

COMPORTAMENTO À FADIGA POR “FRETTING” DE UM AÇO INOXIDÁVEL MARTENSÍTICO DIN X 90 NITRETADO POR PLASMA

Pereira, L. E., Spinelli, D.; Bose Filho, W.W

Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística – Escola de
Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo

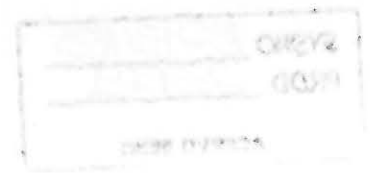
Resumo

Neste trabalho foram determinadas a propriedades de tração, fadiga e fadiga por fretting, do aço DIN X 90 Cr Mo V 18 nitretado por plasma, usado em anéis de pistão. Nos ensaios de fadiga por fretting, os blocos de contato foram usinados a partir de um ferro fundido cinzento perlítico. O material nitretado apresentou pequena diferença nas propriedades de tração em relação ao não nitretado, demonstrando que estas propriedades são controladas pelo substrato. A partir das curvas S-N resultantes destes ensaios, foi obtido o fator de redução de resistência $FRR=1,62$, que o fenômeno de fretting causa na fadiga convencional. Nos ensaios de fadiga por fretting, o pico da força de atrito aumentou com a tensão axial cíclica aplicada, atingindo um valor mínimo de 28 N e máximo de 76 N. A análise fractográfica revelou, em amostras fraturadas sob tração, o trincamento da superfície devido à baixa tenacidade da camada nitretada, além da propagação de trincas por fadiga abaixo da camada nitretada, nos ensaios de fadiga convencional. Os ensaios de fadiga por fretting produziram acumulação de detritos e a formação de trincas secundárias na área de contato de fretting.

Palavras chave: Fadiga, fadiga por fretting, nitretação por plasma, aço inoxidável martensítico, anéis de pistão.

Abstract

In the present work, fretting and plain fatigue properties of plasma nitrided martensitic stainless steel DIN X 90 Cr Mo V 18, used in piston rings, were investigated. The fretting pads were made of pearlitic gray cast iron. The S-N curves generated with and without fretting have given a strength reduction factor $SRF=1.62$, when fretting was applied. In the fretting fatigue, the frictional force increased with axial cyclic stress and reached a minimum of 28 N and maximum of 60 N values. Fractographic observations showed superficial cracking in fractured tensile specimens due to the low toughness of the nitrided case and fatigue crack growth below this layer in plain fatigue specimens. Fretting fatigue tests produced accumulation of debris and the formation of secondary cracks at the contact area.



Keywords: Plasma nitriding, fretting fatigue, nitride steel, piston rings

Introdução

O processo de nitretação tem sido empregado para modificar as superfícies de vários materiais de engenharia visando melhorar suas propriedades mecânicas e metalúrgicas.

Aços inoxidáveis martensíticos são utilizados em componentes que devem apresentar resistência ao desgaste, boa estabilidade térmica e capacidade de amortecer vibrações como em anéis de pistão para motores de combustão interna [1]. Atualmente, estes anéis são nitretados a gás na linha de produção. Recentemente, foi observado que o processo de nitretação por plasma tem fornecido melhores resultados, quando comparados aos da nitretação a gás, pois além de melhorar as propriedades mecânicas do material, permite tratamentos em curtos períodos, maior controle da espessura da camada e da microestrutura da camada, não produzindo a liberação de gases tóxicos como é o caso do processo de nitretação gasosa [2,3].

De maneira a geral, a nitretação por plasma é empregada para aumentar a dureza superficial, a resistência à fadiga de alto ciclo, o desgaste e a resistência à corrosão. Estas propriedades são obtidas a baixas temperaturas de tratamento, sem que haja transformação de fase e crescimento dimensional [4]. Os aços inoxidáveis martensíticos têm sido nitretados em temperaturas que estão em torno de 500°C e em tempos relativamente curtos de tratamento [5].

