

INFLUÊNCIA DE TENSÕES RESIDUAIS COMPRESSIVAS NO COMPORTAMENTO EM FADIGA DE UM FERRO FUNDIDO NODULAR PERLÍTICO¹

Omar Maluf²
Danilo Borges Villarino de Castro³
Luciana Sgarbi Rossino²
Maurício Angeloni³
Dirceu Spinelli⁴

Resumo

O processo de roleteamento é um tratamento superficial comumente utilizado em peças fabricadas em aços e ferros fundidos nodulares, com o intuito de melhorar as propriedades de resistência à fadiga destes materiais. Este processo endurece e introduz tensões compressivas na camada superficial do material através de deformação controlada, provocando uma resultante de tensões residuais compressivas que atuam na superfície da peça submetida a carregamentos cíclicos. O objetivo deste trabalho foi o estudo do efeito do roleteamento superficial sobre a resistência em fadiga de um ferro fundido nodular de matriz perlítica, utilizado na fabricação de virabrequins pela indústria automobilística. Foram realizados ensaios de fadiga por flexão rotativa em corpos de prova lisos e com entalhe. Os corpos de prova com entalhe foram divididos em dois grupos, com e sem roleteamento superficial. Foi utilizado entalhe com geometria semicircular com raio de 1,20 mm e profundidade de 0,70 mm. Para o processo de roleteamento foi utilizado um rolete com diâmetro de 15 mm e raio de curvatura de 1,30 mm com uma força de compressão aplicada de 2390 N. A introdução de tensões residuais compressivas pelo trabalho a frio dificultou a nucleação de trincas na camada superficial dos entalhes roleteados, conforme ficou evidenciado no aumento do limite de fadiga obtido para o material entalhado e roleteado, que cresceu de 168 MPa, na condição sem tratamento mecânico, para 483 MPa, para o material roleteado.

Palavras-chave: Roleteamento; Fadiga; Tensão residual; Ferro fundido nodular.

INFLUENCE OF COMPRESSIVE RESIDUAL STRESS ON FATIGUE BEHAVIOR OF DUCTILE CAST IRON

Abstract

Rolling process is a surface treatment commonly used in in parts fabricated with steel and ductile cast iron, to improve fatigue properties of these materials. This process hardens and introduces compressive residual stress to the surface of the material through the application of controlled strains, causing a reduction of resulting tensile stress at part surface under cyclic loading. The aim of this work was the study of the effect of surface rolling on high cycle fatigue behavior of a pearlitic ductile cast iron used in crankshaft by automotive industries. Rotating bending fatigue tests were performed in both smooth and notched specimens. The notched specimens were divided into two groups: with and without surface rolling treatment. The specimens notch geometry was semicircular with radius of 1.20 mm and depth of 0.70 mm. The rolling treatment was carried out using a roller with diameter of 15 mm, curvature radius of 1.30 mm and a compression force of 2390 N. The introduction of compressive residual stresses under cold work made difficult the crack nucleation on the rolled surface of the notch, as was evidenced in increasing the fatigue limit of the material obtained for notched and rolled, which grew from 168 MPa under the condition without mechanical treatment to 483 MPa for the rolled material.

Keywords: surface Rolling. Fatigue. Residual stress. Ductile cast iron.

¹ Contribuição técnica ao 64° Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Doutor em Engenharia e Ciência dos Materiais, EESC, Universidade de São Paulo, Brasil

³ Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais, EESC, Universidade de São Paulo, Brasil

⁴ Prof. Dr. de Engenharia e Ciência dos Materiais, EESC, Universidade de São Paulo, Brasil

