

UMA DISCUSSÃO A RESPEITO DA NUCLEAÇÃO DE TRINCAS DE FADIGA EM ARAME DE AÇO PARA MOLAS NITRETADAS E NÃO NITRETADAS

João Carmo Vendramim ¹
Jan Vatauvuk ²

Resumo

Há muito se sabe dos efeitos benéficos da aplicação do processo de nitretação na superfície de componentes mecânicos ferrosos submetidos a solicitação cíclica. De forma freqüente se atribui à melhora da resistência à fadiga às tensões residuais de compressão na superfície decorrentes do processo de nitretação.

No presente trabalho se estabelece uma comparação entre arames nitretados com aqueles não submetidos a este processo no que diz respeito à resistência à fadiga, com especial atenção aos mecanismos de nucleação destas trincas. Os resultados são discutidos levando-se em conta a microestrutura, o carregamento mecânico e as tensões residuais desenvolvidas pelo processo de nitretação.

Palavras Chave: nitretação; fadiga; tensão residual

(1) João Carmo Vendramim – Eng.MSc. Combustol Industria e Comércio Ltda

(2) Jan Vatauvuk–Prof.Eng.Dr.Instituto Mackenzie – Depto. Engenharia de Materiais

Introdução

A resistência à fadiga dos materiais utilizados na fabricação de componentes para o setor, por exemplo, automotivo recebe especial atenção, pois, em geral, as peças podem estar submetidas a carregamentos cíclicos ao longo de sua vida. Pode-se citar o caso, por exemplo, das molas de válvulas de motores de combustão interna, que se encontram diretamente associadas aos ciclos de combustão cuja frequência tem aumentado na medida em que os motores mais modernos atingem maiores rotações de funcionamento. A presença de inclusões nos aços com os quais são fabricados estes componentes tem sofrido reduções, possibilitando atingir o melhor desempenho, em termos de fadiga/material. Resta, no entanto, uma possibilidade de incremento adicional desta propriedade que seria a realização do tratamento termoquímico de nitretação, processo que consiste do enriquecimento superficial com nitrogênio da liga ferrosa utilizada na fabricação de molas e que, para este caso, deve ser conduzida em temperaturas inferiores à de revenimento.

A fadiga em alto ciclo (“high cycle fatigue”) é controlada por tensões cíclicas, tensões nominais inferiores ao limite de escoamento e com “vida” (número de ciclos até a fratura), por definição, superior a 10^4 ciclos [1]. A curva S (tensão)-N(número de ciclos) resultante é uma curva da tensão em função do número de ciclos até a fratura e o Limite de Fadiga é o valor limite de tensão abaixo da qual, teoricamente, não ocorre a falha por fadiga. O limite de fadiga, assim como a vida em fadiga (número de ciclos até a fratura) é grandeza estatística e a ocorrência de falha é probabilística. A distribuição de tensões real devida ao carregamento de uma mola, por exemplo, é uma combinação de tensões residuais e daquelas impostas à seção resistente pela solicitação mecânica, conforme ilustra a Figura 1. Quando a fratura tem início abaixo da superfície devido endurecimento desta pela nitretação, a carga de tensão é menor que a da superfície (Figura 1). A fratura por fadiga ocorre em três etapas distintas [1,2]:

- Nucleação de uma trinca
- Propagação estável da trinca até um comprimento crítico; e
- Fratura (separação) final do arame. Etapa que ocorre bruscamente.

