



Ligas de Titânio

para Aplicações Aeroespaciais

UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO AEROESPACIAL
ALEXANDRE DUARTE N°26402

Breve história

- ▶ O titânio foi inicialmente descoberto em 1791 por *William Justin Gregor* a partir do mineral ilmenita;
- ▶ Em 1795 o químico alemão *Heinrich Klaproth* descobriu, novamente, mas no mineral rutilo e dominou como titânio;
- ▶ O primeiro processo para produzir titânio puro foi o processo de *Hunter*, elaborado por *Matthew A. Hunter* em 1910.
- ▶ Em 1940 o engenheiro metalurgista *William Justin Kroll* desenvolveu um método para produzir comercialmente sendo dominando por processo *Kroll*;

Titânio

- ▶ O titânio é o nono elemento mais abundante da crosta terrestre, sendo ele encontrado em diversos metais como a *ilmenita* (FeTiO_3) e o *rutilo* (TiO_2);



Ilmenita



Titânio



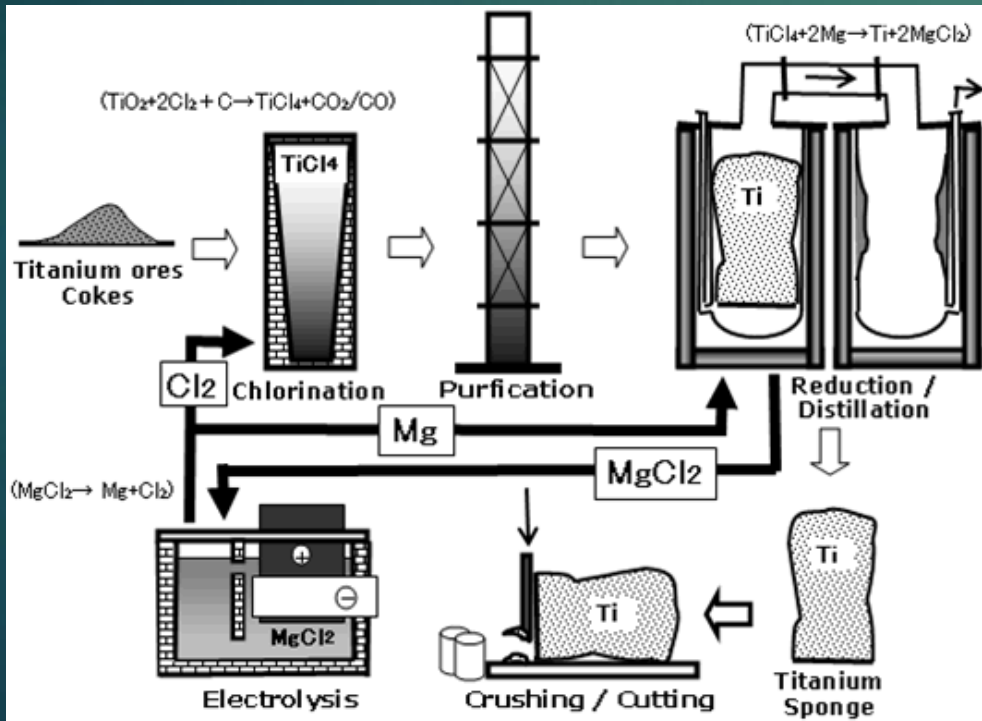
Rutilo

Como se obtém ?

4

Processo de Kroll consiste em duas etapas:

- ▶ $2 \text{FeTiO}_3 (\text{s}) + 7 \text{Cl}_2 (\text{g}) + 6 \text{C} (\text{s}) \rightarrow 2 \text{TiCl}_4 (\text{l}) + 2 \text{FeCl}_3 (\text{l}) + 6 \text{CO} (\text{g}) \quad \alpha 100^\circ\text{C}$
- ▶ $2 \text{Mg} (\text{l}) + \text{TiCl}_4 (\text{g}) \rightarrow 2 \text{MgCl}_2 (\text{l}) + \text{Ti} (\text{s}) \quad \alpha 800\text{-}850^\circ\text{C}$



“esponja” de titânio

Processo de Kroll

Processo de Kroll

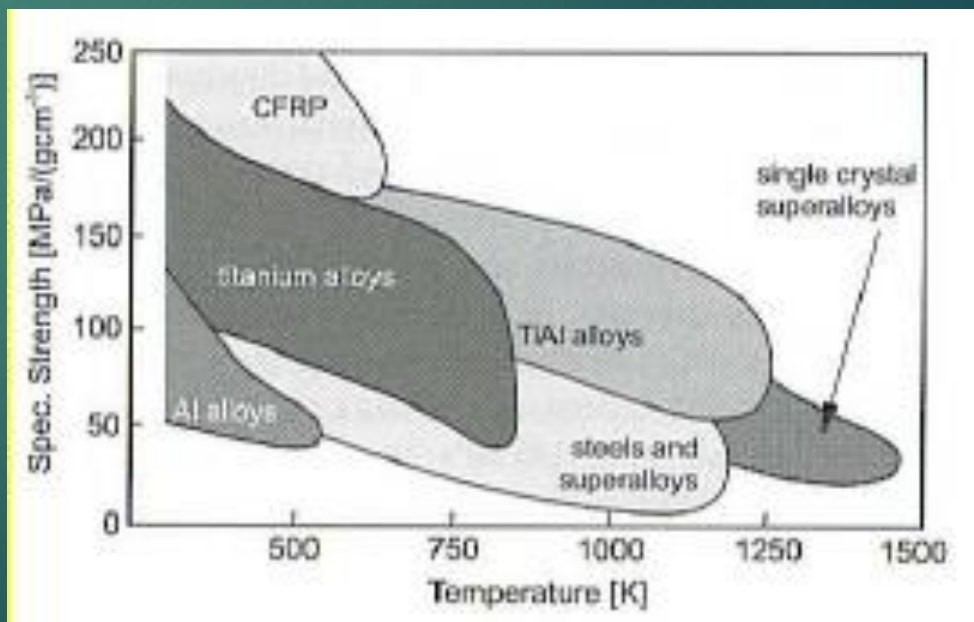
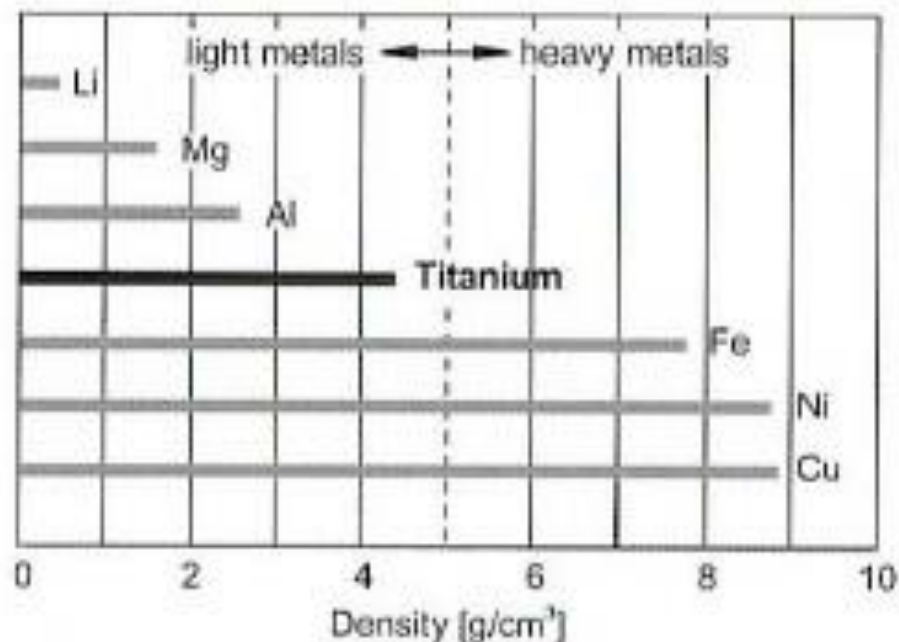
- ▶ <https://www.youtube.com/watch?v=41yjeguApo4>

