

OUTROS METAIS E SUAS LIGAS

TM242 – Materiais de Engenharia

UFPR – Prof. Scheid

TITÂNIO

Introdução:

Titânio foi descoberto em 1789 por Ver William Gregor, que o identificou como um óxido de um metal ainda desconhecido. Em 1795, o químico Austríaco Klaproth designou este metal com o nome de titânio, depois dos titans. Em 1910, Hunter produziu pela primeira vez titânio com 99,5% de pureza.

A produção / obtenção de titânio metálico tornou-se eficiente a partir de Kroll que nos anos 30 desenvolveu um processo de redução do TiCl_4 (tetracloreto de titânio) a partir de sódio, cálcio e posteriormente pelo magnésio, sendo fundido por arco elétrico em atmosfera de gás inerte.

Apesar de reconhecido como metal a cerca de 200 anos, somente a 55 anos começou a ser produzido com aplicações industriais e escala, especialmente pelos Estados Unidos da América.

TITÂNIO

Introdução

Durante a segunda guerra mundial as propriedades e diversidade de ligas estudadas apontavam para grande interesse do metal e das suas ligas. A produção em escala industrial teve começo em 1956, nos estados unidos.

Um dos mais importantes elementos de liga do titânio é o alumínio e, logo nos anos 50, as ligas Ti-6Al-4V e Ti-5Al-2,5Sn foram desenvolvidas e são utilizadas até hoje.

A liga Ti-6Al-4V representa hoje cerca de 50% do mercado de ligas de titânio americano.

TITÂNIO

Propriedades

A elevada resistência à corrosão e a alta resistência específica (razão resistência / peso) justificam o rápido crescimento do mercado destas ligas.

Com densidade de $4,5\text{g/cm}^3$ ou $\sim 55\%$ da densidade do aço, as ligas são aplicadas na indústria aeroespacial, especialmente na fabricação de componentes altamente carregados mecanicamente que operam em temperaturas desde baixas até moderadas.

A resistência à corrosão é atribuída à formação de uma película estável, uniforme e protetora de dióxido de titânio. Esta propriedade faz das ligas de titânio adequadas à aplicações desde a indústria química até implantes cirúrgicos, uma vez que as ligas são biocompatíveis. *A resistência à corrosão é, na maior parte das vezes, superior aos aços inoxidáveis, excetuando-se nos ambientes que contenham íons fluoretos.*

Titânio é não magnético e apresenta boa capacidade de transferência de calor. O coeficiente de expansão térmica é menor que a dos aços e a metade do alumínio.

TITÂNIO

Propriedades

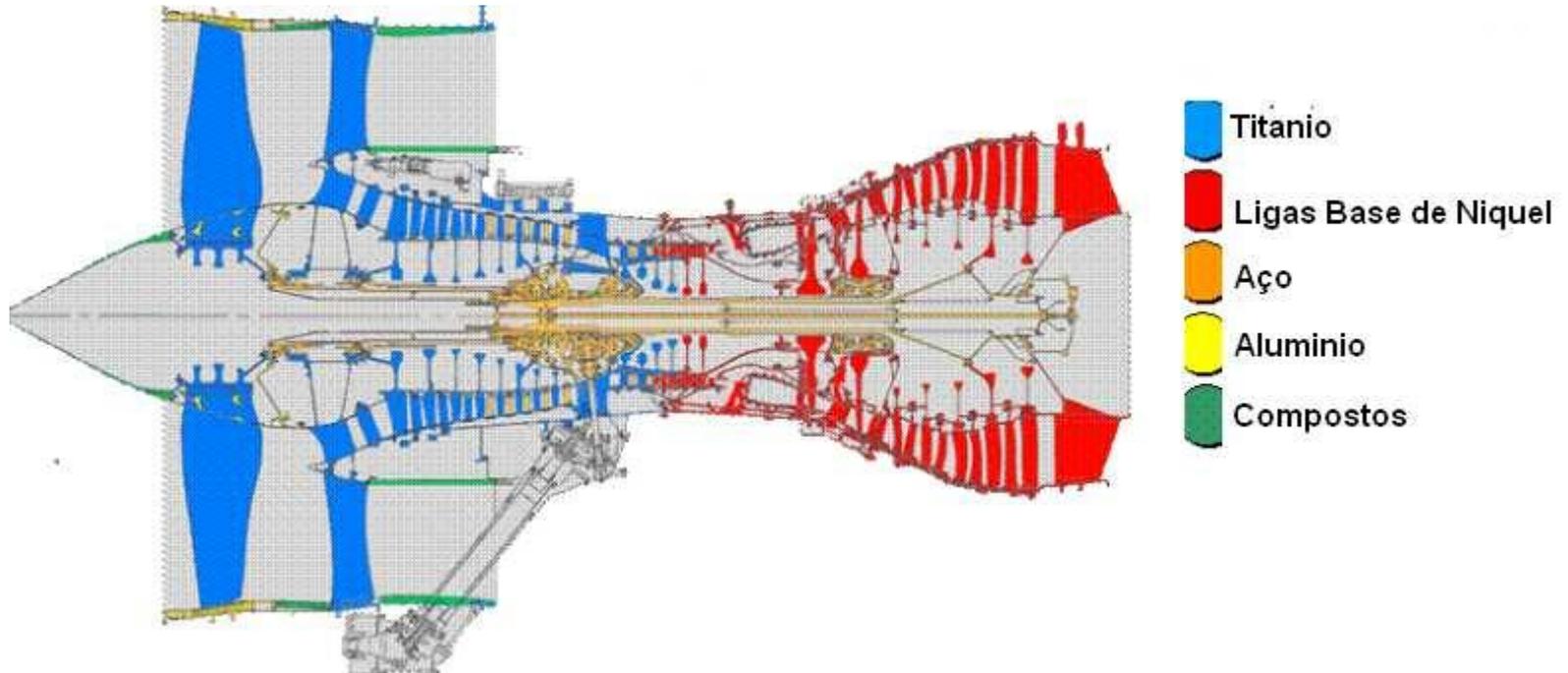
Número Atômico: 22

Peso atômico: 47,867

Temperatura de Fusão: 1668⁰C

Densidade: 4,5 g/cm³

Estrutura Cristalina: Hexagonal Compacto / Cúbico de Corpo Centrado



TITÂNIO

Propriedades

Titânio puro apresenta temperatura de fusão de 1668°C , baixa densidade ($4,5\text{g}/\text{cm}^3$) e excelente resistência à corrosão, que torna estas ligas importantes em diversas aplicações.