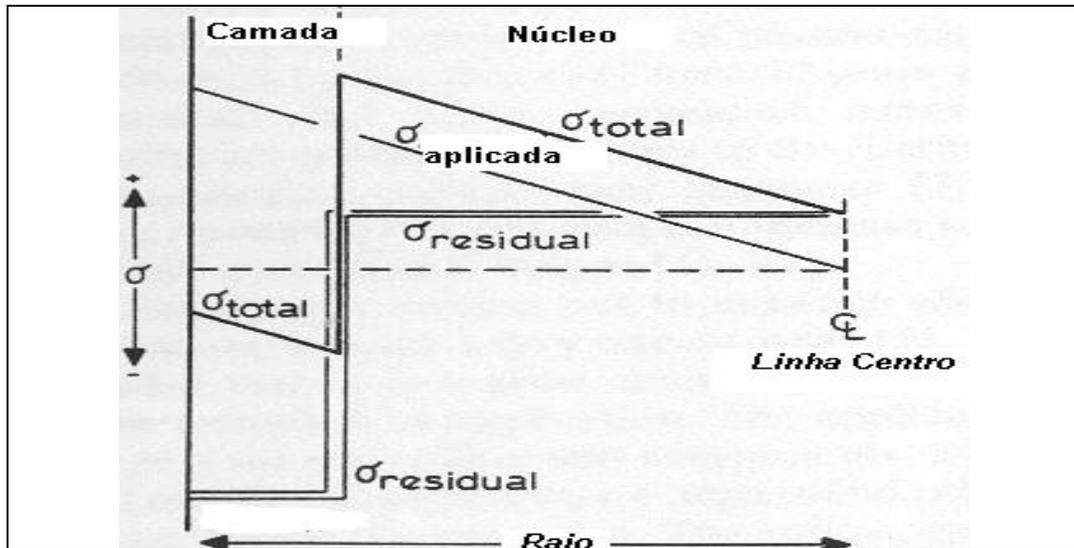


Figura 1 – Distribuição de tensões numa mola [2]

O componente automotivo como o citado acima – mola de válvula, por exemplo – pode apresentar fratura por fadiga cujo início da trinca pode ocorrer em três situações distintas, em termos de nucleação:

- Na superfície
- Na interface camada de difusão e núcleo, como ilustra a Figura 1
- Em uma inclusão, como ilustra a Figura 2

A Figura 2 [3] ilustra a nucleação de trinca por fadiga em uma inclusão que desenvolve uma geometria típica denominada “olho de peixe”. A trinca pode nuclear numa inclusão dependendo da posição relativa desta na seção transversal da peça. Nesse caso, a trinca cresce radialmente, propagando-se lentamente (Estágio II da Fadiga) [3].

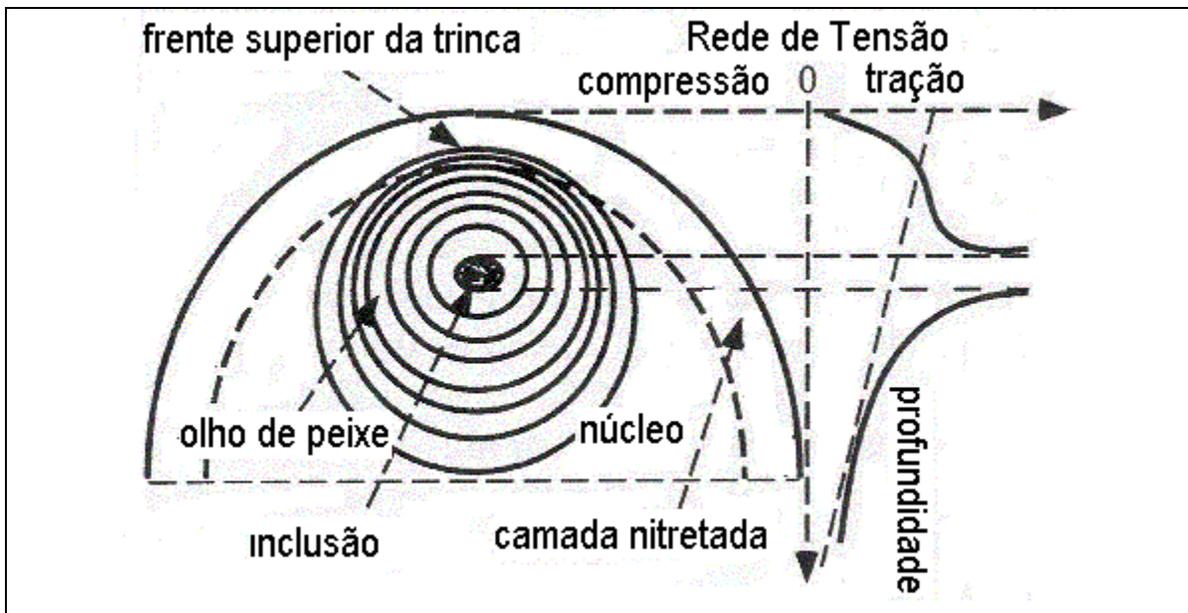


Figura 2 – Representação esquemática da nucleação e crescimento da trinca em uma inclusão – “olho de peixe” [4].

