

# AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA LIGA Ti-13Nb-13Zr À TEMPERATURAS CRIOGÊNICAS

**Sandra Giacomini Schneider**

**Carlos Angelo Nunes**

**Sergio Schneider**

Faculdade de Engenharia Química de Lorena, Departamento de Engenharia de Materiais,  
Caixa Postal 116, 12600-000, Lorena, SP, Brasil, E-mail: [sandra@dta.fauenquil.br](mailto:sandra@dta.fauenquil.br)

## Resumo

A liga Ti-13Nb-13Zr foi produzida via fusão a arco sob atmosfera de argônio a partir de chapas de Ti, Nb e Zr de alta pureza. A liga produzida foi submetida a uma seqüência de tratamentos térmicos (1000°C por 1h + resfriamento em água) e forjamento rotativo a frio impondo redução de área de 60%. Nesse trabalho serão avaliadas as propriedades mecânicas dessa liga nas temperaturas do nitrogênio líquido (77 K) e ambiente através de ensaio de tração uniaxial. O objetivo principal é determinar as seguintes propriedades mecânicas: limite de resistência, limite de escoamento, módulo de elasticidade e alongamento na ruptura. Essas propriedades são, normalmente, fortemente dependentes da temperatura, onde materiais que exibem boa resistência mecânica aliada à tenacidade constituem grande vantagem para aplicação como material estrutural em baixas temperaturas. Os aspectos mecânicos podem definir a viabilidade quanto a possibilidade de sua aplicação em ambientes criogênicos onde podemos citar: componentes e acessórios de criostatos, suportes de magnetos supercondutores, dentre outros.

**Palavras-chaves:** Propriedades mecânicas, liga de titânio, temperaturas criogênicas.

## INTRODUÇÃO

Devido à possibilidade de uma combinação favorável entre propriedades mecânicas e físicas, o titânio e suas ligas vêm sendo muito utilizados nas mais variadas áreas: indústria aeronáutica e aeroespacial, indústria naval, em aplicações criogênicas diversas e até mesmo como material para implante cirúrgico. O uso do titânio e suas ligas para aplicações como material cirúrgico começou a ser difundido no início da década de 70 (Wang, 1996).

Além da alta razão resistência por densidade, as ligas de titânio apresentam características de serem não magnéticas. Possuem maior resistividade elétrica e menor condutividade térmica que o aço inox austenítico. Geralmente, todas essas propriedades são favoráveis em aplicações como material estrutural em ambientes criogênicos. Dentre as ligas de titânio as que mais se destacam para essas condições são Ti-6Al-4V e Ti-5Al-2,5Sn (Donachie Jr, 1988; Nagai et al, 1985; Nagai et al, 1991, Priddey, 1985).

As ligas de Ti podem ser classificadas como  $\alpha$ , próximo- $\alpha$ ,  $\alpha+\beta$ , e  $\beta$  (estável e metaestável) dependendo da microestrutura na temperatura ambiente.

As características mecânicas encontram-se relacionadas à microestrutura da liga, a Ti-5Al-2,5Sn é uma liga do tipo  $\alpha$  enquanto que a Ti-6Al-4V é do tipo  $\alpha+\beta$ , sendo que essa apresenta tanto o limite de escoamento quanto o limite de resistência superiores àquela. As

ligas Ti- $\beta$  além de apresentarem alta resistência, boa plasticidade, alta temperabilidade, podem combinar baixo módulo de elasticidade com alta resistência a corrosão. Dentre elas destaca-se a Ti-13Nb-13Zr liga inicialmente desenvolvida visando a aplicação cirúrgica.