1 INTRODUÇÃO

Ferros fundidos nodulares são ligas ternárias do sistema Fe-C-Si que, em virtude de uma microestrutura muito particular, apresentam propriedades mecânicas semelhantes às de alguns aços, porém com melhor resistência ao desgaste e ao choque térmico. O ferro fundido nodular é um ferro fundido cinzento base que, no estado líquido, sofre um tratamento de transformação microestrutural através da adição do elemento magnésio, que promove a formação de grafita não mais na forma de veios (ferro cinzento), mas sim na forma de nódulos. Como os nódulos de grafita possuem forma esférica, não atuam como concentradores de tensões, como ocorre com os veios de grafita, o que permite a obtenção de materiais com melhor resistência mecânica e ductilidade.⁽¹⁾ Devido ao baixo custo e facilidade de produção, são muito utilizados na confecção de componentes mecânicos como válvulas, corpos de bombas, engrenagens, cilindros de laminação, virabrequins e outros componentes automotivos.⁽²⁻⁴⁾ Os níveis dos parâmetros de resistência e ductilidade são determinados pela composição microestrutural da matriz. Dependendo da composição química e/ou do tratamento térmico, a matriz pode ser ferrítica, perlítica, ferrítica-perlítica, bainítica, martensítica ou austenítica. Outro aspecto de grande importância para as características mecânicas é o tamanho e distribuição dos nódulos de grafita na matriz.

No entanto, o desempenho de uma peça fundida não depende somente do aspecto metalúrgico, como, também, das condições da superfície e geometria da peça. Variações dimensionais, rebaixos e entalhes são regiões concentradoras de tensões susceptíveis à nucleação de trincas por fadiga que, caso não possam ser evitados no projeto, devem receber um tratamento especial.⁽⁵⁾ Por exemplo, para eliminar o efeito de cantos vivos em mancais e pinos de virabrequins, utilizados na fabricação de veículos automotivos, são usinados entalhes com um determinado raio que recebem posteriormente um tratamento mecânico superficial conhecido como roleteamento. Este tratamento tem a finalidade de diminuir a sensibilidade ao entalhe, nessas regiões críticas.

O processo de roleteamento é um tratamento superficial, comumente utilizado para melhorar a resistência à nucleação de trinca por fadiga em locais críticos de componentes mecânicos.⁽⁶⁾ Este processo endurece e introduz tensões compressivas na camada superficial do material através de deformação controlada, provocando uma resultante de tensões residuais compressivas que atuam na superfície da peça submetida a carregamentos cíclicos. Assim, quando as peças são solicitadas em carregamento cíclico, ocorre uma diminuição da tensão resultante.

Este trabalho tem como principal objetivo o estudo da influência do roleteamento superficial nas propriedades de fadiga de alto ciclo de um ferro fundido nodular de matriz perlítica, com composição e microestrutura semelhante às especificadas pela indústria automobilística. Foram realizados ensaios de fadiga em flexão rotativa em corpos de prova com e sem entalhe. Os corpos de prova com entalhe foram divididos em dois grupos: com e sem roleteamento superficial. A geometria dos entalhes, bem como a força de roleteamento aplicada é semelhante às utilizadas no processo de fabricação de virabrequins de motores automotivos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Material

O material utilizado no desenvolvimento deste trabalho foi o ferro fundido nodular de matriz perlítica-ferrítica, segundo a norma GMW10 classe N700-2,⁽⁷⁾ sem qualquer tratamento térmico, ou seja, na condição de “bruto de fusão”, cedido pela General Motors do Brasil. O ferro fundido nodular perlítico-ferrítico apresenta como principais características: alta resistência à tração, elevada dureza e baixa ductilidade. A Tabela 1 apresenta a composição química média desse material.

Tabela 1. Composição química média do material estudado

Teor (%p/p)	C	Si	Mn	Cr	Cu	P	S	Mg
Medida	3,56	2,36	0,45	0,02	0,46	0,046	0,010	0,050
Nominal	3,3–3,9	1,8–2,7	0,2–1,0	----	----	0,05 máx	0,02 máx	0,03–0,05

2.2 Ensaios Mecânicos

Os corpos de prova foram retirados da parte útil de blocos “Y” fundidos, segundo norma ASTM A-476M-00, conforme ilustrado na Figura 1.

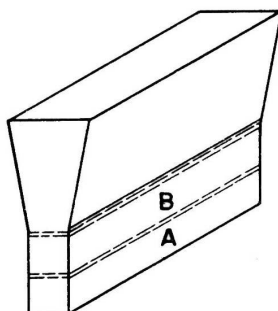


Figura 1. Bloco “Y”, segundo norma ASTM A-476-00, para ferros fundidos nodulares.

