



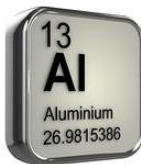
## SEM 0534 – Processos de Fabricação Mecânica

### USINAGEM DE MATERIAIS AERONÁUTICOS

#### MATERIAIS METÁLICOS

ALUMÍNIO, NÍQUEL, TITÂNIO

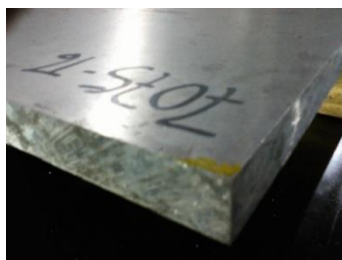
(E SUAS LIGAS)



# LIGAS DE ALUMÍNIO



**Bruto**  
(Fundido)



**Pré-processado**  
(barras, laminados, bobinas, tubos)



**Produto**  
(Aeronaves)



## Contextualização

Alumínio empregado na aviação desde 1920 (primeiro lançamento comercial)

**Airbus:** Crescimento anual de passageiros à razão de 5% a.a. Até 2030

Demanda de mais 31,5 mil aeronaves (23 mil novas)

O alumínio precisa acompanhar este crescimento

Precisa melhorar sua eficiência econômica

**Alcoa:** Desenvolvimentos com a liga Al-Li



↓ 10% o peso e até 30% os custos de manufatura **X** compósitos C

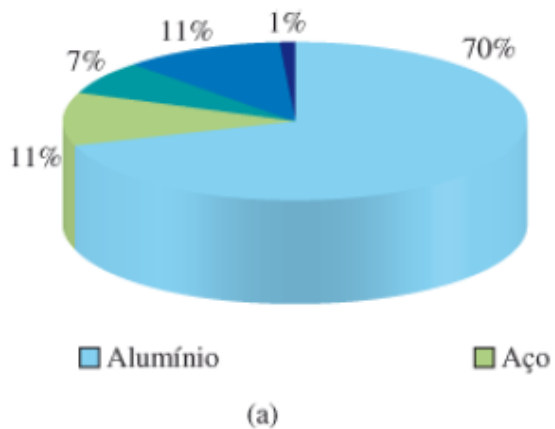
↑ Eficiência do combustível em 12% a 27% (novos motores)

↓ 7% a densidade em aplicações estruturais

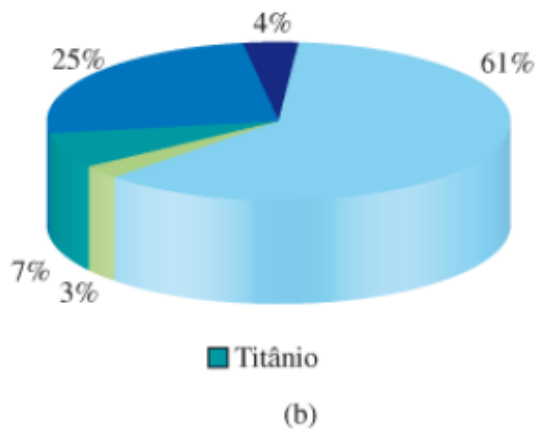
↓ 6% o arrasto (melhor aerodinâmica da fuselagem)



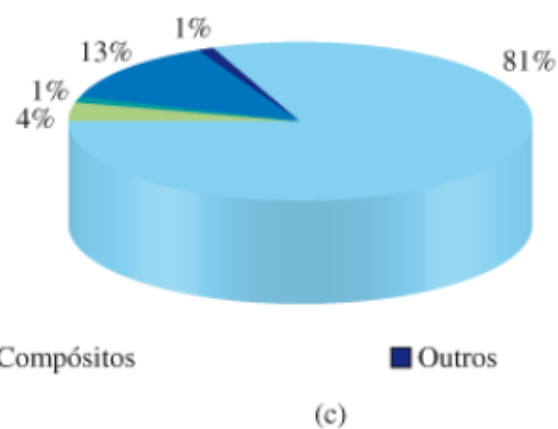
## Contextualização



Boeing 777



Airbus A380



Embraer 170



## Definições

Densidade baixa:  $2700 \text{ kg/m}^3$

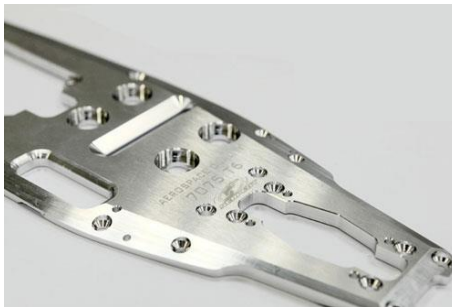
Condutividade térmica e elétrica elevadas

Elevada resistência à corrosão

Baixo ponto de fusão ( $600 \text{ }^\circ\text{C}$ )

Alta ductilidade (facilmente conformada)

Principais constituintes: Si, Cu, Mg, Mn e Zn





## Classificação

### *American Association (AA)*

Ligas forjadas		Ligas fundidas	
Série	Composição química	Série	Composição química
1XXX	Al comercialmente puro	1XX.X	Al comercialmente puro
2XXX	Al-Cu e Al-Cu-Mg	2XX.X	Al-Cu e Al-Cu-Mg
3XXX	Al-Mn e Al-Mn-Mg	3XX.X	Al-Si-Mg e Al-Si-Cu
4XXX	Al-Si	4XX.X	Al-Si
5XXX	Al-Mg	5XX.X	Al-Mg
6XXX	Al-Mg-Si	6XX.X	Não existe esse sistema
7XXX	Al-Zn e Al-Zn-Mg	7XX.X	Al-Zn e Al-Zn-Mg
8XXX	Outras ligas (Al-Li, Al-Fe etc.)	8XX.X	Al-Sn



## Propriedades Mecânicas

Número da <i>Aluminum Association</i>	Número UNS	Composição (%)*	Condição (designação de revenimento)	Limite de resistência à tração [MPa]	Limite de escoamento [MPa]	Ductilidade [% $\Delta L$ em 50 mm]	Aplicações/ características típicas
<i>Ligas forjadas, tratáveis termicamente</i>							
2024	A92024	4,4 Cu; 1,5 Mg; 0,6 Mn	Tratada termicamente (T4)	470	325	20	Estruturas de aeronaves, rebites, rodas de caminhão, produtos de máquinas de fazer parafusos
7075	A97075	5,6 Zn; 2,5 Mg; 1,6 Cu; 0,23 Cr	Tratada termicamente (T6)	570	505	11	Peças estruturais de aeronaves e outras aplicações submetidas a tensões elevadas



## Propriedades Mecânicas

Número da <i>Aluminum Association</i>	Número UNS	Composição (%) <sup>*</sup>	Condição (designação de revenimento)	Limite de resistência à tração [MPa]	Limite de escoamento [MPa]	Ductilidade [% $\Delta L$ em 50 mm]	Aplicações/ características típicas
<i>Ligas fundidas, tratáveis termicamente</i>							
295.0	A02950	4,5 Cu; 1,1 Si	Tratada termicamente (T4)	221	110	8,5	Volante e alojamentos de eixos traseiros, rodas de ônibus e aeronaves, cárteres
356.0	A03560	7,0 Si; 0,3 Mg	Tratada termicamente (T6)	228	164	3,5	Peças de bombas de aeronaves, caixas de transmissão automotivas, blocos de cilindros resfriados a água





## Propriedades Mecânicas

Número da <i>Aluminum Association</i>	Número UNS	Composição (%)*	Condição (designação de revenimento)	Limite de resistência à tração [MPa]	Limite de escoamento [MPa]	Ductilidade [% $\Delta L$ em 50 mm]	Aplicações/ características típicas
<i>Ligas alumínio-lítio</i>							
2090	–	2,7 Cu; 0,25 Mg; 2,25 Li, 0,12 Zr	Tratada termicamente, trabalhada a frio (T83)	455	455	5	Estruturas de aeronaves e estruturas de tancagem criogênica
8090	–	1,3 Cu; 0,95 Mg; 2,0 Li; 0,1 Zr	Tratada termicamente, trabalhada a frio (T651)	465	360	–	Estruturas de aeronaves que devem possuir alta tolerância a danos e avarias



## Propriedades Mecânicas (comparadas com outros materiais)

	Alumínio	Cobre	Aço 371	Plástico
Resistência/Tensão de ruptura $\text{N/mm}^2$	250	250	400	50
Ductibilidade/Alongamento %	15	25	20	25
Elasticidade/Módulo de Young MPa	70.000	125.000	210.000	3.000
Densidade $\text{kg/m}^3$	2.700	8.900	7.800	1.400
Ponto de fusão $^{\circ}\text{C}$	660	1080	1500	80
Amplitude da temperatura de trabalho $^{\circ}\text{C}$	-250-150	-200-300	-50-500	-50-80
Conductividade eléctrica $\text{m/Ohm-mm}^2$	29	55	7	-
Conductividade térmica $\text{W/m } ^{\circ}\text{C}$	200	400	76	0,15
Coefficiente de expansão linear $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	24	17	12	60-100
Não-magnético	Sim	Sim	Não	Sim
Soldável	Sim	Sim	Sim	Sim



## Ligas 2XXX e 7XXX

As ligas de alumínio das séries aeronáuticas (2XXX e 7XXX) possuem como características principais os elevados níveis de resistência mecânica que, aliadas a baixa densidade do metal e a facilidade de conformação e usinagem, transformam o alumínio em uma das melhores opções para a fabricação de dispositivos e estruturas aeronáuticas.