A modificação da superfície do arame por adsorção e difusão de nitrogênio pode ser descrita como uma região superficial contendo duas camadas, uma, freqüentemente denominada de “camada branca” composta, exclusivamente, por nitretos – epsilon e gama linha – ou apenas gama linha e, logo abaixo desta, uma camada denominada de “difusão”, constituída por uma matriz ferrosa incluindo nitrogênio em solução sólida e nitretos precipitados, contendo um teor médio de nitrogênio inferior para este elemento em relação a camada branca.

Na medida em que se aumenta o potencial de nitrogênio, oferecendo nitrogênio acima do limite de solubilidade do nitrogênio da matriz, o primeiro nitreto a se formar na camada branca é o nitreto denominado gama linha - γ' - de estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC) e composição Fe_4N , mantendo-se estável até o teor de 6,1% de N, não dissolvendo carbono. Acima de 6,1%, ocorre a formação do nitreto epsilon - ϵ - de estrutura hexagonal compacta e composição $Fe_{2,3}N$, com, ou não, substituição parcial do nitrogênio pelo carbono, caso presente na composição do meio nitretante ou na composição química do aço, podendo dissolver até 9,0% de N [5]. Ao processo de nitretação atribui-se, em geral [6]:

- Elevação da dureza superficial
- Aumento da resistência ao desgaste
- Aumento da resistência à corrosão
- Elevação da resistência à fadiga de alto ciclo

Este trabalho estabelece uma comparação entre arames, de composição química mostrada na Tabela 1, nitretados com aqueles não submetidos a este processo no que diz respeito à resistência à fadiga, com especial atenção aos mecanismos de nucleação destas trincas. Os resultados são discutidos levando-se em conta a microestrutura, o carregamento mecânico e as tensões residuais desenvolvidas pelo processo de nitretação.

Tabela 1 – Composição química do arame CrSiV, % em peso

C	Mn	Si	Cr	V	P	S	Cu
0,60-0,70	0,55-0,85	0,15-0,30	0,40-0,60	0,12-0,20	0,025mx	0,020mx	0,060mx

Técnica Experimental

O arame da liga CrSiV considerado neste trabalho é de fabricação Aços Villares, obtido por trefilação, com operação final de acabamento (“shaving”) até a bitola final de 4,00mm e submetido a um tratamento térmico em forno contínuo para se adequação das propriedades mecânicas, sendo a etapa do revenimento executada em banho de chumbo à temperatura de 450°C, aproximadamente

A nitretação a gás foi executada pela empresa Combustol, em forno tipo “poço” de dimensões 800 x 1500 mm, utilizando o processo Nitreg® que faz o controle automático do potencial de nitrogênio. A nitretação foi conduzida em temperatura abaixo da temperatura de revenimento e por um tempo suficiente para produzir camadas nitretadas com difusão da ordem de 0,080 mm e camada de compostos, ou camada branca, inferior a 0,002 mm. A inspeção da microestrutura de tempera e revenimento por microscopia óptica mostrou

martensita revenida fina e sem variação da morfologia antes e após a execução da nitretação.

A Figura 3 é uma representação esquemática do equipamento utilizado para execução do ensaio de fadiga por flexão-rotativa – “Nakamura” - desenvolvido pelos produtores de arames para a indústria fabricante de molas. O ensaio é realizado fixando-se uma ponta do arame (A) no mandril (C) do motor (M) e a outra ponta do arame é apenas apoiada (B). A carga utilizada para conduzir o ensaio é aplicada no meio do arame (\oplus). O dispositivo “contagirom” da máquina de teste “Nakamura” paralisa quando ocorre a fratura do arame, terceira etapa da fadiga, registrando a quantidade de ciclos do ensaio. No teste “Nakamura” os arames podem apresentar as seguintes situações de falha no final do ensaio:

- Não romper, significando vida infinita;
- Romper por fadiga; e
- Romper prematuramente, independente da carga devido a defeitos como impurezas (óxidos) e, ou, acabamento superficial.

