

# FADIGA DE BAIXO-CICLO EM SUPERLIGA DE NÍQUEL (WASPALOY)

Maria da Conceição Barbosa Vieira Soares (1)  
Arnaldo Homobono Paes de Andrade (2)

## RESUMO

Este trabalho investiga o efeito do processo de jateamento por partículas metálicas na vida-fadiga de uma superliga de níquel (Waspaloy), utilizada em turbinas a disco na indústria aeronáutica. Experimentos de fadiga de baixo ciclo sob condições de controle de deslocamento e submetidos a esforço de dobramento em 4 pontos foram realizados tanto em corpos de prova jateados com naqueles que não sofreram jateamento.

Os resultados demonstram que o processo de jateamento aumenta a resistência à fadiga da liga e que tal melhora está associada à tensão residual compressiva na superfície do material, induzida pelo processo de jateamento. Uma avaliação microestrutural por microscopia eletrônica de varredura foi efetuada para auxiliar na determinação dos micromecanismos de fratura.

Palavras chave: Superligas, Fadiga, Microestrutura

---

Trabalho a ser apresentado ao 51º Congresso Anual da ABM, Porto Alegre, R.S., 5 a 9 de agosto de 1996

(1) Doutoranda pelo Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear da Universidade de São Paulo (USP); Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela COPPE (UFRJ); Engenheira Metalúrgica pela UFRJ; Pesquisadora do IPEN-CNEN/SP; Membro da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais (ABM)

(2) Sócio da ABM; Doutor em Engenharia de Materiais pelo MIT (USA); Mestre em Física da Matéria Condensada (IF-USP); Bacharel em Física (IF-USP) Pesquisador do IPEN-CNEN/SP; Professor da CPG IPEN-USP

## 1. Introdução

O termo superliga aplica-se às ligas à base de ferro, de níquel e de cobalto, endurecidas por solução sólida e por precipitação, utilizadas geralmente a altas temperaturas, na faixa de 538°C a 1093°C, onde as resistências mecânica e à oxidação são importantes.

As principais aplicações dessas ligas encontram-se sobretudo, no campo aeroespacial, onde são utilizadas como parte integrante de componentes de turbinas para aviação, na indústria nuclear e na indústria petroquímica.

As superligas à base de níquel contêm mais de 50% de Ni, de 10 a 25% de cromo e quantidade menores de outros elementos como Co, Mo, Al, Ti, B, Zr e Fe. Essas superligas consistem de matriz austenítica CFC ( $\gamma$ ) endurecidas por compostos intermetálicos ordenados  $\gamma'$  do tipo  $Ni_3$  (Al,Ti) e por carbetos na forma MC,  $M_{23}C_6$ ,  $M_6C$ ,  $M_7C_3$  (raro).

As principais variáveis microestruturais das superligas de níquel, responsáveis pelas propriedades mecânicas são: a) quantidade de precipitados e sua morfologia b) tamanho e formato dos grãos c) distribuição de carbetos.

O endurecimento através da precipitação de intermetálicos  $\gamma'$  da forma  $Ni_3$  (Al,Ti) fornece resistência mecânica a temperaturas elevadas. A resistência das superligas de níquel depende da fração volumétrica de  $\gamma'$  ( $V_f$ ) e, portanto, do aumento da adição de elementos endurecedores como Al, Ti e do aumento da razão Al/Ti <sup>(1)</sup>.

Em geral, o aumento da fração volumétrica de  $\gamma'$  implica no aumento da resistência mecânica enquanto que a ductilidade diminui. Quanto mais finos forem os precipitados  $\gamma'$  maior será a resistência mecânica da liga a temperaturas mais baixas onde a tensão de escoamento e de resistência são aspectos críticos. Nestas condições, a movimentação de discordâncias envolve corte de precipitados.