Propriedades

- ▶ Alta resistência à corrosão;
 - ▶ Metal leve ($\rho=4,54g/cm^3$);
 - ▶ Ponto de fusão $1668^{\circ}C$;
 - ▶ Excelente resistência a fadiga, à corrosão ($550^{\circ}C$) e mecânica ($E=103GPa$);
 - ▶ Resistência à fluência elevada.
-
- ▶ Elevado custo de produção;
 - ▶ Acima de $550^{\circ}C$ apresenta baixa resistência à corrosão;
 - ▶ Baixa condutividade térmica;
 - ▶ Difícil soldabilidade;

Comparação

7

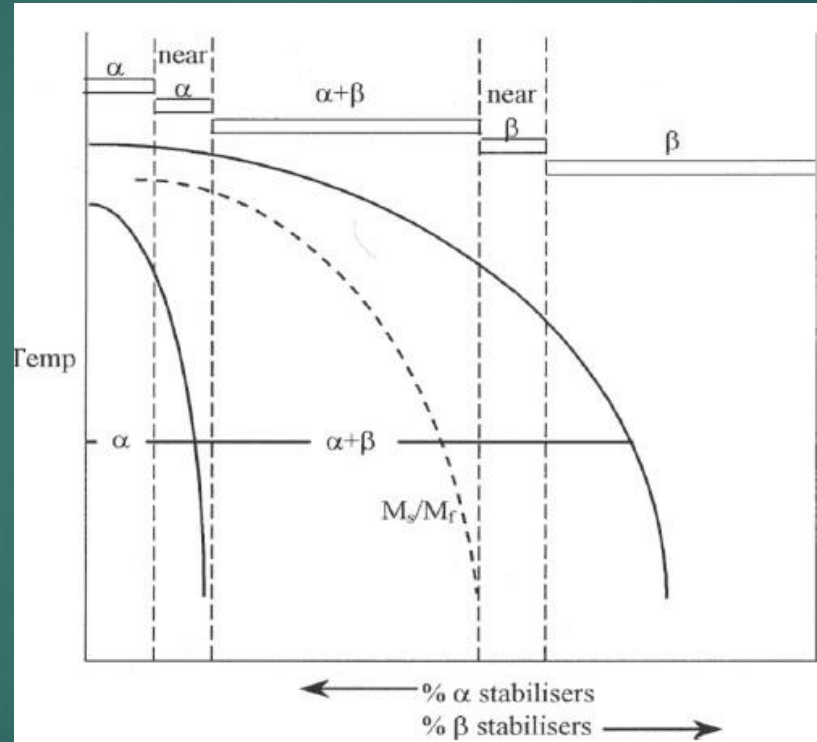


Ligas de Titânio

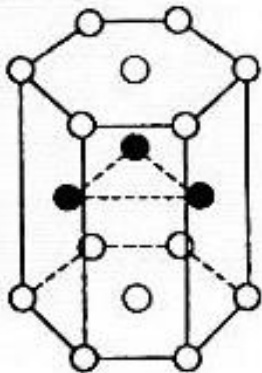
8

As ligas de titânio são divididas em 4 grandes categorias:

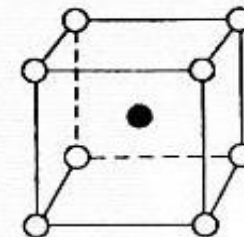
- ▶ Ligas de titânio puro;
- ▶ Ligas α ;
- ▶ Ligas β ;
- ▶ Ligas α - β ;
- ▶ Ligas quase- β ;
- ▶ Ligas quase- α ;



Alpha α
Hexagonal Close
Packed



Beta β
Body-Centered
Cubic



Beta Transus Temperature 883°C

Titânio comercialmente puro (cp titanium)

- ▶ O titânio comercialmente puro apresenta 99,0% ou mais de titânio (e com até 0,08%C, 0,18% a 0,40%O e 0,20 a 0,50%Fe).

Propriedades:

- ▶ Resistência a tração, entre 240 e 690MPa e um modulo de Elasticidade de 103GPa;
- ▶ Excelente resistência à corrosão;
 - ▶ Grande soldabilidade;

Chemical compositions (maximum values) and typical applications of unalloyed titanium†

% Ti	Grade	ASTM No.	% C	% Fe	% N	% O	% H	Typical applications
99.5	1	B265	0.08	0.20	0.03	0.18	0.015	Airframes; chemical, desalination, and marine parts; plate-type heat exchangers; cold-spun or pressed parts; platinized anodes; high formability.
99.2	2	B265	0.08	0.25	0.03	0.20	0.015	Airframes; aircraft engines; marine chemical parts; heat exchangers; condenser and evaporator tubing; formability.
99.1	3	B265	0.08	0.25	0.05	0.30	0.015	Chemical, marine, airframe, and aircraft engine parts which require formability strength, weldability, and corrosion resistance.
99.0	4	B265	0.08	0.50	0.05	0.40	0.015	Chemical, marine, airframe, and aircraft engine parts; surgical implants; high-speed fans; gas compressors; good formability and corrosion resistance, high strength.