Por outro lado, a larga escala de aplicação industrial está limitada pelo elevado custo de fabricação, quando comparadas a outras ligas ferrosas e não ferrosas.

Titânio apresenta duas formas alotrópicas, que são:

- fase α (HC) abaixo de 870°C
- fase β (CCC) acima de 870°C

A transformação alotrópica afeta as propriedades, assim como a adição de elementos que afetam esta transformação. Elementos como oxigênio, carbono, nitrogênio e hidrogênio afetam significativamente as propriedades mecânicas.

TITÂNIO

Propriedades

Assim, existem ligas endurecidas por soluções sólidas e ligas endurecidas por transformações no estado sólido $\beta \rightarrow \alpha$.

Carbono e nitrogênio apresentam solubilidade limitada, sendo formadores de carbonetos e nitretos.

Hidrogênio, elemento de pequeno raio atômico, quando em solução sólida tem pouco efeito sobre as propriedades, entretanto, quando forma hidretos, reduz a ductilidade das ligas.

Oxigênio e nitrogênio tem forte efeito endurecedor. Estes elementos afetam a transformação $\beta \rightarrow \alpha$, levando à formação de estruturas de Widmanstätten (aciculares) que pode causar prejuízo às propriedades.

TITÂNIO

Propriedades

Ligas α

Para resfriamento lento desde o campo β e baixos teores de elementos de liga, obtém-se somente fase α . No caso de titânio puro, a transformação $\beta \rightarrow \alpha$ segue uma reação martensítica com transformação em uma única temperatura ($M_s = M_f$).

Estas ligas apresentam, em geral, alumínio e estanho como elementos de liga. Estes são elementos estabilizadores da fase α .

São ligas que apresentam maior resistência à fluência, sendo preferidas para aplicações em elevada temperatura.

Uma vez que as ligas α não são susceptíveis à transição dúctil-frágil, são adequadas à aplicações criogênicas.

São ligas dúcteis, tenazes, com boa resistência mecânica e de boa soldabilidade, entretanto a forjabilidade é inferior às ligas β .

TITÂNIO

Propriedades

Ligas $\alpha + \beta$

São ligas que podem ter a transformação $\beta \rightarrow \alpha$ suprimida a partir da adição de elementos de liga que fazem com que uma fração da fase β entre 10 e 50% permaneça em temperatura ambiente por resfriamento rápido. Neste caso, α é a fase rica em titânio e β em elementos de liga.

As ligas $\alpha + \beta$ desenvolvem maior resistência mecânica, comparativamente às anteriores.

Estas ligas apresentam boa conformabilidade.

TITÂNIO

Propriedades

Ligas β

A adição de elementos de liga como vanádio, nióbio, molibdênio, cromo e cobre, induz a separação de M_s e M_f e, dependendo do teor, M_s fica deslocada abaixo da temperatura ambiente, promovendo a formação das ligas β .

São ligas com excelente capacidade de forjamento e podem ser conformadas a frio também.

São ligas tratáveis termicamente, especialmente pelo processo de solubilização e envelhecimento.

TITÂNIO

Propriedades

Efeito dos Elementos de liga

Nas ligas de titânio, o principal efeito dos elementos de liga está relacionado à transformação α - β . Enquanto alguns elementos estabilizam a fase α elevando a temperatura de transição, outros estabilizam β promovendo o decréscimo da temperatura de transição.

A tabela apresenta os elementos de liga mais comuns.

Elemento	Wt%	Efeito na estrutura
Alumínio	2-7	Estabilizador α
Estanho	2-6	Estabilizador α
Vanádio	2-20	Estabilizador β
Molibdênio	2-20	Estabilizador β
Cromo	2-12	Estabilizador β
Cobre	2-6	Estabilizador β
Zircônio	2-8	Endurecedor α e β
Silício	0.05 to 1	Eleva Resist. Fluência

TITÂNIO

Propriedades

Estabilizadores da fase α

Alumínio é o primeiro elemento estabilizador da fase alfa. Outros estabilizadores são o estanho, carbono, nitrogênio, oxigênio, gálio e germânio.

Estabilizadores da fase β

Os elementos estabilizadores da fase beta estão divididos em dois grupos:

1- Grupo dos isomorfos: são elementos completamente miscíveis na fase beta e incluem o molibdênio, vanádio, tântalo e nióbio.

2- Grupo dos formadores de eutetóide: são elementos que promovem a decomposição eutetóide cerca de 335°C abaixo da transformação alotrópica do titânio puro. Entre eles estão o manganês, ferro, cromo, cobalto, níquel, cobre e silício.

TITÂNIO

Propriedades

Alumínio

Alumínio é o principal estabilizador alfa e aumenta a resistência à tração e à fluência, bem como o módulo elástico. O máximo efeito de endurecimento por solução sólida é obtido para teores relativamente baixos (6% em peso), uma vez que acima deste teor ocorre uma reação de ordenação formando o intermetálico Ti_3Al , associado à fragilização. Assim, na prática, não existem ligas com teor de Al maior que 7% em peso.

Estanho

Apresenta larga solubilidade nas fases alfa e beta, sendo usado extensamente para promover o endurecimento por solução sólida em conjunto com o alumínio, sem risco de fragilização da liga. É um estabilizador de alfa menos potente que o alumínio, mas retarda a velocidade de transformação. Pode substituir o alumínio na reação de ordenação ou formação do intermetálico do item anterior - $Ti_3(Al,Sn)$.

TITÂNIO

Propriedades

Zircônio

Zircônio é um fraco estabilizador da fase beta. Forma uma solução sólida contínua com o titânio e eleva a resistência à tração em temperaturas desde baixas até moderadas.

Molibdênio

É um importante estabilizador da fase beta e apresenta efeito de endurecimento e aumento da resistência em altas temperaturas para curto tempo de exposição.

Nióbio

Elemento estabilizador da fase beta e é adicionado para elevar a resistência à oxidação em temperaturas elevadas.