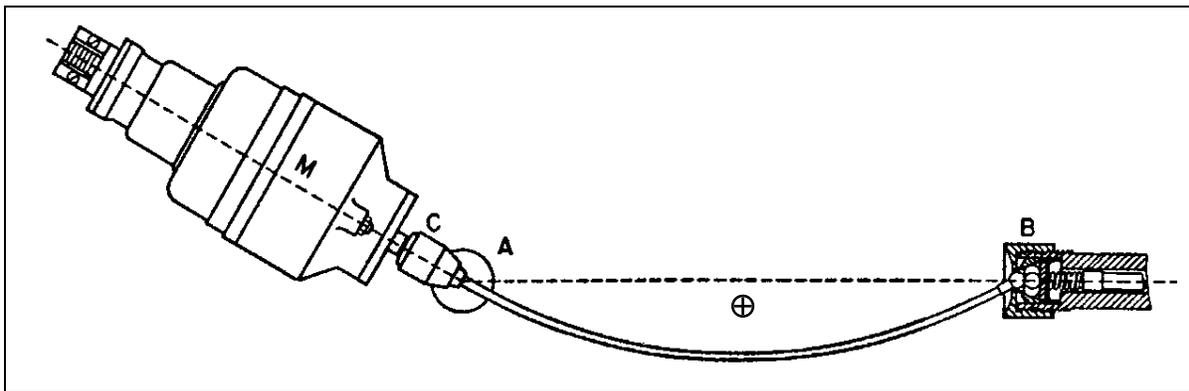


Figura 3 – Representação esquemática do teste de fadiga por flexão-rotativa da máquina “Nakamura” [1].

Os ensaios de fadiga por flexão-rotativa na máquina “Nakamura” foram conduzidos em uma sala refrigerada, temperatura média de 20°C, reduzindo a influência da temperatura desenvolvida durante o ensaio.

Resultados e Discussão

A Figura 4 apresenta a fotomicrografia da seção transversal do arame destacando-se a presença da camada branca, espessura inferior a 0,002mm, e camada de difusão em torno de 0,080mm (medida por ensaio de microdureza Vickers, 200g).



Figura 4 – Micrografia da superfície nitretada do arame, sem camada branca.

Aumento 50x; ataque Nital 3%

A tabela 2 apresenta os resultados de dureza no núcleo do arame antes e após a nitretação.

Tabela 2 – Dureza Rockwell C, carga de 150kg

Tipo de Dureza	Sem nitretação	Com nitretação
HRC	51,7 – 53,0	50,5 – 49,1
HV	540 – 560	520 – 500

A vida infinita no teste Nakamura para o arame apenas na condição de temperado e revenido, sem modificação de superfície, é da ordem de 100 milhões de ciclos na carga limite de 700 N/mm². O arame nitretado apresentou para essa mesma vida infinita uma elevação da carga limite para 900 N/mm².

A Figura 5 apresenta a fotomicrografia da face de fratura do arame, temperado e revenido, sem nitretação submetido ao ensaio Nakamura de flexão rotativa, sinalizando-se os respectivos estágios II e III da fadiga.

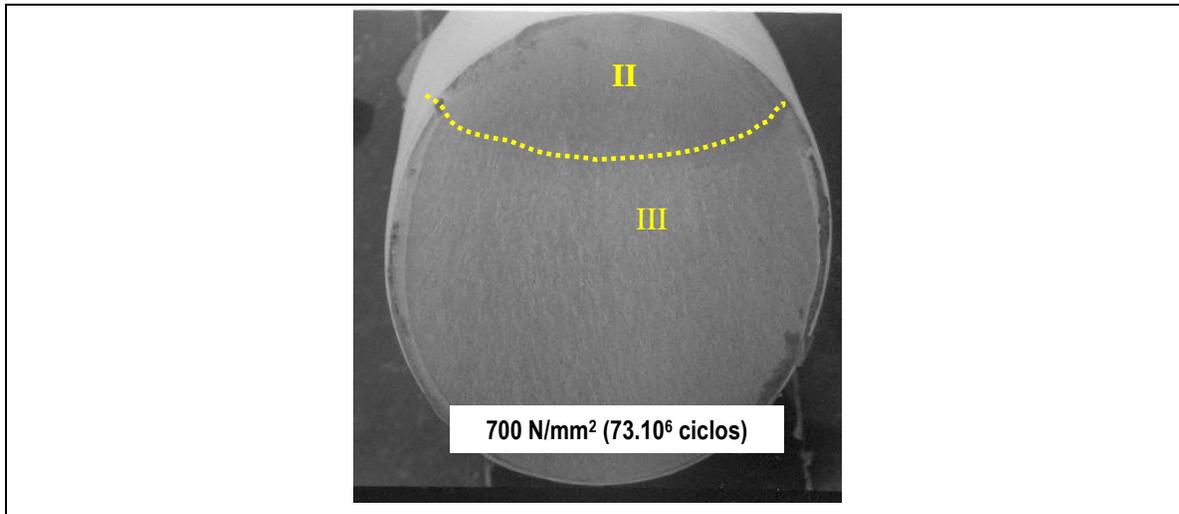


Figura 5 – Micrografia das face de fratura obtida por microscopia eletrônica de varredura. Arame sem nitretação. Aumento 17x.

