

# ESTUDO DA DEGRADAÇÃO MICROESTRUTURAL DE UMA LIGA DE TITÂNIO EM FUNÇÃO DA TAXA DE DEFORMAÇÃO E DA TEMPERATURA

**Miguel Justino Ribeiro Barboza**  
**Carlos Antonio Reis Pereira Baptista**  
**Sergio Schneider**  
**Olivério Silva<sup>(\*)</sup>**

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

<sup>(\*)</sup> Centro Técnico Aeroespacial, Divisão de Materiais, Praça Mal. Eduardo Gomes, 50, Campo Montenegro, 12228-000, São José dos Campos, SP, Brasil.

## Resumo

Neste trabalho são empregados conceitos da mecânica do dano contínuo (MDC), que constitui uma área da mecânica dos sólidos iniciada com a definição de um parâmetro escalar de características isotrópicas associado à redução de área útil de um elemento estrutural sob condições de fluência. A MDC atingiu um estágio de desenvolvimento que permite seu uso em diversas aplicações práticas. Seu forte embasamento em análises e observações experimentais permitiu compreender os vários mecanismos responsáveis pelos processos de degradação microestrutural e sua íntima relação com a ruptura dos diferentes tipos de componentes mecânicos. Este trabalho tem como objetivo associar o comportamento elástico a um parâmetro representativo da degradação microestrutural através de medidas do módulo de Young, visando avaliar e quantificar o efeito do dano por deformação plástica sobre esta propriedade. Para tanto, realizaram-se testes com amostras da liga Ti-13V-11Cr-3Al, sob condições de tração uniaxial e diferentes taxas de deformação, à temperatura ambiente e em temperatura criogênica (77 K). O trabalho é complementado por análises fractográficas das amostras ensaiadas.

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

## INTRODUÇÃO

As diferentes solicitações mecânicas e ambientais provocam alterações na microestrutura dos metais e ligas empregados com fins estruturais. Tendo em vista que essas alterações reduzem a resistência mecânica dos materiais, o termo “dano” é empregado para designá-las. Os processos de acumulação de dano podem ocorrer sob deformação elástica (como no caso da fadiga de alto ciclo), deformação elasto-plástica e sob condições de fluência. Em presença de grandes deformações plásticas, o dano se manifesta pela nucleação e crescimento de microcavidades e microtrincas no metal (Kachanov, 1986). Os diversos tipos de defeitos e sua distribuição correspondem a diferentes descrições matemáticas do dano. A mecânica do dano contínuo (MDC) introduz um parâmetro, que pode ser entendido como uma variável contínua que se relaciona à densidade dos defeitos gerados durante a degradação do material. No caso mais simples, assumindo-se que o dano seja isotrópico, o parâmetro de dano pode ser de natureza escalar. O efeito do dano nas propriedades elásticas do material permite que se avalie

indiretamente o dano sofrido através da variação de seu módulo elástico (Lemaitre, 1992). Neste caso, o dano  $d$  pode ser estimado de acordo com a equação (1), sendo conhecido o módulo de Young  $E$  e medindo-se o módulo de elasticidade do material danificado,  $\tilde{E}$ :

$$d = 1 - \frac{\tilde{E}}{E} \quad (1)$$

Esta metodologia foi empregada em um trabalho recente (Paes *et al*, 1999), em que medidas do módulo de Young obtidas em ensaios de tração e também através do teste não destrutivo de ultra-som foram associadas a um parâmetro de dano com o objetivo de estimar a degradação associada à fadiga em amostras de titânio de pureza comercial.