## Ligas 2XXX

As ligas de alumínio da série 2XXX são ligas com cobre 1,9-6,8% e muitas vezes contêm adições de manganês, magnésio e zinco.

Seu endurecimento por precipitação tem sido amplamente estudado.

Elas são usadas para aplicações tais como, forjamento, extrusão e tanques de armazenamento de gás liquefeito de transporte civil e aeronaves supersônicas.

Essas ligas têm menores taxas de crescimento de trinca e, portanto, têm melhor desempenho em fadiga do que as ligas da série 7XXX.

Portanto, estas são utilizadas nas asas e na parte inferior da fuselagem.

As ligas utilizadas são 2224, 2324 e 2524 (ambas as versões modificadas de 2224). Estas ligas são geralmente compostas por 99,34% de alumínio puro para maior resistência à corrosão.



## Ligas 7XXX

O sistema Al-Zn-Mg oferece o maior potencial de endurecimento por precipitação (de ligas de alumínio).

O cobre muitas vezes é adicionado para melhorar a resistência à corrosão sob tensão (com o inconveniente de reduzir a soldabilidade).

Fissuração por corrosão diminui a resistência com o aumento da relação Zn:Mg.

A fissuração por corrosão têm sido a maior restrição sobre o uso dessas ligas, mas eles ainda têm sido usados em, vagões, aeronaves militares e civis.



## Exemplos e Aplicações (carregamentos mecânicos)



**Figura 3.** Principais cargas envolvidas na operação de uma aeronave (cortesia Embraer).



## Exemplos e Aplicações (materiais x peças na aeronave)

**THE BASIC AIRCRAFT IS MADE OF ALUMINUM WITH STAINLESS STEEL AND TITANIUM ALLOYS IN SPECIFIC AREAS.**

**LANDING GEAR ATTACHMENT FITTINGS: 7010**

**ALUMINUM ALLOY FRAMES MACHINED: 7010/7050/2024/7075 FORGED: 7175**

**KEEL MEMBER SHEET: 2024/7475 EXTRUSION: 7075**

**SPARS AND RIBS: 7010/7050 TOP SKIN PANELS: 7150 BOTTOM SKIN PANELS: 2024**

**TITANIUM ALLOY 6AL4V IS USED FOR: PYLON - RIBS/PANELS/FITTINGS WING - MANHOLE DOORS/SPAR STRAPS FLAP TRACK RACKS. FUSELAGE - WINDSHIELD AREA/APU - ACCESS DOORS/FIRE WALLS - PAX DOOR STOP FITTINGS**

**STAINLESS STEELS ARE USED FOR: PYLON - SPARS/FITTINGS WING - SLAT TRACKS**

**Wing Box**  
7075-T76 H.S. Clad (Surfaces)  
7075-T6 (Substructure)  
7075-T76 (Spar caps)

**Elevator and Rudder**  
2024-T3 Clad

**Vertical Stabilizer skin and stringers**  
7075-T6 Clad surface

**Main Frames (6)**  
7075-T6 Forging  
7075-T6 Clad  
7075-T6 Extrusion

**Trailing edges**  
fibreglass-reinforced plastic

**Centre engine support**  
6 Al-4 V Titanium  
2024-T3 Clad  
2024-T81 Clad

**Trailing edges**  
fibreglass-reinforced plastic

**Horizontal stabilizer**  
integrally stiffened skin  
7075-T76 extrusion

**Plug-type doors (typical)**

**Fuselage skins**  
2024-T3 Clad  
7075-T76 Clad (High load areas)

**CODE**  
Honeycomb sandwich  
Alum face and core

**Frames**  
7075-T6 Clad  
7178 or 7178-T6 Clad

**Bonded fail-safe straps**  
Ti - 6Al-6V - 2Sn or  
Ti - 6Al-4V (typical)

**Stringers**  
7075-T6 Clad (typical)

**Bonded doublers (typical around cutouts)**

**Longerons (4)**  
7075-T6 extrusion

**Fuselage splices**  
Riveting and bonding  
Rivets and walent

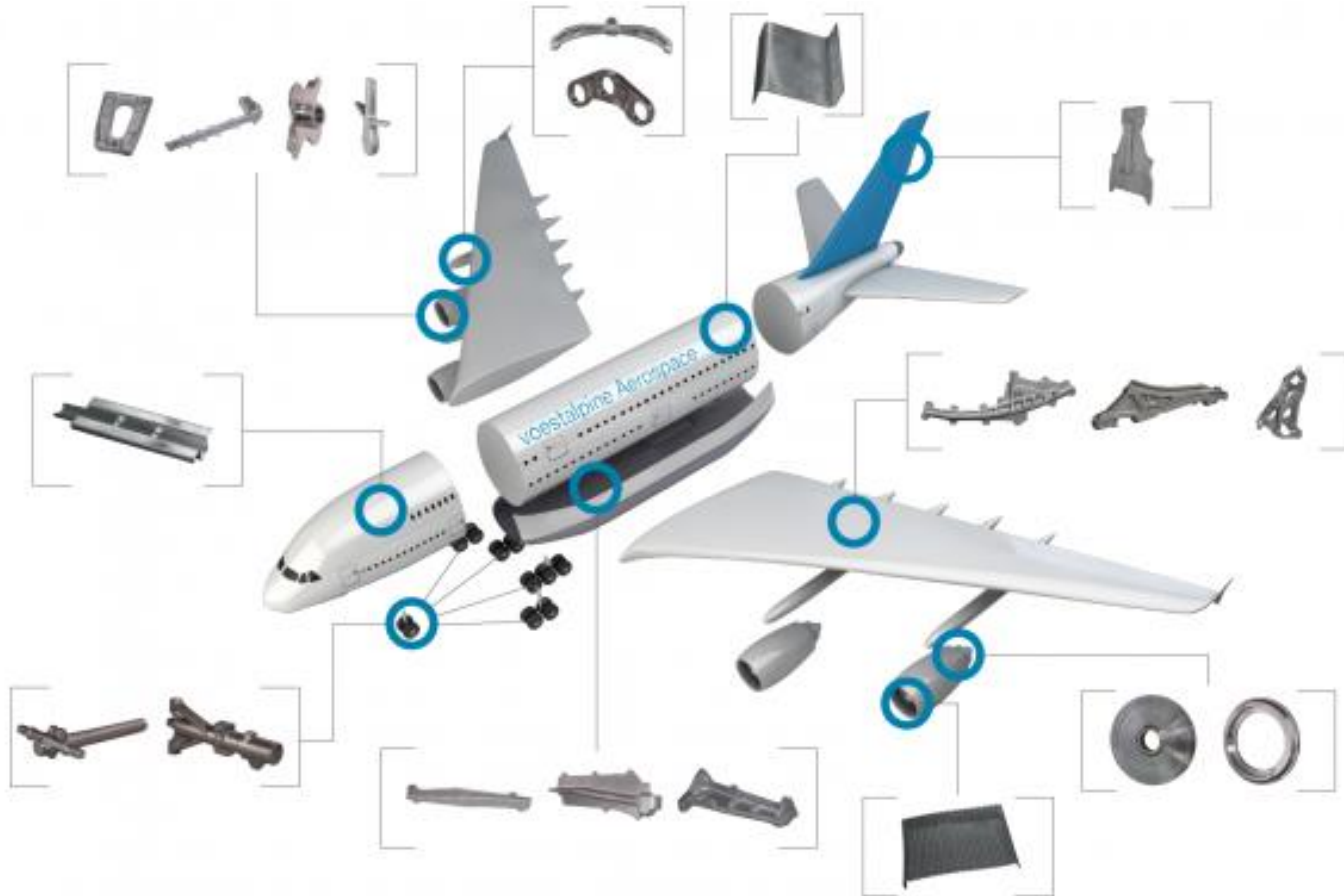
**Thick stringerless sidewalls**

**Pylon box**  
6 Al-4 V Titanium

**L1011 basic materials and design features.**



## Exemplos e Aplicações (geometria das peças)







## Variantes do uso do alumínio

1970-80: Fiber Metal Laminate (FML)

