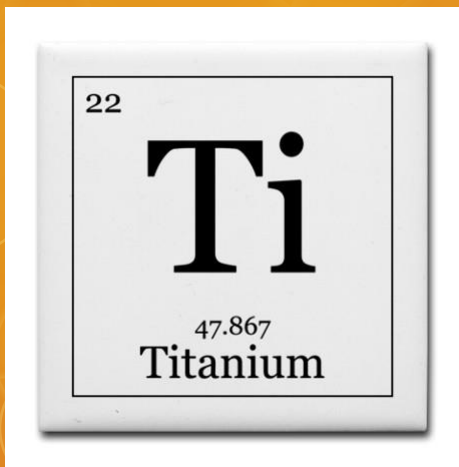


Ligas de Titânio





- 4º metal mais abundante na crosta terrestre
- Encontrado no mineral Ilmenite e Rútilo



História



- Descoberto em 1791 por William Gregor em Inglaterra na Ilmenite (FeTiO_3)
- Redescoberto em 1795 por Heinrich Klaproth no Rútulo (TiO_2)
- Em 1910, Matthew A. Hunter obteve Titânio puro através do processo de Hunter
- Só em 1946 é que o Titânio foi utilizado fora do laboratório como metal, quando William Kroll desenvolveu um método para comercializa-lo (Processo de Kroll)

Propriedades do Titânio e principais razões de aplicação

- Elevada Resistência à corrosão;
- Elevada resistência mecânica;
- Baixa Densidade ($\rho_{Al} < \rho_{Ti} < \rho_{Fe}$) (60% da densidade do Ferro) (4.51g/cm³);
- Baixa condutividade térmica (21.9 W/(m.K));
- Dúctil e fácil de trabalhar(quando puro);
- Temperatura de Fusão elevada (1668°C);
- Elevada bio compatibilidade;

Métodos de Fabricação

Processo de Hunter

Mistura-se o mineral que contém titânio (rútilo ou ilmenite) com cloro (Cl₂) e carvão e adiciona-se calor. O carvão reage com o óxido de titânio formando CO₂ e o cloro reage com o titânio formando o TiCl₄ (Tetracloreto de Titânio).



De seguida, mistura-se Na com o TiCl₄ obtido, adicionando calor (700-800°C).



Este processo produz titânio com elevado grau de pureza, no entanto devido a seu elevado custo de produção foi substituído pelo processo Kroll que é mais económico.

Métodos de Fabricação

Processo de Kroll

- O Rútulo ou a Ilmenite são misturados com carvão e cloro num reator e aquecidos a 900°C;
- O produto final da reação é um material conhecido como "tickle" (TiCl₄ impuro com aspecto esponjoso) e cloreto de ferro;
 - $2 \text{FeTiO}_3 (\text{s}) + 7 \text{Cl}_2 (\text{g}) + 6 \text{C}(\text{s}) \rightarrow 2\text{TiCl}_4 (\text{l}) + 2\text{FeCl}_3(\text{l}) + 6\text{CO}(\text{g})$



Processo de Kroll

- O TiCl_4 obtido é colocado em tanques de destilação e limpo de impurezas;
- O TiCl_4 é encaminhado para outro reator onde é adicionado magnésio e aquecido a cerca de 1100°C ;
- Produto final: Cloreto de Magnésio e Titânio puro (s);
 - $2 \text{Mg (l)} + \text{TiCl}_4 \text{ (g)} \rightarrow 2 \text{MgCl}_2 \text{ (l)} + \text{Ti (s)}$
- O Titânio é removido e tratado com água e ácido clorídrico para remover os excessos de magnésio;
- O resultado final é um metal poroso chamado "esponja".



