

## ASPECTOS DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO TITÂNIO GRAU 2 SUBMETIDO A CARREGAMENTOS CÍCLICOS

**Marcelo Paes**

**Carlos A. R. P. Baptista**

**Miguel J. R. Barboza**

**Edmara M. R. da Silva**

**Francisco P. Reis**

FAENQUIL – Faculdade de Engenharia Química de Lorena

Departamento de Engenharia de Materiais

cx. postal 116, 12.600.000 – Lorena – SP

**Viktor A. Pastoukhov**

UNITAU – Universidade de Taubaté

Departamento de Matemática e Física

Av. Daniel Danelli, s/n, 12.060.440 – Taubaté – SP

**Resumo.** *As solicitações cíclicas resultam em mudanças na estrutura dos metais, as quais refletem em suas propriedades mecânicas. A previsão de vida de componentes estruturais pode ser melhorada ao se associar propriedades do material, aferidas por métodos não destrutivos, a um parâmetro de dano correspondente à degradação já ocorrida. O presente trabalho tem por objetivo avaliar o comportamento mecânico de amostras de titânio grau 2 submetidas a carregamentos cíclicos correspondentes a determinadas parcelas da vida em fadiga. Paralelamente, são feitas medidas do módulo elástico pela técnica de ultra-som. Os resultados são discutidos em termos da possibilidade de se modelar a variação das propriedades mecânicas do material em função do carregamento cíclico aplicado, bem como de se utilizar técnicas não destrutivas na estimativa da vida restante.*

**Palavras-chave:** *comportamento mecânico, fadiga, titânio, acumulação de dano*

### 1. INTRODUÇÃO

As diferentes solicitações mecânicas e ambientais provocam alterações na microestrutura dos metais e ligas empregados com fins estruturais, reduzindo sua resistência. Considera-se que nestas situações o material sofre processos de acumulação de dano.

Os carregamentos cíclicos desencadeiam a fadiga dos materiais, que é responsável por grande parte das falhas de componentes mecânicos. A degradação dos materiais sujeitos a solicitações cíclicas reflete-se em mudanças de suas propriedades, dentre as quais se destacam as propriedades mecânicas (Klesnil e Lukáš, 1992). A vida em fadiga de um espécime ou

estrutura corresponde ao número de ciclos de tensão (ou deformação) necessários para causar a falha. As mudanças nas propriedades dos materiais, que ocorrem no início do processo de fadiga, geralmente atingem valores de saturação e estão condicionadas pela deformação plástica cíclica, como resultado da movimentação e interação de discordâncias. Nesta situação, o dano em fadiga é um fator presente em todo o volume do material. Os eventos que se seguem, no processo de fadiga, envolvem os mecanismos de nucleação, acumulação e crescimento de micro trincas (Dieter, 1976). O crescimento de uma trinca principal, levando à ruptura do material ou componente, está relacionado a um processo de dano altamente localizado na ponta da fissura. O tempo correspondente ao crescimento da trinca pode variar de 10 a 80 por cento da vida do espécime, dependendo de suas condições iniciais. Os estudos da variação das propriedades mecânicas dos materiais submetidos à fadiga remontam ao início deste século (Bairstow, 1910), e geralmente se valem de ensaios de fadiga de baixo ciclo controlados pela deformação.

A mecânica do dano contínuo introduz um parâmetro, que pode ser entendido como uma variável contínua que se relaciona à densidade dos defeitos (descontinuidades, microtrincas, cavidades) gerados durante a degradação do material. Assumindo-se que o dano seja isotrópico, o parâmetro de dano pode ser de natureza escalar. Dada a dificuldade de se determinar a acumulação de dano no primeiro estágio da fadiga e o instante em que se formam as macrotrincas, considera-se, no estudo do acúmulo de dano, o processo total de fratura, sem a distinção dos estágios da fadiga (Kachanov, 1986). Assim, o dano  $d$  pode ser definido em termos do número de ciclos de carregamento,  $n$ , em relação ao número de ciclos para a fratura,  $N$ , como mostrado na Eq.(1):