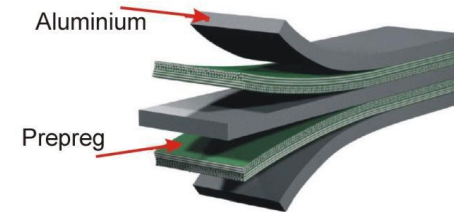
Folha Al + Folha FV + Matriz Epóxi

Melhor resistência à fadiga, impacto, corrosão, calor

Compósito matriz Al + reforço Si

Permite aumentar a temperatura de trabalho **X** matriz plástica

Temperatura do motor (1600 °C) e da fuselagem (300 °C)





## Usinabilidade

A usinabilidade pode ser definida como uma grandeza tecnológica que expressa, por meio de um valor numérico comparativo (índice de usinabilidade), um conjunto de propriedades de usinagem de um material em relação a outro tomado como padrão.

Expressa o grau de dificuldade para usinar um material.

Pode-se ter usinabilidade boa ou ruim, em função dos critérios de avaliação adotados.



## Usinabilidade

A usinabilidade depende do estado metalúrgico da peça, da dureza, das propriedades mecânicas do material, de sua composição química, das operações anteriores efetuadas sobre o material (a frio ou a quente) e do eventual encruamento.

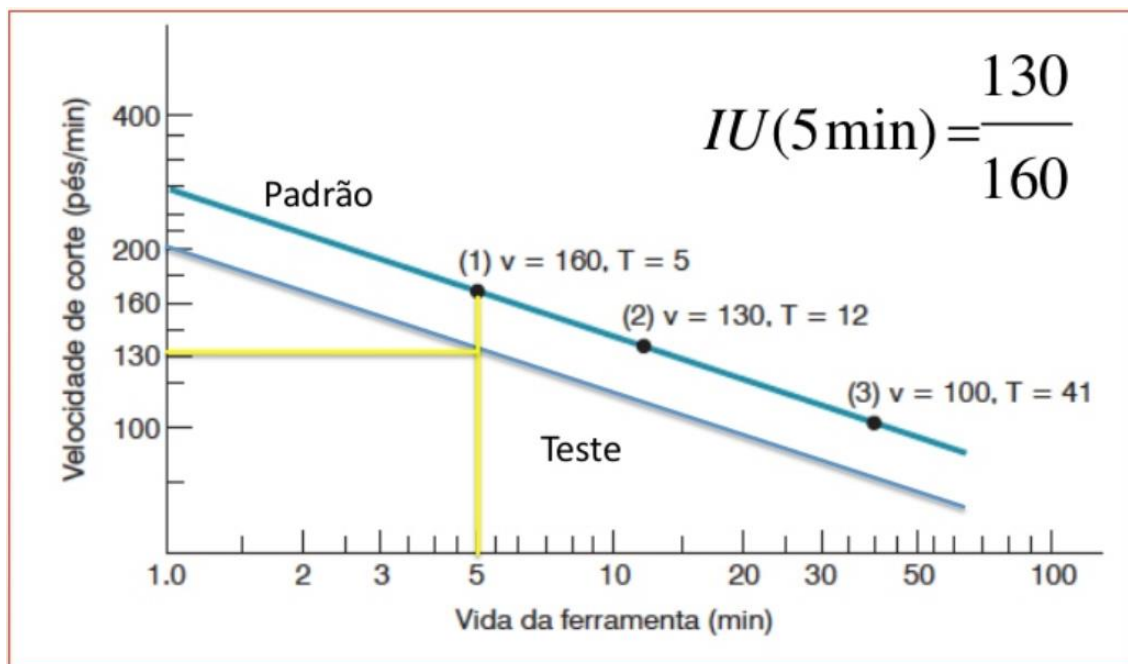
Mas a usinabilidade não depende apenas do material da peça, depende também das condições de usinagem: características da ferramenta, condições de refrigeração, rigidez do sistema máquina-ferramenta-peça-dispositivos de fixação e das operações executadas (tipo da operação, corte contínuo ou intermitente, condições de entrada e saída da ferramenta,...)



## Usinabilidade

Há vários métodos para medir o índice de usinabilidade. O ensaio chamado de longa duração, é o método mais aceito. O material ensaiado e o material “padrão” são usinados até o fim da vida da ferramenta (ou valor de desgaste pré-determinado para a ferramenta), em diversas velocidades de corte. Obtém-se a velocidade de corte para uma determinada vida da ferramenta. Por exemplo,  $v_{c5}$  (velocidade de corte para uma vida de 5 minutos).

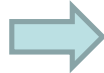
O material padrão é o aço  
AISI B1112 (IU = 100% ou 1,0)



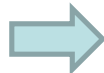


## Usinabilidade do alumínio

Referência



A comparar



Material usinado	Dureza Brinell	Índice de usinabilidade <sup>a</sup>
Aço-padrão: B1112	180–220	1,00
Ligas de alumínio (macias)	Macio	2,00 <sup>a</sup> (100% + fácil de usar)
Ligas de Alumínio (duras)	Duro	1,25 <sup>a</sup> (25% + fácil de usar)



## Usinabilidade

É comum se pensar que a usinabilidade é apenas uma propriedade ligada à dureza do material da peça e à sua resistência mecânica. Segundo este raciocínio, um material mole é de boa usinabilidade, e um material duro é de baixa usinabilidade.

Este raciocínio é falso. Pois, além das propriedades citadas, outras podem ser determinantes para a usinabilidade. Como : microestrutura, quantidade de inclusões e aditivos presentes, tendência ao empastamento do cavaco, etc.



## Usinabilidade do alumínio

- O alumínio em geral pode ser facilmente usinado.
- A energia consumida por unidade de volume do metal é muito baixa.
- Apenas o magnésio e sua ligas podem ser usinadas com a mesma taxa de energia consumida e o desgaste da ferramenta raramente é um problema.

Material	u [J/mm <sup>3</sup> ]
Ligas de alumínio	0,702
Ferro fundido cinzento	1,053
Latão	1,053
Aço AISI 1213	1,755
Aço de médio teor de carbono AISI 1018	2,106
Ligas de titânio	3,510
Aços inoxidáveis	4,914
Ligas a base de níquel ou cobalto	4,914

## Exceção feita

LIGAS 4XXX e 6XXX

- As ligas de alumínio-silício, onde as partículas de silício presentes são altamente abrasivas e desgastam rapidamente a ferramenta de metal duro.



## Usinabilidade do alumínio

Com relação porém aos critérios de usinabilidade baseados na rugosidade da peça e na característica do cavaco, não se pode dizer que o alumínio tenha uma boa usinabilidade, pois, o cavaco formado é longo e o acabamento superficial insatisfatório.



Porém, bons acabamentos superficiais podem ser obtidos se a velocidade de corte for suficientemente alta e a geometria da ferramenta for adequada.





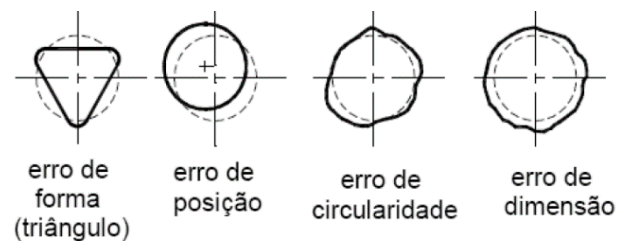
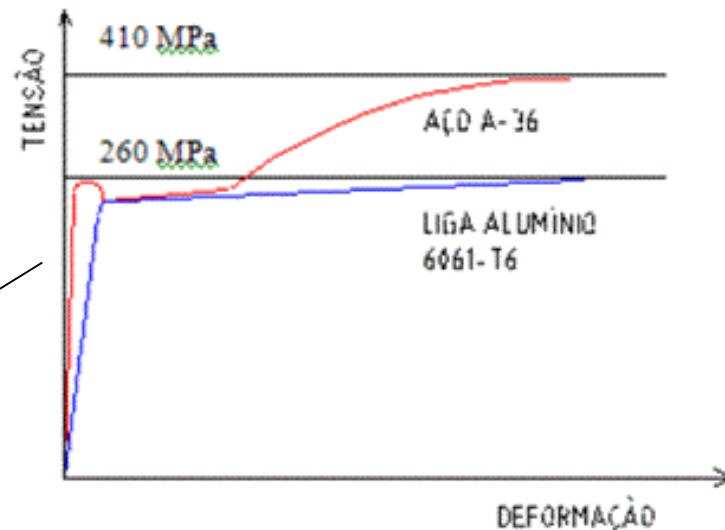
## Usinabilidade do alumínio

### Baixo módulo de elasticidade

Este fato tem conseqüências negativas na obtenção de boas superfícies usinadas e pode gerar deformações indesejadas da peça.