Os ensaios de durabilidade em anéis de pistão são normalmente executados em motores de bancada, o que não permite a obtenção rápida dos resultados. Em laboratório, o ensaio de desgaste abrasivo é o mais comumente realizado, a fim de se obter as propriedades dos materiais utilizados na fabricação de anéis, sejam eles nitretados a gás, por plasma, e/ou recobertos com outros materiais. Este tipo de ensaio tem sido amplamente divulgado na literatura. Já a caracterização das propriedades mecânicas de fadiga desses materiais, principalmente a do aço DIN X 90, utilizado atualmente na fabricação de anéis e objeto deste estudo, não é facilmente encontrada. Assim, ocorreu a necessidade de se caracterizar a resistência à fadiga do material, com o ensaio de corpos de prova em laboratório. Nas condições de trabalho do motor pode ocorrer contato entre a camisa do pistão e o anel de compressão. Na impossibilidade da reprodução fiel e total deste contato, que envolve lubrificação e altas temperaturas, optou-se por simular uma pequena linha de contato entre corpos de prova de fadiga confeccionados a partir do material do anel e pequenos blocos do

material da camisa que é fabricada em ferro fundido cinzento. O ensaio que melhor simula estas condições, em fadiga, é o chamado ensaio de fadiga por fretting.

Fretting é um movimento oscilatório relativo de pequena amplitude, tipicamente entre 10 e 50 µm, que pode ocorrer entre superfícies em contato, sujeitas a vibrações ou a tensões cíclicas, como em fadiga [6]. Portanto, com apenas uma força normal e um movimento relativo de pequena amplitude, ou microdeslizamento entre as superfícies, a situação de fretting pode ocorrer em componentes que estão em contato. Se um destes componentes sofrer carregamento de fadiga, a chamada fadiga por fretting (fretting fatigue) pode ocorrer.

Por este processo, o microdeslizamento gera um desgaste contínuo, que por sua vez leva ao acúmulo de detritos óxidos entres as superfícies, por meio de um processo de adesão. Este acúmulo de detritos, aliado às altas tensões locais de contato, ocasiona a deformação plástica próxima à superfície, promovendo a nucleação de microtrincas [7,8]. A fadiga por fretting ocorre, portanto, quando uma ou mais destas trincas propagam-se para o interior do material. Deste modo, este processo pode ser considerado como uma interação entre os mecanismos de desgaste, fadiga e corrosão, operando simultaneamente, impulsionado pelo microdeslizamento na superfície de contato e pelas tensões cíclicas no contato [9].

Assim, este trabalho está focalizado, principalmente, na determinação da resistência à fadiga por fretting do aço DIN X 90 nitretado por plasma, e compará-la à resistência à fadiga convencional deste material, sem tentar simular as condições reais de contato dos anéis em serviço, que ocorrem no motor em funcionamento.

Materiais e Métodos

Foram confeccionados corpos de prova do aço inoxidável martensítico DIN X 90 (DIN 1.4112), cuja composição química (% em peso) é 0,81C, 0,42Si, 0,36Mn, 17,50Cr, 0,94Mo, 0,1V e Fe em balanço. Este material apresenta uma dureza de 42 HRC no estado temperado e revenido. Os blocos de contatos, para o ensaio de fadiga por fretting, foram usinados a partir de placas de um ferro fundido cinzento perlítico, com grafitas do tipo A e B e dureza de 250 HB, utilizado na fabricação de cilindros de pistões. A geometria utilizada para os corpos de prova para os ensaios de tração, fadiga e fadiga por fretting está mostrada na figura 1. Depois de usinados, todos corpos de prova e blocos de fretting foram polidos e tiveram acabamento final com lixa d'água 600 e limpos em banho ultrasônico com acetona, antes de serem nitretados.