† After "ASM Databook," published in *Met. Prog.*, mid-June, vol. 114, no. 1, 1978.

Ligas do tipo α

11

- ▶ Estabilizadores: Al, O, C, N.
- ▶ Al e O são os principais elementos da liga.
- ▶ Se existir um excesso de elementos de liga pode formar-se um composto intermetálico com estrutura hexagonal compacta do Ti_3Al muito frágil.

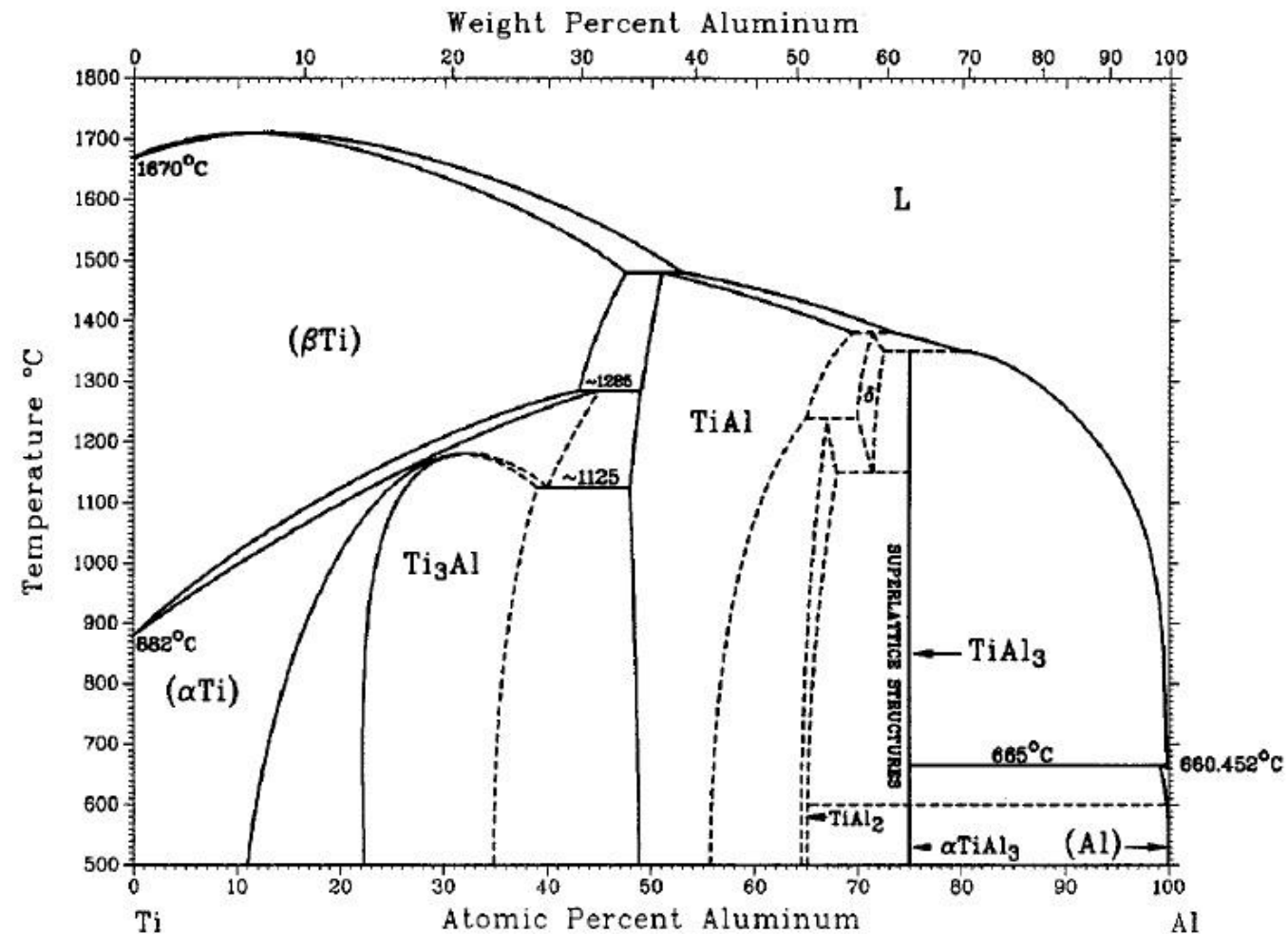


Fig. The Ti-Al phase diagram (T.B. Massalski, 1990).

Propriedades

12

- ▶ As ligas alfa apresentam uma elevada resistência à corrosão e uma grande resistência à deformação;
- ▶ Grande soldabilidade;

e

Aplicações

Chemical compositions and typical applications of α titanium alloys†

α Alloys	Condition	Typical applications
3% Al, 2.5% Sn	Annealed	Weldable alloy for forgings and sheet-metal parts such as aircraft engine compressor blades and ducting; steam turbine blades; good oxidation resistance and strength at 600 to 1100°F; good stability at elevated temperatures.
5% Al, 2.5% Sn (low O ₂)	Annealed	Special grade for high-pressure cryogenic vessels operating down to -423°F.

† After "ASM Databook," published in *Met. Prog.*, mid-June, vol. 114, no. 1, 1978.

Ligas do tipo β

13

- ▶ São constituídas por β -estabilizadores (metais de transição e materiais nobres), Ex: V,Nb,Co,Si,Cu,Fe,Mo...;
- ▶ O mercado destas ligas ainda é pequeno, mas ao nível aeroespacial tem aumentado utilizando a liga Ti-10-2-3.

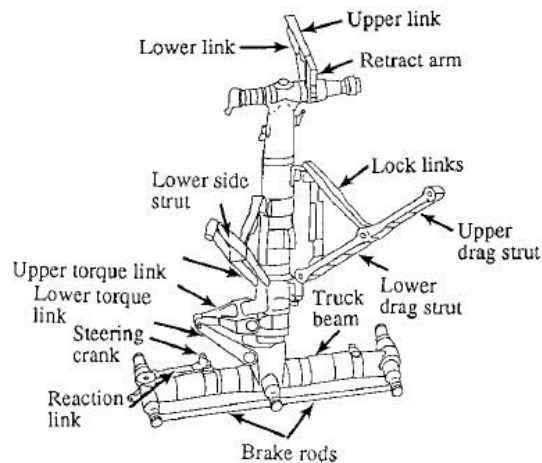


Fig. Main landing gear of the Boeing 777 of forged TIMETAL 10-2-3 parts (Boeing Commercial Aircraft, Seattle, WA, USA).