Devido a isto também, não se deve utilizar esforços exagerados na fixação da peça.

Embora algumas ligas de alumínio apresentem um limite de resistência equivalente ao aço de baixo carbono, em temperatura ambiente, em temperaturas elevadas essa resistência é bastante reduzida



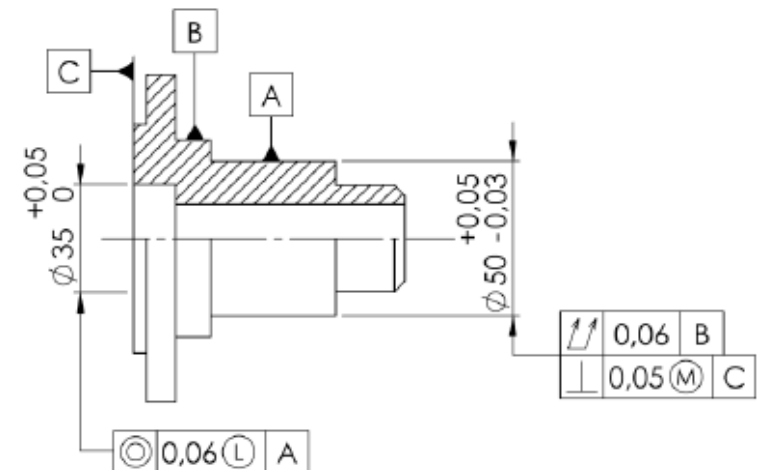
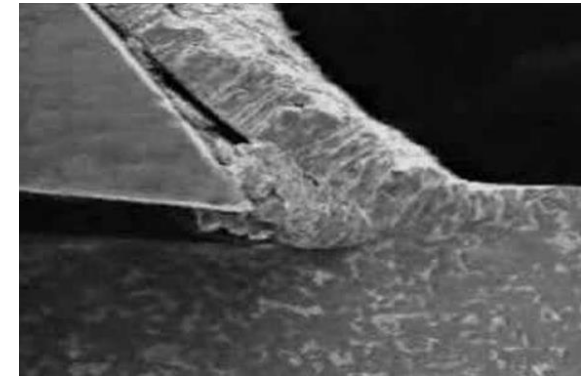
$k$  alto: calor vai para a peça  
 $F_c \text{ Al} < F_c \text{ aços}$



## Usinabilidade do alumínio

•A alta condutividade térmica do alumínio favorece a usinabilidade mas é necessário que a dureza da liga seja maior que 80 HB para reduzir a tendência à formação da aresta postiça de corte.

O coeficiente de dilatação térmica do alumínio, por ser maior que o aço e do latão, pode gerar dificuldades de obtenção de tolerâncias apertadas.





## Usinabilidade do alumínio

Elementos de Liga	Influência na Usinabilidade
Sn, Be e Pb	Atuam como lubrificantes e como fragilizadores do cavaco.
Fe, Mn, Cr e Ni	Combinam entre si ou com o alumínio e/ou para formarem partículas duras, que favorecem a quebra do cavaco e que, em grande quantidade, tem efeito abrasivo sobre a ferramenta.
Mg	Em teores pequenos (cerca de 0,3%) aumenta a dureza do cavaco e diminui o coeficiente de atrito entre cavaco e ferramenta.
Si	Aumenta a abrasividade da peça – a vida da ferramenta diminui com o aumento do tamanho da fase primária do silício.
Cu	Forma o intermetálico CuAl, que fragiliza o cavaco
Zn	Não exerce influência na usinabilidade.



## Ferramenta de Corte

Afiada (mínimo raio de aresta)

Ângulo de saída bem positivo (evita APC)

Usar MD classe K (exceto para liga Al-Si)

- Temperaturas de corte baixas
- Desgaste de cratera (difusão) não é problema

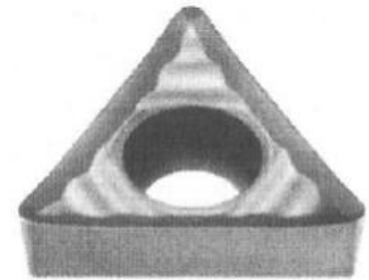
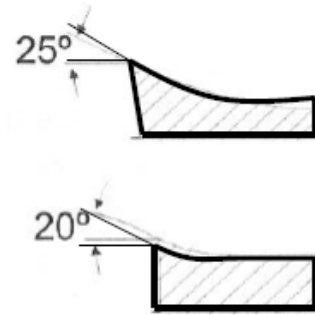
Não usar MD classe P (afinidade química Ti e Al)