TITÂNIO

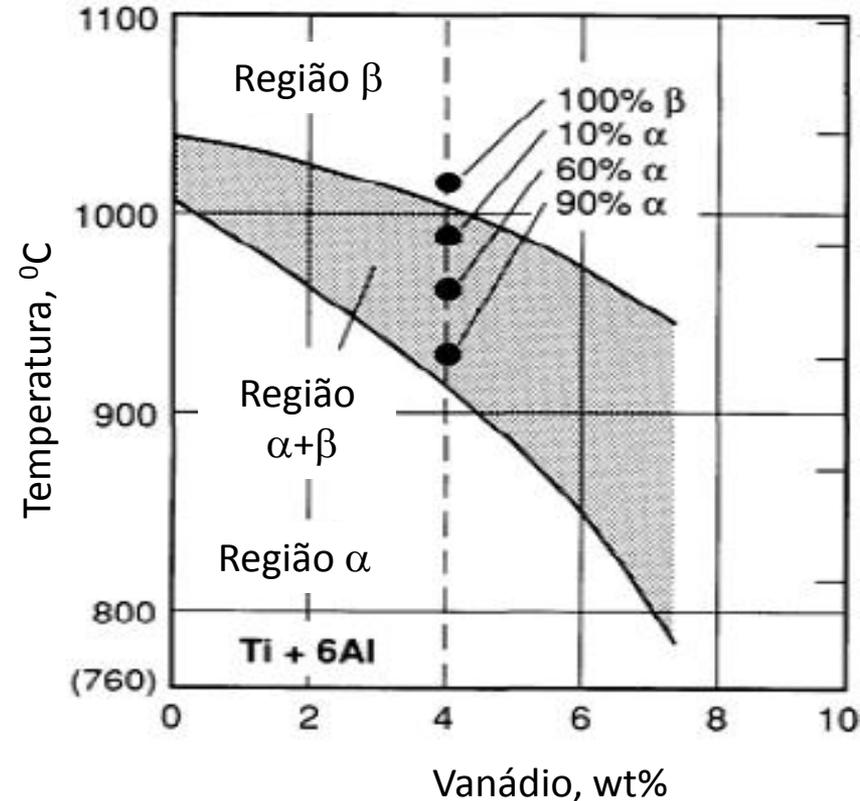
Propriedades

Ferro

Ferro é elemento estabilizador da fase beta e tende a reduzir a resistência à fluência. Quando as ligas forem selecionadas para elevadas temperaturas, deseja-se baixo teor de ferro.

Carbono

É um elemento estabilizador da fase alfa que alarga a faixa de transformação (campo alfa + beta).



TITÂNIO

Soldabilidade

Titânio apresenta forte afinidade com oxigênio e forma uma camada de óxido estável e tenaz já em temperatura ambiente para uma superfície limpa. Esta afinidade induz a uma passividade natural que confere elevada resistência à corrosão. Esta afinidade aumenta com a temperatura e tende a formar camadas mais espessas à medida que a temperatura é elevada.

Para temperaturas acima de 500°C, a resistência à oxidação é reduzida e as ligas estão sujeitas à fragilização pelo oxigênio, nitrogênio e hidrogênio que se dissolvem intersticialmente no titânio. **Assim, a fusão, solidificação e resfriamento no estado sólido a partir da soldagem devem ser conduzidos em atmosfera inerte ou em vácuo.**

Os processos mais usados para a união de titânio são:

- GTAW – Gas Tungsten Arc Welding
- GMAW – Gas-Metal Arc Welding
- PAW – Plasma Arc Welding
- LBW – Laser-Beam Welding
- EBW – Electron-Beam Welding

A proteção ocorrerá por fluxo de gás inerte ou em vácuo (no caso do EBW)

TITÂNIO

Soldabilidade

Titânio puro apresenta excelente soldabilidade quando comparado às ligas usadas na indústria aeroespacial (ligas α - β).

Titânio e suas ligas são geralmente soldados com composições de arame próximos ou iguais à composição nominal das ligas a serem unidas. Desta forma, as uniões soldadas apresentam resistência à corrosão similar à da liga usada.

Contaminações acima de 0,05 wt% de ferro causarão corrosão acelerada em ácido nítrico e outras soluções fortemente oxidantes. Assim, é impositivo evitar quaisquer contaminações com ferro. Escovas de aço para limpeza da junta ou interpasses deverão ser rigorosamente evitados.

Considerando a transformação α - β a 870°C, a zona afetada pelo calor apresentará grãos crescidos de fase β no aquecimento. Estes originarão uma estrutura acicular ou serrilhada de fase α no resfriamento até a temperatura ambiente.

TITÂNIO

Soldabilidade

Uma vez que titânio puro não é tratável termicamente, um recozimento entre 650⁰C e 750⁰C ou alívio de tensões entre 480 e 595⁰C são requeridos para manter as dimensões das peças após operações posteriores de usinagem e transformação.

DESIGNAÇÃO	Rm (mín.)		Re (mín.)		Impurezas wt% (máx.)					Composição Nominal wt%				
	MPA	KSI	MPA	KSI	N	C	H	Fe	O	Al	Sn	Zr	Mo	OTHERS
UNALLOYED GRADES														
ASTM GRADE 1	240	35	170	25	0.03	0.10	0.015	0.20	0.18	...	...	...	...	...
ASTM GRADE 2	340	50	280	40	0.03	0.10	0.015	0.30	0.25	...	...	...	...	...
ASTM GRADE 3	450	65	380	55	0.05	0.10	0.015	0.30	0.35	...	...	...	...	...
ASTM GRADE 4	550	80	480	70	0.05	0.10	0.015	0.50	0.40	...	...	...	...	...
ASTM GRADE 7	340	50	280	40	0.03	0.10	0.015	0.30	0.25	...	...	...	...	0.2 PD
ASTM GRADE 11	240	35	170	25	0.03	0.10	0.015	0.20	0.18	...	...	...	...	0.12-0.25 PD
ASTM GRADE 12	480	70	380	55	0.03	0.10	0.015	0.30	0.25	...	...	...	0.3	0.6-0.9 NI
ALPHA AND NEAR-ALPHA ALLOYS														
TI-0.3MO-0.8NI	480	70	380	55	0.03	0.10	0.015	0.30	0.25	...	...	...	0.3	0.8 NI
TI-5AL-2.5SN	790	115	760	110	0.05	0.08	0.02	0.50	0.20	5	2.5	...	...	...
TI-5AL-2.5SN-ELI	690	1130	620	90	0.07	0.08	0.0125	0.25	0.12	5	2.5	...	...	...
TI-8AL-1MO-1V	900	130	830	120	0.05	0.08	0.015	0.30	0.12	8	...	...	1	1 V
TI-6AL-2SN-4ZR-2MO	900	130	830	120	0.05	0.05	0.0125	0.25	0.15	6	2	4	2	...
TI-6AL-2NB-1TA-0.8MO	790	115	690	100	0.02	0.03	0.0125	0.12	0.10	6	...	...	1	2 NB, 1 TA
TI-2.25AL-11SN-5ZR-1MO	1000	145	900	130	0.04	0.04	0.008	0.12	0.17	2.25	11.0	5.0	1.0	0.2 SI
TI-5AL-5SN-2ZR-2MO ^(A)	900	130	830	120	0.03	0.05	0.0125	0.15	0.13	5	5	2	2	0.25 SI
ALPHA-BETA ALLOYS														
TI-6AL-4V ^(B)	900	130	83	120	0.05	0.10	0.0125	0.30	0.20	6.0	...	...	...	4.0 V
TI-6AL-4V-ELI ^(B)	830	120	760	110	0.05	0.08	0.0125	0.25	0.13	6.0	...	...	...	4.0 V
TI-6AL-6V-2SN ^(B)	1030	150	970	140	0.04	0.05	0.015	1.0	0.20	6.0	2.0	...	...	0.75 CU, 6.0 V
TI-8MN ^(B)	860	125	760	110	0.05	0.08	0.015	0.50	0.20	...	...	...	...	8.0 MN
TI-7AL-4MO ^(B)	1030	150	970	140	0.05	0.10	0.013	0.30	0.20	7.0	...	...	4.0	...
TI-6AL-2SN-4ZR-6MO ^(C)	1170	170	1100	160	0.04	0.04	0.0125	0.15	0.15	6.0	2.0	4.0	6.0	...
TI-5AL-2SN-2ZR-4MO-4CR ^{(A)(C)}	1125	163	1055	153	0.04	0.05	0.0125	0.30	0.13	5.0	2.0	2.0	4.0	4.0 CR
TI-6AL-2SN-2ZR-2MO-2CR ^{(A)(B)}	1030	150	970	140	0.03	0.05	0.0125	0.25	0.14	5.7	2.0	2.0	2.0	2.0 CR, 0.25 SI
TI-3AL-2.5V ^(D)	620	90	520	75	0.015	0.05	0.015	0.30	0.12	3.0	...	...	...	2.5 V
TI-1100	1000	145	900	130	...	...	...	0.02	0.07	6.0	2.75	4.0	0.4	0.45 SI