Processo de Kroll

- A esponja de Titânio puro é misturada com outros metais para formar ligas;
- Essa mistura chama-se esponja eléctrodo;
- A esponja eléctrodo é fundida e arrefecida de maneira a formar lingotes;
- Depois de finalizados, são inspeccionados para se encontrar alguns defeitos
- [How Do They Do It? Titanium](#)

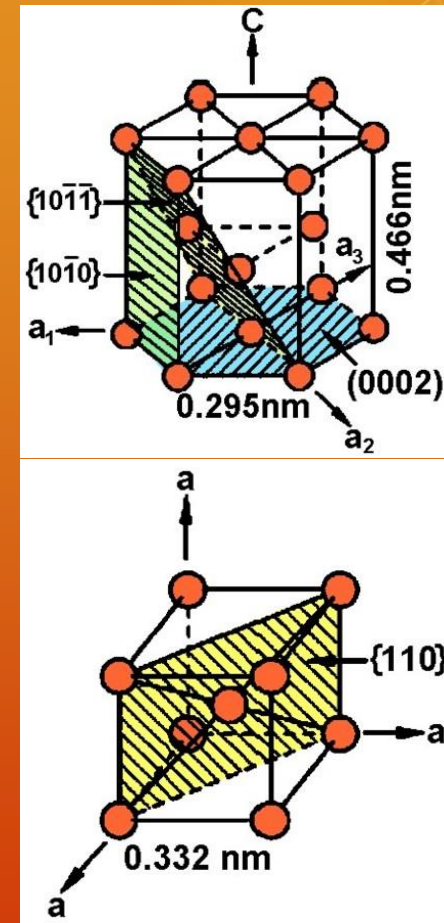
Ligas de Titânio

- Contêm uma mistura de titânio com outros elementos químicos;
- Os elementos de liga são divididos entre estabilizadores α e estabilizadores β ;