Advantages

- high strength-to-density ratio
- high strength/high toughness
- high fatigue strength
- good deep hardenability
- low forging temperature
- strip producible – low-cost TMP* (some alloys)
- cold formable (some alloys)
- easy to heat treat
- excellent corrosion resistance (some alloys)
- excellent combustion resistance (some alloys)

Disadvantages

- high density
- low modulus
- poor low and high temperature properties
- small processing window (some alloys)
- high formulation cost
- segregation problems
- high springback
- microstructural instabilities
- poor corrosion resistance (some alloys)
- interstitial pick up

* TMP: thermomechanical processing

Table 6.4 Compositions and applications of β -titanium alloys

Alloy	Country of Origin	Applications
Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn (Beta III)	U.S.A.	Aircraft fasteners, rivets, steel springs for orthodontic devices.
Ti-8V-6Cr-4Mo-4Zr-3Al (Beta C)	U.S.A.	Aircraft fasteners, springs, tubular casings for oil, gas and geothermal wells.
Ti-10V-2Fe-3Al (Ti 10-2-3)	U.S.A.	High strength forgings for airframes, landing gear, bar and plate.
Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn (Ti 15-3)	U.S.A.	Airframe sheet, tubing and fasteners.
Ti-15Mo-2.7Nb-3Al-0.2Si (Ti-21S)	U.S.A.	Oxidation and corrosion resistant sheet and foil for use at elevated temperatures. (e.g. 260-425°C) e.g. jet engine nacelles.
Ti-5Mo-5V-8Cr-3Al (TB2)	P.R. China	High speed rotors and other forgings.
Ti-5Al-5V-5Mo-1Cr-1Fe (VT22)	C.I.S.	High strength forgings, aircraft landing gear.

Ligas do tipo α - β

15

- ▶ As ligas α - β têm como constituintes estabilizadores alfa e beta, em que o estabilizador alfa mais utilizado é o alumínio. Em relação ao estabilizador beta varia de liga para liga.
- ▶ Composição típica: Ti, 6%Al e 4%V



Ti-6Al-4V

- ▶ Mais de 50% das ligas de titânio utilizadas hoje em dia é desta composição, sendo a liga Ti-6Al-4V a mais utilizada ao nível Aeroespacial. Tendo como composição Al-6%, Fe-max0.25%, O-max0.2%, Ti-90% e V-4%.

Algumas propriedades desta liga são:

Módulo de Elasticidade – 113,8GPa;

Módulo de rigidez – 44GPa;

Resistência à tração – 950MPa;

Propriedades

- ▶ As ligas alfa-beta apresentam uma boa resistência à temperatura ambiente;
- ▶ Difícil soldabilidade;
- ▶ Uma grande ductilidade;
- ▶ Boa resistência à corrosão;

e Aplicações

Chemical compositions and typical applications of α - β titanium alloys†

Alloy composition	Condition	Typical applications
6% Al, 4% V	Annealed; solution + age	Rocket motor cases; blades and disks for aircraft turbines and compressors; structural forgings and fasteners; pressure vessels; gas and chemical pumps; cryogenic parts; ordnance equipment; marine components; steam-turbine blades.
6% Al, 4% V (low O ₂)	Annealed	High-pressure cryogenic vessels operating down to -320°F
6% Al, 6% V, 2% Sn	Annealed; solution + age	Rocket motor cases; ordnance components; structural aircraft parts and landing gears; responds well to heat treatments; good hardenability.
7% Al, 4% Mo	Solution + age	Airframes and jet engine parts for operation at up to 800°F; missile forgings; ordnance equipment.
6% Al, 2% Sn, 4% Zr, 6% Mo	Solution + age	Components for advanced jet engines.
6% Al, 2% Sn, 2% Zr, 2% Mo, 2% Cr, 0.25% Si	Solution + age	Strength, fracture toughness in heavy sections; landing-gear wheels.
10% V, 2% Fe, 3% Al	Solution + age	Heavy airframe structural components requiring toughness at high strengths.
8% Mn	Annealed	Aircraft sheet components, structural sections, and skins; good formability, moderate strength.
3% Al, 2.5% V	Annealed	Aircraft hydraulic tubing, foil; combines strength, weldability, and formability.

Em resumo:

17

	α	$\alpha + \beta$	β
Density	+	+	-
Strength	-	+	++
Ductility	-/+	+	+/-
Fracture toughness	+	-/+	+/-
Creep strength	+	+/-	-
Corrosion behavior	++	+	+/-
Oxidation behavior	++	+/-	-
Weldability	+	+/-	-
Cold formability	--	-	-/+

Ligas do tipo quase- α

18

- São caracterizadas como contendo pequenas porções de estabilizadores beta;

Materials de Construção Aeroespacial – 2014/2015

Chemical compositions and typical applications of near- α titanium alloys†

Composition	Condition	Typical applications
8% Al–1% Mo–1% V	Duplex-annealed	Airframe and jet-engine parts requiring high strength to 850°F (455°C); good creep and toughness properties; good weldability.
6% Al–2% Sn–4% Zr–2% Mo		Parts and cases for jet-engine compressors; airframe skin components.
5% Al–5% Sn–2% Zr–2% Mo–0.25% Si	975°C ($\frac{1}{2}$ h) air-cooled, + 600°C (2h) air-cooled	Jet engine parts; high creep strength to 1000°F (538°C).
6% Al–1% Mo–2% Cb–1% Ta	As-rolled, 1-in plate	High toughness; moderate strength; good resistance to sea water and hot-salt stress corrosion; good weldability.