AR: 300 m/min

MD: 600 m/min

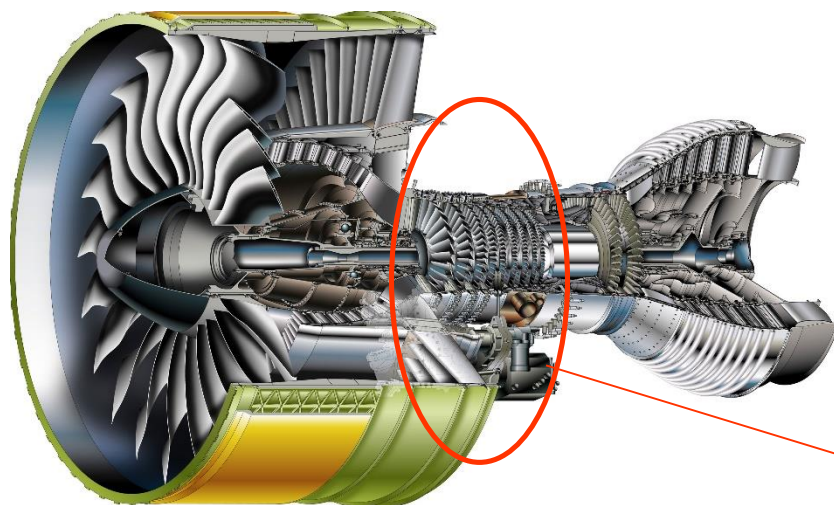
PCD: 3000 m/min

- Limitada pela máquina e não pelo desgaste
- Acabamento de retificação





# SUPERLIGAS DE NÍQUEL E AÇOS INOXIDÁVEIS



**Turbina Airbus**  
(Fabricantes GE + PW)  
R\$ 27 milhões

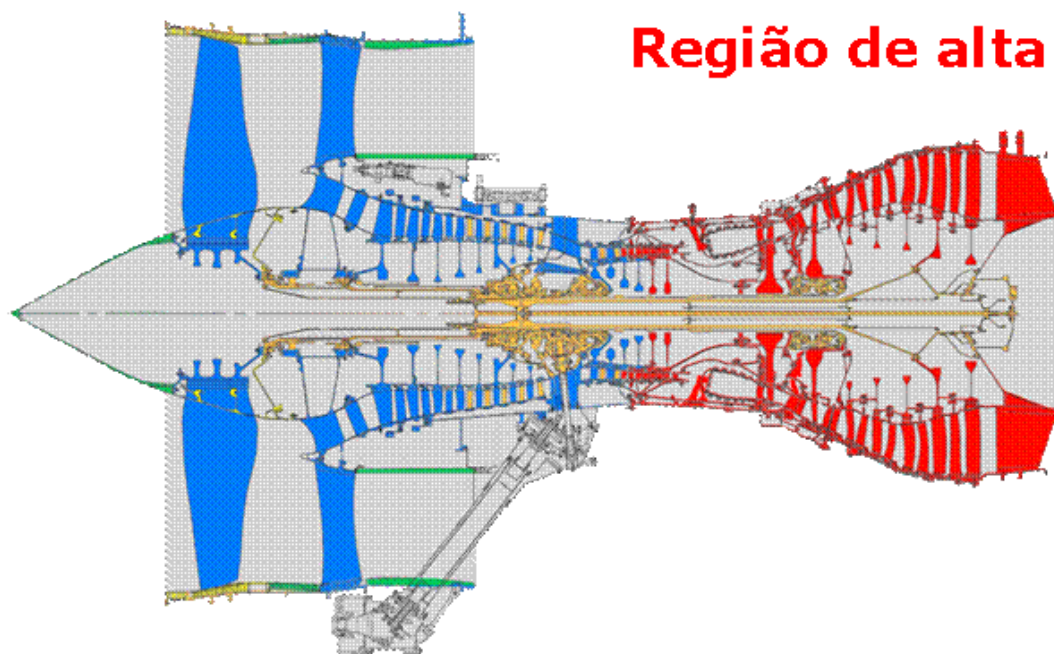
**Disco da Turbina**










## Contextualização

### Região de baixa temperatura



### Região de alta temperatura

-  Titanium
-  Nickel Base Alloys
-  Steel
-  Aluminum
-  Composite

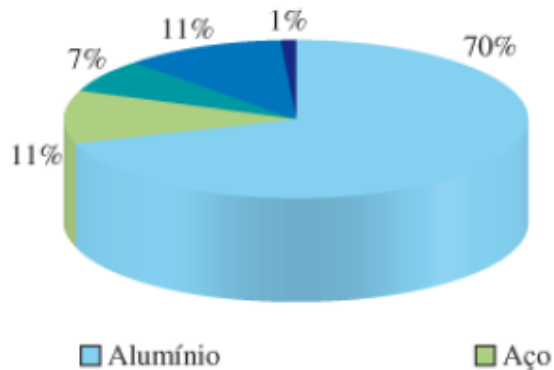


## Contextualização

Airbus 380 e Boing 787: superligas a base de níquel e aços inoxidáveis

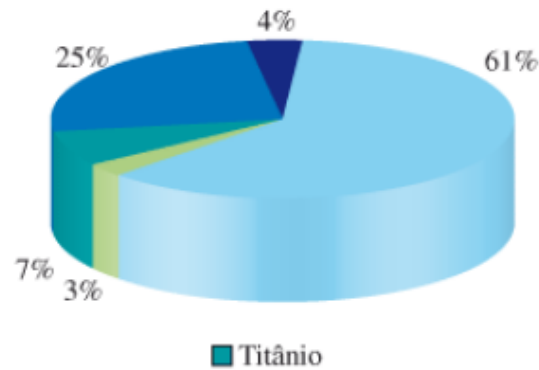
Superligas: Inconel 718, Hastelloy, Waspalloy

Aços Inoxidáveis: 15-5 PH, 17-4 PH



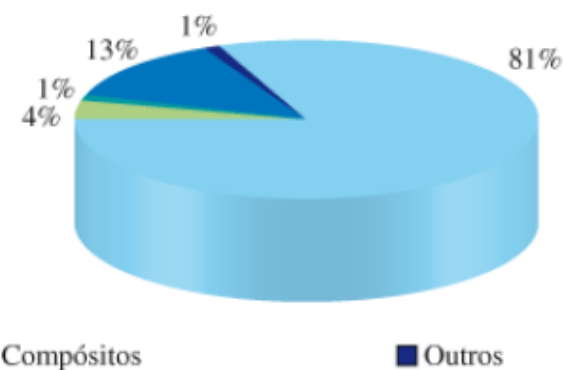
(a)

Boeing 777



(b)

Airbus A380



(c)

Embraer 170

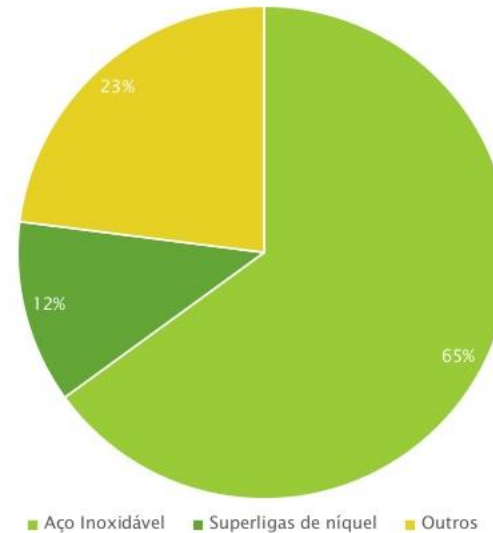


## Contextualização

Aplicações de superligas:

- Motores de foguetes e veículos espaciais
- Reatores nucleares
- Submarinos
- Usinas termoelétricas
- Equipamentos petroquímicos

## USO DO NÍQUEL NA INDÚSTRIA



Aço Inoxidável – 65%

Superligas de níquel – 12%

Outros – 23%

- Outras ligas
- Baterias recarregáveis
- Reações de catálise
- Cunhagens de moedas
- Revestimentos metálicos
- Fundição.





## Definições

**Superligas:** combinação extrema de propriedades mecânicas

Desenvolvimento nos anos 1930 nos EUA

Elevada resistência mecânica e ductilidade simultaneamente

Elevada resistência ao impacto, à fadiga mecânica e térmica

Suportam elevadas temperaturas e atmosferas agressivas

Elementos majoritários (Fe, Ni, Co) e associados (Ta, Ti, Cr, Nb, Mo, W)

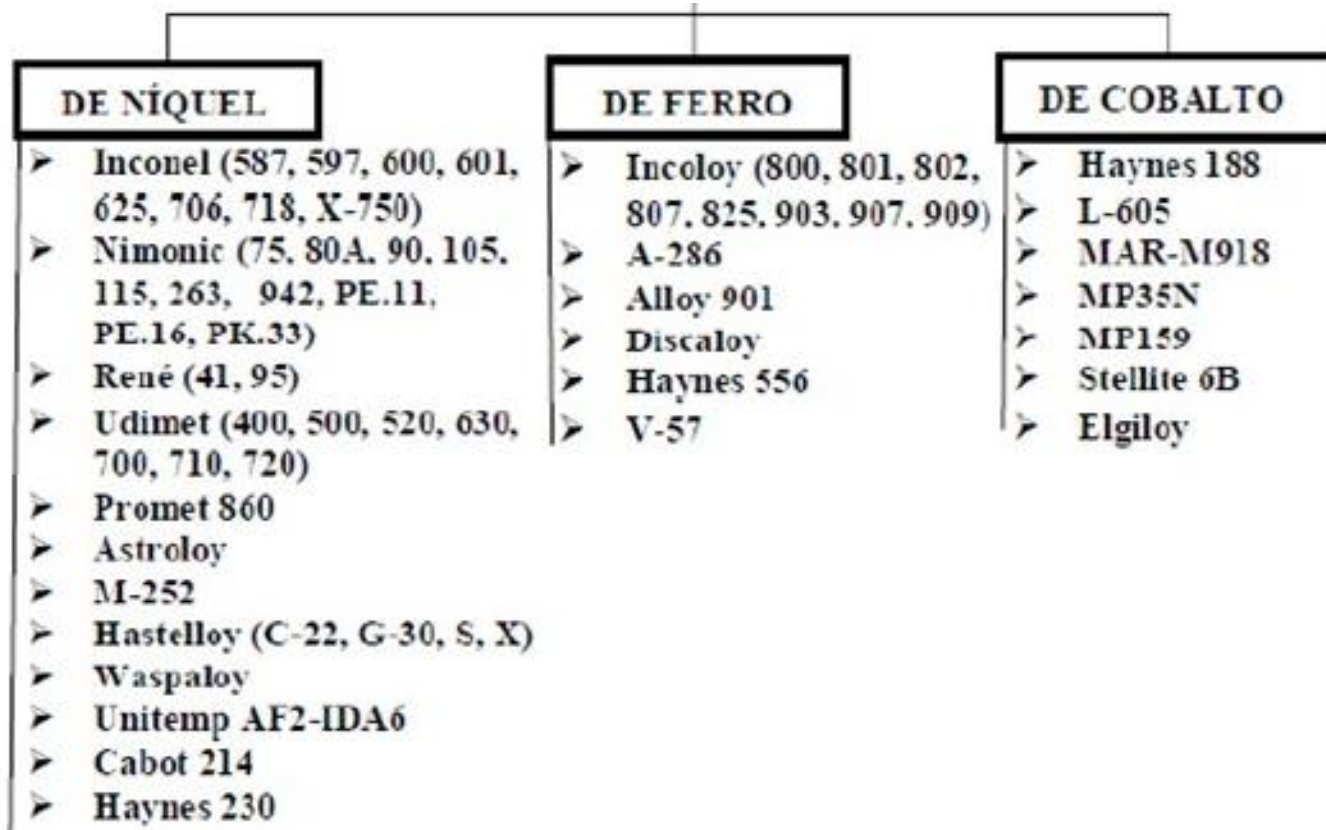
**Aços Inoxidáveis:** ligas ferrosas com 12% Cr (min)