DESIGNAÇÃO	Rm (mín.)		Re (mín.)		Impurezas wt% (máx.)					Composição Nominal wt%				
	MPA	KSI	MPA	KSI	N	C	H	Fe	O	Al	Sn	Zr	Mo	OTHERS
TI-4.5AL-5MO-1.5CR (CORONA 5)	900	130	830	120	...	...	...	...	...	4.5	...	...	5.0	1.5 CR
METASTABLE BETA ALLOYS														
TI-10V-2FE-3AL ^{(A)(C)}	1170	170	1100	160	0.05	0.05	0.015	2.5	0.16	3.0	...	...	...	10.0 V
TI-13V-11CR-3AL ^(C)	1170	170	1100	160	0.05	0.05	0.025	0.35	0.17	3.0	...	...	...	11.0 CR, 13.0 V
TI-8MO-8V-2FE-3AL ^{(A)(C)}	1170	170	1100	160	0.05	0.05	0.015	2.5	0.17	3.0	...	...	8.0	8.0 V
TI-3AL-8V-6CR-4MO-4ZR ^{(A)(B)}	900	130	830	120	0.03	0.05	0.020	0.25	0.12	3.0	...	4.0	4.0	6.0 CR, 8.0 V
TI-11.5MO-6ZR-4.5SN (BETA III) ^(B)	690	100	620	90	0.05	0.10	0.020	0.35	0.18	...	4.5	6.0	11.5	...
TI-15V-3AL-3SN-3CR	790	115	775	115	0.03	0.03	0.015	0.30	0.13	3.0	3.0	...	...	15.0 V, 3.0 CR
TI-15MO-2.7NB-3AL-0.2SI (BETA 21S) ^(C)	1100	160	1030	150	...	...	...	...	...	3.0	...	...	15.0	2.7 NB, 0.2 SI

OUT

TITÂNIO

Principais Aplicações

Indústria Aeroespacial

- Componentes estruturais (airframes)
- Turbinas a jato

Indústria como resultado da sua resistência à corrosão

- Processos químicos (corpos de válvulas e bombas)
- Processamento de celulose e papel
- Aplicações marinhas
- Geração de energia

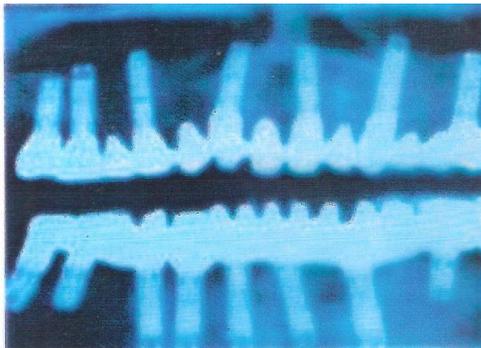
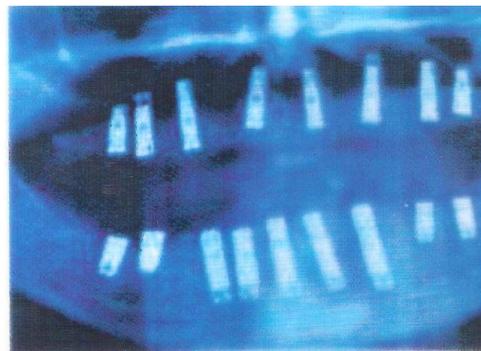
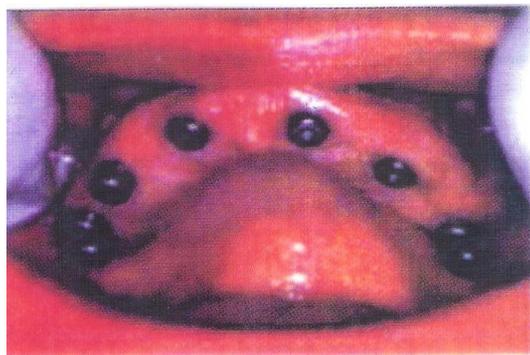


TITÂNIO

Principais Aplicações

Biomédica

- Próteses e implantes cirúrgicos



MAGNÉSIO

Introdução:

Magnésio é o sexto metal mais abundante da terra, apresentando-se em forma de compostos minerais como: magnesita (MgCO_3), carnalita ($\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) e também na forma de cloreto dissolvido na água do mar, sendo o mais leve dos metais estruturais.

A sua aplicação está baseada em três características principais:

- 1- Facilidade de formação de compostos intermetálicos com outros metais, permitindo o seu uso como elemento de liga nas ligas de alumínio;
- 2- Alta reatividade química, o que lhe proporciona excelentes características de reagente em reações físico-químicas metalúrgicas (dessulfuração de aços, inoculação em ferros fundidos)
- 3- Baixa densidade, podendo ser usado em peças estruturais com sensível diminuição de peso ($\rho = 1,738 \text{ g/cm}^3$ a 20°C).