Propriedades:

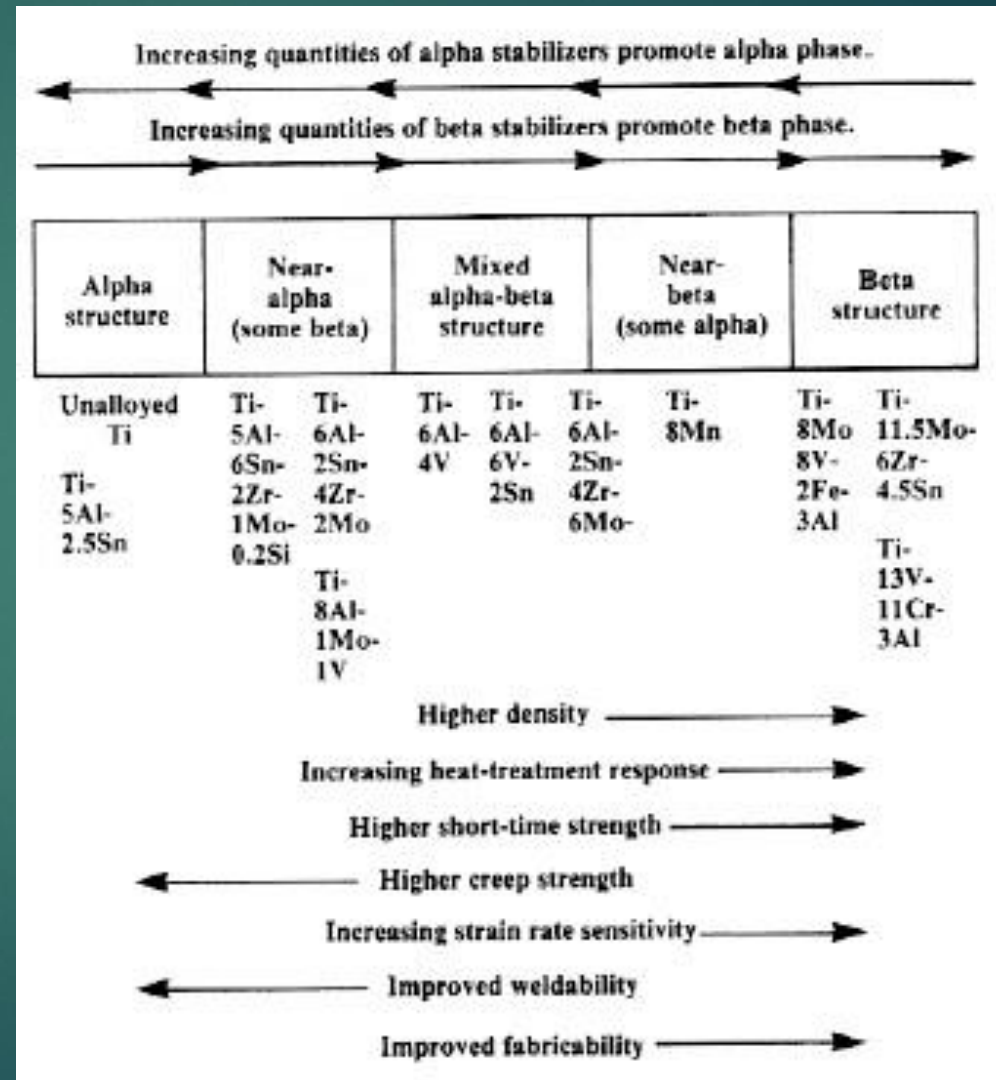
- Boa resistência à deformação
- Alta resistência mecânica;
- Temperaturas de operação entre 500 a 550°C.

† Alter "ASM Databook," published in *Met. Prog.*, vol. 114, no. 1, mid-June 1978.

Ligas do tipo quase- β

19

- ▶ Estas ligas contêm estabilizadores alfa e estabilizadores beta;



Propriedades

20

Materials de Construção Aeroespacial – 2014/2015

Alloy	Chemical Composition [wt. %]	T_p [°C]	Developer	Year	Hardness [HV]	E [GPa]	YS [MPa]	TS [MPa]	%El	K_{Ic} [MPa m ^{1/2}]
<i>α Titanium Alloys</i>										
high purity Ti	99.98 Ti	882			100	100–145	140	235	50	
Grade 1	(cp-Ti: 0.2Fe, 0.18O)	890	miscellaneous		120		170–310	>240	24	
Grade 4	(cp-Ti: 0.5Fe-0.40O)	950	miscellaneous		260	100–120	480–655	>550	15	
Grade 6	(Ti-5Al-2.5Sn)	1040	miscellaneous	1953	300	109	827	861	15	70
<i>Near-α Titanium Alloys</i>										
Ti-6-2-4-2-S	Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.1 Si	995	RMI, USA	1970	340	114	990	1010	13	70
TIMETAL 1100	Ti-6Al-2.7Sn-4Zr-0.4Mo-0.4Si	1010	Timet, USA	1988		112	900–950	1010–1050	10–16	60–75
TIMTETAL 685	Ti-6Al-5Zr-0.5Mo-0.25Si	1020	IMI, UK	1969		120	850–910	990–1020	6–11	68
TIMETAL 834	Ti-5.8Al-4Sn-3.5Zr-0.5 Mo-0.7Nb-0.35Si-0.06C	1045	IMI, UK	1984	350	120	910	1030	6–12	45
<i>$\alpha+\beta$ Titanium Alloys</i>										
Ti-6-4	Ti-6Al-4V	995	miscellaneous	1954	300–400	110–140	800–1100	900–1200	13–16	33–110
Ti-6-6-2	Ti-6Al-6V-2Sn	945	miscellaneous		300–400	110–117	950–1050	1000–1100	10–19	30–70
Ti-6-2-2-2-2	Ti-6Al-2Sn-2Zr-2Mo-2Cr-0.25Si					110–120	1000–1200	1100–1300	8–15	65–110
Ti-6-2-4-6	Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo	940	Pratt & Whitney, USA		330–400	114	1000–1100	1100–1200	13–16	30–60
Ti-17	Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr	890	GE, USA	1968	400	112	1050	1100–1250	8–15	30–80
<i>Metastable β Titanium Alloys</i>										
SP 700	Ti-4.5Al-3V-2Mo-2Fe	900	NKK, J	1989	300–500	110	900	960	8–20	60–90
Beta III	Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn	760	Colt/Crucible, USA	1960	250–450	83–103	800–1200	900–1300	8–20	50–100
Beta C	Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr	795	RMI, USA	1969	300–450	86–115	800–1200	900–1300	6–16	50–90
Ti-10-2-3	Ti-10V-2Fe-3Al	800	Timet, USA	1976	300–470	110	1000–1200	1000–1400	6–16	30–100
Ti-15-3	Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn	760	Timet, USA	1981	300–450	80–100	800–1000	800–1100	10–20	40–100

Tratamentos térmicos

21

É efetuado tratamentos térmicos nas ligas de titânio para:

- ▶ Reduzir as tensões residuais produzidas durante a fabricação;
- ▶ Aumentar a resistência mecânica
- ▶ Melhorar a ductilidade;
- ▶ Melhorar a resistência ao desgaste
- ▶ Melhorar a resistência à corrosão
- ▶ Melhores a resistência ao calor