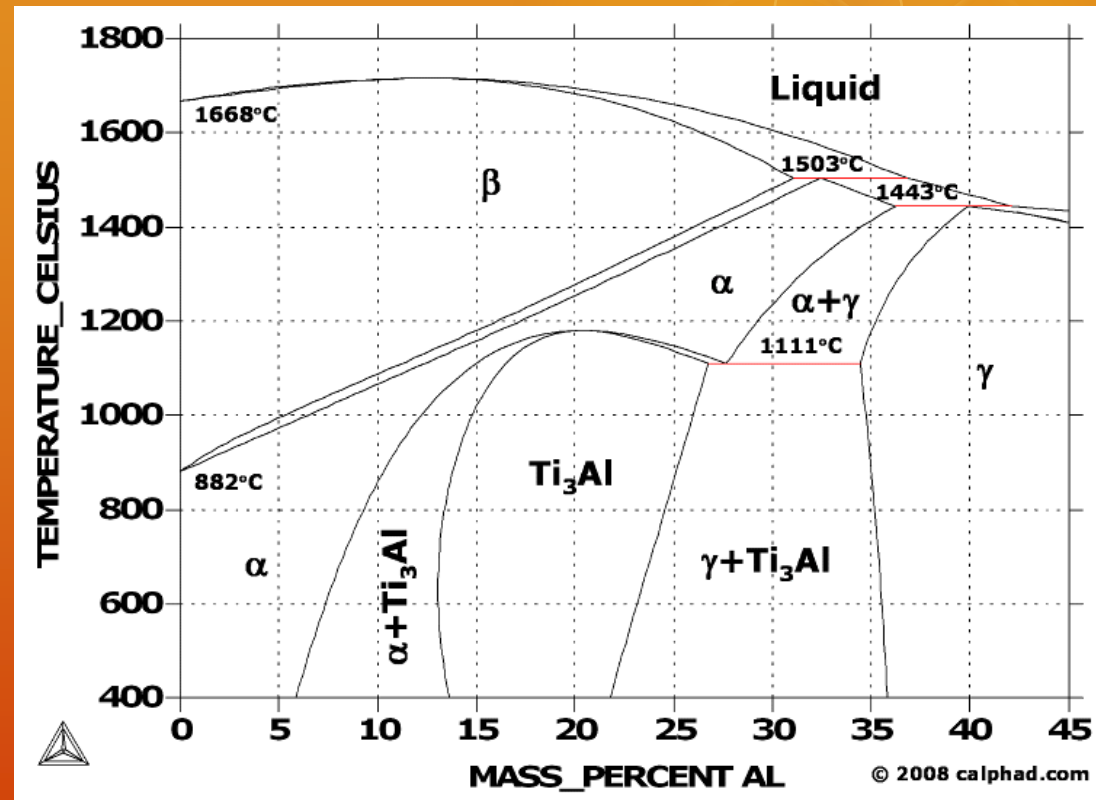
Ligas de Titânio

- O Titânio, a temperatura ambiente, tem uma estrutura HCP (Hexagonal Compacta): fase α ;
- ao atingir os 882°C, sofre uma transformação de fase e passa a ter uma estrutura BCC (Cúbica de Corpo Centrado), chamada fase β



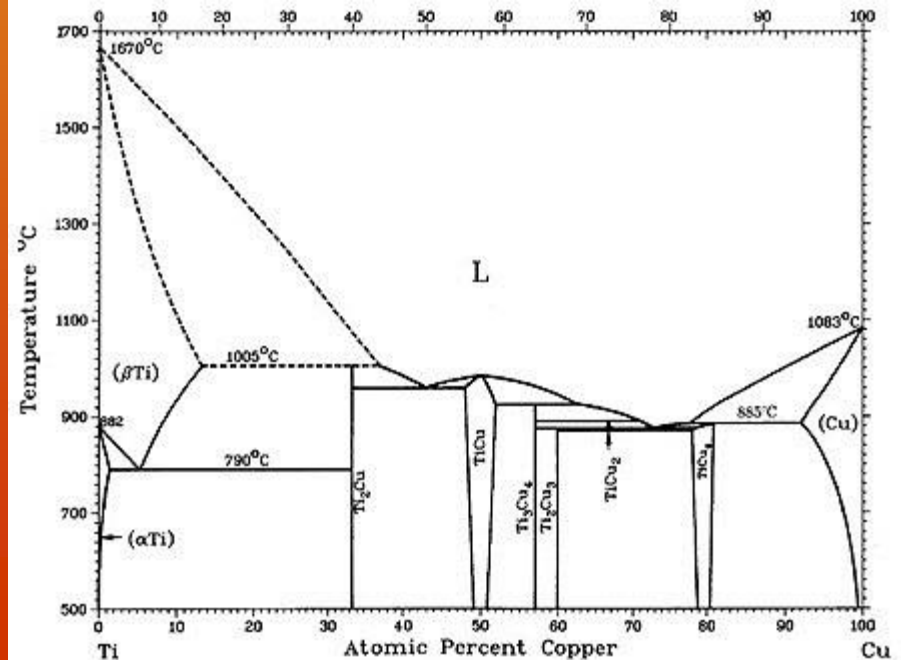
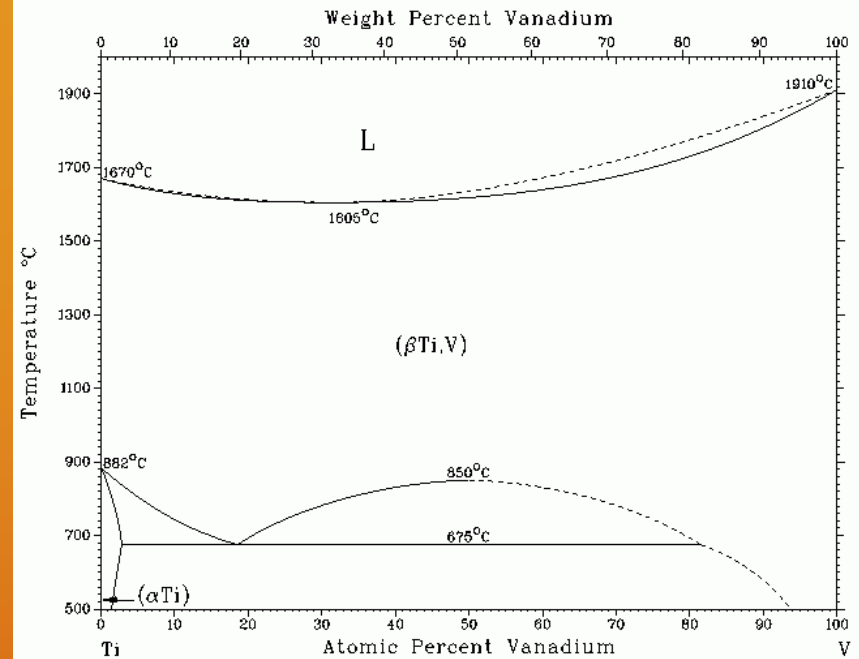
Ligas de Titânio