O titânio e suas ligas, devido à possibilidade de uma combinação favorável entre propriedades mecânicas e físicas, vêm sendo muito utilizados nas mais variadas áreas: indústria aeronáutica e aeroespacial, indústria naval e em aplicações criogênicas diversas. Além da alta razão resistência por densidade, as ligas de titânio apresentam a característica 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. O titânio apresenta, à temperatura ambiente, estrutura cristalina hexagonal compacta, denominada fase  $\alpha$ . Esta estrutura se transforma alotrópicamente para cúbica de corpo centrado, chamada fase  $\beta$ , a 1155,5 K. É basicamente na manutenção de uma ou outra fase que se baseia a adição de elementos de liga ao Ti. Os elementos que favorecem a fase  $\beta$  (chamados betagênicos) reduzem a temperatura de transformação alotrópica e incluem os metais de transição do grupo IV. As ligas Ti- $\beta$  além de apresentarem alta resistência, boa plasticidade e alta temperabilidade, podem combinar baixo módulo de elasticidade com alta resistência à corrosão. Dentre essas, destaca-se a liga Ti-13V-11Cr-3Al, que, tendo sido a primeira liga Ti- $\beta$  comercial (introduzida em 1952), é empregada na indústria aeroespacial em componentes estruturais de alta resistência (Donachie Jr., 1988; Flower, 1990; Nagai et al, 1985). Além disso, de acordo com a norma ASTM E399 (1990) esta liga é a mais indicada para a confecção de braços para medidores de deslocamento (*clip gauges*) empregados nos ensaios de tenacidade à fratura, devido à sua alta relação entre limite elástico e módulo de Young na condição solubilizada. A possibilidade do emprego desses medidores em baixas temperaturas é um fator adicional a justificar o estudo de seu comportamento mecânico a 77 K.

O presente trabalho tem como objetivo associar o comportamento elástico da liga Ti-13V-11Cr-3Al a um parâmetro representativo da degradação microestrutural através de medidas do módulo de Young, visando avaliar e quantificar o efeito do dano por deformação plástica sobre esta propriedade. Para tanto, realizaram-se testes com amostras da liga Ti-13V-11Cr-3Al, sob condições de tração uniaxial e diferentes taxas de deformação, à temperatura ambiente e em temperatura criogênica (77 K). O trabalho é complementado por análises fractográficas das amostras ensaiadas.

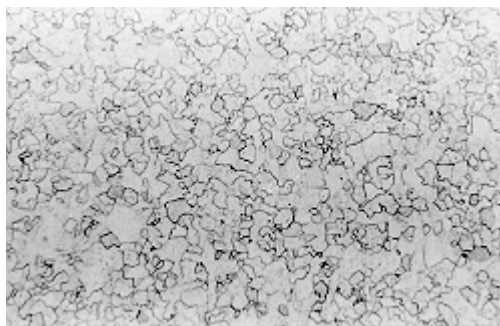
## MATERIAIS E MÉTODOS

O material foi recebido na forma de barras cilíndricas com 7,6 mm de diâmetro. Através de análise química por ICP encontrou-se, para os teores dos elementos de liga e para o ferro, os valores mostrados na Tabela 1. Estes valores são comparados com as faixas de variação estabelecidas para esta liga de acordo com a especificação AMS 4917. A análise metalográfica mostrou que a microestrutura do material compõe-se de grãos da fase metaestável  $\beta$ , conforme pode ser observado na Figura 1.

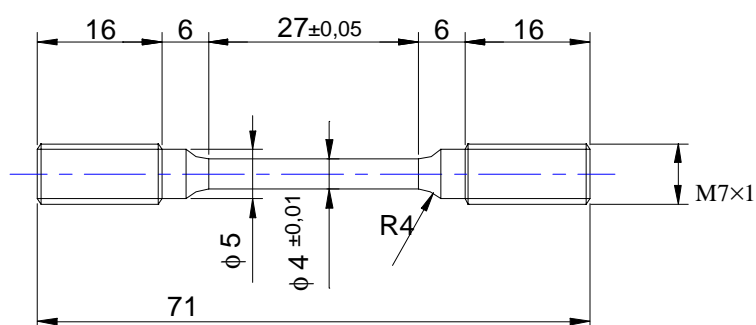
**Tabela 1.** Composição da liga (% em peso)

	V	Cr	Al	Fe
Mat. Recebido	14,1	11,1	3,32	0,18
AMS 4917	12,5-14,5	10,0-12,0	2,5-3,5	0,35 máx.