Todos os corpos de prova foram nitretados por plasma a 500 °C, em tempos de 5 horas e em 5 mbar de pressão, em corrente contínua, sendo que a mistura de gás usada foi de 20% de N₂ e 80% de H₂.

Corpos de prova do aço DIN X 90, não nitretado e nitretado por plasma foram ensaiados em tração. Tanto os ensaios de fadiga convencional, quanto os ensaios de fadiga por fretting foram realizados à temperatura ambiente, sob controle de carga, submetidos à tensões cíclicas tração-tração, com razão de carga R=0,1, e onda senoidal na frequência de 30 Hz. Para isto, foi utilizada uma máquina servo-hidráulica MTS 810, de 250 kN de capacidade.

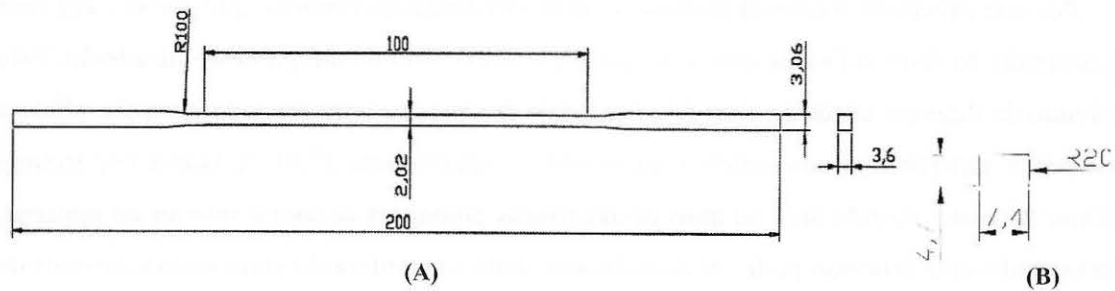


Figura 1: (A) Geometria dos corpos de prova de tração, fadiga e fadiga por fretting. (B) Blocos de contato (Dimensões em mm).

A configuração utilizada para o ensaio de fadiga por fretting está ilustrada na figura 2. O dispositivo de fretting consiste de duas hastes parafusadas na garra superior da máquina de ensaio de fadiga (MTS), que serviram de suporte para os blocos de contato. Estes blocos possuem um raio de curvatura de 20mm e uma vez pressionados por uma força normal P contra o corpo de prova geram um campo de tensão Hertziano. Esta força P é aplicada pelos parafusos de ajuste que estão na parte inferior de cada haste. Com a imposição do carregamento axial cíclico no corpo de prova, que se deforma elasticamente, é gerado um movimento oscilatório entre o bloco de contato e corpo de prova e, conseqüentemente, uma força de atrito, Q. Em cada haste foi colado um par de extensômetros, arranjados como meia ponte de Wheatstone, para se medir P e outro par de extensômetros, arranjados em uma ponte completa de Wheatstone, para se efetuar a medida do valor de Q. Cada arranjo foi previamente calibrado, o que permitiu que as hastes fossem utilizadas em vários ensaios.

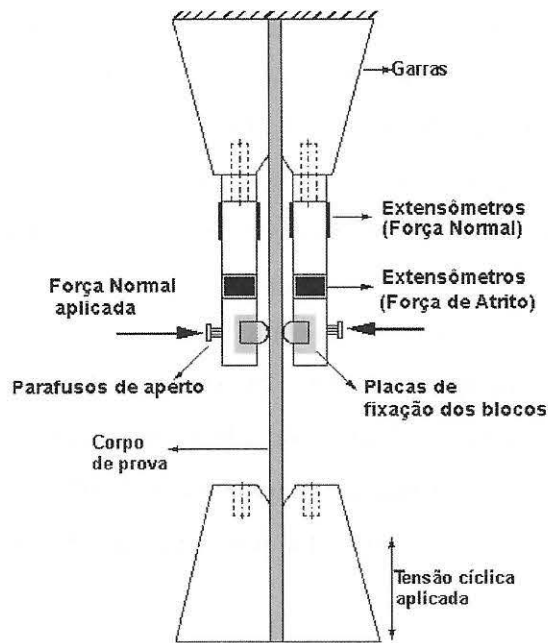


Figura 2: Representação esquemática do ensaio de fadiga por fretting.