$$d = \frac{n}{N} \quad (1)$$

Propriedades mecânicas básicas dos metais, como o módulo de Young, podem ser aferidas por métodos indiretos e não destrutivos, como o ensaio de ultra-som. Em situações práticas, a falta de informações sobre a história das solicitações cíclicas impossibilita uma avaliação da vida restante do material em termos do número de ciclos. 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  $d$  é estimado de acordo com a Eq. (2) conhecendo-se o módulo de Young  $E$ , e medindo-se o módulo de elasticidade do material danificado,  $\tilde{E}$ :

$$d = 1 - \frac{\tilde{E}}{E} \quad (2)$$

A determinação do módulo elástico pelo método de ultra-som é uma alternativa promissora para a avaliação do dano no estágio inicial da fadiga, antes da propagação das trincas. O presente trabalho tem por objetivo relacionar as variações dos dados obtidos experimentalmente a um parâmetro do dano, para uma chapa de titânio grau 2. São desenvolvidas análises preliminares visando à modelagem da variação das propriedades mecânicas do material com o acúmulo de dano por fadiga. As técnicas experimentais englobaram ensaios mecânicos de fadiga e tração, bem como o teste por ultra-som.

## 2. MATERIAL

Para a realização deste trabalho, utilizou-se o titânio comercialmente puro (grau 2), na forma de chapa recozida com 1,5mm de espessura, fornecido pela Nippon Steel Co. de acordo com a especificação da norma ASTM B 265-79. O titânio é um metal leve e resistente, apresentando excelente relação resistência/ peso e alto ponto de fusão (1941 K). Estas propriedades, aliadas à sua resistência à corrosão e suas características de biocompatibilidade, o tornam atraente para aplicações em setores das indústrias química e aeronáutica, implantes cirúrgicos, tendo mais recentemente experimentado uma diversificação em seu uso, abrangendo desde componentes para a indústria automotiva até produtos mais prosaicos como tacos de golfe e utensílios para cozinha (Farthing Ma, 1977; Froes, 1997). Este metal apresenta-se, à temperatura ambiente, com estrutura cristalina hexagonal compacta, denominada fase  $\alpha$ . A Tabela 1 apresenta a composição química do material, de acordo com dados do fornecedor.

Tabela 1. Composição Química

Composição química (% peso)						
C	O	N	Fe	H	Residuais	Ti
0,01	0,14	0,01	0,05	0,01	máx. 0,4	> 99,3

Através da análise difratométrica de raios-x, constatou-se a ausência de uma direção preferencial e, através do processamento dos dados e comparação com a microficha do titânio, determinou-se os parâmetros de rede, indicados na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros de Rede do Material

Parâmetro de Rede	Valores [nm]
A	0,29463±0,00023
C	0,46850±0,0034



Figura 1 – Micrografia óptica do Ti grau 2 (aumento 200×).

A análise metalográfica de amostras obtidas segundo três planos perpendiculares revelou uma microestrutura com equiaxialidade dos grãos. Através do método comparativo, determinou-se o tamanho de grão como sendo predominantemente 7. A Figura 1 é uma fotomicrografia representativa do material em estudo.

### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para realização dos ensaios foram utilizados corpos de prova de tração com 200mm de comprimento, 1,5mm de espessura e comprimento útil de 60mm. As amostras foram lixadas e polidas com lixas de granulometria 320 a 1000. Os ensaios mecânicos foram realizados com uma máquina servo-hidráulica MTS modelo 810.23M. O módulo de elasticidade foi determinado de acordo com a norma ASTM E111. Utilizou-se também a técnica de ultra-som para a determinação desta propriedade, conforme a norma ASTM E494, através de um equipamento NORTEC modelo NDT 131, com transdutores de ondas longitudinais e transversais. Após a caracterização mecânica básica, em que se determinaram o módulo de Young, limite de escoamento, limite de resistência à tração e alongamento até a ruptura, procedeu-se o estudo do efeito dos carregamentos cíclicos nas propriedades do material.