Os ensaios mecânicos foram realizados em uma máquina servo-hidráulica MTS com capacidade de 250 kN. Os corpos de prova foram confeccionados segundo as dimensões mostradas na Figura 2, de acordo com a norma ASTM E8M. 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 para imersão das amostras em um banho de nitrogênio líquido. Para a aquisição dos dados de deformação foi utilizado o extensômetro MTS mod. 632.11F21, com faixa de trabalho de  $\pm 15\%$  e adequado para uso em baixa temperatura.



**Figura 1.** Microestrutura do material, corte transversal (aumento 100 $\times$ )



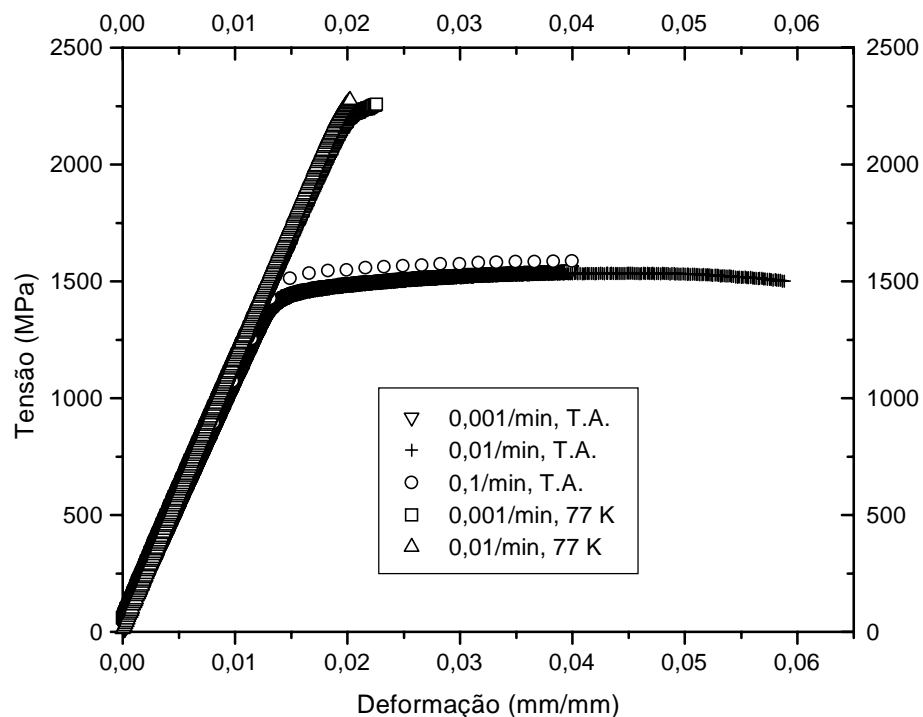
**Figura 2.** Corpo de prova para ensaios de tração

Para os ensaios de tração à temperatura ambiente foram adotadas 3 taxas de deformação: 0,001/min, 0,01/min e 0,1/min. As duas primeiras foram adotadas também no caso dos ensaios a baixa temperatura. Estas taxas foram reproduzidas em ensaios com descarregamentos sucessivos, realizados com o objetivo de se avaliar o dano por deformação

plástica. As superfícies de fratura de amostras ensaiadas à temperatura ambiente e a 77 K foram observadas ao microscópio eletrônico de varredura.

## RESULTADOS

Na Figura 3 são apresentadas as curvas  $\sigma \times \epsilon$  correspondentes aos ensaios de tração sob as diferentes condições de temperatura e taxas de deformação adotadas. Os valores do módulo de Young correspondentes às diferentes condições de ensaio são mostrados na Tabela 2. Pode-se observar que o efeito da temperatura se sobrepõe ao efeito da taxa de deformação no que diz respeito ao comportamento sob tração uniaxial do material, nas condições estudadas neste trabalho. A Figura 4 mostra a variação do limite de escoamento ( $\sigma_e$ ) e do limite de resistência à tração ( $\sigma_t$ ) com a taxa de deformação, para o caso dos ensaios à temperatura ambiente.