São resistentes à corrosão

Elementos majoritários (Fe, Cr, Ni) e associados (Cu, Al, Si, Mo)



## Classificação das superligas





## Classificação dos aços inoxidáveis

**Ferríticos:** principal constituinte ferrita (série 400)

Aumento da resistência mecânica por trabalho a frio (encruamento)

Não são tratáveis termicamente e são ferromagnéticos

**Austeníticos:** principal constituinte austenita (série 300)

Aumento da resistência mecânica por trabalho a frio (encruamento)

Não são tratáveis termicamente e não são ferromagnéticos

São os mais produzidos e os mais resistentes à corrosão

**Martensíticos:** principal constituinte martensita (série 400)

São ferromagnéticos e tratáveis termicamente



## Propriedades Mecânicas (aços inoxidáveis)

Número AISI	Número UNS	Composição (%)*	Condição	Limite de resistência tração [MPa]	Limite de escoamento [MPa]	Ductilidade [% ΔL em 50 mm]	Aplicações típicas
<b>Ferrítico</b>							
409	S40900	0,80 C; 11,0 Cr; 1,0 Mn; 0,50 Ni; 0,75 Ti	Recozido	380	205	20	Componentes de exaustão automotivos, tanques para pulverizadores agrícolas
446	S44600	0,20 C; 25 Cr; 1,5 Mn	Recozido	515	275	20	Válvula (alta temperatura), moldes para vidro, câmaras de combustão



## Propriedades Mecânicas (aços inoxidáveis)

Número AISI	Número UNS	Composição (%)*	Condição	Limite de resistência tração [MPa]	Limite de escoamento [MPa]	Ductilidade [% ΔL em 50 mm]	Aplicações típicas
<b>Austenítico</b>							
304	S30400	0,08 C; 19 Cr; 9 Ni; 2,0 Mn	Recozido	515	205	40	Equipamentos para processamento químico e de alimentos, vasos criogênicos
316L	S31603	0,03C; 17 Cr; 12 Ni; 2,5 Mo; 2,0 Mn	Recozido	485	170	40	Construções com solda



## Propriedades Mecânicas (aços inoxidáveis)

Número AISI	Número UNS	Composição (%)*	Condição	Limite de resistência tração [MPa]	Limite de escoamento [MPa]	Ductilidade [% ΔL em 50 mm]	Aplicações típicas
<b>Martensítico</b>							
410	S41000	0,15 C; 12,5 Cr; 1,0 Mn	Recozido Temperado e Revenido	485 825	275 620	20 12	Canos de rifles, cutelaria e peças de motores a jato
440A	S44002	0,70 C; 17,0 Cr; 0,75 Mo; 1,0 Mn	Recozido Temperado e Revenido	795 1.790	415 1.650	20 5	Cutelaria, mancais e rolamentos, instrumentos cirúrgicos
<b>Endurecível por precipitação</b>							
17-7PH	S17700	0,09 C; 17 Cr; 7 Ni; 1,0 Al; 1,0 Mn	Endurecimento por precipitação	1.450	1.310	1-6	Molas, facas, vasos de pressão



## Composição química das principais superligas de níquel

Liga	Ni	Cr	Co	Mo	W	Ta	Nb	Al	Ti	Fe	Mn	Si	C	B	Zr	Outros
Astroloy	55,1	15,0	17,0	5,25	-- -	---	---	4,0	3,5	---	---	---	0,06	0,030	---	---
Waspaloy	58,3	19,5	13,5	4,3	-- -	---	---	1,3	3,0	---	---	---	0,08	0,006	0,06	---
Hasteloy X	47,3	22,0	1,5	9,0	0,6	---	---	---	---	18,5	0,50	0,50	0,10	---	---	---
Inconel 600	76,6	15,8	---	---	-- -	---	---	---	---	7,2	0,20	0,20	0,04	---	---	---
Inconel 601	60,7	23,0	---	---	-- -	---	---	1,35	---	14,1	0,50	0,25	0,05	---	---	---
Inconel 625	61,1	22,0	---	9,0	-- -	---	4,0	0,2	0,2	3,0	0,15	0,30	0,05	---	---	---
Inconel 706	41,5	16,0	0,5	0,5	-- -	---	2,9	0,2	1,75	40,0	0,18	0,18	0,03	---	---	---
Inconel 718	53,0	18,6	---	3,1	-- -	---	5,0	0,4	0,9	18,5	0,20	0,30	0,04	---	---	---



## Resistência mecânica das principais superligas de níquel

Tabela 1.5 – Resistência à Tração (UTS) em Diferentes Temperaturas de algumas Superligas de Níquel Fundidas (Unidade: MPa).

Liga	21 °C	538 °C	649°C	760 °C	871 °C
Astroloy	1414	1242	1311	1159	773
D-979	1408	1297	1104	718	345
Hastelloy X	787	649	572	435	255
Inconel 600	621	579	448	186	103
Inconel 601	738	725	525	290	159
Inconel 625	855	745	711	504	283
Inconel 706	1297	1124	1014	690	---
Inconel 718 barra	1435	1276	1228	952	338
Inconel 718 chapa	1276	1145	1034	676	---
Waspaloy	1276	1172	1117	794	525





## Usinabilidade de superligas de níquel

Possuem matrizes austeníticas (encruam durante a usinagem);

Esses materiais tem tendências de reagirem com as ferramentas;

Tendências desses materiais se aderirem às superfícies das ferramentas;

A presença de carbonetos duros e abrasivos na matriz dessas ligas aumenta a presença de desgaste abrasivo severo nas ferramentas;

A condutividade térmica é baixa, o que contribui para o desenvolvimento de altas temperaturas na ponta da ferramenta.



## Usinabilidade de aços inoxidáveis

Formam cavacos longos que tendem a empastar na ferramenta

Tem alta taxa de encruamento e grande zona plástica

Resulta em aresta postiça de corte

**Austeníticos e martensíticos:** usinabilidade difícil (carbonetos de cromo)

**Ferríticos:** usinabilidade facilitada dada a fase mole ferrítica na matriz

Baixa condutividade térmica: dificuldade de expulsar o calor do corte

Alto atrito na interface cavaco-ferramenta: aumenta a temperatura de corte

Alta dilatação térmica: dificulta manter tolerâncias apertadas



## Ferramentas para usinagem de superligas de níquel e aços inox

Excelente resistência ao desgaste

Alta resistência e tenacidade em alta temperatura

Alta dureza a quente

Resistência ao choque térmico

Alta condutividade térmica

Suficiente estabilidade química em altas temperaturas

As ferramentas de cerâmicas são mais adequadas para **superligas**

As ferramentas de MD classe M são mais adequadas para **aços inox**



## Usinabilidade das ligas de níquel e aços inoxidáveis

Material usinado	Dureza Brinell	Índice de usinabilidade <sup>a</sup>	Material usinado	Dureza Brinell	Índice de usinabilidade <sup>a</sup>
Aço-padrão: B1112	180–220	1,00	Aço ferramenta (não endurecido)	200–250	0,30
Aço com baixo carbono C1008,C1010,C1015	130–170	0,50	Ferro fundido Macio	60	0,70
Aço com médio carbono C1020,C1025,C1030	140–210	0,65	Dureza média	200	0,55
Aço com alto carbono C1040,C1045,C1050	180–230	0,55	Duro	230	0,40
Aços-liga 1320,1330,3130,3140	170–230	0,55	Superligas		
			Inconel	240–260	0,30
			Inconel X	350–370	0,15
			Waspalloy	250–280	0,12



(70 a 88% + difícil de usar)