Foram realizadas duas séries de experimentos. Na primeira, corpos de prova foram submetidos a carregamentos cíclicos axiais a determinados valores da razão de tensão mínima/máxima,  $R$ , durante períodos correspondentes a determinadas parcelas da vida média em fadiga do material (segundo Silva, 1998), de acordo com a Tabela 3. Em seguida, determinaram-se as propriedades mecânicas dessas amostras, para a comparação com os valores correspondentes ao material não danificado. As superfícies de fratura de algumas amostras foram observadas ao MEV.

Tabela 3. Condições dos Ensaios de Fadiga Interrompidos

Razão de carga e tensão máxima	Vida média em ciclos, $N$	Parcelas da Vida empregadas (%)
$R=0,5$ e $\sigma_{m\acute{a}x.}=450\text{MPa}$	64000	5, 25 e 50
$R=0,1$ e $\sigma_{m\acute{a}x.}=360\text{MPa}$	162445	5,25 e 50

A segunda etapa consistiu de testes de tração com descarregamentos sucessivos. Neste tipo de ensaio avalia-se a evolução do dano por deformação plástica através da medição da variação do módulo elástico. Foram realizados ensaios em amostras de material virgem, bem como em corpos de prova submetidos a carregamento cíclico prévio, com razão de carga  $R=0,1$  e tensão máxima no ciclo igual a 360 MPa. Neste caso, os carregamentos cíclicos foram aplicados durante 5 e 10 por cento da vida média.

### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente serão apresentados os resultados da caracterização mecânica do titânio, obtidos através de ensaios mecânicos e ensaios por ultra-som. Em seguida, serão apresentados e discutidos os resultados das duas séries de experimentos com corpos de prova submetidos a carregamentos cíclicos prévios.

#### 4.1 Propriedades mecânicas do material como recebido

Os resultados de quatro ensaios de tração e dos testes de ultra-som estão nas Tabelas 4 e 5, respectivamente. Nota-se uma discrepância entre os valores do módulo de Young,  $E$ , medidos através das duas técnicas distintas. O teste de ultra-som permitiu determinar também o módulo volumétrico  $K$ , o módulo de elasticidade transversal  $G$  e o coeficiente de Poisson  $\nu$ .

Tabela 4. Propriedades mecânicas do titânio

E [GPa]	$\sigma_e$ [MPa]	$\sigma_t$ [MPa]	$\Delta L$ [%]
96,7	347,9	472,0	27,7
101,7	350,7	473,2	27,3
97,9	348,8	472,8	26,5
97,0	347,2	471,2	27,3

Tabela 5. Propriedades do titânio obtidas por ultra-som

E [GPa]	K [GPa]	G [GPa]	$\nu$
113±8,7	123±7,3	42±1,7	0,3469±0,09

#### 4.2 Propriedades do material após aplicação de carregamentos cíclicos

Nas Tabelas 6 e 7 são apresentados os resultados de ensaios de tração realizados em corpos de prova previamente submetidos aos ensaios de fadiga interrompidos.

Tabela 6. Propriedades mecânicas após ciclagem com  $R=0,5$  e  $\sigma_{m\acute{a}x}=450$  MPa

Parcela Vida(%)	E [GPa]	$\sigma_e$ [MPa]	$\sigma_t$ [MPa]	$\Delta L$ [%]
5	87,0	472,4	486,6	23,8
	89,7	469,9	484,0	23,8
	97,6	472,7	498,0	23,9
	-	-	-	-
25	82,4	490,8	508,9	17,8
	84,3	494,9	512,9	18,9
	85,6	489,7	504,1	19,5
	87,6	489,6	505,5	19,9
50	82,7	499,4	514,1	17,1
	83,1	501,8	511,3	14,9
	88,0	501,8	514,2	15,2
	86,7	499,9	514,1	17,1