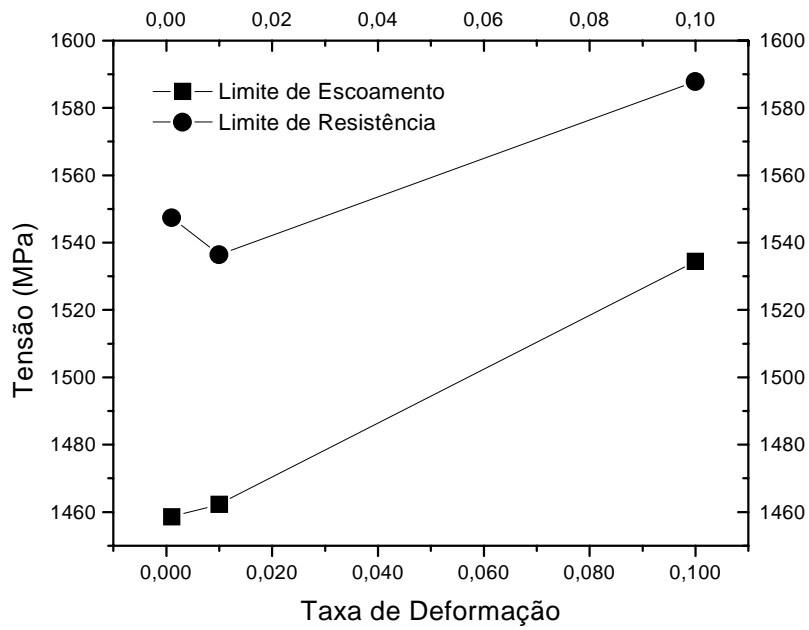


**Figura 3.** Curvas Tensão-Deformação

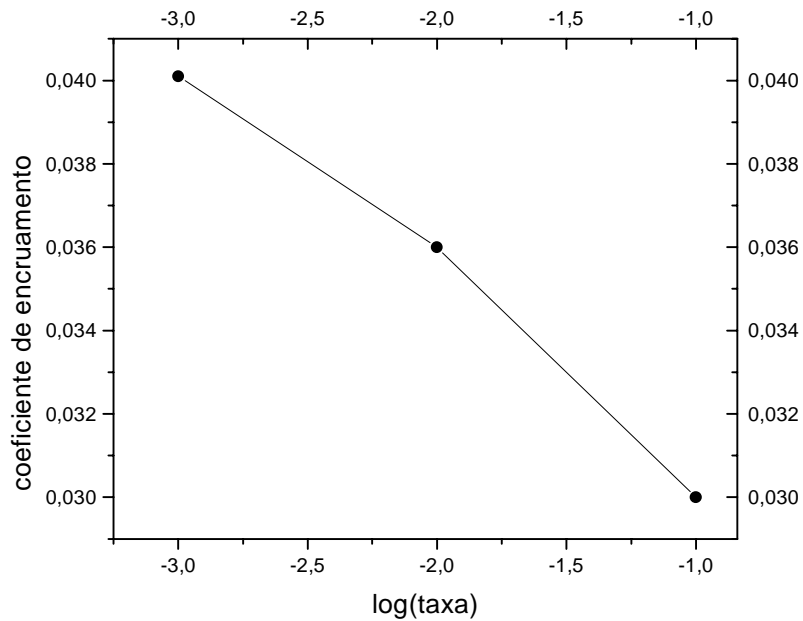
**Tabela 2.** Variação do Módulo de Young

E (GPa)	0,001/min	0,01/min	0,1/min
Temp. Ambiente	105,7	104,8	106,6
77 K	108,5	112,8	-

Na Figura 5 pode-se observar o efeito da taxa de deformação sobre o coeficiente de encruamento, obtido de acordo com a norma ASTM E646, para os ensaios à temperatura ambiente. No caso dos ensaios a 77 K, devido à pouca deformação plástica, esses parâmetros não puderam ser determinados.