Após ser alinhado aos blocos de contato e preso às garras, o corpo de prova a ser ensaiado foi submetido à carga média axial desejada. Feito isto, todas as deformações acusadas pelos aparelhos de leitura foram zeradas, e assim, a força normal P de 100 N, constante, foi aplicada. A distribuição da pressão de contato para esta configuração de ensaio resultou em uma pressão máxima de contato de 282 MPa. Após a aplicação de P , eventuais deformações acusadas pelos medidores da força de atrito foram zeradas e assim o carregamento de fadiga foi aplicado. A força de atrito foi medida durante os primeiros 200.000 ciclos, para os ensaios de longa duração.

Os aspectos morfológicos das superfícies de fratura dos corpos de prova nitretados por plasma, resultantes dos ensaios de tração, de fadiga convencional e fadiga por fretting, foram examinados utilizando-se as técnicas de microscopia ótica e eletrônica de varredura (MEV). Foram realizadas também macrografias da área de contato de fretting por meio de um estereomicroscópio ótico.

Resultados

As propriedades mecânicas de tração do material recebido no estado temperado e revenido, e após a nitretação, estão listadas na tabela 1. Os corpos de prova nitretados por

plasma apresentaram pequena diferença nas propriedades de tração, em relação aos não nitretados. Isto deve-se ao fato de que a nitretação muda apenas o comportamento de uma fina camada superficial, o que demonstra que as propriedades de tração dos corpos de prova nitretados são controladas pelo substrato. Em tração, ao se atingir tensões que deformam plasticamente o substrato, a camada nitretada, de elevada dureza, rompe-se e funciona como um entalhe para o substrato, levando o corpo de prova à fratura, sem que ocorra alongamento e redução de área significativos, para este material [10].

A figura 3 mostra, comparativamente, as curvas S-N para os ensaios de fadiga convencional e fadiga por fretting. O limite de fadiga convencional obtido foi de 641 MPa e representa 57% do limite de resistência do material nitretado ($\sigma_r = 1117$ MPa). Já o limite de fadiga por fretting obtido foi de $\sigma_f = 395$ MPa, representando 35% do limite de resistência do material.

Tabela 1: Propriedades mecânicas de tração do aço DIN X90.

Corpos de prova	Limite de escoamento σ_e (0,2%)(MPa)	Resistência à tração σ_r (MPa)	Alongamento total (%)	Redução de área (%)	E (GPa)
Como Recebido	1045	1153	6,4	21,3	200,2
Nitretado por Plasma	1015	1117	-	-	197

O fenômeno de fretting exerceu seu maior efeito na região de alto ciclo, a partir de aproximadamente 10^5 ciclos, provocando um decréscimo acentuado na vida em fadiga, em tensões inferiores ao limite de fadiga convencional. Assim, o fator de redução de resistência à fadiga (FRR) em 10^7 ciclos, definido neste trabalho como sendo a razão entre o limite de fadiga convencional e o limite de fadiga por fretting para 10^7 ciclos. O valor obtido do FRR foi de 1,62. Vale lembrar que este fator é função das condições adotadas no ensaio de fadiga por fretting, e principalmente, o tipo de materiais em contato e a força normal aplicada.