MAGNÉSIO

Obtenção:

Processo Eletrolítico:

Processo de obtenção que advém do Mg(OH)_2 da água do mar enriquecido com outros minerais de elementos calcinados.

Estes compostos são misturados com ácido clorídrico (HCl), originando MgCl_2 . Este composto é adicionado às células eletrolíticas que liberam gás cloro e obtém-se magnésio metálico.

Processo Silicotérmico:

Neste processo o magnésio metálico é obtido em fornos de redução através da adição de ferro-silício como redutor dos óxidos de magnésio em temperaturas acima de 1100°C em atmosfera de vácuo, de onde se obtém vapor de magnésio, sendo então condensado. Os cristais condensados são refundidos e refinados.

MAGNÉSIO

Propriedades:

Número Atômico: 12

Peso atômico: 24,310

Temperatura de Fusão: 650°C

Densidade: 1,738 g/cm³

Estrutura Cristalina: Hexagonal Compacto

Magnésio puro tem aplicação limitada e a resistência à corrosão é influenciada pela adição de metais mais pesados como ferro, níquel e cobre.

A resistência à tração é baixa sendo, porém, compensada pela boa razão resistência / peso.

O tratamento térmico de solubilização e envelhecimento pode elevar a resistência pela formação de intermetálicos Mg-Al.

MAGNÉSIO

Propriedades Mecânicas:

	DESIGNAÇÃO LIGAS E TÊMPERAS	LIMITE DE ESCOAMENTO (MPa)	LIMITE DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa)	ALONGAMENTO EM 50 mm (%)	DUREZA RB (500 kgf, 10 mm)
LIGAS FUNDIDAS	AZ91C-T6	195	275	6	66
	EZ33A-T5	110	160	2	50
	HK31A-T6	105	220	8	55
	ZK61A-T5	185	310	-	68
	AM60A-F	115	205	6	-
	AZ91A-F	150	230	3	63
LIGAS DÚTEIS	AZ10A-F	145	240	10	-
	HM31A-F	230	290	10	-
	ZK12A-F	195	260	4	-
	AZ31B-H24	220	290	15	73
	HK31A-H24	200	255	9	68
	ZK60A-T5	305	365	11	88

MAGNÉSIO

Classificação e Designação (ASTM):

Magnésio e suas ligas são classificados em duas categorias:

Ligas trabalhadas

As ligas trabalhadas podem ser encontradas na forma de barras e perfis, forjados, laminados e trefilados.

Ligas fundidas

As ligas fundidas podem ser encontradas em lingotes e destinam-se à fabricação de peças fundidas em areia ou moldes permanentes (coquilhas).

O **sistema de designação** segue os caracteres alfanuméricos:

- As duas primeiras letras referem-se na ordem decrescente de teor, aos dois principais elementos de liga.
- Os dois números à seguir representam, na mesma ordem, o teor nominal desses elementos.
- A letra colocada após os números indica possíveis variações na liga básica, enquanto o último dígito após o traço indica a têmpera.

MAGNÉSIO

Classificação e Designação (ASTM):

Elementos de liga e sistemas de designação de têmpera

SÍMBOLOS DOS ELEMENTOS DA LIGA:

A = alumínio

K = zircônio

S = silício

E = terras raras

M = manganês

T = estanho

H = tório

O = prata

Z = zinco

SÍMBOLOS DAS TÊMPERAS:

F = como fabricado

O = recozido

H10 a H11 = levemente encruado

H23, H24, H26 = encruado e parcialmente recozido

T4 = solubilizada

T5 = envelhecida artificialmente

T6 = solubilizada e envelhecida artificialmente

T8 = solubilizada, trabalhada a frio (encruada) e envelhecida artificialmente

MAGNÉSIO

Classificação e Designação (ASTM):

Principais sistemas de liga

Os sistemas de ligas mais comuns para a fundição são:

- ligas magnésio-alumínio-manganês, com ou sem silício ou zinco;
- ligas magnésio-zircônio;
- ligas magnésio-zinco-zircônio, com ou sem terras raras;
- ligas magnésio-tório-zircônio, com ou sem zinco;
- ligas magnésio-prata-zircônio, com terras raras ou tório.

Os sistemas de ligas trabalhadas mais aplicadas são:

- ligas magnésio-alumínio-zinco;
- ligas magnésio-manganês;
- ligas magnésio-zinco-manganês;
- ligas magnésio-zinco-zircônio;
- ligas magnésio-tório-manganês;
- ligas magnésio-tório-zircônio.

MAGNÉSIO

Classificação e Designação (ASTM):

Ligas comuns

DESIGNAÇÃO DAS LIGAS		ELEMENTOS DE LIGA (%)						
		Mg	Al	Mn	Th	Zn	Zr	Terras raras
LIGAS FUNDIDAS	AZ91C	rest.	8,7	0,13	-	0,7	-	-
	EZ33A	rest.	-	-	-	2,7	0,6	3,3
	HR31A	rest.	-	-	3,3	-	0,7	-
	ZK61A	rest.	-	-	-	6,0	0,7	-
	AM60A	rest.	6,0	0,13	-	-	-	-
	AZ91A	rest.	9,0	0,13	-	0,7	-	-
LIGAS DÚTEIS	AZ10A	rest.	1,2	0,2	-	0,4	-	-
	HM31A	rest.	-	1,2	3,0	-	-	-
	ZK21A	rest.	-	-	-	2,3	0,45	-
	AZ31B	rest.	3,0	-	-	1,0	-	-
	HK31A	rest.	-	-	3,0	-	0,6	-
	ZK60A	rest.	-	-	-	5,5	0,45	-

MAGNÉSIO

Soldabilidade:

A soldabilidade das ligas de magnésio está baseada na susceptibilidade ao trincamento e também a eficiência de formação de uma união uniforme.

A tabela apresenta uma lista, onde a soldabilidade é:

A: excelente, B: boa, C: ruim, D: soldabilidade limitada

- Adições de até 10% de **alumínio** aumenta a soldabilidade pois refina a estrutura.
- **Zinco** em teor acima de 1% em peso induz a formação de trinca a quente. Assim são as piores ligas em termos de soldabilidade.
- Ligas contendo **Tório** são as que apresentam soldabilidade A ou B, ou seja, o melhor desempenho.

A seleção do arame é governada pela composição da liga a ser unida. Em geral, arames com adições de alumínio são preferidas, a fim de evitar o trincamento das uniões.