A Figura 6 apresenta a fotomicrografia dos micromecanismos alveolar (a) e quasi-clivagem (b) presentes nos estágios II e III da face de fratura do arame sem nitretação da Figura 5.

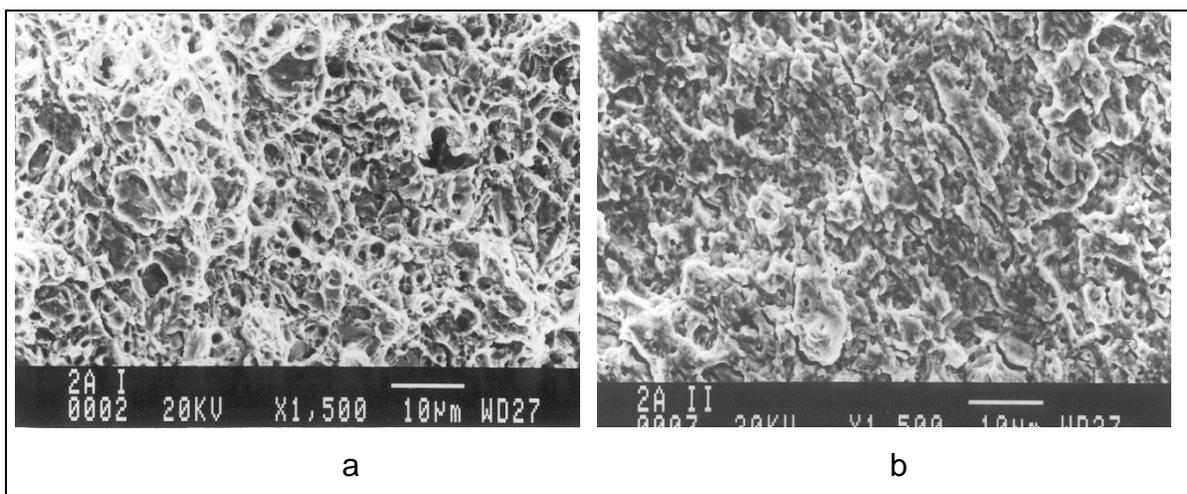


Figura 6 – Micrografia dos micromecanismos de fratura; a) Estágio II; b) Estágio III
Aumento 1.500x

A Figura 7 apresenta a fotomicrografia da face de fratura por fadiga de flexão rotativa do arame nitretado.