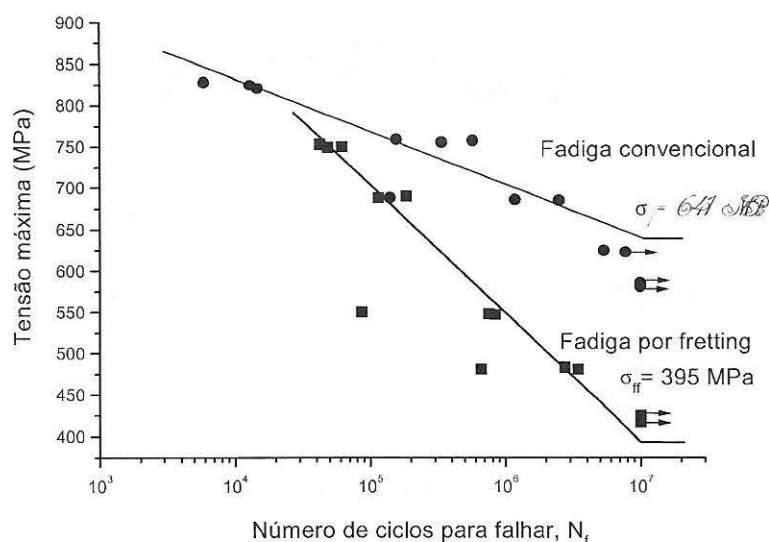


Fig.3. Curvas S-N para o aço DIN X 90 nitretado por plasma a 500 °C.

A figura 4 mostra a evolução da força de atrito máxima, Q_{max} , para um determinado corpo de prova. Pode ser observado um aumento da força de atrito no início do ensaio, seguido de um período de pequenas variações, que se manteve na maior parte do ensaio, até cair rapidamente um pouco antes da ruptura do corpo de prova. Esta queda está relacionada à trinca que se propagou para a fratura. A explicação para esta queda é que, com o aumento da abertura da trinca na superfície, a área de contato entre o bloco e o corpo de prova vai sendo reduzida gradualmente, diminuindo, por conseqüência a força de atrito. Este é um comportamento típico, encontrado nos ensaios de fadiga por fretting para diversas combinações de materiais [11].

Foi observado também, que a força de atrito aumentou com a tensão axial aplicada, como mostrado pela figura 5 e poderia alcançar um valor limite, aproximadamente igual à força normal aplicada ao contato [12]. Isto implica que um coeficiente de atrito igual à unidade poderia ser alcançado sob condições de fretting e permaneceria constante para tensões axiais elevadas. Esta é uma situação de macrodeslizamento, ou de deslizamento total, caracterizada por intenso desgaste e conseqüente formação de detritos óxidos, que podem tanto escapar da região de contato, como aí se acumular, funcionando como um lubrificante sólido [13-14]

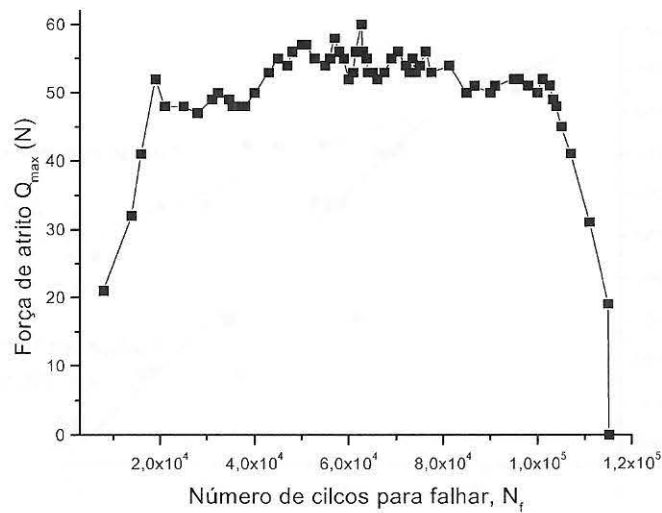


Figura 4: Evolução da força de atrito durante um ensaio de fadiga por fretting . $\sigma_{max}=688\text{MPa}$ e $N_f=115188$ ciclos, $Q_{max}=60\text{N}$