Os ensaios de tração, realizados para determinação das propriedades mecânicas do material, foram realizados à temperatura ambiente, segundo a norma ASTM E-8M-01, em uma máquina Instron, modelo TTDM/L de 100 kN de capacidade. A Figura 2(a) apresenta o dimensionamento do corpo de prova utilizado no ensaio de tração.

Os ensaios de impacto foram realizados pelo método Charpy, em corpos de prova do tipo I com entalhe em V, à temperatura ambiente, com martelo de 300 J. A máquina utilizada foi uma Instron Wolpert, instrumentada, modelo PW30 e os ensaios realizados conforme norma ASTM E-23-98. A Figura 2(b) apresenta o dimensionamento do corpo de prova utilizado no ensaio de impacto.

Os ensaios de fadiga rotativa foram realizados de acordo com a norma ASTM E-466-96, em uma máquina da marca Fatigue Dynamics, modelo RFB-200, apresentada na Figura 3. A tensão na área útil de menor diâmetro do corpo de prova é introduzida por meio de um momento fletor rotativo, M , aplicado na extremidade livre do mandril de fixação do corpo de prova. A variação deste momento foi resultante do deslocamento de um peso sobre uma régua graduada localizada na parte inferior da máquina. O cálculo do momento M foi realizado utilizando-se a Equação 1, onde S é a tensão em MPa e Φ é o diâmetro menor da área útil do corpo de prova, em mm.

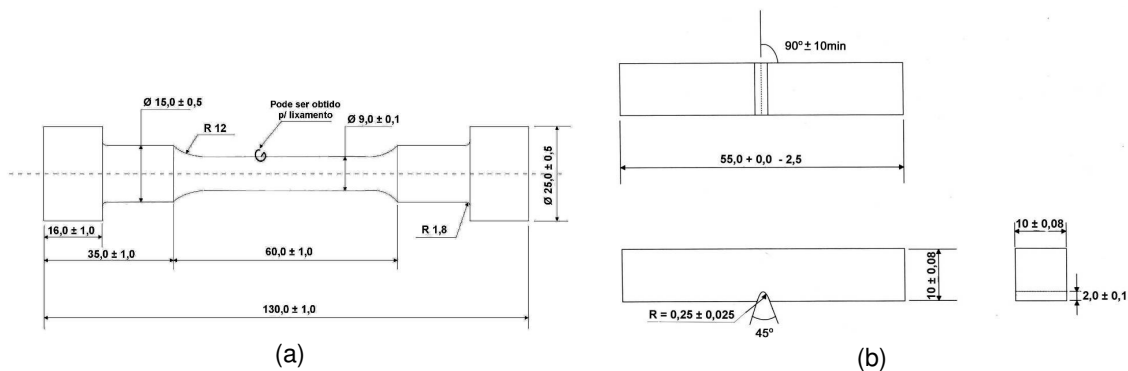


Figura 2. Corpo de prova utilizado no ensaio de (a) tração e (b) impacto. Dimensões em mm.

$$M = \frac{\pi}{32} S \cdot \phi^3 \quad (1)$$

Para o levantamento das curvas S-N nos ensaios de fadiga de flexão rotativa, foram utilizados 5 níveis de tensão para cada condição de ensaio, e 5 corpos de prova para cada nível de tensão, como estabelecido pela norma ASTM E-739-98, de tal maneira a se atingir a faixa máxima de repetitividade, R , que é de 75% a 88%, caracterizando os dados mais confiáveis. Esse cálculo é realizado utilizando a Equação 2. A frequência utilizada foi de 92 Hz e foram considerados corpos de prova sem falha, *run out*, os que atingiram uma vida de 10^7 ciclos sem a ruptura do corpo de prova. Para este trabalho, foi estabelecido que o limite de fadiga fosse de 2×10^6 ciclos (N).

$$R(\%) = 100 \cdot \left(1 - \frac{\text{quantidade de níveis de tensão}}{\text{número total de corpos de prova}} \right) \quad (2)$$