Na prática, é preferível ter uma precipitação bimodal de  $\gamma'$  com precipitados finos e grosseiros, uma vez que, para a resistência à fluência, os precipitados  $\gamma'$  de tamanho moderado da ordem de 0,25 a 0,5  $\mu m$ , são preferidos aos muitos finos ou grosseiros e tendem a dispersar o deslizamento de discordâncias e reduz a sensibilidade ao entalhe.

A resistência à fadiga é influenciada pelo tamanho de grão. No caso de fadiga de alto ciclo, no qual a resistência à iniciação de trinca é avaliada, quanto mais fino o grão maior a resistência à iniciação de trinca de fadiga.

No entanto, a resistência à propagação de trincas em condições de fadiga de baixo ciclo a altas temperaturas e a resistência à fluência aumentam com o aumento do tamanho de grão.

Portanto, o tamanho de grão ótimo parece estar em um tamanho intermediário de grão capaz de satisfazer condições tão antagônicas. A superliga de níquel Waspaloy, para utilização em turbinas a disco, quando produzida pelo processo de metalurgia do pó, costumam ter tamanho de grão da ordem de 6  $\mu m$  e, quando produzidas através de trabalho mecânico de forjamento, tamanho de grão da ordem de 45  $\mu m$  a 90  $\mu m$  <sup>(2)</sup>.

Os carbetos são essenciais em contorno de grão de superligas policristalinas e vários são os tipos de carbetos possíveis, como já citado. Os carbetos são normalmente formados por reações sequenciais de MC para  $M_{23}C_6$  e os mais importantes formadores de carboeto são: Cr ( $M_{23}C_6$ ,  $M_7C_3$ ); Ti, Ta, Nb, Hf (MC) e Mo, W ( $M_6C$ )

A precipitação de carbetos de forma discreta e globular em contorno de grão aumenta a resistência à ruptura por fluência prevenindo o deslizamento de contorno de grão. Por outro lado, a precipitação de forma contínua em contorno de grão ou precipitação celular deve ser evitada por degradar a resistência ao impacto, diminuir a tensão de ruptura e a ductilidade.

Assim a otimização da fração volumétrica de  $\gamma'$  e sua morfologia, em conjunto com a dispersão discreta e globular de carbeto em contorno de grão, bem como o tamanho de grão, tornam-se fatores importantes a serem obtidos através do processamento mecânico e térmico dessas ligas visando ótima resistência à fadiga, à tração e à fluência.

### 1.1. Superliga de níquel - Waspaloy

A super liga de níquel Waspaloy é utilizada amplamente na indústria aeroespacial em turbinas a disco, em substituição as antigas turbinas de palheta <sup>(3)</sup>. A temperatura de operação das novas turbinas foi reduzida e o desempenho do componente ficou limitada à resistência à tração, ductilidade e resistência ao entalhe, enquanto que a resistência à fluência deixou de ter importância.

Waspaloy é uma liga forjada a uma temperatura ligeiramente abaixo da temperatura de solubilização de  $\gamma'$  Ni<sub>3</sub> (Al,Ti) e inferior à temperatura de recristalização em que não ocorre crescimento de grão. Essa temperatura também é muito baixa para se ter a completa dissolução de todos os carbeto e alguma deformação residual deve ser mantida após a deformação plástica. Esta temperatura de forjamento está em torno de 1120°C.

Após trabalho de forjamento controlado, a liga é solubilizada em torno de (1010°C - 1021°C) e submetida a envelhecimentos intermediário e final, ocorrendo três gerações de precipitação  $\gamma'$  na microestrutura <sup>(3)</sup>:

- a) superenvelhecimento em temperatura de solubilização (3000 - 5000Å em diâmetro);
- b) precipitação de  $\gamma'$  junto com a de carbeto a 843°C, com  $\gamma'$  da ordem de 600Å; e
- c) precipitação final de  $\gamma'$  a 760°C com  $\gamma'$  da ordem de 100Å.

### 1.2. Processo de jateamento por partículas

Com vista a melhorar a resistência à fadiga das turbinas a disco fabricadas com Waspaloy, esta superliga é submetida, após forjamento e tratamento térmico, ao processo de jateamento por partículas.