## Usinabilidade das ligas de níquel e aços inoxidáveis

Material usinado	Dureza Brinell	Índice de usinabilidade <sup>a</sup>	Material usinado	Dureza Brinell	Índice de usinabilidade <sup>a</sup>
4130	180–200	0,65	Titânio		
4140	190–210	0,55	Puro	160	0,30
4340	200–230	0,45	Ligas	220–280	0,20
4340 Fundido	250–300	0,25	Alumínio		
6120,6130,6140	180–230	0,50	2-S,11-S,17-S	Macio	5,00 <sup>e</sup>
8620,8630	190–200	0,60	Ligas de alumínio (macias)	Macio	2,00 <sup>d</sup>
B1113	170–220	1,35	Ligas de Alumínio (duras)	Duro	1,25 <sup>d</sup>
Aços de usinagem fácil	160–220	1,50	Cobre	Macio	0,60
<b>Aços inoxidáveis</b>			Latão	Macio	2,00 <sup>d</sup>
301,302	170–190	0,50	Bronze	Macio	0,65 <sup>d</sup>
304	160–170	0,40			
316,317	190–200	0,35			
403	190–210	0,55			
416	190–210	0,90			



(10 a 65% + difícil de usar)



# TITÂNIO E SUAS LIGAS



**Trem de pouso  
(Boing 787)**



## Contextualização

Na aeronáutica: rotores, paredes corta-fogo, trens de pouso, dutos de exaustão

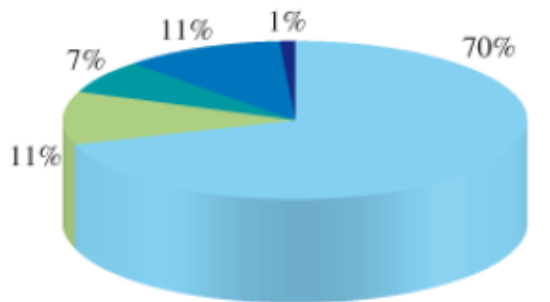
Outras indústrias: médica, química, bélica, naval, petróleo e eletrônica

2/3 da produção de Ti são aplicados na indústria aeroespacial (50% é Ti6Al4V)

Aplicação do titânio e suas ligas no:

Boing 737 (18 ton), 747 (45 ton), 777 (59 ton)

Airbus A320 (12 ton), A330 (18 ton), A340 (32 ton), A380 (77 ton, 11 ton nos motores)

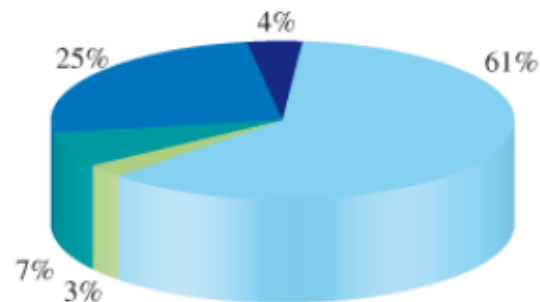


Alumínio

Aço

(a)

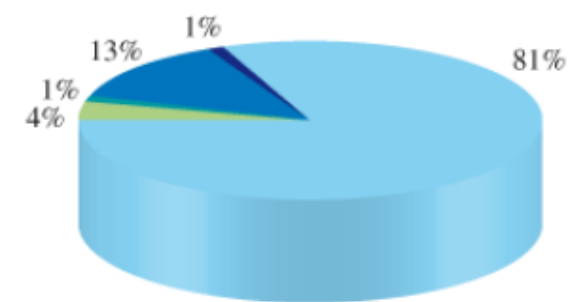
Boeing 777



Titânio

(b)

Airbus A380



Compositos

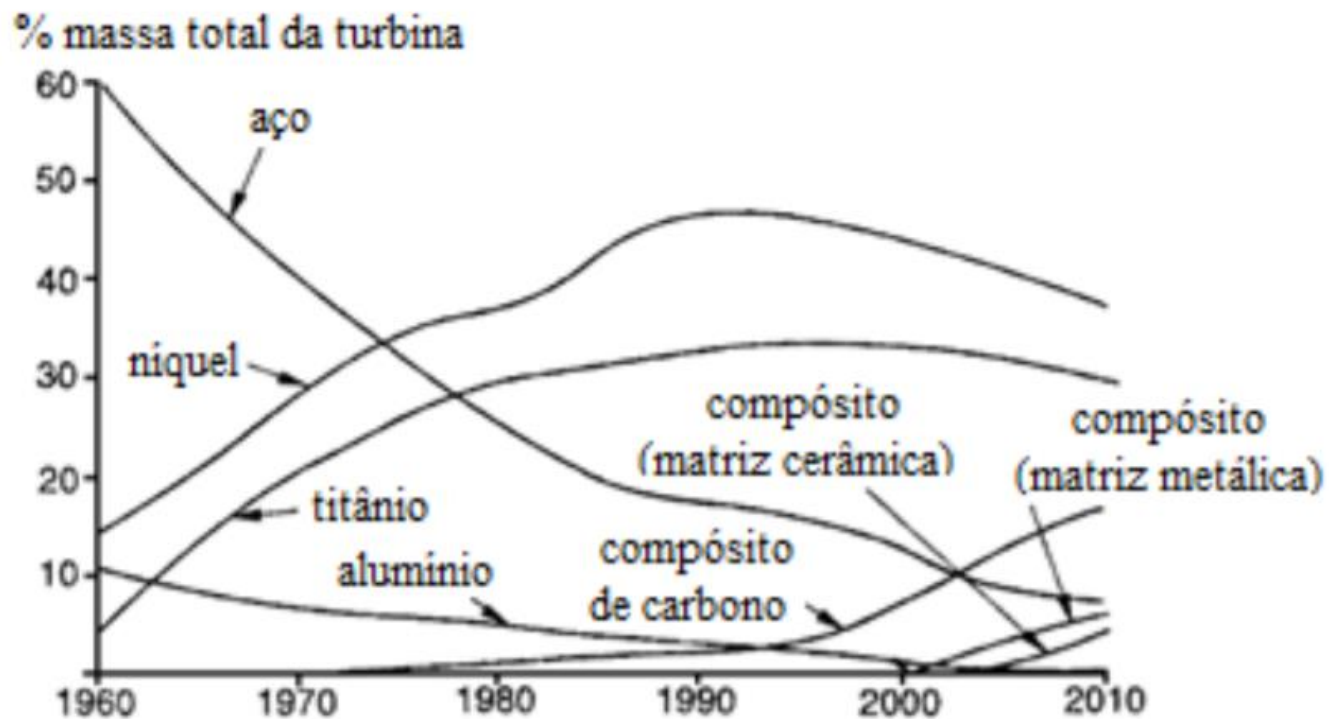
Outros

(c)

Embraer 170



## Contextualização







## Definições

Descoberto Ti em 1791 na Inglaterra

Ti puro tem densidade  $4500 \text{ kg/m}^3$  (quase metade da do aço)

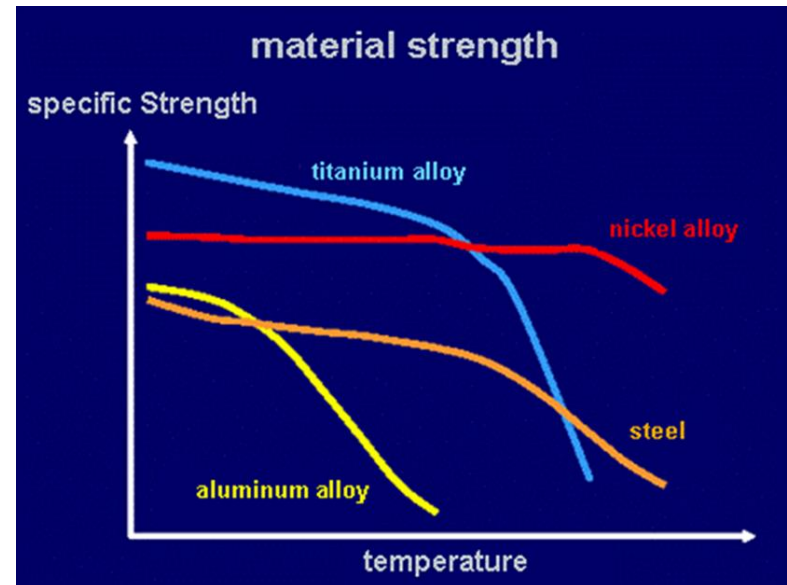
Limite de resistência à tração elevada: 1400 MPa (a temperatura ambiente)

Limitação: reatividade química a temperaturas elevadas

Elevado ponto de fusão:  $1668 \text{ }^\circ\text{C}$

Resistente à corrosão (material inerte)