Os principais tratamentos térmicos são :

Recozimento

Têmpera

Alívio de tensões

Table 6.3 Properties of annealed Ti-6Al-4V forgings†

	Forging treatment‡	
	$\alpha + \beta$ phase field	β phase field
Tensile ultimate (MPa)	978	991
Tensile yield (MPa)	940	912
Tensile elongation (%)	16	12
Reduction in area (%)	45	22
Fracture toughness (MPa m ^{1/2})	52	79
10 ⁷ fatigue limit (MPa)§	± 494	± 744

† Annealed 2 h at 705°C, air-cooled after forging

‡ α/β transus 1005°C

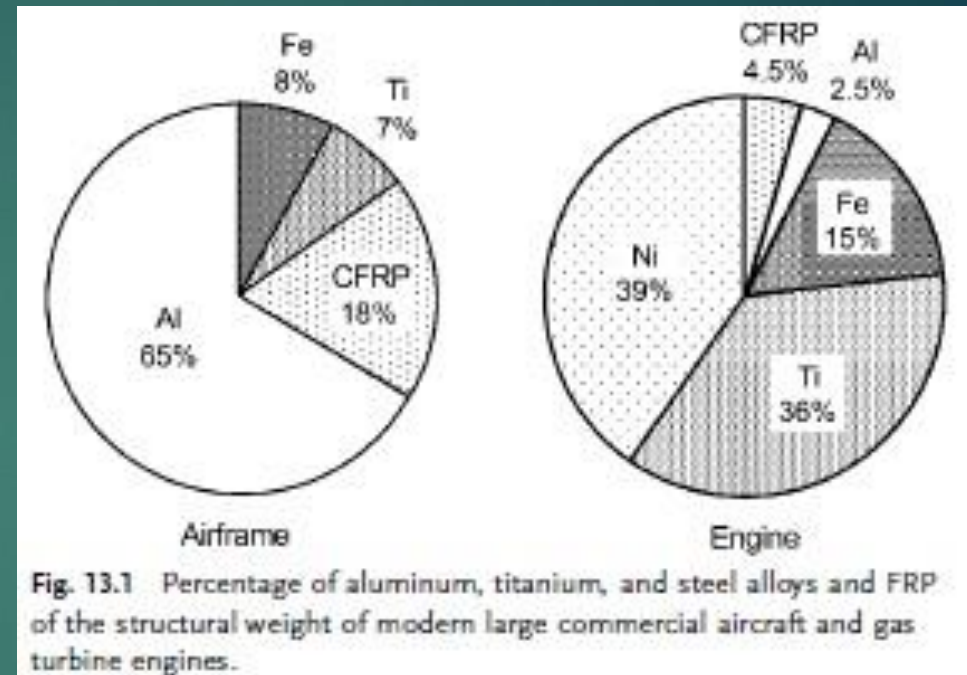
§ Axial loading; smooth specimens, $K_t = 1.0$

Aplicações ao nível Aeroespacial

22

As principais propriedades pelo uso das ligas de titânio na indústria aeroespacial são:

- ▶ Redução de peso;
- ▶ Corrosão;
- ▶ Compatibilidade galvânica com os compósitos;



Aplicações Aeroespacial

23

Primeira utilização de titânio no Douglas X-3 Stiletto



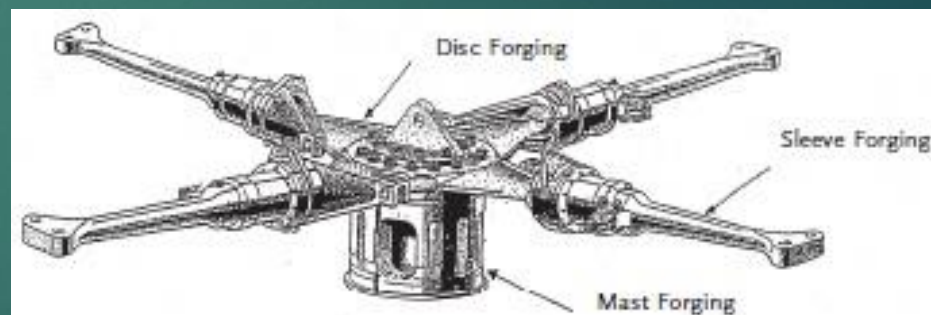
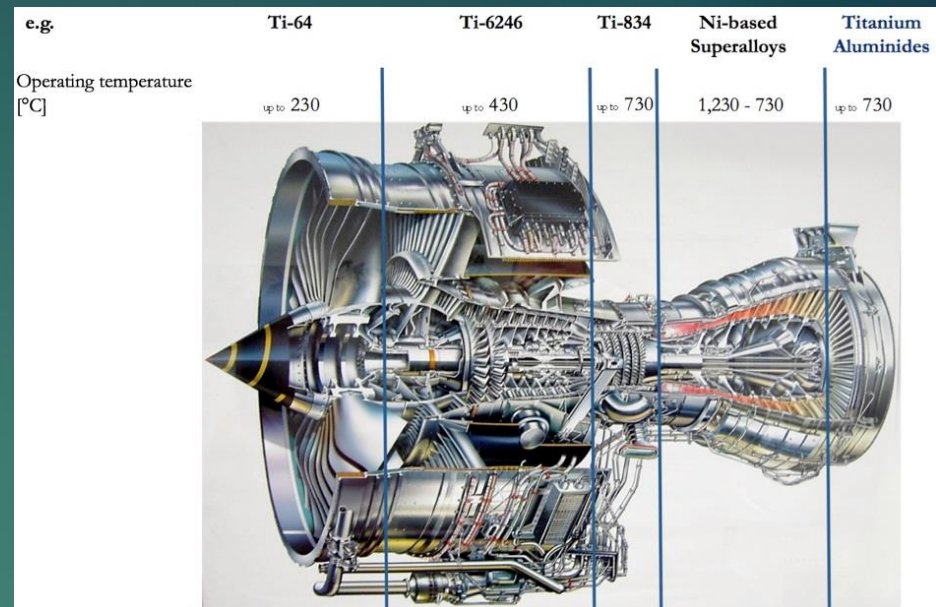
TiAl low-pressure turbine blades for the CF6-80C2 (GE Aircraft Engines, Extondale, OH, USA).



SR-71 Blackbird



Fig. Pressure tanks manufactured from titanium for space transportation systems (TIMET, Henderson, NV, USA).