O jateamento é um processo de encruamento a frio da superfície de um componente, através de um jato dirigido de partículas esféricas duras de tamanho e forma uniforme sob condições controladas. O impacto múltiplo destas partículas na superfície do material promove deformação plástica localizada em uma fina camada do componente <sup>(4)</sup>.

O resultado deste processo é a formação de uma tensão residual compressiva na superfície do componente devido à natureza trativa da deformação, o encruamento da superfície do material e mudanças na rugosidade e geometria do mesmo.

A tensão residual compressiva na superfície reduz efetivamente as tensões de serviço aplicadas na superfície do material, onde geralmente ocorre iniciação de trinca por fadiga, além de retardar o crescimento de trinca ou até mesmo promover a sua parada dependendo das condições de carregamento e tamanho de trinca.

A figura 1 apresenta o perfil típico da tensão residual obtida pelo processo de jateamento. Nota-se que a tensão residual compressiva apresenta-se contida em uma camada superficial estreita e a porção trativa da tensão residual, de mais baixo valor, estende-se sobre uma região maior garantindo, assim, as condições de equilíbrio necessárias à tensão residual. Outro aspecto a ser notado é o gradiente de tensão abrupto presente na transição entre as regiões compressivas e trativas.

A deformação plástica promovida pelo jateamento encrua a superfície do material, aumentando a tensão de escoamento na superfície e a vida em fadiga <sup>(5)</sup>. Por outro lado o processo de jateamento geralmente gera rugosidade na superfície lisa do componente pela formação de pequenas cavidades em toda a superfície.

O controle do processo de jateamento por partículas depende das propriedades do jato de partículas. Portanto, a magnitude da tensão residual compressiva e sua profundidade são influenciadas por diversos parâmetros de processo e características da peça de trabalho tais como:

- tipo e densidade ( $\rho$ ) do jato;
- tamanho ( $d$ ), forma e distribuição de partículas;
- velocidade do jato ( $v$ );
- dureza do jato  $H(s)$ ;
- angulo de impacto do jato;
- tempo de exposição da peça; e
- dureza da peça  $H(w)$  e encruamento do material.

A figura 2 apresenta a influência dos parâmetros do processo de jateamento de partículas na distribuição de tensão residual. A profundidade e magnitude da tensão residual aumenta com o aumento de  $v$ ,  $d$ ,  $t$ ,  $\rho$  e  $H(s)$ . Com o aumento da dureza da peça de trabalho a magnitude da tensão residual também é aumentada e diminui a profundidade da camada de tensão residual compressiva.

## 2. Resultados e discussão

Neste trabalho, a superliga de níquel Waspaloy é analisada, sob o ponto de vista microestrutural e de resistência à fadiga na condição simplesmente forjada e na condição forjada e jateada com intensidade de jateamento de 7 Almen e 100% de cobertura.

A tabela 1 apresenta a composição química em peso da superliga, onde o níquel, principal elemento endurecedor por solução sólida, é responsável pela estabilização da austenita e o cromo age como formador de carbetos, promovendo a resistência à oxidação e a corrosão da liga a quente e o endurecimento por solução sólida.

O cobalto também atua como elemento endurecedor por solução sólida da liga enquanto que o molibdênio, além de endurecedor por solução sólida, é também formador de carbetos. O alumínio e titânio são formadores de precipitados  $Ni_3(Al,Ti)$ .

A tabela 2 apresenta as propriedades mecânicas e cristalográficas do material.

A figura 3 apresenta a micrografia da superliga Waspaloy em que se observa, além da matriz de grãos austeníticos  $\gamma$ , uma trinca secundária de fadiga de natureza predominantemente intergranular. A análise por metalografia quantitativa determinou um tamanho de grão médio da ordem de  $35\mu m$  tanto para a amostra jateada como para a não jateada.