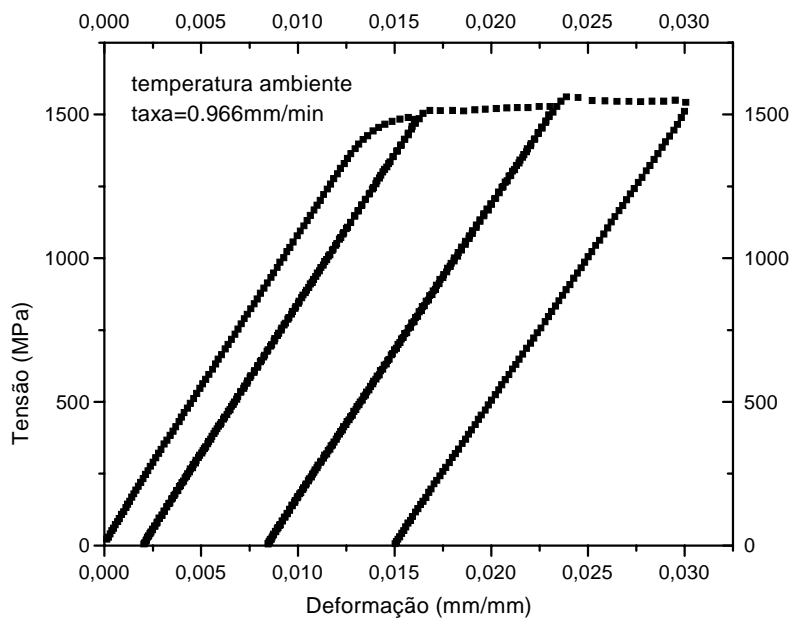


**Figura 4.** Variação das Propriedades de Tração com a Taxa de Deformação



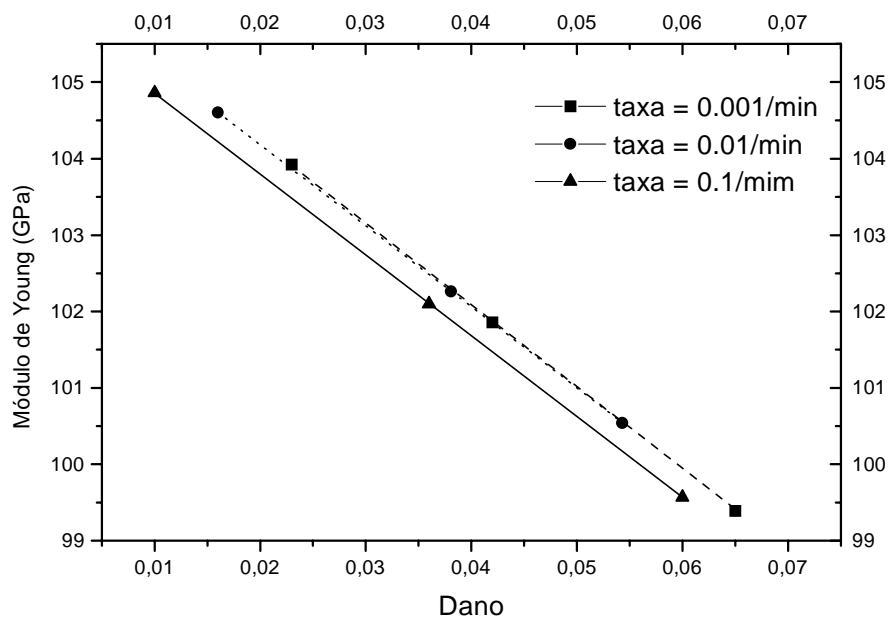
**Figura 5.** Variação do Coeficiente de Encruamento com a Taxa de Deformação

Para analisar o efeito do dano, foram realizados ensaios de tração com descarregamentos sucessivos, nas diferentes temperaturas e taxas de deformação estudadas. Como exemplo, mostra-se na Figura 6 a curva  $\sigma \times \epsilon$  correspondente à taxa de 0,01/min para a temperatura ambiente.