ALLOY	RATING
CASTING ALLOYS	
AM100A	B+
AZ63A	C
AZ81A	B+
AZ91C	B+
AZ92A	B
EK30A	B
EK41A	B
EQ21	B
EZ33A	A
HK31A	B+
HZ32A	B
K1A	A
QE22A	B
ZE41A	B
QH21A	B
WE43	B-
WE54	B-
ZC63	B-
ZH62A	C-
ZK51A	D
ZK61A	D
WROUGHT ALLOYS	
AZCOML	A
AZ10A	A
AZ31B,C	A
AZ80A	B
HK31A	A
HM21A	A
HM31A	A
ZE10A	A
ZK21A	B

MAGNÉSIO



Aplicações:

- Motor VW refrigerado a ar e seus componentes
- Carcaças de caixa de câmbio
- Rodas Gaúchas (décadas de 60 e 70)
- Armadura de volante
- Chassi do painel de instrumentos
- Suporte da coluna de direção



TÂNTALO



Introdução:

Tântalo é um metal da família dos metais refratários, que são produzidos por metalurgia do pó e consolidados por sinterização ou fusão. Nesta família estão incluídos ainda: nióbio, molibdênio, tungstênio e rênio.

Excetuando-se o irídio e o ósmio, os metais refratários apresentam temperatura de fusão superior a 2000^oC e as menores pressões de vapor dentre todos os metais.

Os metais refratários apresentam rápida degradação em ambientes oxidantes, o que tem limitado o seu uso em diversas aplicações. O nióbio vem sendo estudado para sistemas de ligas de revestimento a fim de elevar a resistência à oxidação na indústria aeroespacial.

Durante muito tempo, a aplicação dos metais refratários ficou limitada a filamentos de lâmpadas, resistências de aquecimento e contatos elétricos. Entretanto, estes metais encontraram uma larga faixa de aplicações, que incluem as áreas aeroespacial, eletrônica, nuclear e processos industriais químicos.

TÂNTALO

Obtenção:

Tântalo é obtido a partir da extração do minério, composto normalmente por óxidos como: $((\text{Fe},\text{Mn})(\text{Ta}, \text{Nb}))_2\text{O}_6$ ou ainda associado à escória da obtenção do estanho, principalmente em jazidas na Tailândia e Malásia.

A separação do tântalo destes compostos é realizada pela precipitação de $\text{Ta}(\text{OH})_5$, que é então calcinado ao pentóxido ou ainda pela cristalização com fluoreto de potássio (K_2TaF_7). Este último é o processo mais usado para a obtenção de pó de tântalo metálico. Este é então fundido por feixe de elétrons, refinado e transformado em lingotes.

Com exceção do rênio, os metais refratários vem sendo produzidos em quantidades de, no mínimo, 900 t/ano considerando a produção mundial.

Pode ser fornecido em pó, barras, lingotes, arames, placas e tubos.

TÂNTALO

Propriedades:

Número Atômico: 73

Peso atômico: 180,95

Temperatura de Fusão: 2996⁰C

Densidade: 16,6 g/cm³

Estrutura Cristalina: Cúbica de Corpo Centrado

Módulo de Elasticidade: 185 GPa

Tântalo oferece uma combinação de propriedades não encontrada em outros metais refratários. A elevada temperatura de fusão (2996⁰C), tolerância a elementos intersticiais e razoável módulo de elasticidade faz com que este elemento seja atrativo para uso como elemento principal em ligas.

Tântalo apresenta boa ductilidade (>20% em temperatura ambiente), é **prontamente soldável**, apresenta baixa temperatura de transição dúctil-frágil (-250⁰C) e apresenta solubilidade boa a outros elementos, refratários ou não.

TÂNTALO

Propriedades:

Tântalo apresenta excelente resistência à corrosão em diversos ácidos, soluções aquosas contendo sais, compostos orgânicos ou ainda combinações destes agentes corrosivos. Apresenta ainda boa resistência à corrosão em diversos gases e metais líquidos. É resistente à corrosão em fluidos do corpo humano, sendo aplicado em dispositivos de próteses.

Abaixo de 150⁰C, os meios que podem afetar o tântalo são aqueles que contém fluoretos, ácido clorídrico, ácido sulfúrico e soluções fortemente alcalinas e certos sais fundidos.

A resistência à corrosão do tântalo é a mesma dos vidros, entretanto, suporta maiores temperaturas e oferece as vantagens da facilidade de processamento dos metais.

A excepcional resistência à corrosão é atribuída à formação de um filme de óxidos impermeável e tenaz, quando exposto à condições atmosféricas.

TÂNTALO

Propriedades Mecânicas:

Tântalo apresenta propriedades mecânicas superiores ao nióbio e inferiores ao molibdênio e tungstênio. A resistência à fluência e o limite de escoamento em alta temperatura podem ser melhorados pela dispersão de segunda fase obtida pela adição de carbono.

LIGA	%C	Re (MPa)	Tensão para 1% de fluência a 1316°C após 10000h
Ta-10W	---	120	5
T-111	---	190	4
T-222	0,01	260	20
Astar-811C	0,025	215	60
Astar-1211C	0,025	267	90
Astar-1511C	0,025	288	96

TÂNTALO

Elementos de liga:

Tântalo apresenta solubilidade total para tungstênio, nióbio e molibdênio e solubilidade bastante extensa para o Háfnio, Zircônio, rênio e vanádio.

A larga solubilidade permite a escolha dentre diversos elementos, todos promovendo efeito de endurecimento por solução sólida substitucional ao metal à base de tântalo.

Adições de 2,5 wt% tungstênio ao tântalo puro eleva a resistência mecânica em temperatura ambiente em 25% e dobra a resistência mecânica a 200°C.

Adições de 10 wt% tungstênio ao tântalo promovem a elevação da resistência e do módulo de elasticidade, permitindo o seu uso na indústria aeroespacial até temperatura de 2480°C.

TÂNTALO

Classificação (principais ligas):

LIGA	Adições Nominais, wt%
Tantaloy 63	2,5W, 0,15Nb
FS-61	7,5W
Ta-10W	10W
T-111	8W, 2Hf
T-222	10W, 2,5Hf, 0,01C
Astar-811C	8W, 1Re, 1Hf, 0,025C
Astar-1211C	12W, 1Re, 1Hf, 0,025C
Astar-1511C	15W, 1Re, 1Hf, 0,025C
KBI 40	40Nb
WC-640	40 Nb, 0,5W
Ta-Mo	Mo na faixa de 10 – 50%

TÂNTALO

Resistência à Oxidação:

Não pode ser usado por longo tempo em temperatura acima de 260°C em atmosfera oxidante, a não ser pela adoção de atmosfera inerte ou vácuo.