Medidas de rugosidade realizadas para a amostra jateada resultou em uma rugosidade média de  $4,2 \pm 0,3 \mu m$  enquanto que para amostra não jateada uma rugosidade média de  $3,51 \pm 0,06 \mu m$ .

A determinação de microdureza Vickers, utilizando indentador com carga de 300g, foi efetuada ao longo da espessura de 6mm para determinar o efeito de encruamento plástico produzido pelo jateamento. A figura 4 apresenta o perfil de microdureza da amostra não jateada com resultado médio de  $417 \pm 20 HV$ .

A figura 5 apresenta o perfil de microdureza da amostra jateada com microdureza média de  $429 \pm 15$  HV ao longo de toda a espessura do material. Um maior número de medidas de microdureza realizadas próximas à superfície, e ao longo dos primeiros 2mm de espessura da amostra, apresentou resultado médio de microdureza de  $431 \pm 15$  HV. A amostra jateada apresentou uma dureza média na superfície 3% superior a amostra não jateada, não representando, portanto, em uma variação significativa nos resultados.

A curva S-N é um dos parâmetros que ajuda a predizer a vida em fadiga. Os experimentos de fadiga em baixo ciclo da figura 6 foram realizados em condição de deslocamento constante a uma frequência de 0,7 Hz com carregamento em quatro pontos, utilizando corpos de prova de Waspaloy com dimensões de 200mm (comprimento) x 300mm (largura) x 6mm (espessura) nas condições jateadas e não jateadas.

O processo de jateamento permitiu um aumento da vida em fadiga de até 50% em relação aos corpos de prova não jateados. Esta melhora na vida em fadiga e do atraso na iniciação de trinca pode ser atribuído ao encruamento da superfície do material e a tensão residual compressiva produzida pelo jateamento. Quanto à maior variação nos resultados encontrados nos corpos de prova jateados, esta pode ser atribuída à maior rugosidade e maior variação da mesma nestas amostras.

Estudo por microscopia eletrônica de varredura, realizada na superfície de fratura dos corpos de prova submetidos à fadiga de baixo ciclo, demonstrou que a propagação da trinca de fadiga se deu predominantemente, por mecanismo de fratura intergranular, tanto nas amostras jateadas como nas amostras não jateadas para todos os níveis de deformação. Tal propagação pode estar associada a uma fragilização em contorno de grão, provavelmente associada por partículas nos contornos ou na existência de um filme de carbetos em contorno. Estas hipóteses deverão ser investigadas em futuro trabalho, através da análise dos precipitados por réplica em microscopia eletrônica de transmissão.

As figuras 7-10 apresentam fractografias da amostra não jateada submetida a 1% de deformação plástica sob condições de fadiga de baixo ciclo. Na figura 7 observa-se o modo de fratura intergranular e a presença de estrias de fadiga. A figura 8 apresenta a região de transição de fadiga para a sobrecarga, em que se nota a natureza intergranular da fratura em ambas as regiões. A figura 9 mostra detalhe de dois grãos expostos por fratura intergranular. A figura 10 apresenta aspecto isolado de ocorrência de clivagem na superfície de fratura por fadiga.

As figuras 11-13 apresentam fractografia da amostra jateada submetida a 1% de deformação plástica. Nota-se, na figura 11, a presença de microtrincas e de estrias. A figura 12 mostra aspecto geral de fratura intergranular e várias microtrincas. A figura 13 apresenta detalhe de estrias, microcavidades e deformação plástica produzida por fadiga.

### 3. Conclusões

O processo de jateamento por partículas demonstrou ser efetivo na melhora da resistência à fadiga da liga Waspaloy.

A melhor resistência à fadiga da liga jateada pode ser atribuída à deformação plástica superficial e à tensão residual compressiva introduzida na superfície do material pelo processo de jateamento de partículas. Por sua vez, a maior rugosidade da liga jateada constitui-se em um fator contrário ao bom desempenho em fadiga.

O mecanismo de fratura e propagação de trinca na superliga é predominantemente intergranular, tanto no material jateado como na liga não jateada.