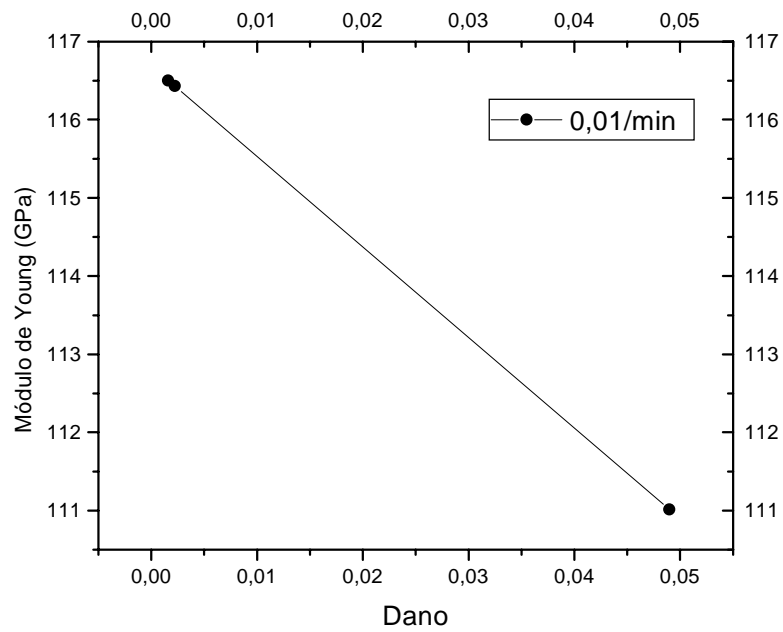


**Figura 6.** Ensaio com Descarregamentos Sucessivos

A evolução do dano, calculado de acordo com a equação (1), é mostrada nas Figuras 7 (temperatura ambiente) e 8 (77 K). Observa-se na Figura 7 que a evolução do dano é independente da taxa de deformação. Na Figura 8, pode-se notar que o dano a 77 K atingiu níveis compatíveis com aquele à temperatura ambiente, embora a deformação plástica tenha atingido apenas 0,25%, ante 1,5% de deformação plástica atingida no ensaio com descarregamentos sucessivos à temperatura ambiente.