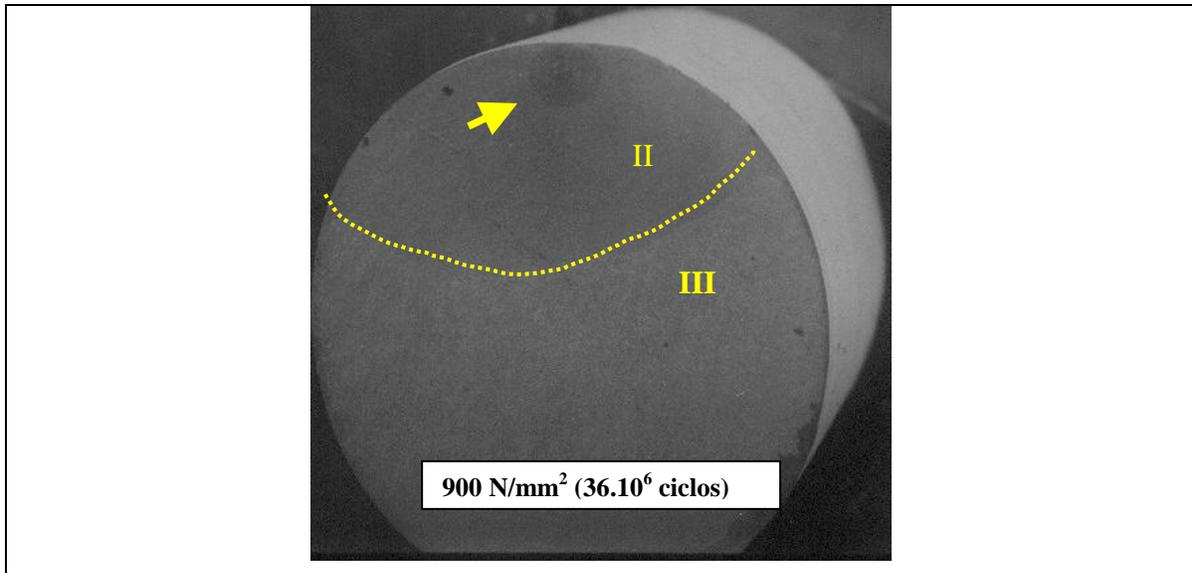


Figura 7 – Fotomicrografia obtida por MEV da face de fratura do arame nitretado indicando (seta) a nucleação de trinca tipo “olho de peixe”. Aumento 17x

A Figura 8 apresenta detalhes da área de propagação radial e lenta da trinca em um uma inclusão. Fratura denominada “olho de peixe”.

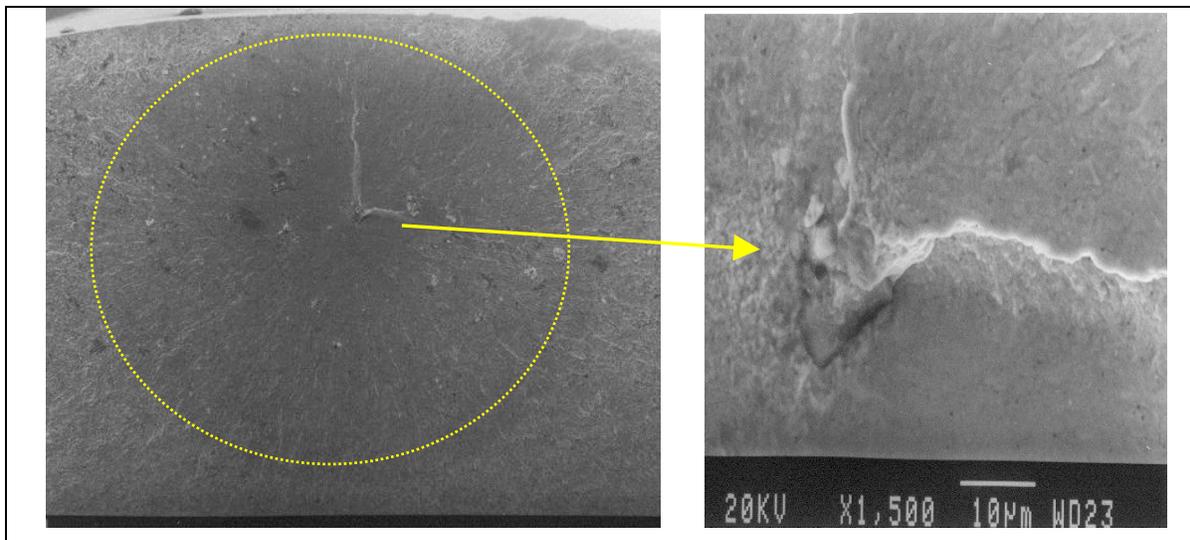


Figura 8 – Micrografia obtida no MEV da face de fratura do arame nitretado na área do “olho de peixe” e detalhe da inclusão. Aumentos de 150 e 1,500x

A inclusão mostrada Figura 8 indicou, na inspeção por EDS (Espectroscopia por Energia Dispersiva), a presença dos elementos químicos, % em peso, Silício 7,16%; Cálcio 5,73%; Magnésio 2,05%; Ferro 82,92% e outros elementos de menor expressão.

A Figura 9 apresenta os micromecanismos de fratura envolvidos no processo de fadiga referentes aos estágios II e III de propagação