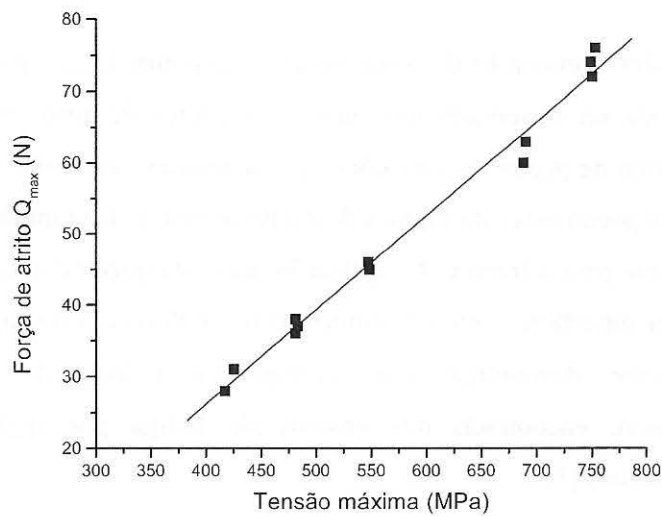


Figura 5: Relação entre tensão axial e força de atrito.

Em tração, a camada nitretada apresenta um comportamento totalmente elástico e o substrato comporta-se de maneira predominantemente plástica. Isto, mais o estado de multiaxialidade de tensões existente na interface camada, ajudam a explicar a série de trincas regularmente espaçadas [10,15], que ocorrem na superfície, observadas em todo comprimento útil do corpo de prova, conforme mostrado pela figura 6. Estas trincas atuam como entalhes para o substrato levando o corpo de prova a fraturar sem alongamento ou redução de área significativos, como visto anteriormente.

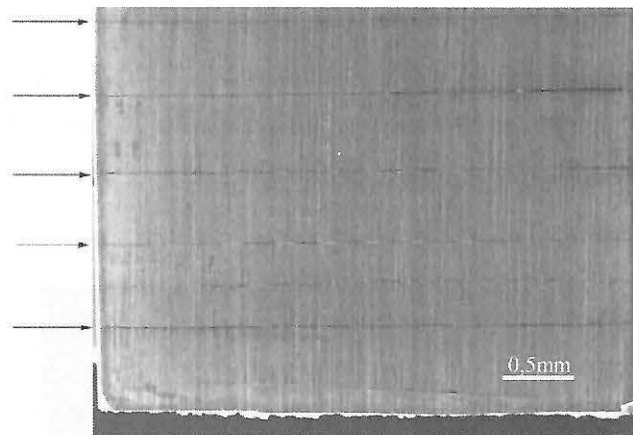


Figura 6: Vista da superfície lateral do corpo de prova mostrando o trincamento externo da superfície nitretada, indicado pelas setas.

Na região de baixo ciclo, onde as tensões aplicadas são altas, é esperado que a trinca que se propaga para a fratura nucleie na superfície, devido à baixa tenacidade superficial, decorrente da alta dureza da camada nitretada. No entanto, na região de alto ciclo é difícil precisar o local de nucleação da trinca. A figura 7 mostra uma região de transição entre a camada nitretada e o substrato.

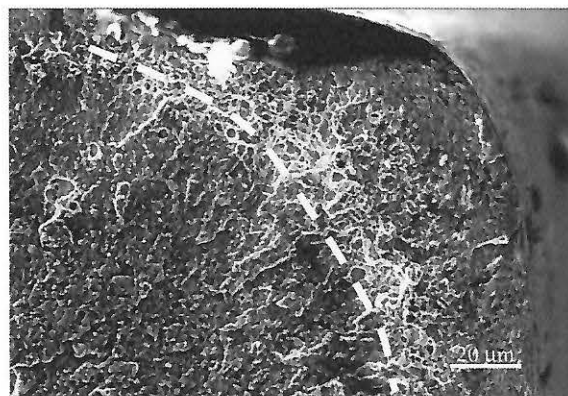


Figura 7: Fratura na região de alto ciclo: $\sigma_{\max} = 685$ MPa; $N_f = 2,526$ E6 ciclos. A região mais clara, indicada pela linha tracejada, corresponde à zona de transição.