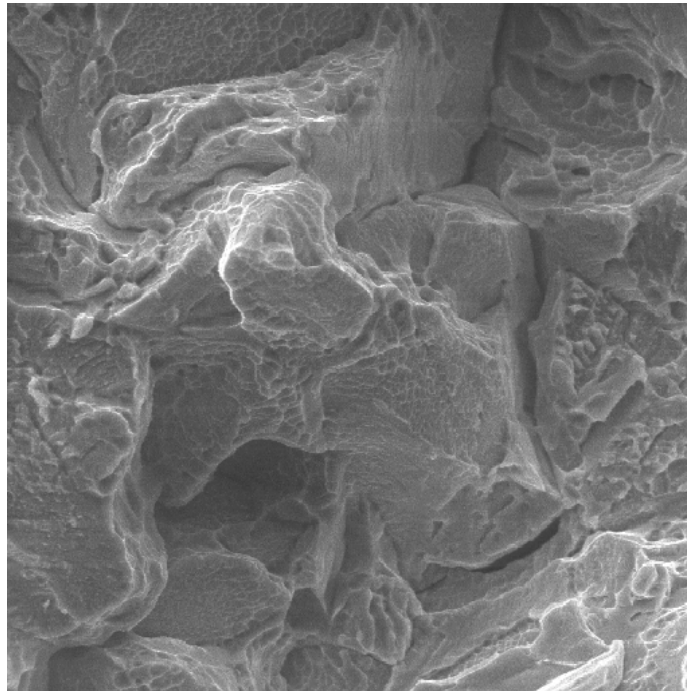


**Figura 7.** Correlação entre Dano e Módulo de Young, Temperatura Ambiente

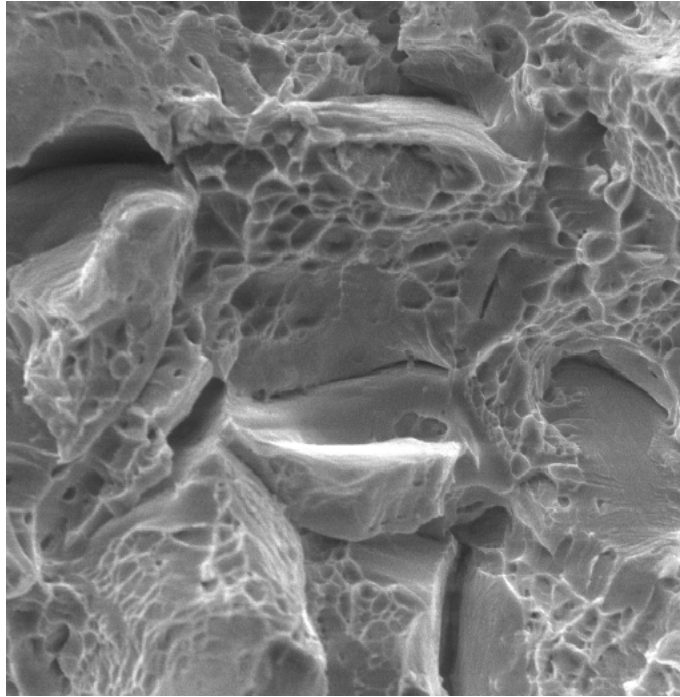


**Figura 8.** Correlação entre Dano e Módulo de Young, 77 K

As Figuras 9 e 10 são dois exemplos representativos da superfície de fratura, respectivamente a 77 K e à temperatura ambiente. Na Figura 9 o principal aspecto concentra-se no mecanismo intergranular, caracterizando intensa fragilidade nessas condições de ensaio. No entanto, a Figura 10 apresenta poucas regiões relativas a estrutura alveolar, destacando-se de forma mais intensa os micromecanismos responsáveis pela fratura intergranular.



**Figura 9.** Superfície de Fratura a 77 K (1000 ×)



**Figura 10.** Superfície de Fratura à Temperatura Ambiente (1000 ×)

## CONCLUSÕES

Observou-se que as propriedades em tração e a evolução do dano não foram significativamente afetadas pela taxa de deformação, dentro dos limites estudados neste trabalho. Os ensaios a 77 K resultaram em um aumento significativo das propriedades de resistência em tração e uma intensa redução na componente plástica até a fratura. O principal mecanismo de fratura corresponde a cavidades intergranulares, independente da temperatura de ensaio. O parâmetro de dano não apresentou uma dependência significativa em relação à temperatura, embora os níveis de deformação plástica verificados nos ensaios com descarregamentos sucessivos a 77 K tenham sido 6 vezes menores que no caso da temperatura ambiente.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Donachie Jr., J.D., 1988, "Titanium, A Technical Guide", ASM International, Metals Park, Ohio, 469 p.
- Flower, H.M., 1990, "Microstructural Development in Relation to Hot Working of Titanium Alloys. Materials Science and Technology, v.6(11), p.1082-1092.
- Kachanov, L.M., 1986, "Introduction to Continuum Damage Mechanics", Martinus Nijhoff, Dordrecht, Holanda, 135p.
- Lemaitre, J., 1992, "A Course on Damage Mechanics", Springer-Verlag, Berlin, Alemanha, 228p.
- Nagai K., Yuri T., Umezawa O. Andishikawa, 1985, "Fatigue and fracture of Ti alloys at cryogenic temperatures", 11<sup>th</sup> International Conf. on Magnet Technology, p.754-759.
- Paes, M., Baptista, C.A.R.P., Barboza, M.J.R., Silva, E.M.R., Reis, F.P., Pastoukhov, V.A., 1999, "Aspectos do Comportamento Mecânico do Titânio Grau 2 Submetido a Carregamentos Cíclicos", Anais do XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Águas de Lindóia, SP, Brasil, 10p. (em CD-ROM).