O ensaio de microdureza não foi capaz de detectar diferenças significativas na dureza proveniente do encruamento plástico da superfície jateada em relação à microdureza da liga não jateada.

## 5. Referências Bibliográficas

- (1) Metals Handbook- Metallography and microstructure, vol 9, ASM, 1988, 9 Ed.
- (2) Donachie, M. J. - Introduction to superalloys - em Superalloys source book, p.3-19 ASM, 1984.
- (3) Wilkinson, N. A. - Technological considerations in forging of superalloys rotor parts - em Superalloys source book, p.234-247 ASM, 1984.
- (4) Almen, J. O. ; Black, P. H. - Residual Stress and Fatigue in Metals . Mc Graw Hill Book Co. Inc, N. York, 1963.
- (5) Shot peening application catalogue, Metal Improvement Company Inc, 7th Ed.

## LOW-CYCLE FATIGUE OF A NICKEL SUPERALLOY (WASPALLOY)

### ABSTRACT

This work is related to the effect of metallic shot peening in the fatigue life of a nickel superalloy (Waspaloy), used in turbine disks in the aerospace industry. Low-cycle fatigue experiments were performed, under displacement control conditions and 4-point bending stress, both in peened and non-peened specimens.

The results show that the peening process improves the fatigue resistance of the alloy and this improvement is associated to the compressive residual stress in the material surface, induced by the peening process. An microstructural evaluation by scanning electron microscopy was done to help in the determination of the fracture micromechanisms.

Key-Words: Superalloys, Fatigue, Microstructure

**Tabela 1-** Composição química em % peso da superliga Waspaloy

Elemento	Ni	C	Cr	Co	Al	Mo	Ti	Zr	B
Comp.Média	bal	0,08	19,50	13,50	1,3	4,30	3,00	0,06	0,006

**Tabela 2-** Propriedades mecânicas e cristalografia da superliga Waspaloy

Material	Elemento Base	E (GPa)	$\sigma_y$ (Mpa)	Estrutura
Waspaloy	Ni	210	1000	CFC

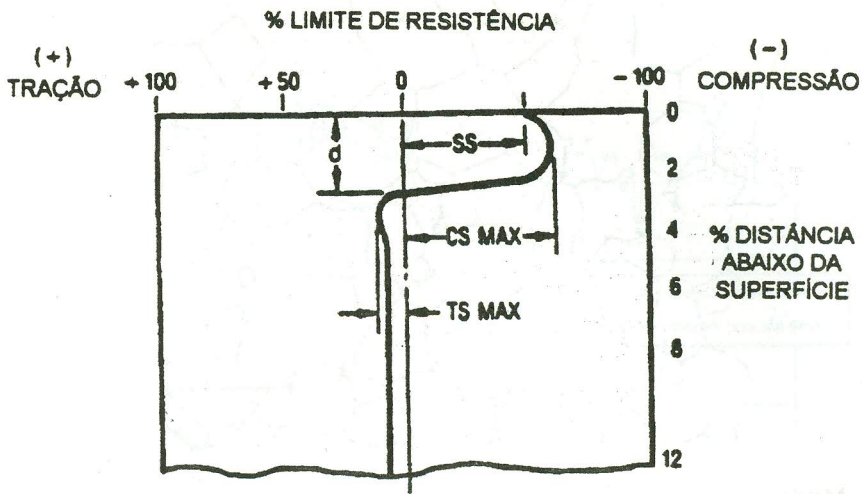


Figura 1- Perfil de tensão residual em uma placa jateada.