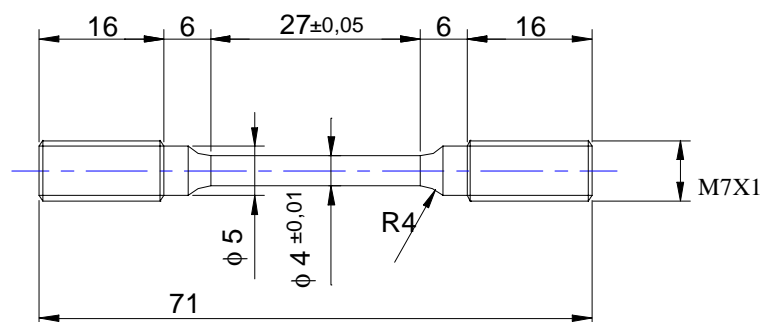
As propriedades supercondutoras de ligas do sistema Ti-Nb-Zr foram estudadas inicialmente por Alekseyevskiy N. Ye., Ivanov O.S., Rayevskiy I. I. and Stepanov M. V. abordando principalmente a influência dos componentes Ti e Zr na densidade de corrente crítica  $J_c$  ( Alekseyevskiy et al, 1967).

As pesquisas sobre a liga Ti-13Nb-13Zr mostram que suas propriedades podem ser controladas através de deformação a quente, tratamentos térmicos e deformação a frio. O seu módulo de elasticidade a temperatura ambiente, por exemplo, pode variar entre 41 e 83 GPa e valores de resistência tão altos quanto 1330 MPa podem ser obtidos ( Schneider et al, 1999). Considerando a potencialidade da liga Ti-13Nb-13Zr, devido às suas características, a temperatura ambiente e possuindo os requisitos necessários e favoráveis a uma maior investigação quanto a sua aplicação em ambientes criogênicos, este trabalho tem por objetivo avaliar as propriedades mecânicas, através de ensaios de tração, tanto a temperatura ambiente quanto a baixa temperatura (77 K). Estes resultados serão usados como parâmetros preliminares na caracterização dessa liga para essas condições específicas.

## MATERIAIS E MÉTODOS

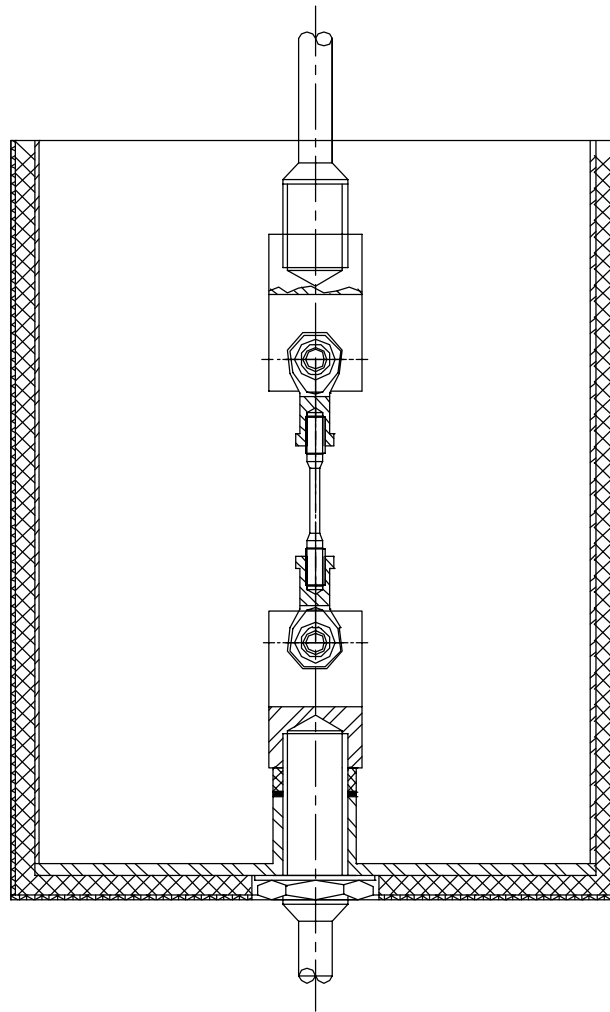
A liga Ti-13Nb-13Zr foi produzida em forno a arco com eletrodo não consumível em atmosfera de argônio. Como material de partida foram utilizadas chapas de Ti, Nb e Zr de alta pureza. As chapas, de espessura 2-3 mm, foram cortadas, decapadas (HF e HNO<sub>3</sub>) e posteriormente pesadas nas proporções adequadas à obtenção de um lingote de aproximadamente 120,0 g.