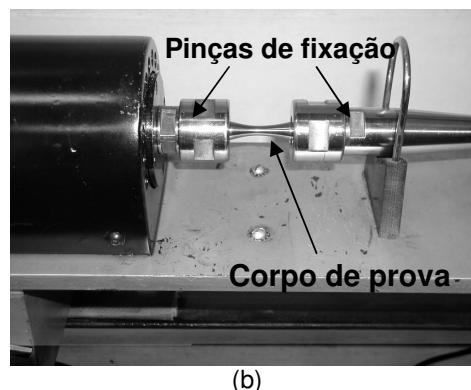
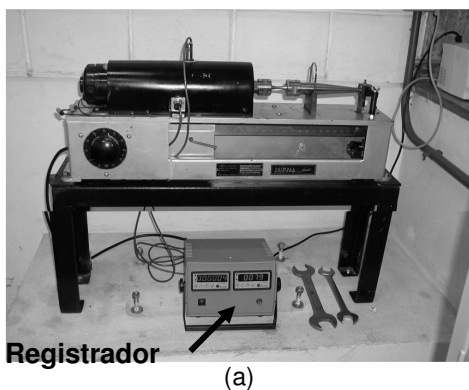


Figura 3. (a) Máquina de fadiga rotativa. (b) Detalhe do posicionamento do corpo de prova.

Os corpos de prova entalhados e sem entalhes, utilizados nos ensaios de fadiga, estão apresentados nas Figuras 4(a) e 4(b), respectivamente. Foram utilizados 25 corpos de prova de fadiga sem entalhe e 50 corpos de prova entalhados, sendo que metade dos entalhados foi submetida ao roleteamento no entalhe.

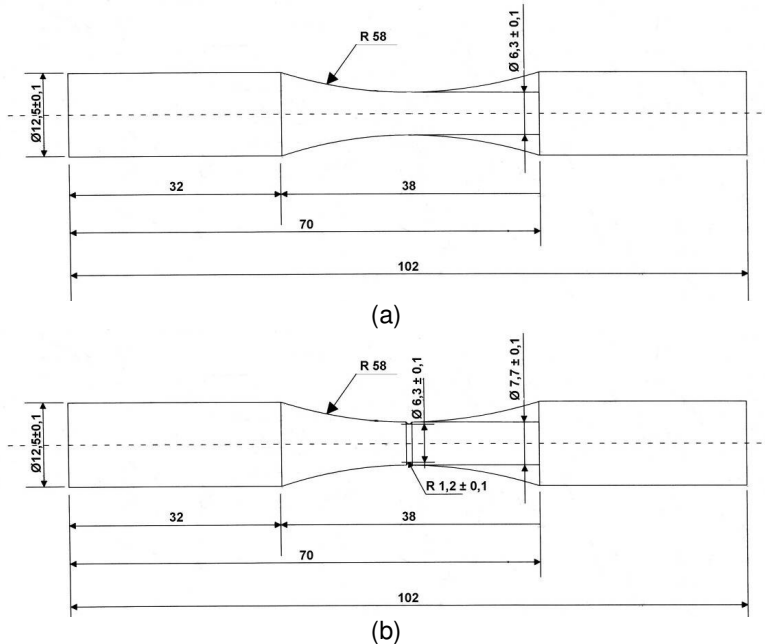


Figura 4. Corpos de prova para ensaio de fadiga rotativa: (a) sem entalhe e (b) com entalhe. Dimensões em mm.

As amostras usadas para as medições de macro dureza foram retiradas de corpos de prova de tração, impacto e fadiga, já ensaiados. Utilizou-se uma máquina marca Leco, modelo RT-240. Os resultados foram obtidos em Rockwell B (HRB), conforme norma ASTM E-18-98 e transformados em Brinell (HB), através de tabelas de conversão obtidas pela norma ASTM E-140-97. Os valores de microdureza Vickers (HV) dos microconstituintes foram obtidas conforme norma ASTM E-384-99, utilizando-se um microdurômetro marca Bühler, modelo Micromet, série 2100 e carga de 25 gf. Foram efetuadas dez medidas de microdureza na ferrita e na perlita, para cada amostra: entalhada e entalhada e roleteada.