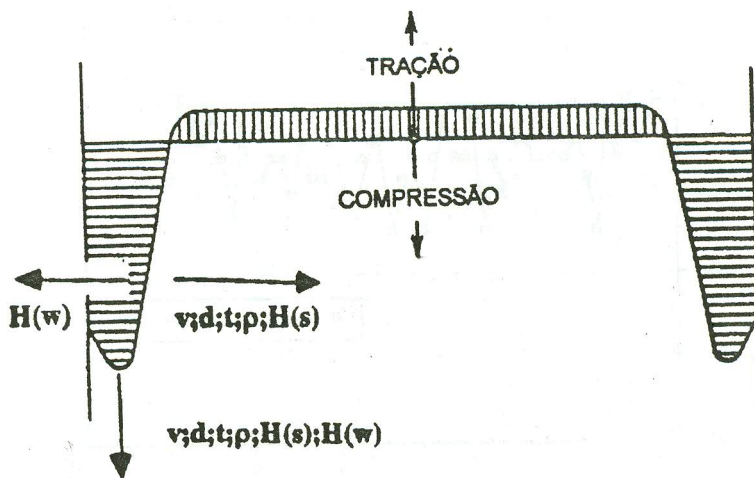


Figura 2- Influência dos parâmetros de processo nas características de jateamento.

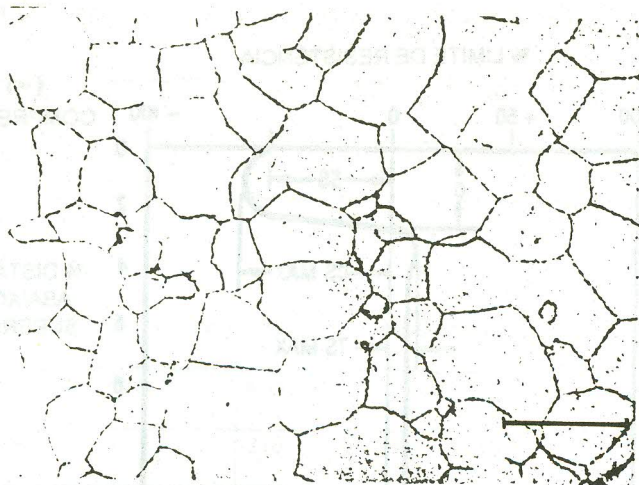


Figura 3- Matriz austenítica de grãos  $\gamma$ , tamanho de grão  $35\mu\text{m}$ . Reagente: 40% HCl, 20%  $\text{HNO}_3$ , 40%  $\text{H}_2\text{O}$  (aumento: 100x).

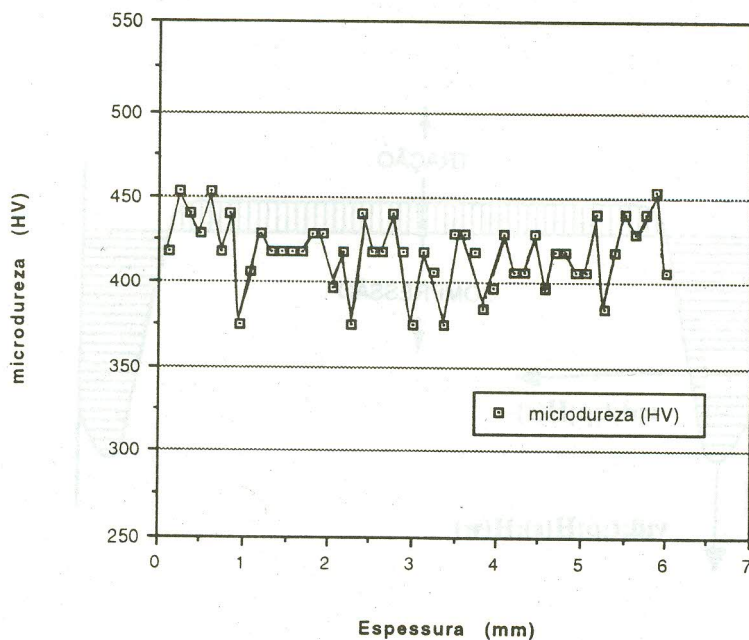


Figura 4- Perfil de microdureza de liga de Waspaloy não jateada.