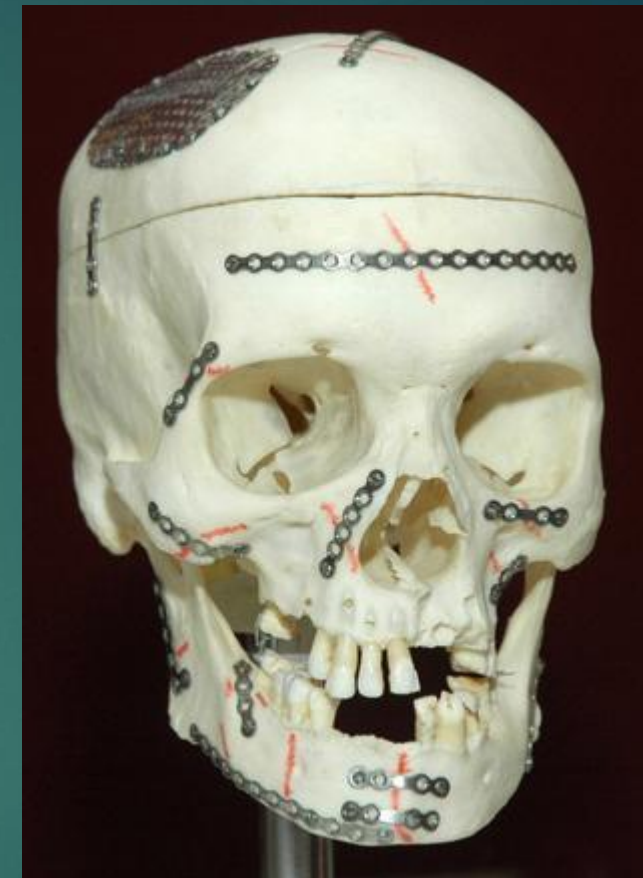
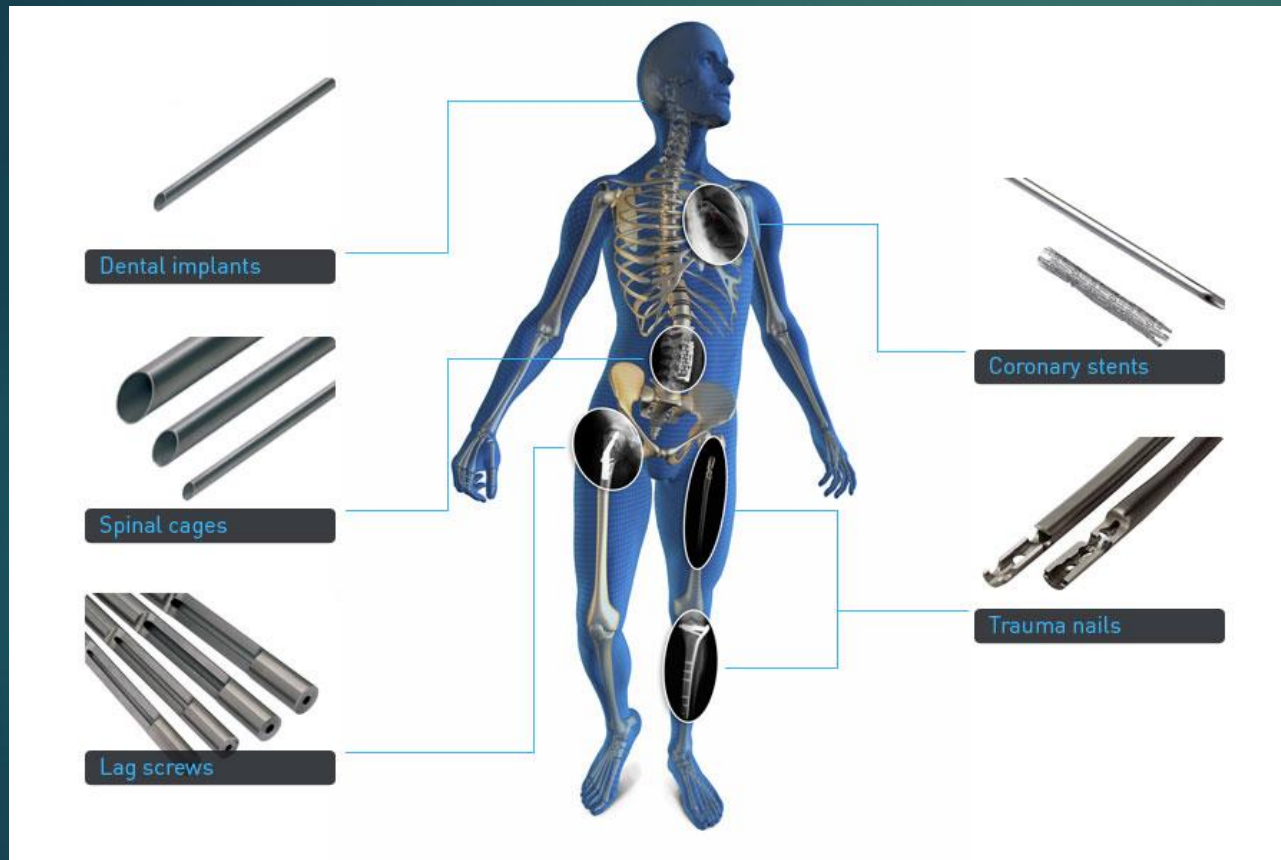
Courtesy of Westland Helicopters

Fig. 2.15 Super Lynx helicopter main bolted rotor head made from Ti-10-2-3.

Ao nível médico

25

Materials de Construção Aeroespacial – 2014/2015



Reconstrução facial

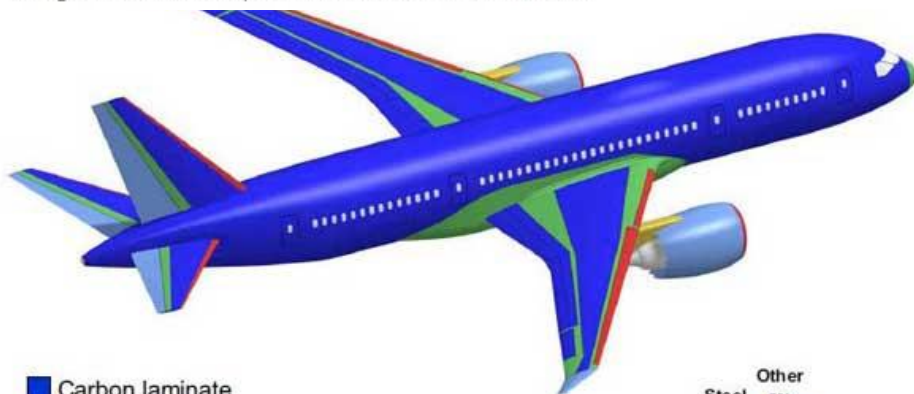
"...range of high quality metal tubes in stainless steel and titanium alloys, designed to meet the unique requirements of customers in the medical device industry. ..." - finetubes.co.uk/industries/medical-tubes/