Boa ductilidade

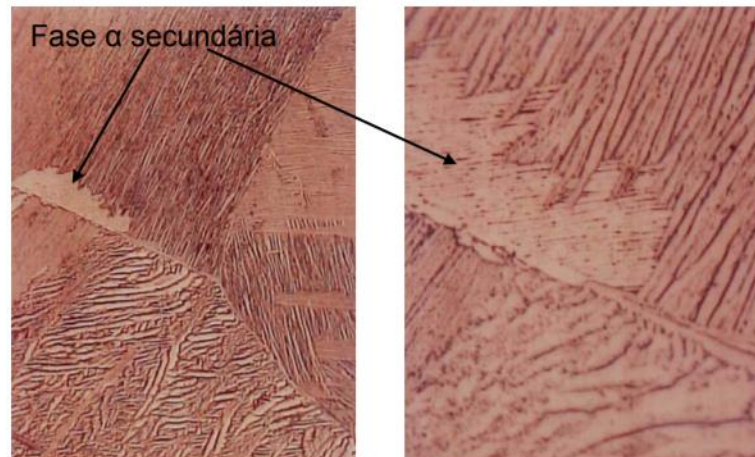




## Classificação

Podem ser divididas em 4 grupos principais:

- Ti puro (fase alfa): ASTM F67 (4 graus de pureza e 30% do uso)
- Liga próxima à fase alfa
- Liga beta
- Liga alfa + beta: ASTM F136 (Ti6Al4V)





## Propriedades Mecânicas

Tipo de liga	Número UNS	Composição (%)*	Condição	Limite de resistência à tração [MPa]	Limite de escoamento [MPa]	Ductilidade [% $\Delta L$ em 50 mm]	Aplicações típicas
Comercialmente pura	Sem liga (R50500)	99,1 Ti	Recozida	484	414	25	Invólucros de motores a jato, carcaças e fuselagens de aviões, equipamentos resistentes à corrosão para as indústrias naval e de processamento químico
$\alpha$	Ti-5Al-2,5Sn (R54520)	5 Al; 2,5 Sn; restante Ti	Recozida	826	784	16	Invólucros e anéis de motores a turbina a gás; equipamentos para processamentos químicos que exigem resistência à temperatura de 480 °C



## Propriedades Mecânicas

Tipo de liga	Número UNS	Composição (%)*	Condição	Limite de resistência à tração [MPa]	Limite de escoamento [MPa]	Ductilidade [% $\Delta L$ em 50 mm]	Aplicações típicas
Próximo a $\alpha$	Ti-8Al-1Mo-1V (R54810)	8 Al; 1 Mo; 1 V; restante Ti	Reduzida (duplex)	950	890	15	Peças forjadas para componentes de motores a jato (discos, placas e cubos de compressores)
$\alpha$ - $\beta$	Ti-6Al-4V (R56400)	6 Al; 4V; restante Ti	Recozida	947	877	14	Implantes e próteses de elevada resistência, equipamentos para processamento químico, componentes estruturais de fuselagens de avião



## Propriedades Mecânicas

Tipo de liga	Número UNS	Composição (%)*	Condição	Limite de resistência à tração [MPa]	Limite de escoamento [MPa]	Ductilidade [% $\Delta L$ em 50 mm]	Aplicações típicas
$\beta$	Ti-10V-2Fe-3Al	10 V; 2 Fe; 3 Al; restante Ti	Solubilização + envelhecimento	1.223	1.150	10	Melhor combinação de elevada resistência e tenacidade dentre quaisquer ligas comerciais de titânio; usada para aplicações que exigem uniformidade das propriedades de tração nas posições na superfície e no centro; componentes de fuselagens de avião de alta resistência



## Usinabilidade do titânio e suas ligas

São considerados materiais de difícil usinabilidade (*difficult-to-cut materials*)

Alta resistência a quente: dificuldade de formar cavaco por deformação plástica

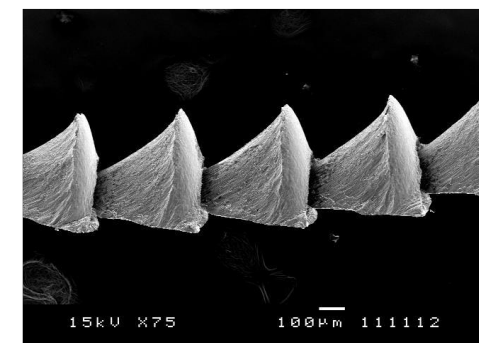
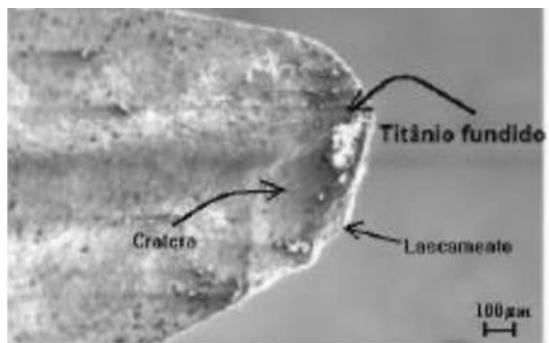
Cavaco fino e área de contato pequena: altas tensões na ferramenta

Pobres propriedades térmicas:  $T_c \sim 1100 \text{ }^\circ\text{C}$

Coeficiente de atrito elevado na interface cavaco-ferramenta

Reatividade química acima de  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  com outros materiais de ferramenta

Baixo módulo de elasticidade: vibração e deflexão da ferramenta





## Ferramentas para usinagem de titânio e suas ligas

MD classe K para fresamento frontal e torneamento

MD revestido com diamante

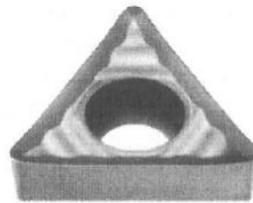
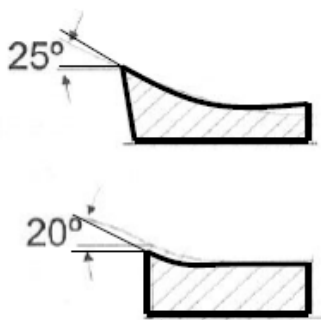
PCD e CBN

Menores ângulos de cunha

Uso de refrigeração criogênica ou fluido a alta pressão

Aplicar baixas velocidades de corte ( $< 100$  m/min)

Utilizar inserto redondo (mudança de contato)





## Usinabilidade de titânio e suas ligas

Material usinado	Dureza Brinell	Índice de usinabilidade <sup>a</sup>	Material usinado	Dureza Brinell	Índice de usinabilidade <sup>a</sup>
Aço-padrão: B1112	180–220	1,00	Titânio		
Aço com baixo carbono C1008,C1010,C1015	130–170	0,50	Puro	160	0,30
Aço com médio carbono C1020,C1025,C1030	140–210	0,65	Ligas	220–280	0,20
Aço com alto carbono C1040,C1045,C1050	180–230	0,55			
Aços-liga 1320,1330,3130,3140	170–230	0,55			



(70 a 80% + difícil de usar)





## Bibliografia

Machado, A. R., Abrão, A. M., Coelho, R. T., Silva, M. B. **Teoria da usinagem dos materiais**. Ed. Edgar Blucher, 408 p., 2015.

Andrade, D. A. **Processos de usinagem**, notas de aula (aula 10), 2015.

Rodrigues, A.R. **Desenho técnico mecânico: projeto e fabricação do desenvolvimento de produtos industriais**, Elsevier, 512 p., 2015.

Couto, A. A. et al. **Caracterização microestrutural da liga Ti-6Al-4V comercial utilizada como biomaterial**, 17º CBECiMat, Foz do Iguaçu-PR, 12 p. 2006.

Barbosa, H. C. **Aplicações do alumínio na indústria aeronáutica e aeroespacial**, Workshop “Alumínio 100% a favor”, Slides APAL, ISEP, 2014.

Rodrigues, L.E.M.J. **Introdução ao projeto de aeronaves**, notas de aula (aula 32), IFSP, s.d.

Prado, W. **Usinabilidade dos materiais**, notas de aula (aula 9), s.l., s.d.

Souza, J. F. **Usinabilidade dos materiais**, notas de aula, s.l., s.d.

<http://www.icz.org.br/niquel-superligas.php>. Acesso em 21/04/2018.

<http://usinagemsemsegredos.blogspot.com.br/2009/11/voce-sabia-usinagem-dos-componentes.html>.

Acesso em 22/04/2018

<http://www.defesanet.com.br/bid/noticia/17256/Titanio---Boeing--Airbus-e-Embraer-em-Guerra-/>. Acesso em 22/04/2018

<http://www.ipesi.com.br/Noticias/1531-e-possivel-usinar-titanio-de-forma-eficiente-e-produtiva>. Acesso em 22/04/2018