A figura 8 mostra o aspecto da área de contato de fretting, após a fratura. Este foi o aspecto típico que ocorreu em todos os corpos de prova ensaiados e rompidos. Embora os blocos de contato tivessem a mesma largura do corpo de prova, as marcas de fretting não se estenderam às bordas do corpo. Na região central das marcas de fretting, o caminho da trinca era curvo. Em alguns corpos de prova, o caminho da trinca era curvo em toda extensão da

região sob fretting e acentuava-se na região central. A figura 9 mostra a presença de detritos aderidos à superfície do corpos de prova e a presença de trincas superficiais “paralelas” à região de fratura. Geralmente, esta transferência ocorre do bloco de contato de menor dureza para a superfície nitretada de maior dureza, por adesão [16].

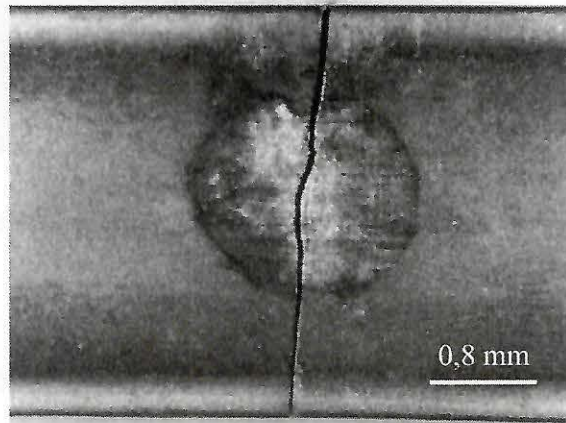


Figura 8: Macrografia frontal da área de contato de fretting, após a fratura: $\sigma_{\max}=749$ MPa; $N_f=48623$.

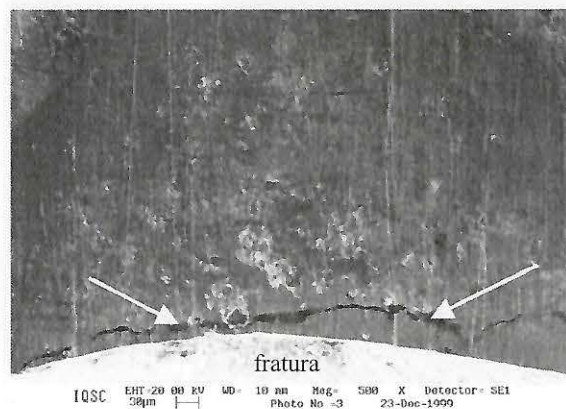


Figura 9: Micrografia da área de contato sob fretting. As setas indicam uma trinca secundária: $\sigma_{\max}=750$ MPa; $N_f=42379$ ciclos.

6.0 – Conclusões

(1) O material nitretado apresentou limite de escoamento, limite de resistência e módulo de elasticidade, próximos aos do material na condição de como recebido. Isto indica que constituição do substrato controla os parâmetros de resistência do material nitretado.

(2) O fenômeno de fretting reduziu sensivelmente a resistência à fadiga do material nitretado. O limite de fadiga por fretting foi de 395 MPa, o que implica em um fator de redução de resistência (FRR) de 1,62. Além disto, nos ensaios de fadiga por fretting, a evolução da força de atrito em uma interface de contato está relacionada aos estágios de nucleação e propagação da trinca de fadiga. Foi observado também que a força de atrito máxima aumentou com a tensão axial aplicada.