A fusão da liga Ti-13Nb-13Zr foi realizada em duas etapas e para cada uma foram necessárias 6-7 fusões para garantir a homogeneidade. Na primeira etapa, com a finalidade de reduzir o ponto de fusão do Nb (2500°C), utilizou-se todo Nb e uma quantidade de Ti suficiente para obtenção de uma liga rica em Ti. Na segunda etapa foram acrescentados à liga Ti-Nb o restante do material (Ti e Zr) para a fusão da liga Ti-13Nb-13Zr. O lingote final de massa 120,0 g e forma aproximadamente cilíndrica ( $\phi_{\text{médio}} \approx 15,0$  mm) foi submetido ao forjamento a frio, em forja rotativa, até um diâmetro final de 7,1 mm. Foram realizados tratamentos térmicos intermediários sempre que a redução de área atingia 60%, consistindo em manter o material a 1000°C por 1h e resfriando-o bruscamente em água rompendo a cápsula de quartzo ( Schneider et al, 1999). A caracterização mecânica foi realizada em uma máquina de ensaios mecânicos com atuador servo-hidráulico da MTS. Os corpos de prova para o ensaio de tração foram usinados seguindo as dimensões mostradas na figura 1, de acordo com a norma ASTM-E8.



**Figura 1 – Corpo de prova para ensaios de tração.**

Os ensaios foram realizados nas temperaturas ambiente (293 K) e do nitrogênio líquido (77 K). Sendo que para os ensaios a baixa temperatura foi necessário desenvolvimento de um dispositivo que permitisse realizar os ensaios com corpo de prova imerso em um banho de nitrogênio líquido. É importante observar que tal dispositivo é provido de duas articulações fixas nas extremidades do corpo de prova mantendo o seu alinhamento com a direção de aplicação da carga, conforme mostra a figura 2.

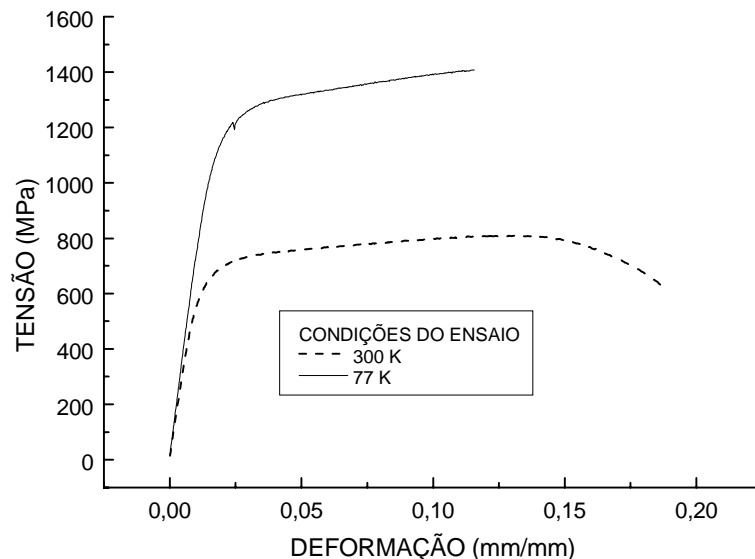


**Figura 2 – Dispositivo desenvolvido para realização dos ensaios a baixa temperatura (293K).**

Durante os ensaios foram utilizados extensômetros para aquisição dos dados de deformação. O modelo MTS 632.11F21, que admite deformação de até  $\pm 15\%$ , foi o utilizado para nos ensaios em baixas temperaturas. Para temperatura ambiente foi utilizado o modelo MTS 634.12F21 com limites de deformação de  $-10$  a  $+50\%$ . Ambos possuem especificação adequada para as condições de temperaturas estudadas.

## RESULTADOS

Foram ensaiados três corpos de prova para cada condição, temperaturas ambiente e do nitrogênio líquido, e os resultados obtidos foram reprodutivos. A figura 3 mostra as curvas de tensão x deformação dos ensaios de tração de dois dos corpos de prova que representam cada condição.