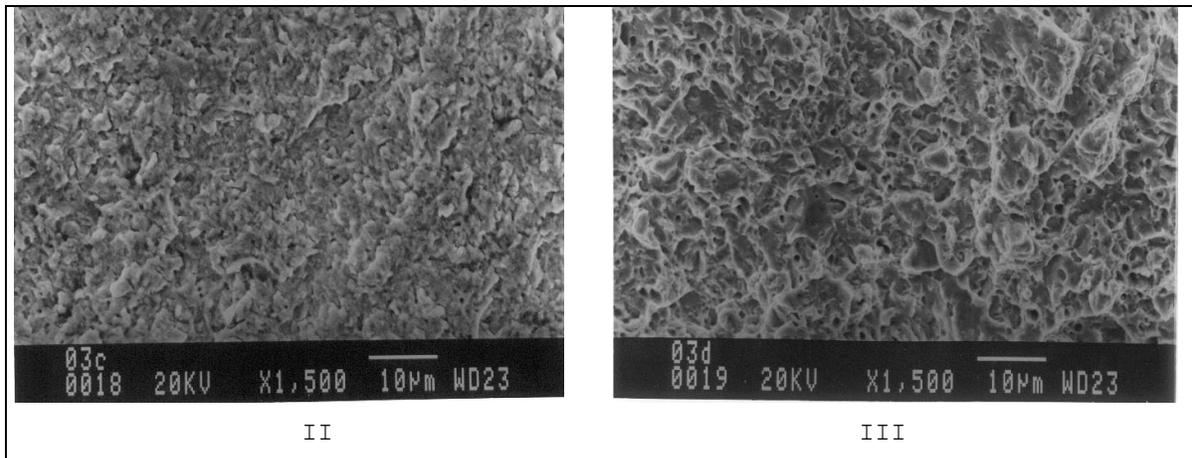


Figura 9 – Fotomicrografia dos micromecanismos de fratura do estágio I e II da fratura da Figura 5.

O exame da figura anterior indica para o estágio II figura 9 à esquerda, sinais de estrias de fadiga de pouca definição, o que pode ser atribuído a estrutura cúbica de corpo centrado associada a elevado grau de defeitos cristalinos além da presença de precipitados oriundos de reações de estado sólido do processo de revenimento do aço. A fratura final (estágio III de fadiga), figura 9 a esquerda apresenta uma propagação de trinca pelo mecanismo de quase clivagem, o que esta de pleno acordo com as observações anteriores, e típico para estruturas ferrosas temperadas e revenidas.

Conclusão

A aplicação do processo de nitretação resultou em uma apreciável elevação da resistência à fadiga de alto ciclo para o aço estudado.

O processo final de fratura obedeceu ao mecanismo de quase clivagem nas observações realizadas neste estudo.

As observações realizadas através da microscopia eletrônica de varredura, indicaram para o estágio II de propagação, ora através de um mecanismo com predominância de fratura plástica (alvéolos), ora exibindo em sua superfície estrias de fadiga pouco definidas.

A nucleação da trinca de fadiga no material nitretado se deu na interface entre material de base e a camada, a partir de inclusão rica em Silício, Cálcio, Magnésio, e principalmente ferro.

Abstract

There is a lot it is known about the beneficial effects of the nitriding process application n the surface of ferrous mechanical components submitted the cyclical solicitation. In a frequent way it is attributed to the improvement of the fatigue resistance to the compression residual tensions in the nitrided surface.

In the present work if it establishes a comparison among nitrided wires with those no submitted to this process in what it concerns the fatigue resistance, with special attention to the cracks mechanisms nucleation. The results are discussed being taken into account the microstructure, the mechanical shipment and the residual tensions developed by the nitriding process.

Referências Bibliográficas

- [1] FORREST, P.G. – Fatigue of metals – Oxford Editora – p.192 – 198 – Ed.197

- [2] JACK, D.H.; WINNIK, S. – Effect of process variables on the fatigue resistance of nitrided steels. In: Heat Treatment, 79. Birmingham, England, may 22-24. pp.169-177 – 1979

- [3] JACK, D.H.; JACK, K.H. Invited review: carbides and nitrides in steel. Materials Science and Engineering, v.11, p.1-27 - 1973.

- [4] De la CRUZ, P.; ODÉN, M.; ERICSSON, T. – Influence of plasma nitriding on fatigue strength and fracture of a B-Mn steel. Materials Science and Engineering, A242; p.181-194 – 1998

- [5] BLOEM, L; VENDRAMIM, JC; VATAVUK, J. Estudo comparativo entre os processos de nitrocarbonetação em banho de sal e por plasma para aplicação em êmbolos. Congresso SAE-Brasil, 2000. Paper series 2000-01-3175 P.

- [6] LILIENTAL, W.K; MALDZINSKI, L.; MORAWSKI, D.C.; TYMOWSKI, G.J. – Potential-Controlled gas nitriding applied to gears – Technical publication by Nitrex Metal, Montreal, Canada – p.1-2 – code TP/PPR/Nshv001- 2001