O perfil de microdureza Knoop (HK), na raiz dos entalhes dos corpos de prova com e sem roleteamento, não ensaiados, foi realizado em um microdurômetro marca Leica, modelo VMHTMOT com carga de 100 gf conforme norma ASTM E-384-99. As medidas foram realizadas a cada 0,025 mm a partir da raiz dos entalhes até 0,200 mm, e espaçadas progressivamente até o centro do corpo de prova.

2.3 Análises Metalográficas e Fratográficas

As amostras para análises metalográficas foram retiradas no sentido perpendicular à superfície de fratura em corpos de prova de tração e fadiga. As amostras foram preparadas conforme norma ASTM E-3-95, embutidas em baquelite, lixadas utilizando lixas de granulometria #220, #320, #400, #600 e #1.000, e depois, polidas na seguinte sequência: óxido de cromo 10 μm , diamante 6 μm , diamante 3 μm , diamante 1 μm e diamante 0,25 μm . Para a revelação da microestrutura foi utilizado o reagente Nital 2% (Ácido Nítrico 2% + Etanol 98%).

Todas as análises metalográficas e quantitativas foram feitas utilizando-se um sistema de aquisição de imagens composto por um microscópio óptico Zeiss Axiotech equipado com uma câmera Sony DXC-151A, acoplado a um microcomputador Macintosh. Nas amostras isentas de ataque químico, determinou-se o tamanho, distribuição e forma dos nódulos de grafita. Já nas amostras atacadas com

Nital 2%, foram observadas as microestruturas das matrizes. As análises de porcentagem de microconstituintes, distribuição e tamanho de nódulos foram realizadas utilizando o analisador de imagens Graffitek.

Para a análise das superfícies de fratura, foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura marca Zeiss, modelo DSM960, com a finalidade de se observar as morfologias das superfícies de fratura dos corpos de prova de fadiga. Antes das análises, as superfícies de fratura foram limpas por ultra-som em álcool isopropílico.

2.4 Dispositivo de Roleteamento

O dispositivo para o roleteamento dos corpos de prova de fadiga com entalhe é composto basicamente por três roletes dispostos em ângulos de 120° em relação ao centro do eixo do corpo de prova, conforme ilustrado na Figura 5. A carga de roleteamento é aplicada através do rolete de encruamento que possui diâmetro de 15 mm e um raio de curvatura da borda de 1,3 mm. Os outros dois roletes são rolamentos de esferas de diâmetro de 26 mm que atuam somente como apoio ao corpo de prova.

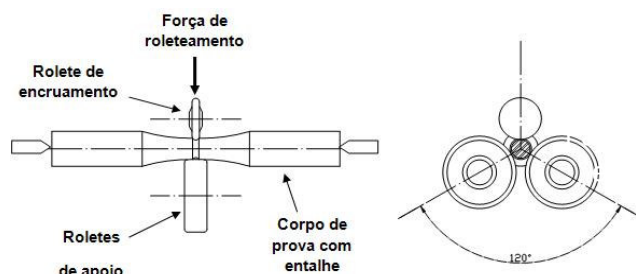


Figura 5. Dispositivo para o roleteamento dos corpos de prova de fadiga com entalhe. Três roletes dispostos em ângulos de 120° em relação ao centro do eixo do corpo de prova.

O rolete de encruamento está fixado em um porta-rolete de uma máquina de roleteamento de virabrequins marca Hegenscheidt, que foi adaptado para este ensaio. A carga aplicada é perpendicular ao eixo do corpo de prova. O porta-rolete foi fixado na porta-ferramentas de um torno marca Romi, modelo ID20, e a aplicação da carga foi feita através da movimentação do carrinho do torno na direção perpendicular ao eixo do corpo de prova que estava fixado entre pontos, com uma das extremidades presa na placa e a outra presa em um contra-ponto com rolamento. A base com os roletes de apoio foi acoplada a uma célula de carga de capacidade 10 kN, marca MSI e modelo DT 1000, e todo o conjunto estava fixado na base do carrinho do torno. A leitura da carga aplicada foi feita por um aparelho digital marca Transdutech, modelo TMDE, devidamente aferido e zerado antes de cada operação. A Figura 6 apresenta imagens do dispositivo de roleteamento dos corpos de prova de fadiga rotativa. As operações de roleteamento nos corpos de prova entalhados foram realizadas utilizando força aplicada de 2390 N, rotação de 50 rpm e 250 voltas por operação.