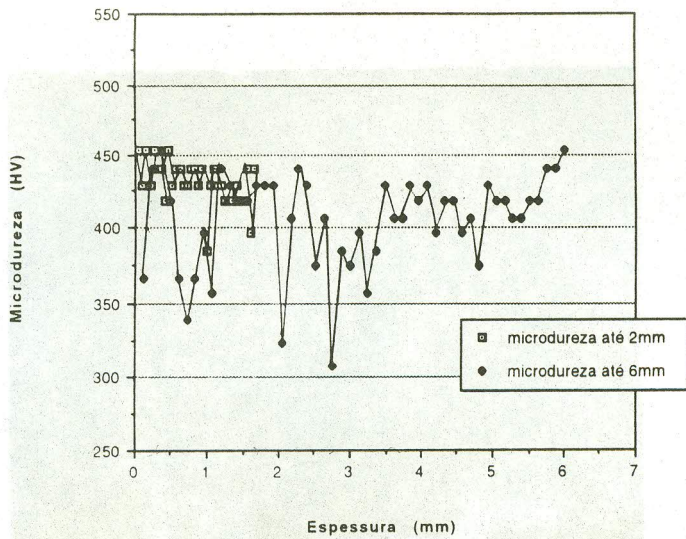


Figura 5- Perfil de microdureza da liga de Waspaloy (7A) jateada.

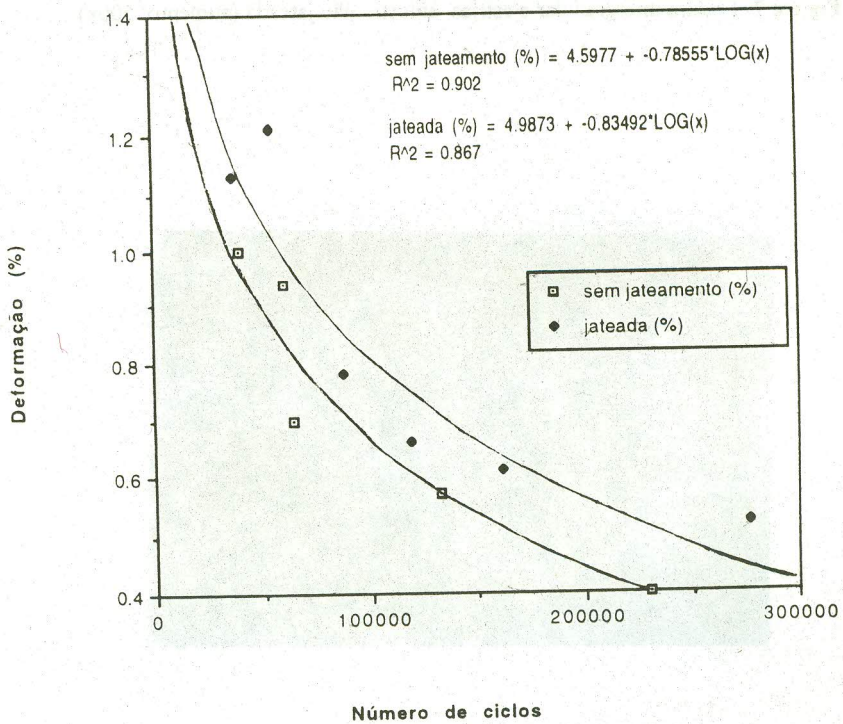
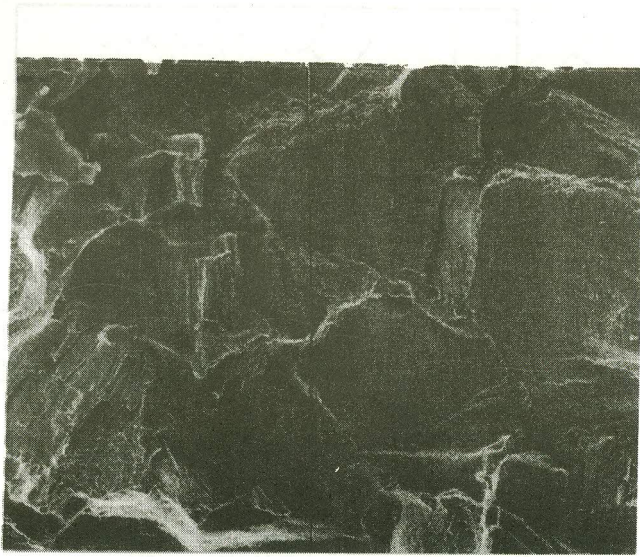
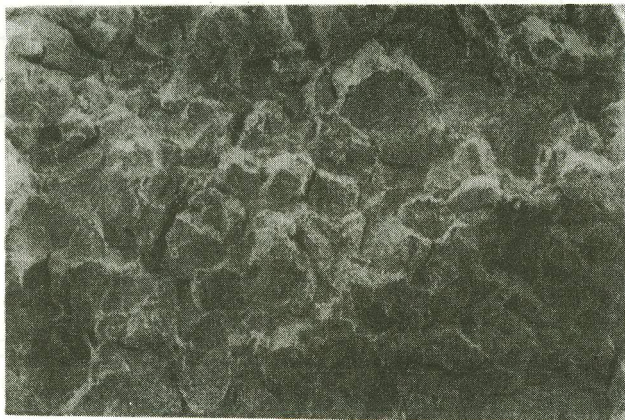