- Essa temperatura pode ser mudada, consoante os elementos que misturamos ao criar a liga;
- Os elementos que aumentam essa temperatura, são os **estabilizadores α** .
- Os mais usados são o Alumínio (Al), Oxigênio (O) e o Azoto (N).



Ligas de Titânio

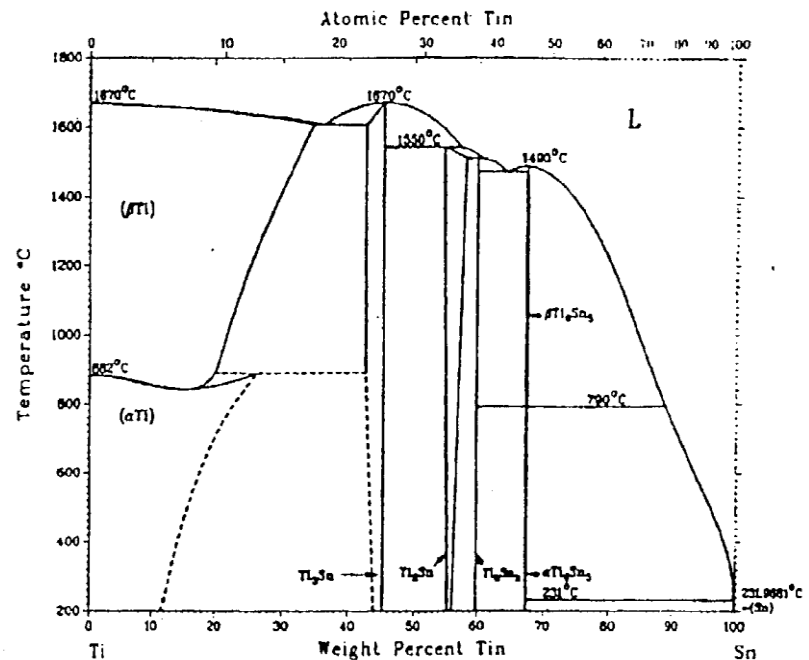
- Os elementos que diminuem essa temperatura são os estabilizadores β
- Existem os β -isomorfos (Molibdênio(Mo), Vanádio(V), Tungstênio(W), Nióbio(Nb), Tântalo(Ta))
- E os β -eutéctoides (Ferro(Fe), Crômio (Cr), Cobre(Cu), Níquel(Ni), Cobalto(Co), Manganésio(Mn))



Ligas de Titânio

- Os elementos que não provocam grandes alterações na temperatura de mudança de fase, chamados de elementos neutros;
- o Zircônio (Zr), Silício (Si), Estanho (Sn) e o Háfênio (Hf);

Sn-Ti



Ligas de Titânio

- **Ligas α e Ticp (Titânio comercialmente puro)** – que contêm elementos neutros e/ou estabilizadores α
- **Ligas quase- α (near α)** – que contêm uma pequena fração de fase β e alguns estabilizadores β como o Vanádio e o Molibdênio.
- **Ligas $\alpha+\beta$** – que contêm estabilizadores α e estabilizadores β em quantidades equivalentes.
- **Ligas β** – constituídas por grandes quantidades de estabilizadores β , fazendo diminuir bastante a sua temperatura de mudança de fase.