Prospecções para o Futuro

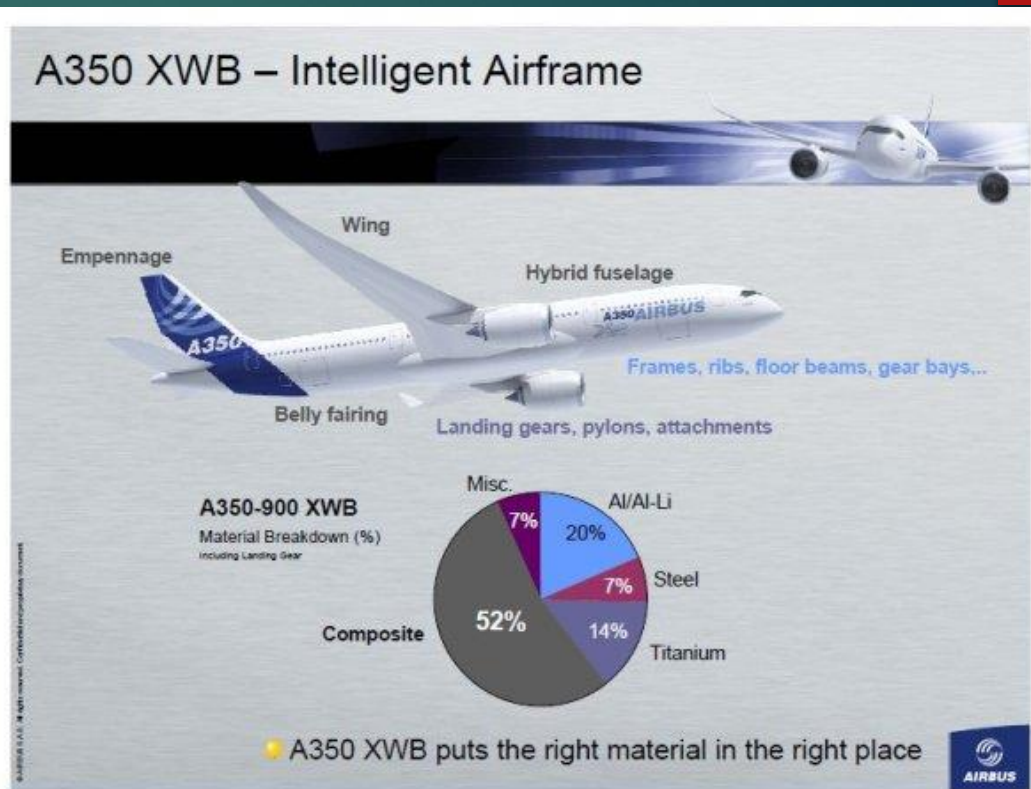
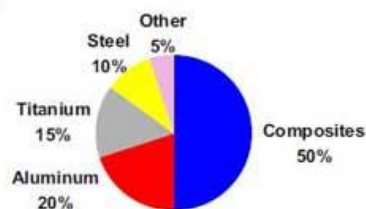
26



Titanium hip implants have the potential to be 3D printed in the future.
Image credit: stockpackshot / Shutterstock.com

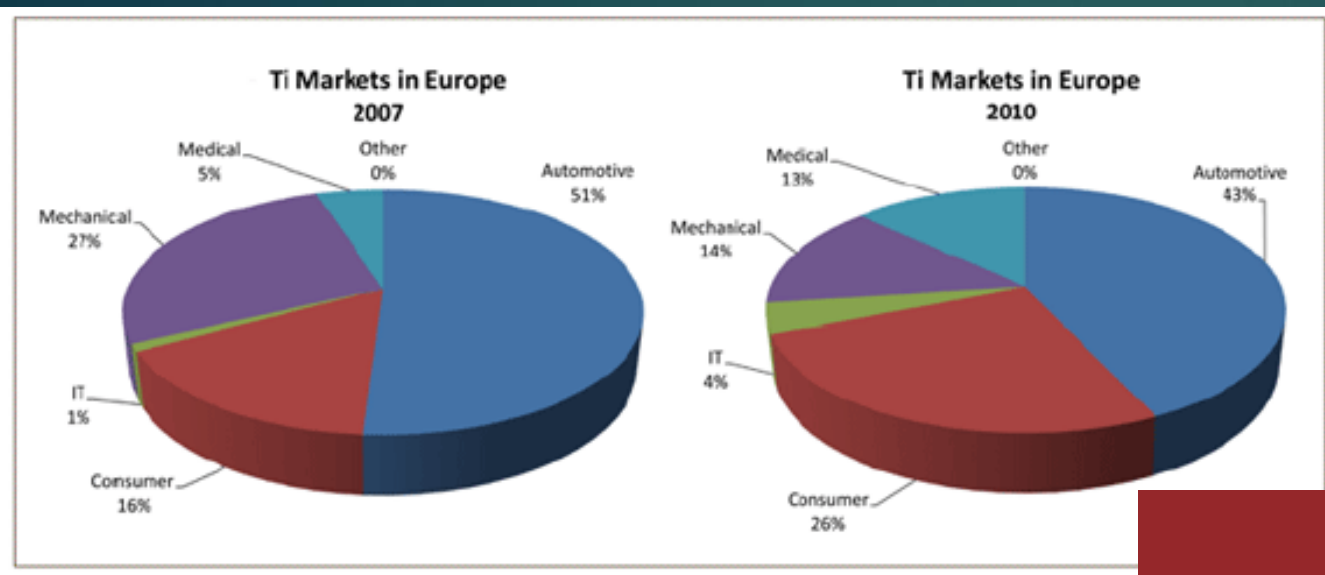


- Carbon laminate
- Carbon sandwich
- Fiberglass
- Aluminum
- Aluminum/steel/titanium pylons



Materials de Construção Aeroespacial – 2014/2015

<https://www.youtube.com/watch?v=tkwd2YXNy9I>



Titanium MIM at Euro PM2012



Obrigado