(3) As superfícies nitretadas apresentaram, em tração, várias trincas regularmente espaçadas ao longo do comprimento útil do corpo de prova, quer atuaram como entalhes para o substrato, levando o material nitretado a se romper, sem apresentar alongamento ou redução de área significativos. Assim, a constituição da camada nitretada controla os parâmetros de ductilidade do material nitretado

(4) Os corpos de prova ensaiados em fadiga convencional apresentam regiões bem distintas de propagação de trinca, que ocorre abaixo da camada nitretada e de fratura final. No entanto, não foi possível detectar o local de nucleação da trinca por fadiga.

(5) Na área de contato de fretting, as trincas apresentaram um caminho curvo, que se acentua na região central das marcas de fretting, que por sua vez, foram sempre menores que a largura do corpo de prova. Nestas marcas foi verificada também, a presença de trincas secundárias e de detritos, aderidos à superfície do corpo prova.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao FINEP pelo financiamento do projeto e ao CNPQ pela bolsa de mestrado concedida.

REFERENCES

- [1] TOMANIK, E.; DEMARCHI, V.; VATAVUK, J.;(1994): Anéis de aço nitretados para motores de combustão interna. In: *SAE Technical Paper Series, III Congresso e Exposição Internacionais de Tecnologia da Mobilidade*, n. 942394 P.
- [2] EDENHOFER, B., Physical and metallurgical aspects of ionitriding. *Heat Treatment Metallurgical*, v. (1) 2, 1974, p. 23-28.
- [3] STAINES, A. M, Trends in plasma-assisted surface engineering processes, *Heat Treatment of Metals*, v. 4, 1990, p. 85-92.
- [4] HUCHEL, U. ; BRAMERS, S. ; CRUMMENAUER, J.; DRESSLER, S.; KINKEL, S.; (1995): Single cycle, combinations layers with plasma assistance. *Surface Coatings and Technology*, n.76-77, p.211-217.

- [5] SUN, Y.; BELL, T. WOOD, G. (1994): Wear behaviour of plasma-nitrided martensitic stainless steel. *Wear* n.178 p.131-138.
- [6] WATERHOUSE, R.B. (1992): Fretting fatigue. *International Materials Reviews*, v. 37, n. 2, p.77-97.
- [7] HARISH, G.; FARRIS, T.N (1998): Shell modeling of fretting in riveted lap joints. *AIAA Journal*, v.36, n.6, p.1087-1093
- [8] WATERHOUSE, R. B.; TAYLOR, D.E. (1971): The initiation of fatigue cracks in a 0.7% carbon steel by fretting. *Wear*, v.17, p.139-147
- [9] SZOLWINSKI, M. P.; FARRIS, T. N.; (1996): Mechanics of fretting fatigue crack formation. *Wear*, v. 198, p. 93-107.
- [10] QIAN, J.; FATEMI, A. (1995): Cyclic deformation and fatigue behaviour of ion-nitrided steel. *International Journal of Fatigue*, v. 17, n.1, p.15-24.
- [11] LINDLEY, T. C.; NIX, K. J.; (1992): Fretting fatigue in the power generation industry. In: *Standardization of Fretting Fatigue Test Methods and Equipment*, ASTM STP 1159, p.153-1699.
- [12] LINDLEY, T. C. (1997). Fretting fatigue in engineering alloys. *International Journal of Fatigue*, v. 19, Sup. n. 1, p. S39-S49. (1993) 608-617
- [13] ENDO, K; GOTO, H. (1976): Initiation and propagation of fretting fatigue cracks. *Wear*, v. 38 p. 311-324
- [14] GODET, M. (1984): The third-body approach: a mechanical view of wear. *Wear*, v.100, 437-452
- [15] JACK, D. H.; WINNIK, S. (1979): Effect of process variables on the fatigue resistance of nitrided steel. In: *Heat Treatment '79*, The Metals Society Proceedings Conference, London, p. 169-177.
- [16] BILL, R. C., (1983): Fretting Wear and Fretting Fatigue - How are the Related?, *Transactions of the ASME*, v. 105, p.230- 238.