Ligas α , quase- α e Ticp

- Não precisam de tratamento térmico;
- Alta Soldabilidade;
- Resistência mecânica média/alta;
- Boa resistência à fluência a elevadas temperaturas;
- Boa ductilidade;



Ti Comercialmente Puro

- Fazem parte das ligas α ;
- Têm um grau de pureza de 99.0 a 99.5%;
- Ferro, Carbono, Oxigênio, Azoto e Hidrogênio;
- Resistência mecânica depende da quantidade de Oxigênio;

Ti Comercialmente Puro

- As ligas de grau 1 possuem **menor** concentração de Oxigênio e de Ferro, possuindo uma menor resistência mecânica mas uma elevada ductilidade e facilidade de trabalho a frio.
- As ligas de grau 2 têm as propriedades equilibradas de resistência mecânica e ductilidade
- As ligas de grau 3 têm uma maior resistência mecânica que as de grau 2 (devido uma maior concentração de Oxigênio e Azoto) mas uma menor ductilidade.
- As ligas de grau 4 são as ligas Ti6Al4V com maior resistência mecânica.

ASTM grade	Minimum tensile strength		0.2 % yield strength	
	MPa	ksi	MPa	ksi
Grade 1	240	35	170-310	25-45
Grade 2	345	50	275-450	40-65
Grade 3	440	64	380-550	55-80
Grade 4	550	80	480-655	70-95

Density. 4.51 g/cm³ (0.16 3 lb/in.³)

Ti Comercialmente Puro

- Fuselagens, industria naval, implantes cirurgicos ...

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.

Ligas α

- Alumínio e Oxigénio são os principais elementos que oferecem às ligas uma maior resistência mecânica;
- adição de pequenas quantidades de Estanho e Zircónio também aumenta a resistência mecânica;
- O Alumínio reduz a densidade da liga;
- Não podem conter mais de 6% de Alumínio
- A quantidade de estabilizadores α não pode passar 9% de alumínio equivalente
- *(Pode levar à fragilização da liga)*

$$\text{○ } \%Al \text{ equiv} = Al + \frac{1}{3} Sn + \frac{1}{6} Zr + 10(O+C+2N) \leq 9\%$$

Ligas α

- Resistência mecânica moderada (depende do Al e do O)
- Boa resistência à corrosão e boa resistência mecânica a temperaturas entre os 320° C e os 600° C
- Fácil soldabilidade
- (Ti – Al 5 % - Sn 2 , 5 %),

Ligas α

- Pás do compressor de motores a jacto, peças em chapa para motores de aeronaves, contentores de criogénio de elevadas pressões...

Chemical compositions and typical applications of α titanium alloys†

α Alloys	Condition	Typical applications
5% 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.

Ligas Quase- α

- São adicionadas pequenas quantidades de estabilizadores β que dão uma microestrutura de fase β dispersada na estrutura de fase α que melhora a eficiência da liga;
- Adiciona-se Estanho e Zircônio para reduzir a quantidade de alumínio e manter a mesma resistência mecânica;



Ligas Quase- α

- Maior resistência à fluência que as ligas α ;
- boa soldabilidade;
- boa resistência em ambientes salinos;
- alta tensão de cedência;
- elevada tenacidade e resistência á fluência a altas temperaturas;
- alta resistência e boa ductilidade à temperatura ambiente;



Ligas Quase- α

- As ligas ***Ti-8Al-1Mo-1V*** e ***Ti-6Al-2Sn-4Zr-Mo*** são as mais comuns em aplicações aeronáuticas como fuselagens, peças de motores,...

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.