Tabela 7. Propriedades mecânicas após ciclagem com  $R=0,1$  e  $\sigma_{m\acute{a}x}=360$  MPa

Parcela Vida(%)	E [GPa]	$\sigma_e$ [MPa]	$\sigma_t$ [MPa]	$\Delta L$ [%]
5	91,6	422,4	473,2	29,1
	92,8	421,1	474,4	26,0
25	89,7	433,3	477,8	23,3
	88,1	431,7	477,6	23,5
50	86,2	436,0	482,2	20,1
	87,3	437,8	482,0	20,3

Analisando-se os dados das Tabelas 6 e 7, observa-se as tendências de diminuição do módulo de elasticidade e do alongamento até a ruptura e de aumento do limite de escoamento e do limite de resistência à tração com o incremento da parcela da vida média na qual as amostras são submetidas a cargas cíclicas. Nota-se também um maior espalhamento nos resultados referentes ao módulo elástico e ao limite de escoamento. Em todos os casos observou-se a tendência à saturação, e uma forma possível de descrever o comportamento do material é dada por uma equação exponencial, que descreve o comportamento das propriedades normalizadas, como mostrado pela Eq. (3):

$$\frac{p}{p_0} = y_0 + A_1 e^{\left(\frac{-d}{t_1}\right)} \quad (3)$$

onde  $p$  é a propriedade medida após o ensaio de fadiga interrompido,  $p_0$  é o valor médio da propriedade para o material como recebido,  $d$  é o dano em fadiga representado pela parcela de vida de acordo com a Eq. (1), e  $y_0$ ,  $A_1$  e  $t_1$  são os parâmetros de ajuste. Um exemplo deste comportamento é dado na Figura 2, que mostra a variação do limite de escoamento normalizado em função do acúmulo de dano.

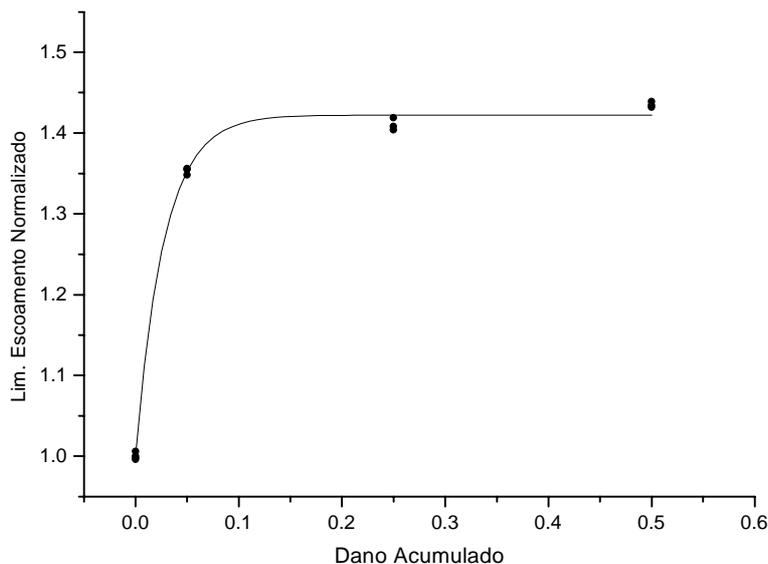


Figura 2 – Modelagem da variação do limite de escoamento para R=0,5

As Figuras 3, 4 e 5 são fractografias obtidas após os ensaios de tração, representativas do comportamento do material nas condições analisadas. Na Figura 3 observa-se uma pequena região com características de fragilidade na superfície de fratura do material como recebido, muito embora a maior parte desta superfície corresponde à formação de alvéolos por coalescimento de vazios, envolvendo evidentemente deslizamento planar, correspondendo a fratura do tipo dúctil. A Figura 4 corresponde a uma amostra ciclada em 5% da vida antes do ensaio de tração, onde observa-se uma superfície tipicamente dúctil com topografia irregular. A Figura 5 refere-se a uma amostra ciclada em 50% da vida média, em que observa-se com clareza a estrutura alveolar. No entanto, notam-se algumas pequenas cavidades de coloração

mais escura, que podem ter origem no processo de arrancamento de inclusões ou ainda ter sido geradas pelo acúmulo de deformação plástica localizada, relacionada ao processo de fadiga. A grande dificuldade de se determinar e localizar estes pontos concentradores de deformação é devida ao possível congelamento de suas dimensões e forma a partir do início do processo de estrição até a ruptura.