**Figura 3 – Gráfico comparativo das curvas de tensão x deformação da liga Ti-13Nb-13Zr nas temperaturas ambiente e 77 K.**

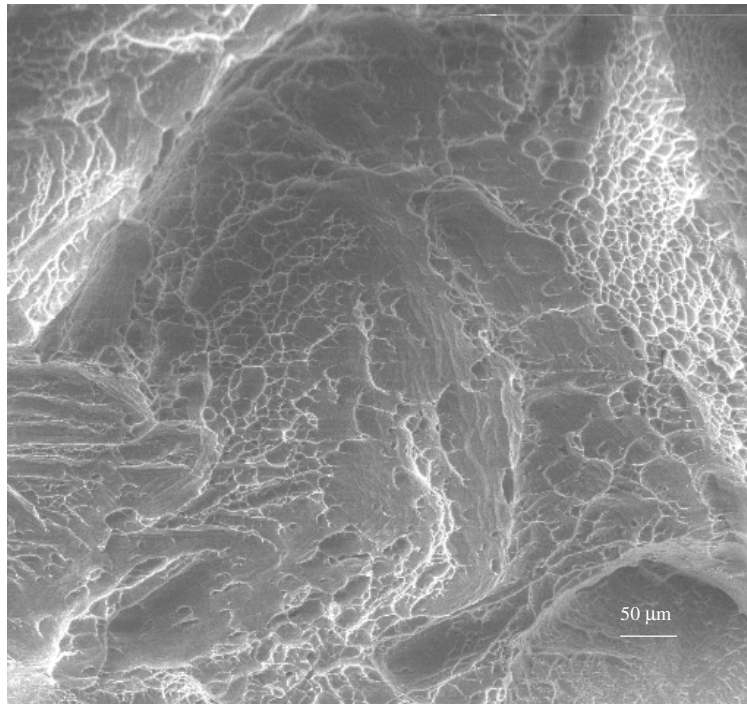
Na Tabela 1 encontram-se os principais resultados obtidos nestes ensaios e também aqueles da literatura para auxiliar na interpretação dos mesmos.

**Tabela 1 – Propriedades mecânicas de ligas de titânio**

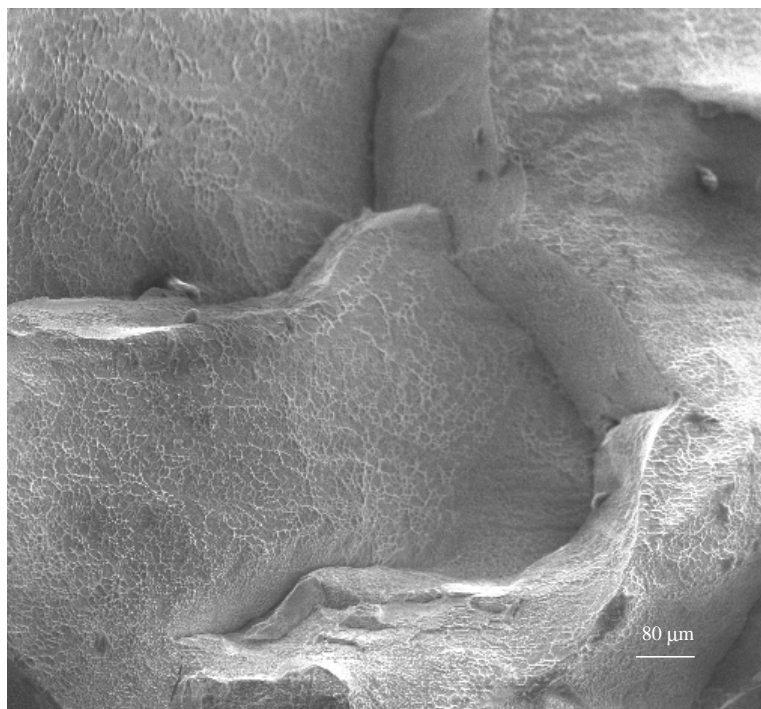
Liga	Temperatura (K)	Limite convencional de escoamento (0,2%) (MPa)	Limite de resistência (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Alongamento percentual (%)
Ti-6Al-4V *	293	890	986	108,6	12,1
	77	1433	1534	120,4	11,4
Ti-5Al-2,5Sn*	297	795	850	105	16
	77	1300	1370	120	14
Ti-13Nb-13Zr	293	600	810	60,9	14
	77	1046	1406	74,4	11,5

\* Dados contidos na literatura, referências 2 e 5

As figuras 4 e 5 exemplificam os principais mecanismos responsáveis pela fratura em condições de tração nas temperaturas 293 e 77 K.