Ligas $\alpha+\beta$

- Contêm estabilizadores α e β
- São adicionados estabilizadores β em quantidade o suficiente para permitir a retenção de quantidades consideráveis de microestruturas de fase β em temperatura ambiente.
- São tratadas termicamente para uma melhor resistência mecânica.
- Têm uma melhor resistência mecânica e melhor conformação plástica que as ligas α
- Menor tensão de cedência para altas temperaturas que as ligas α e quase α .
- Têm uma boa soldabilidade.

Ligas $\alpha+\beta$

- Motores de aeronaves (pás de compressores e turbinas, válvulas de pressão, cárteres de motores rocket)
- Fuselagens
- Tubos hidráulics de aeronaves...

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

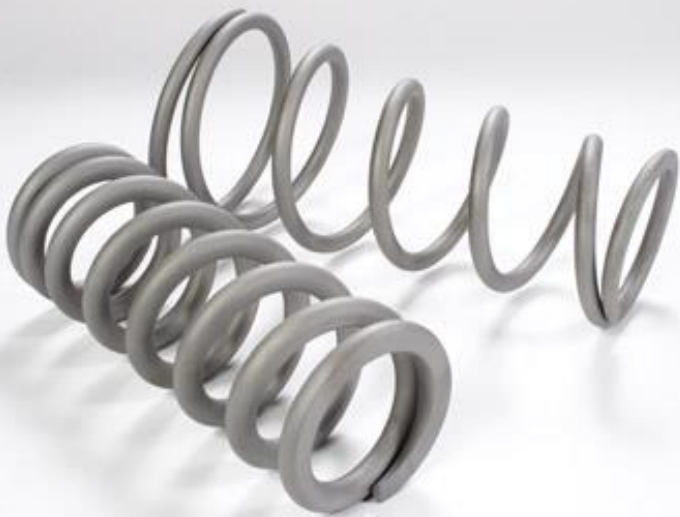
Alloy composition	Condition	Typical applications
6% Al, 4% V	Annealed; solution + age	Rocket motor cases; blades and disks for aircraft turbines and compressors; structural forgings and fasteners; pressure vessels; gas and chemical pumps; cryogenic parts; ordnance equipment; marine components; steam-turbine 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.

Ligas $\alpha+\beta$ e Ligas Quase- α

Alloy		Ultimate strength		Yield strength		Ductility	
		MPa	ksi	MPa	ksi	Elongation, %	Reduction in area, %
Ti-6Al-4V	$\alpha-\beta$	895	130	825	120	10	20
Ti-6Al-6V-2Sn	$\alpha-\beta$	1065	155	995	145	10	20
Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo	$\alpha-\beta$	1030	150	965	140	10	20
Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	Quase α	895	130	825	120	10	25
Ti-8Al-1Mo-1V	Quase α	895	130	825	120	10	20

Ligas β

- Quantidades suficientes de estabilizadores β são adicionados às ligas;
- uma estrutura constituída maioritariamente por fases β , pode ser obtida na temperatura ambiente através de resfriamento rápido;
- As ligas β são tratadas termicamente, obtendo uma elevada resistência mecânica



Ligas β

Vantagens

- elevada resistência mecânica
- elevada tenacidade
- fácil tratamento térmico
- elevada resistência á corrosão (algumas ligas)
- elevada resistência ao calor (algumas ligas)

Desvantagens

- elevada densidade
- baixa ductilidade
- fracas propriedades a baixas e altas temperaturas

Alloy	Tensile yield strength		Ultimate tensile strength		Elongation, %	Reduction in area, %	K_{IC}	
	MPa	ksi	MPa	ksi			MPa√m	ksi√in.
Beta C(a)	1090	158	1143	165.8	5.5	8.6	72.2	65.6
Beta 21S	1150	164	1057	151	8	...	101(b)	92(b)
Ti-15-3(c)	1520	220	...	16	59	53.6
Beta CEZ(d)	1200	174	1315	191	10	26	75	69
Ti-10-2-3 (high strength)(e)	1185	172	1250	181	8	18	52	47
Ti-10-2-3 (medium strength)(e)	1080	157	1160	168	16	44	73	66
Ti-10-2-3 (low strength)(e)	940	136	1020	148	22	61	102	93

Ligas β

- São mais utilizadas para implantes médicos
- Utilizadas em peças do trem de aterragem...