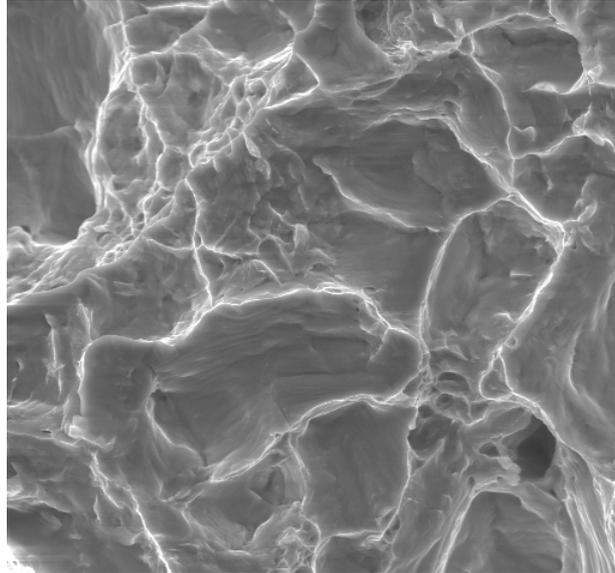


Figura 3 – Superfície de fratura do material como recebido (1000×)

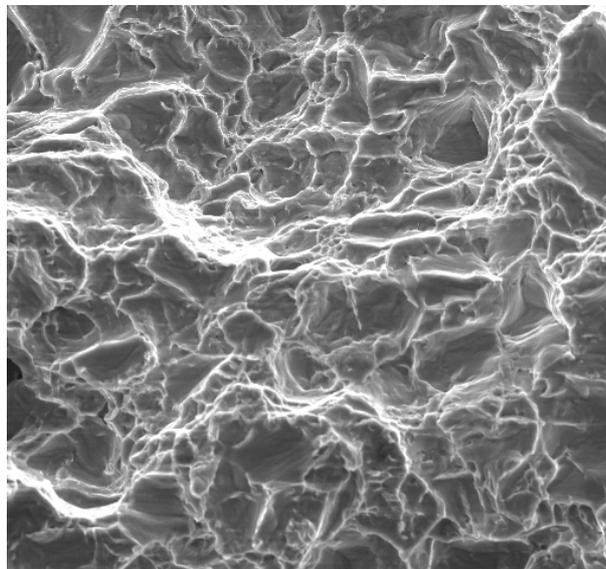


Figura 4 – Superfície de fratura de amostra ciclada a R=0,1 por 5% da vida média (500×)

Avaliou-se por ultra-som o módulo elástico de uma amostra ciclada por 50% da vida média a R=0,1 e tensão máxima no ciclo de 360 MPa. O valor encontrado foi  $E=104\pm 8,6$  GPa, que apesar de diferir do valor medido no ensaio de tração, representa uma variação da ordem de 8% em relação ao módulo de Young original medido por esta técnica. Esta variação está condizente com aquela observada quando se comparam os resultados médios dos ensaios de tração das amostras previamente cicladas com os resultados das amostras do material como recebido.