Para os casos em que não for possível a adoção de vácuo ou atmosfera inerte, poderá ser preparada uma liga com adição de elementos que auxiliem a formação de óxidos estáveis superficialmente ou ainda pela adoção de revestimentos protetores.

Corrosão em metais líquidos:

Tântalo e algumas das suas ligas apresentam boa resistência à corrosão quando imersos em metais líquidos até cerca de 1100°C , especialmente na ausência de oxigênio.

TÂNTALO

Resistência à Corrosão

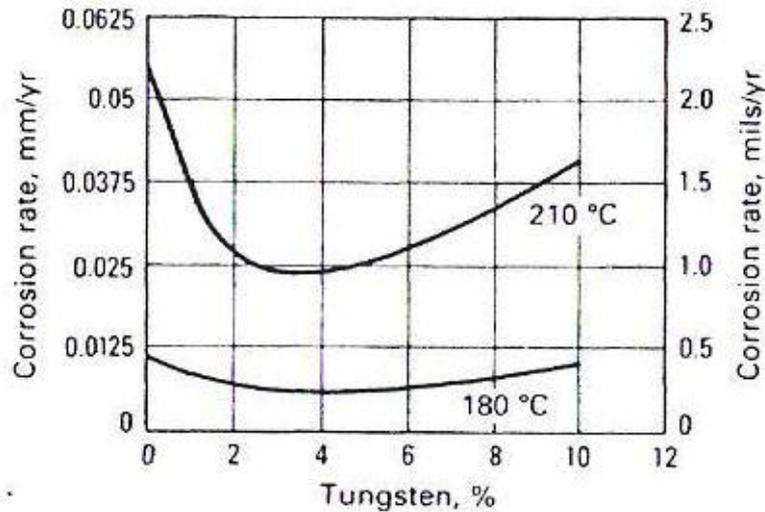
Taxas de corrosão para tântalo exposto a H_2SO_4 concentrado entre 175 e 200°C.

Material	Metallurgical condition	Temperature		Exposure, days	Corrosion rate	
		°C	°F		mm/yr	mils/yr
Ta, electron beam melted	Recrystallized	175	345	60	0.005	0.189
Ta, P/M	Recrystallized	175	345	60	0.0055	0.217
Tantaloy 63	Recrystallized	175	345	60	0.0058	0.229
Tantaloy 63	As-rolled	181	360	7	0.0026	0.104
Tantaloy 63	Stress-relieved	181	360	7	0.0022	0.087
Tantaloy 63	Recrystallized	181	360	7	0.0022	0.087
Ta, electron beam melted	As-rolled	199	390	3	0.018	0.72
Ta, electron beam melted	Recrystallized	199	390	3	0.024	0.96
Tantaloy 63	As-rolled	199	390	3	0.0048	0.19
Tantaloy 63	Stress-relieved	199	390	3	0.0043	0.17
Tantaloy 63	Recrystallized	199	390	3	0.0045	0.18
Ta, electron beam melted	Recrystallized	200	392	32	0.057	2.24
Ta, (P/M)	Recrystallized	200	392	32	0.058	2.27
Tantaloy 63	Recrystallized	200	392	32	0.029	1.15
Tantaloy 63	Recrystallized	200	392	13	0.03	1.24
Ta-5W	Recrystallized	200	392	13	0.034	1.34
Ta-10W	Recrystallized	200	392	13	0.05	1.98

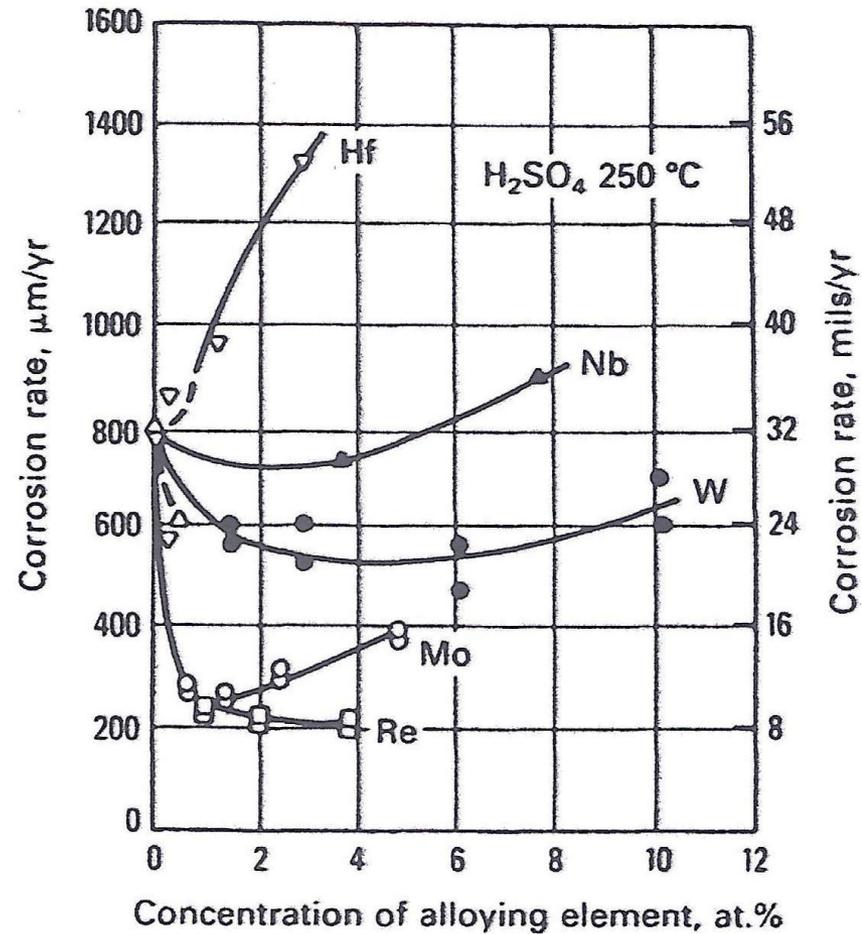
TÂNTALO

Resistência à Corrosão

H₂SO₄ concentrado a 180°C e 210°C.



H₂SO₄ conc. 95% a 250°C.



TÂNTALO

Soldabilidade:

Tântalo apresenta soldabilidade similar à do titânio. Reage prontamente com o oxigênio, formando óxidos estáveis. Apresentam elevada solubilidade para oxigênio, nitrogênio e hidrogênio em elevadas temperaturas.

Pequenas quantidades de oxigênio e nitrogênio promovem endurecimento do tântalo e suas ligas, enquanto o hidrogênio reduz a tenacidade e eleva a sensibilidade ao entalhe.