Alloy composition	Commercial name	Category (Mo equivalent)	T_{β} (°C)	Actual and potential applications
Ti-35V-15Cr Ti-40Mo Ti-30Mo	Alloy C	Beta (47) Beta (40) Beta (30)		Burn resistant alloy Corrosion resistance Corrosion resistance
Ti-6V-6Mo-5.7Fe-2.7Al	TIMETAL 125	Metastab (24)	704	High strength aircraft fasteners
Ti-13V-11Cr-3Al	B120 VCA	Metastab (23)	650	Airframe, landing gear, springs
Ti-1Al-8V-5Fe	1-8-5	Metastab (19)	825	Fasteners
Ti-12Mo-6Zr-2Fe	TMZF	Metastab (18)	743	Orthopedic implants
Ti-4.5Fe-6.8Mo-1.5Al	TIMETAL LCB	Metastab (18)	800	Low cost, high strength alloy
Ti-15V-3Cr-1Mo-.5Nb-3Al-3Sn-.5Zr	VT35	Metastab (16)		High strength airframe castings
Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr	Beta-C	Metastab (16)	795	Oil-fields, springs, fasteners
Ti-15Mo	IMI 205	Metastab (15)	727	Corrosion resistance
Ti-8V-8Mo-2Fe-3Al	8-8-2-3	Metastab (15)	775	High strength forgings
Ti-15Mo-2.6Nb-3Al-0.2Si	Beta 21S	Metastab (13)	807	Oxidation/corrosion resist, MMC
Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al	15-3	Metastab (12)	760	Sheet, plate airframe castings
Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn	Beta III	Metastab (12)	745	High strength
Ti-10V-2Fe-3Al	10-2-3	Metastab (9.5)	800	High strength forgings
Ti-5V-5Mo-1Cr-1Fe-5Al	VT22	Metastab (8)	850	High strength forgings
Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr	Ti-17	Beta-rich (5.4)	885	High strength, medium temperature
Ti-4.5Al-3V-2Mo-2Fe	SP700	Beta-rich (5.3)	900	High strength, SPF
Ti-5Al-2Sn-2Cr-4Mo-4Zr-1Fe	Beta CEZ	Beta-rich (5.1)	890	High strength, medium temperature
Ti-13Nb-13Zr		Beta-rich (3.6)		Orthopedic implants

Liga	Tipo	E(Gpa)	Tensão de Cedência (Mpa)	Resistência à Tracção (Mpa)	ϵ (%)
Grau 1	α	100	170-310	240	24
Grau 2	α	103	275-450	345	20
Grau 3	α	105	380-550	440	18
Grau 4	α	100-120	480-655	550	18
Ti-5Al-2,5Sn	α	109	827	861	15
Ti-3Al-2,5V	Quase α	95-105	480	620	15
Ti-6Al-2,75Sn-4Zr-0,4Mo-0,45Si	Quase α	112	900-950	1010-1050	10-16
Ti-6Al-4V	$\alpha+\beta$	110-140	800-1100	900-120	13-16
Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo	$\alpha+\beta$	114	1000-1100	1100-1200	13-16
Ti-6Al-6V-2Sn	$\alpha+\beta$	110-117	950-1050	1000-1100	10-19
Ti-35Nb-7Zr-5Ta	β	55	547	596	19
Ti-12Mo-6Zr-2Fe	β	74-85	100-1060	1060-1100	18-22

Conclusão

- As ligas de Titânio têm excelentes propriedades de resistência até elevadas temperaturas com uma baixa densidade e uma excelente bio compatibilidade mas o elevado custo de matéria prima e dos processos ainda limita o seu uso;
- É provavel existirem avanços no futuro na fabricação do titânio, desenvolvimento de novas ligas e redução de custo dos mesmos pois existe mais procura que produção.