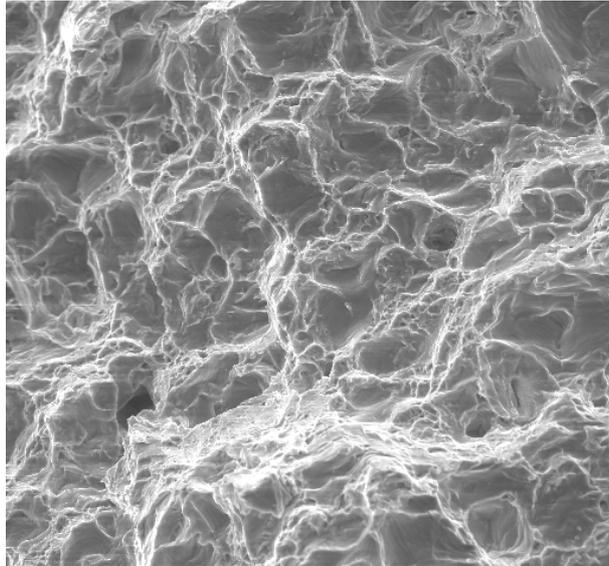


Figura 5 – Superfície de fratura de amostra ciclada a  $R=0,5$  por 50% da vida média (370 $\times$ )

#### 4.3 Ensaio de tração com descarregamentos sucessivos

Através destes ensaios foi avaliada a variação do módulo de elasticidade com a deformação plástica. Na Figura 6 observa-se uma curva típica apresentada por este tipo de ensaio. A variação no módulo de elasticidade foi associada a um parâmetro de dano, de acordo com a Eq. (2). Comparou-se desta forma a evolução do dano em amostras de material virgem com as amostras previamente cicladas. Os resultados são mostrados na Figura 7. Observa-se que as discrepâncias observadas entre as amostras correspondentes a condições diferentes tendem a reduzir-se à medida em que evolui o dano por deformação plástica.

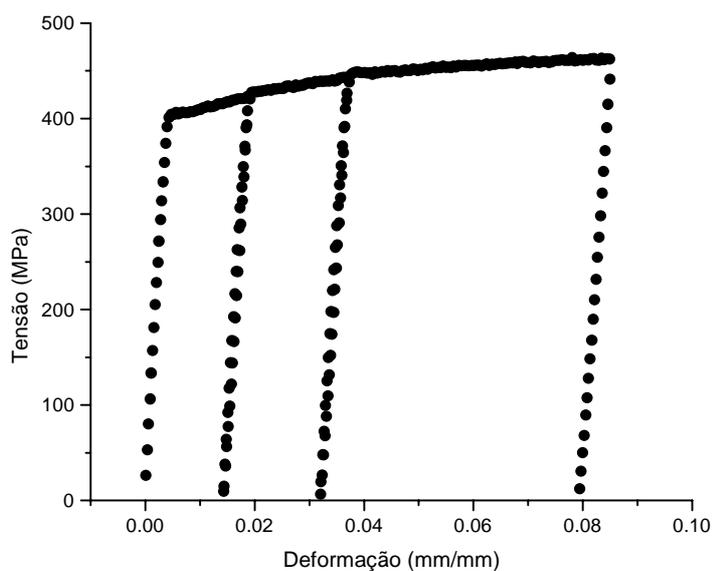


Figura 6 – Ensaio com descarregamentos sucessivos de amostra ciclada por 10% da vida

## 5. CONCLUSÃO

Avaliaram-se as propriedades mecânicas de amostras de titânio previamente submetidas a carregamentos cíclicos. Verificou-se que sua variação é descrita por uma lei exponencial. A avaliação do comportamento do módulo elástico pela técnica de ultra-som mostrou as possibilidades do emprego deste ensaio não destrutivo. Devido ao fato de em muitas situações ser impossível precisar o histórico de carregamento de um componente, a estimativa do dano acumulado através desta técnica mostra-se promissora. As características das superfícies de fratura dos corpos de prova no ensaio de tração foram associadas à condição inicial do material. Os ensaios com descarregamentos sucessivos permitiram observar que o dano por deformação plástica, inicialmente diferente para as amostras que sofreram fadiga, tende a evoluir de forma idêntica em todas as condições.