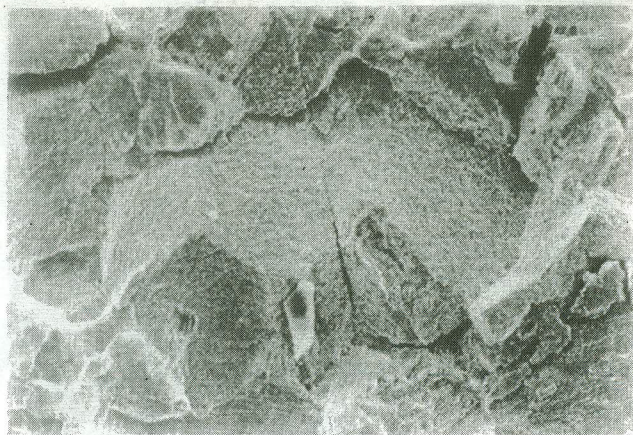
Figura 6- Curva de fadiga de baixo ciclo.



**Figura 7-** Fratura intergranular e estrias: amostra não jateada (aumento: 500x)



**Figura 8-** Região de transição de fadiga para sobrecarga com fratura intergranular: amostra não jateada (aumento: 125x).



**Figura 9-** Fratura intergranular: amostra não jateada (aumento: 400x).



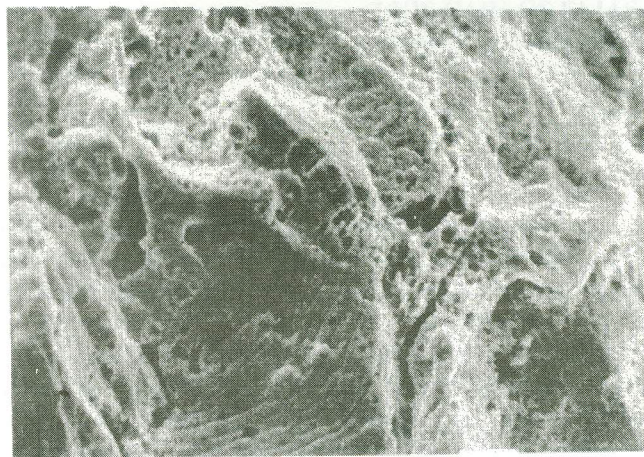
**Figura 10-** Aspecto de clivagem: amostra não jateada (aumento 500x).



**Figura 11-** Fratura intergranular com microtrincas e estrias: amostra jateada (aumento: 350x).



**Figura 12-** Fratura intergranular e presença de microtrincas: amostra jateada (aumento: 200x)



**Figura 13-** Detalhe de estria e microcavidades: amostra jateada (aumento 1000x).