040 (UNS G10400)	51.3	26.9	1	5
ASTM A242 type 1 (UNS K11510)	42.3	27.2	1	5
AISI 4130 (UNS G41300)	194.9	27.2	4	3
AISI 316 (UNS S31600)	25.6	25.1	4	3
AISI 416 heat treated (UNS S41600)	57.1	28.1	4	3
AISI 431 heat treated (UNS S43100)	71.4	28.1	4	3
AA 6061 T6 (UNS A96061)	101.9	25.8	3	4
AA 2024 T6 (UNS A92024)	141.9	26.1	3	4
AA 2014 T6 (UNS A92014)	148.2	25.8	3	4
AA 7075 T6 (UNS A97075)	180.4	25.9	3	4
Ti-6Al-4V	208.7	27.6	5	1
Epoxy-70% glass fabric	604.8	28	4	2
Epoxy-63% carbon fabric	416.2	66.5	4	1
Epoxy-62% aramid fabric	637.7	27.5	4	1

^a5 Excellent, 4 Very good, 3 Good, 2 Fair, 1 Poor.

^b5 Very inexpensive, 4 Inexpensive, 3 Moderate price, 2 Expensive, 1 Very expensive.

4. Caso de Estudo

- Determinação dos índices de desempenho:

Material	Scaled Specific Strength * 0.3	Scaled Specific Modulus * 0.3	Scaled Corrosion Resistance * 0.15	Scaled Relative Cost * 0.25	Performance Index (γ)
AISI 1020 (UNS G10200)	1.7	12.3	3	25	42
AISI 1040 (UNS G10400)	2.4	12.3	3	25	42.7
ASTM A242 type 1 (UNS K11510)	2	12.3	3	25	42.3
AISI 4130 (UNS G41300)	9.2	12.3	6	15	42.5
AISI 316 (UNS S31600)	1.2	11.3	12	15	39.5
AISI 416 heat treated (UNS S41600)	2.7	12.7	12	15	42.4
AISI 431 heat treated (UNS S43100)	3.4	12.7	12	15	43.1
AA 6061 T6 (UNS A96061)	4.8	11.6	9	20	45.4
AA 2024 T6 (UNS A92024)	6.7	11.8	9	20	47.5
AA 2014 T6 (UNS A92014)	7	11.6	9	20	47.6
AA 7075 T6 (UNS A97075)	8.5	11.7	9	20	49.2
Ti-6Al-4V	9.8	12.5	15	5	42.3
Epoxy-70% glass fabric	28.4	12.6	12	10	63
Epoxy-63% carbon fabric	19.6	30	12	5	66.6
Epoxy-62% aramid fabric	30	12.4	12	5	59.4

4. Caso de Estudo

Atendendo às condições de falha definidas anteriormente para uma estrutura cilíndrica oca, devemos considerar os limites impostos por:

- Condição de cedência do material

$$\frac{F}{A} < \sigma_y \quad (2.04)$$

- F = força axial aplicada
- A = área da secção transversal
- σ_y = tensão de cedência do material

4. Caso de Estudo

Atendendo às condições de falha definidas anteriormente para uma estrutura cilíndrica oca, devemos considerar os limites impostos por:

- Instabilidade local

$$\frac{F}{A} < \frac{0.121Et}{D} \quad (2.05)$$

- E = módulo elástico do material
- t = espessura da parede do tubo
- D = diâmetro externo do tubo

4. Caso de Estudo

Atendendo às condições de falha definidas anteriormente para uma estrutura cilíndrica oca, devemos considerar os limites impostos por:

- Instabilidade generalizada

$$\sigma_y > \frac{F}{A} \left\{ 1 + \left(\frac{LDA}{1000I} \right) \sec \left[\left(\frac{F}{EI} \right)^{1/2} \frac{L}{2} \right] \right\} \quad (2.06)$$

- L = comprimento do elemento
- I = segundo momento de área

4. Caso de Estudo

Atendendo às condições de falha definidas anteriormente para uma estrutura cilíndrica oca, devemos considerar os limites impostos por:

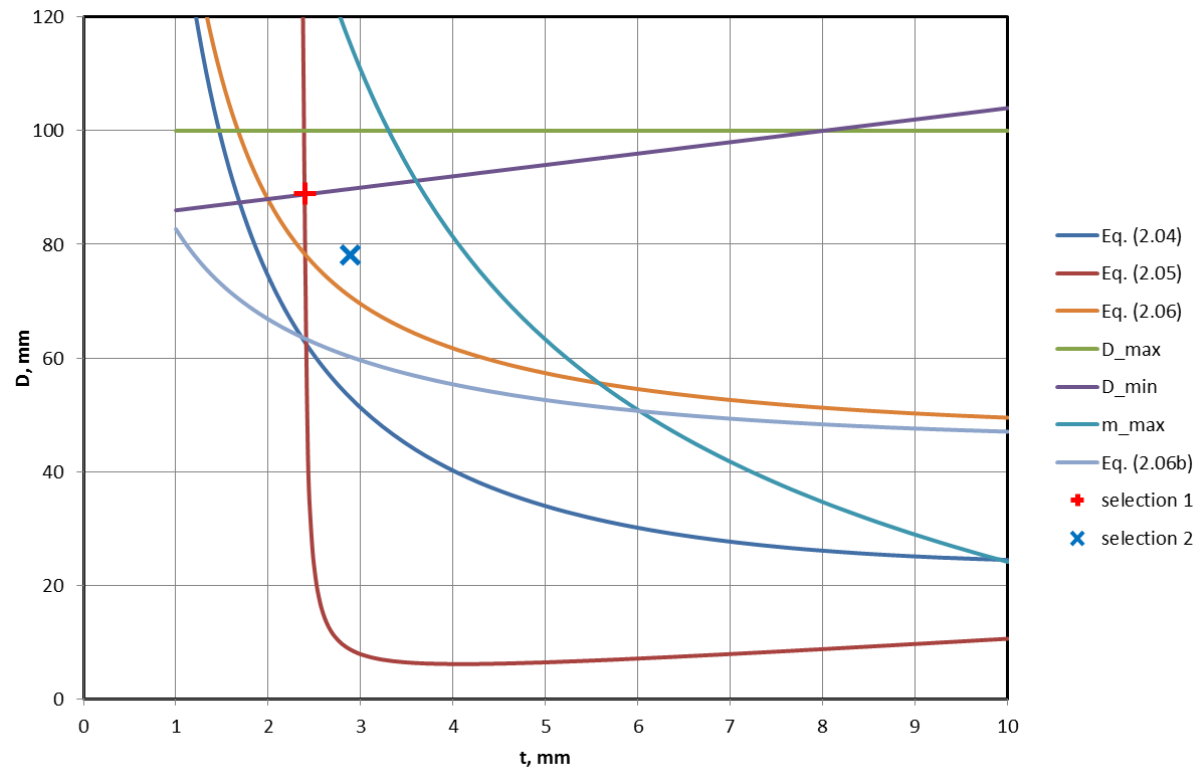
- Instabilidade das fibras de reforço (no caso de compósitos)

$$\frac{F}{A} < \left[\frac{E_m}{4} (1 + \nu_m) (1 - \sqrt{V_f}) \right] \quad (2.07)$$

- E_m = módulo elástico do material da matriz
- ν_m = coeficiente de Poisson do material da matriz
- V_f = fração volumétrica das fibras paralelas à carga axial

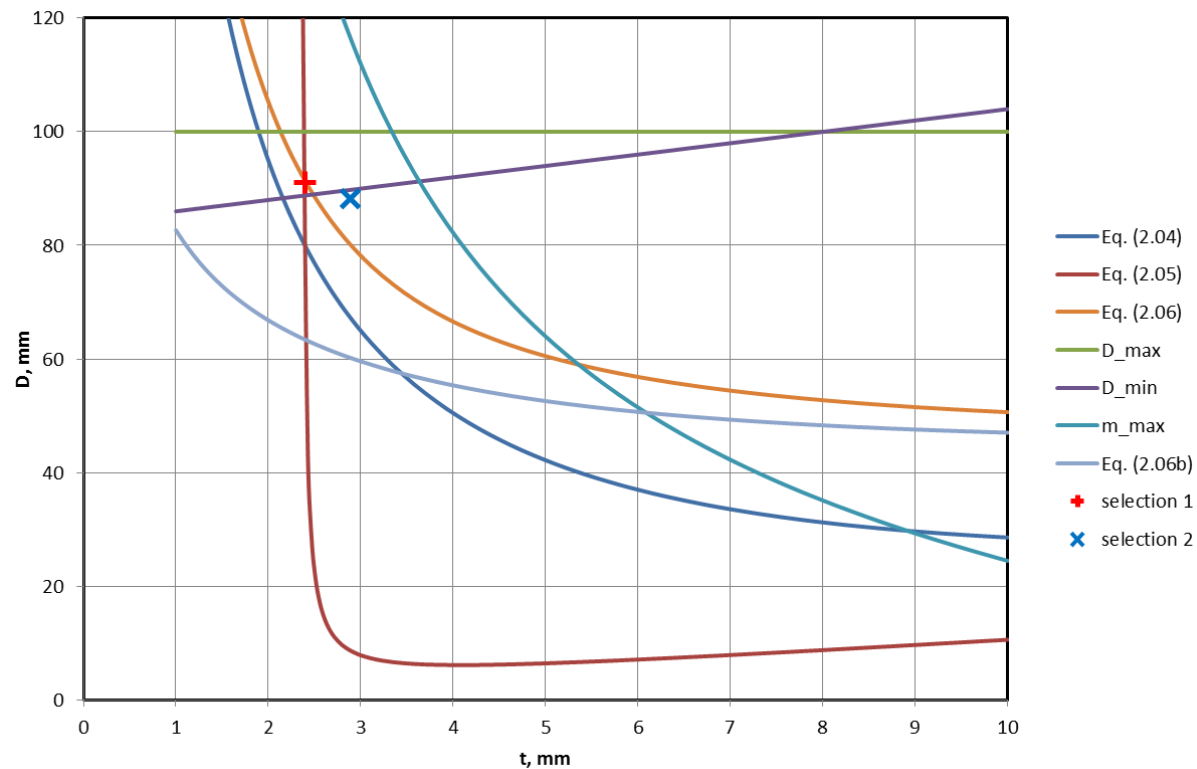
4. Caso de Estudo

Gráfico de condições limite para o caso particular do alumínio 7075-T6:



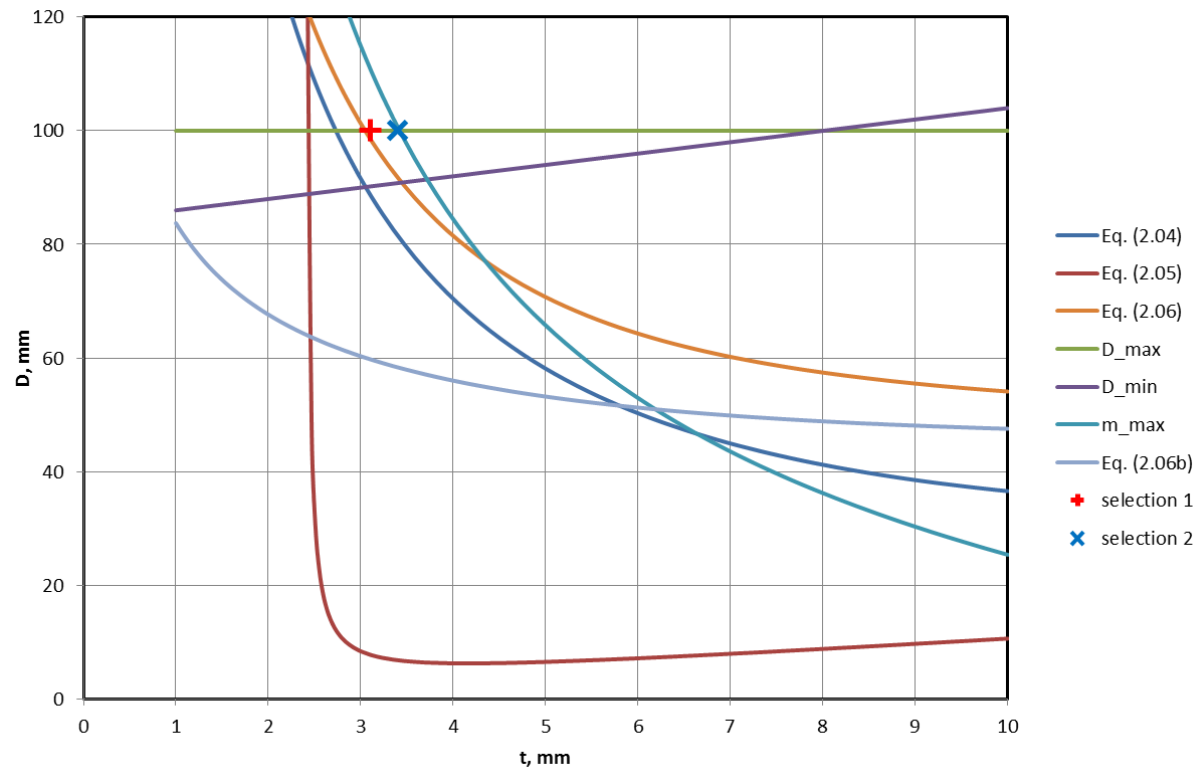
4. Caso de Estudo

Gráfico de condições limite para o caso particular do alumínio 2024-T6:



4. Caso de Estudo

Gráfico de condições limite para o caso particular do alumínio 6061-T6:



4. Caso de Estudo

Resultados finais para diferentes materiais candidatos:

Material	D (mm)	t (mm)	A (mm ²)	Mass (kg)	Cost/kg (\$)	Cost of Component (\$)
AA 6061 T6 (UNS A96061)	100	3.4	1065.7	2.88	8	23.2
AA 2024 T6 (UNS A92024)	88.3	2.89	801.1	2.22	8.3	18.4
AA 2014 T6 (UNS A92014)	85.6	2.89	776.6	2.17	9	19.6
AA 7075 T6 (UNS A97075)	78.1	2.89	709.1	1.99	10.1	20
Epoxy-70% glass fabric	78	4.64	1136.3	2.39	30.8	73.6
Epoxy-63% carbon fabric	73.4	2.37	546.1	0.88	99	87.1
Epoxy-62% aramid fabric	75.1	3.99	941.6	1.30	88	114.4

A liga de alumínio 2024 T6 é a melhor solução do ponto de vista dos requisitos de projeto!