*Figura 4 – Superfície de fratura da liga Ti-13Nb-13Zr à 293 K.*



*Figura 5 – Superfície de fratura da liga Ti-13Nb-13Zr à 77 K.*

## CONCLUSÕES

O gráfico da figura 3 mostra uma notável influência da temperatura nas propriedades mecânicas, no entanto a liga Ti13Nb13Zr aumentou consideravelmente sua resistência sem grande variação de sua ductilidade.

Os valores apresentados na tabela 1, referentes à temperatura ambiente, mostram que a liga estudada possui menor resistência mecânica que as ligas Ti-6Al-4V e Ti-5Al-2,5Sn. Apesar disso, os valores de alongação encontram-se próximos.

Os resultados dos testes realizados a 77K indicam que apesar da liga Ti-13Nb-13Zr apresentar valores inferiores de módulo de elasticidade e limite de escoamento, o limite de resistência e a alongação são comparáveis aos das ligas Ti-6Al-4V e Ti-5Al-2,5Sn.

A análise da superfície de fratura mostrada na figura 4 indica fratura por micromecanismo dúctil, apresentando dimples de baixa profundidade e de tamanhos irregulares. Observa-se também a presença de pequenas cavidades ao longo dos contornos granulares. Já a superfície de fratura mostrada na figura 5 apresenta topografia bastante irregular e fratura do tipo mista, sendo que o principal micromecanismo corresponde efetivamente as cavidades intergranulares com a presença de dimples aparentemente equiaxiais no interior dos grãos.

Conclui-se portanto, que os valores obtidos quanto à caracterização mecânica da liga Ti13Nb13Zr em função de diferentes níveis de temperatura, podem ser considerados resultados preliminares e satisfatórios de certas propriedades mecânicas, podendo ser utilizados como parâmetros de projeto nas condições testadas.

Além das propriedades estudadas em condições de baixas temperaturas, sabe-se que, em geral, a tenacidade à fratura de ligas de titânio pode ser um parâmetro crítico. Sendo assim, esse e outros parâmetros, tais como resistência à fadiga e energia absorvida no impacto, deverão ser avaliados posteriormente tornando o estudo dessa liga mais abrangente.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alekseyevskiy N. Ye., Ivanov O.S., Rayevskiy I. I. and Stepanov M. V., 1967, Constitution diagram of the system niobium-titanium-zirconium and superconducting properties of the alloys. *Fiz. Metal. Metalloved.*, vol.23, n1, p.28-36.
- Donachie Jr. J.D. ,1988, *Titanium, A Technical Guide*, ASM Int., Metals Park, Ohio.
- Nagai K., Yuri T., Umezawa O. Andishikawa ,1985, Fatigue and fracture of Ti alloys at cryogenic temperatures, 11<sup>th</sup> International Conference on Magnet Technology, p.754-759.
- Nagai K., et all. , 1991, Cryogenic mechanical properties of Ti-6Al-4V alloys with three levels of oxygen content. *International*, vol.31, n 8, p. 882-889.
- Priddey M. D., 1985, Titanium – Na attractive proposition, 9<sup>th</sup> International Conference on Magnet Technology, p.687.
- Schneider S. G., Nunes C. A. e Bressiani J. C. Processamento e caracterização mecânica da liga Ti-13Nb-13Zr. *CIDIM'99*, Chile, 1999.
- Wang, K. The use of titanium for medical applications in the USA, *Materials Science and Engineering*, 1996, v.19, p. 134-137.