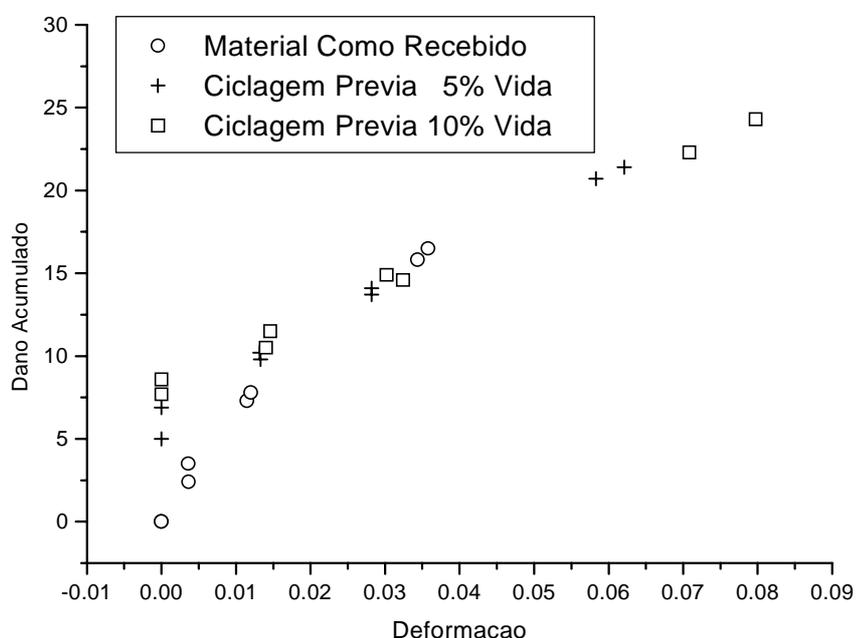


Figura 7 – Evolução do dano para as diferentes condições analisadas

### *Agradecimentos*

Os autores agradecem ao AMR/IAE/CTA pela utilização do MEV e dos transdutores de ultra-som.

### **REFERÊNCIAS**

- Bairstow, L., 1910, The Elastic Limits of Iron and Steel under Cyclical Variations of Stress. Phil. Trans. Roy. Soc., A210, p.35-55.
- Dieter, G. E., 1976, Mechanical Metallurgy, McGraw-Hill, New York, 774p.
- Farthing Ma, T. W., 1977, Introducing a New Material - The Story of Titanium. Proc. Instn Mech Engrs, V 191, p.59-73.

- Froes, F.H., 1997, The Titanium Market: Maturing after 40 Years of Instability. Journal of Metals, p. 34.
- Kachanov, L. M., 1986, Introduction to Continuum Damage Mechanics, Martinus Nijhoff, Dordrecht, 135p.
- Klesnil, M., Lukás, P., 1992, Fatigue of Metallic Materials, Elsevier, Amsterdam, 270p.
- Lemaitre, J., 1992, A Course on Damage Mechanics, Springer-Verlag, Berlin, 228p.
- Silva, E. M. R., 1998, Investigação da Acumulação de Dano por Fadiga Cíclica em Titânio, dissertação (mestrado em engenharia de materiais), FAENQUIL, Lorena, 103p.

## **SOME ASPECTS OF MECHANICAL BEHAVIOUR OF CYCLICALLY-LOADED GRADE II TITANIUM**

***Abstract.** Cyclic loading leads to changes in metals structure, which reflect in their mechanical properties. The lifetime prediction of mechanical components can be improved by the correlation of the material properties, evaluated by means of non destructive testing, to a damage parameter related to the occurred degradation. The aim of this work is to evaluate the mechanical behaviour of grade II titanium sheet samples cyclically loaded to some portions of total fatigue lifetime. Moreover, some elastic modulus measurements are made by means of ultrasonics technique. The results are discussed in terms of the possibility of modelling the changes in mechanical properties as function of the applied loading, as well as the use of non destructive techniques in estimations of residual life.*

***Keywords:** mechanical behaviour, fatigue, titanium, damage accumulation*