2.5 Fatores Concentradores de Tensão: K_t e K_f

Determinou-se o valor do fator de concentração de tensão monotônica, K_t , para a região do entalhe dos corpos de prova, utilizando-se as curvas de concentração de tensões de Peterson.⁽⁸⁾ Os dados para a determinação de K_t foram

obtidos utilizando-se algumas dimensões do corpo de prova: diâmetro maior da área útil (D), diâmetro do entalhe (d) e raio do entalhe (r). O valor de K_f é calculado utilizando-se as Equações 3 e 4, onde a é um parâmetro do material e S_u é o limite de resistência à tração em ksi.⁽⁸⁾

$$K_f = 1 + \frac{K_t - 1}{\left(1 + \frac{a}{r}\right)} \quad (3)$$

$$a = \left[\frac{300}{S_u}\right]^{1,8} \cdot 10^{-3} \quad (4)$$

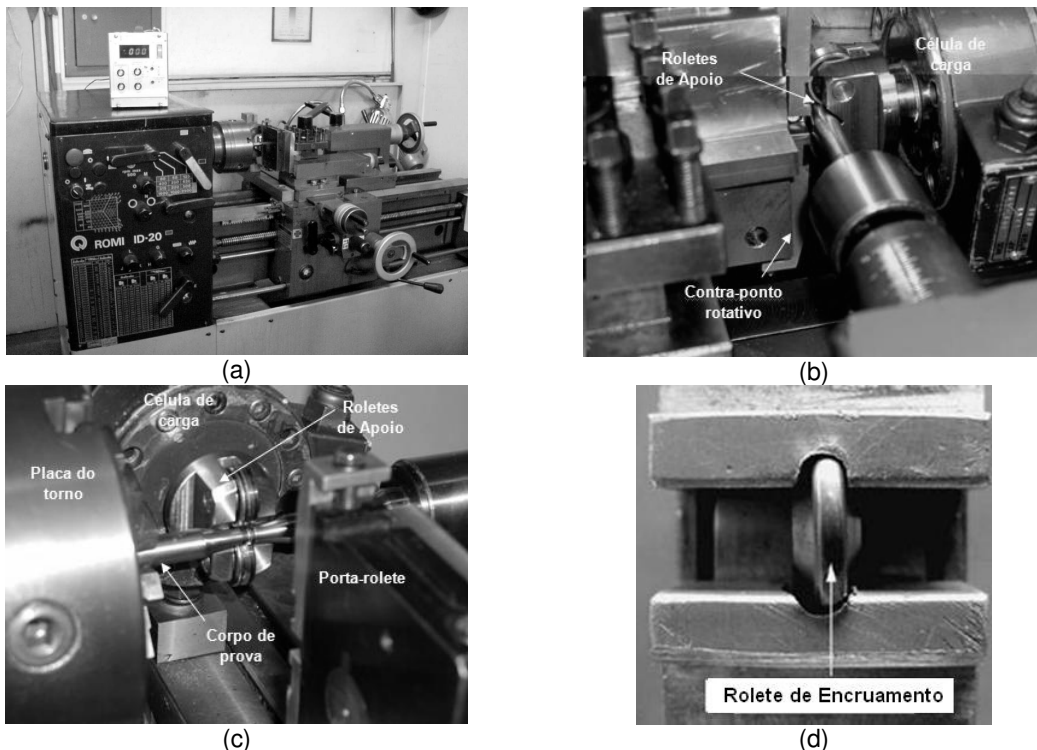


Figura 6. (a) Vista geral dos equipamentos utilizados na operação de roleteamento. (b) Detalhe da operação de roleteamento. (c) Detalhe mostrando o corpo de prova fixado no torno: base com os roletes de apoio, a célula de carga e o porta-rolete afastado. (d) Detalhe do rolete de encruamento.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As médias dos resultados das microdurezas Vickers (HV) dos microconstituintes perlita e ferrita são mostradas na Tabela 2. Esses resultados foram subsídios importantes para o cálculo da microdureza equivalente da matriz. A perlita apresenta dureza maior que a ferrita, pois é um microconstituente formado por lamelas intercaladas de duas fases, de ferrita (menos dura) e de cementita (muito dura).