Por estas razões, as ligas de tântalo deverão ser soldadas ou brasadas em atmosfera inerte ou em vácuo.

TÂNTALO



Aplicações:

- Elementos de aquecimento e resfriamento, por sua condutividade térmica superior à dos aços e ligas de níquel, além da resistência à corrosão e resistência ao calor.
- Indústria química (trocadores de calor, condensadores, serpentinas).
- Válvulas, diafragmas, tubulações que operam imersas em diversos meios.
- Chapas finas para *clad* juntamente com aço, alumínio e cobre, obtidos por explosão.
- Placas defletoras de calor em fornos
- Placas de blindagem de portas corta fogo (densidade alta e boa ductilidade)

ZIRCÔNIO

Introdução:

Zircônio foi descoberto por Klaproth em 1789, entretanto, somente foi isolado com metal em 1824 por Berzelius que preparou um pó metálico de zircônio.

Em 1925, VanArkel e Deboer purificaram o metal a partir da decomposição do iodeto de zircônio. Em 1947, Kroll desenvolveu um processo de redução do tetracloreto de zircônio a partir do uso do magnésio.

Zircônio tem excelente resistência à diversos meios corrosivos, incluindo água superaquecida e é transparente a nêutrons térmicos, sendo prontamente adotado para a fabricação de reatores nucleares refrigerados a água como encapsulamento de urânio.

ZIRCÔNIO

Obtenção:

Zircônio é obtido a partir da areia pesada de praia, associado a háfnio e apresenta-se como silicato $(\text{Zr-Hf})\text{SiO}_4$, geralmente com razão zircônio-háfnio de 50:1.

A obtenção do zircônio metálico é um processo complexo. Neste, o minério é misturado ao carbono em forma de coque. Esta mistura é então cloretada, produzindo um gás em elevada temperatura que contém tetracloreto de silício, zircônio e háfnio. O tetracloreto de zircônio e háfnio é então separado por condensação seletiva, sendo o tetracloreto de silício vendido como subproduto.

Para a produção de ligas industriais, o tetracloreto de zircônio é então sublimado e reduzido com a adição de magnésio. Para aplicações nucleares, o zircônio deverá ser separado do háfnio. Este processo é realizado por separação líquido-líquido ou destilação.

ZIRCÔNIO

Propriedades:

Número Atômico: 40

Peso Atômico: 91,224

Temperatura de Fusão: 1855°C

Densidade: 6,5 g/cm³

Estrutura Cristalina: Hexagonal

Módulo de Elasticidade: 88 GPa

Zircônio é um metal estrutural resistente à corrosão que apresenta diversas propriedades físicas e mecânicas similares aos aços inoxidáveis austeníticos e às ligas de titânio. É mais leve que o aço com uma dureza similar ao cobre. No estado metálico, oxida espontaneamente em contato com a atmosfera. Ao ar, reage antes com o nitrogênio e depois com o oxigênio, especialmente a altas temperaturas. É um metal resistente a ácidos, porém dissolve-se em ácido fluorídrico (HF), formando complexos com os fluoretos.



ZIRCÔNIO

Especificações:

Existem algumas composições para o zircônio e ligas de zircônio, conforme ASTM B-550-92.

ELEMENT	COMPOSITION, WT%		
	R60702	R60704	R60705
ZIRCONIUM + HAFNIUM, MIN	99.2	97.5	95.5
HAFNIUM, MAX	4.5	4.5	4.5
IRON + CHROMIUM	0.2 MAX	0.2-0.4	0.2 MAX
TIN	...	1.0-2.0	...
HYDROGEN, MAX	0.005	0.005	0.005
NITROGEN, MAX	0.025	0.025	0.025
CARBON, MAX	0.05	0.05	0.05
NIوبيUM	...	...	2.0-3.0
OXYGEN, MAX	0.16	0.18	0.18

ZIRCÔNIO

Especificações:

Existem algumas composições para o zircônio e ligas de zircônio para a indústria nuclear, ASTM B-351-92.

ELEMENT	COMPOSITION WT%		
	R60802 (ZIRCALOY-2)	R60804 (ZIRCALOY-4)	R60901 (ZR-2.5NB)
TIN	1.20-1.70	1.20-1.70	...
IRON	0.07-0.20	0.18-0.24	...
CHROMIUM	0.05-0.15	0.07-0.13	...
NICKEL	0.03-0.08	...	...
NIOBIUM	...	...	2.40-2.80
OXYGEN	...	...	0.09-0.13
IRON + CHROMIUM + NICKEL	0.28-0.38	...	...
IRON + CHROMIUM	...	0.28-0.37	...
HAFNIUM	0.010	0.010	0.010
ZIRCONIUM	BAL	BAL	BAL

ZIRCÔNIO

Soldabilidade:

Zircônio apresenta soldabilidade similar à do titânio. Reage prontamente com o oxigênio, formando óxidos estáveis. Apresentam elevada solubilidade para oxigênio, nitrogênio e hidrogênio em elevadas temperaturas.

Uma vez que apresenta baixo módulo de elasticidade, o zircônio desenvolve baixo nível de tensões residuais. Devido ao baixo coeficiente de expansão térmica, o grau de distorção das uniões soldadas é minimizado.

Normalmente não há problemas com inclusões de óxidos na soldagem, uma vez que o óxido de zircônio é solúvel no metal. Não deve ter contato com metais reativos, evitando assim a formação de intermetálicos frágeis que prejudicam as propriedades das uniões soldadas.

ZIRCÔNIO

Soldabilidade:

Abaixo estão relacionados os processos normalmente usados na soldagem de zircônio. O mais largamente adotado é o GTAW.

- GAS-TUNGSTEN ARC WELDING (GTAW)
- GAS-METAL ARC WELDING (GMAW)
- PLASMA ARC WELDING (PAW)
- ELECTRON-BEAM WELDING (EBW)
- LASER-BEAM WELDING (LBW)
- FRICTION WELDING (FRW)
- RESISTANCE WELDING (RW)
- RESISTANCE SPOT WELDING (RSW)
- RESISTANCE SEAM WELDING (RSEW)

ZIRCÔNIO

Aplicações:

- É utilizado principalmente (em torno de 90% do consumo) como revestimento (encapsulamento) de urânio em reatores nucleares, devido a sua secção de capturas de nêutrons ser muito baixa.
- Se utiliza como aditivo em aços obtendo-se materiais muito resistentes. Também é empregado em ligas com o níquel na indústria química devido a sua resistência a certas substâncias corrosivas.
- Devido à sua resistência à corrosão é usado como substituto do Cromo Hexavalente nas linhas de tratamento de superfície de alumínio.