Tabela 2. Média da microdureza dos microconstituintes perlita e ferrita

Microconstituintes	Perlita	Ferrita
Dureza média (HV)	329,0 ± 33,5	167,0 ± 34,1

O perfil das microdurezas Knoop (HK), a partir da raiz dos entalhes dos corpos de prova com e sem roleteamento, não ensaiados, estão apresentados na Figura 7. Este perfil de microdureza Knoop, comparando a dureza do entalhe roleteado com o não roleteado, demonstrou claramente o sensível efeito que o processo de roleteamento exerceu sobre esta propriedade, nas regiões próximas ao tratamento de roleteamento. Pode-se notar que a operação de usinagem acarretou aumento da dureza na região superficial do entalhe.

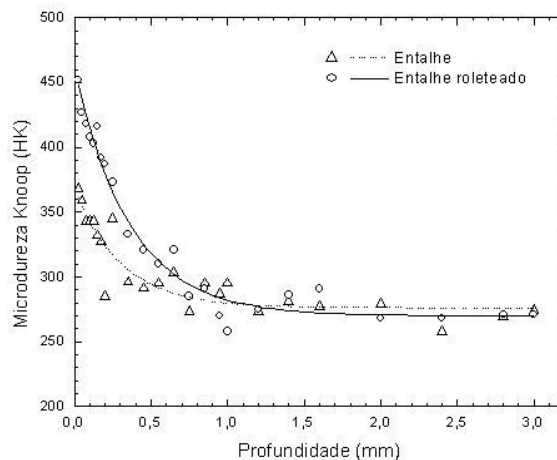


Figura 7. Perfil de microdureza Knoop (HK) a partir da raiz dos entalhes dos corpos de prova com e sem roleteamento (não ensaiados).

A Tabela 3 apresenta as propriedades mecânicas obtidas com a realização dos ensaios de tração, impacto e dureza Brinell para o material estudado. A norma GMW-10⁽⁷⁾ informa que o valor máximo de absorção de energia (**E**), à temperatura ambiente, no ensaio de tenacidade ao impacto do tipo Charpy, para corpos de prova de ferro fundido nodular perlítico (com entalhe de 45º) é de 5 J. O valor médio encontrado para E foi de 2,14 J, o que atende, na totalidade, ao recomendado.

Tabela 3. Propriedades mecânicas do ferro fundido nodular perlítico, correspondendo a uma média de 10 ensaios realizados para a obtenção de cada propriedade apresentada

σ_R (MPa)	σ_e (MPa)	A _% (mm/mm)	Dureza (HB)	E (J)
762,1 ± 59,9	465,2 ± 26,4	4,0 ± 0,9	239,0 ± 9,3	2,14 ± 0,14

Os resultados dos ensaios de fadiga rotativa para os corpos de prova sem entalhe, com entalhe e com entalhe roleteado estão apresentados na Figura 8, em termos da amplitude de tensão em função do número de ciclos para falhar. O resultado do cálculo da repetitividade R, de acordo com a Equação 2, foi de 80%, satisfazendo a norma ASTM E-739-98. Os valores obtidos dos limites de fadiga para os corpos de prova sem entalhe, com entalhe e com entalhe roleteado foram de 300 MPa, 168 MPa e 483 MPa, respectivamente. Desta forma, estes resultados demonstram claramente o quão nocivo é o efeito do entalhe sobre o limite de fadiga, quando comparado com o do corpo de prova sem entalhe. Esta redução foi de 44%. A situação foi totalmente modificada quando os corpos de prova com geometria idêntica tiveram seu entalhe roleteado. O efeito do entalhe, ou seja, concentração de tensão nesta região foi praticamente eliminado e o aumento do limite de fadiga, quando comparado com o corpo de prova sem entalhe, foi de 61%. Esta mudança de desempenho ocorreu em virtude da introdução de tensões residuais compressivas que se contrapuseram às tensões trativas aplicadas, fazendo com que

o pico de tensões residuais trativas fosse deslocado da superfície para o interior, dificultando assim a nucleação por fadiga na raiz do entalhe.

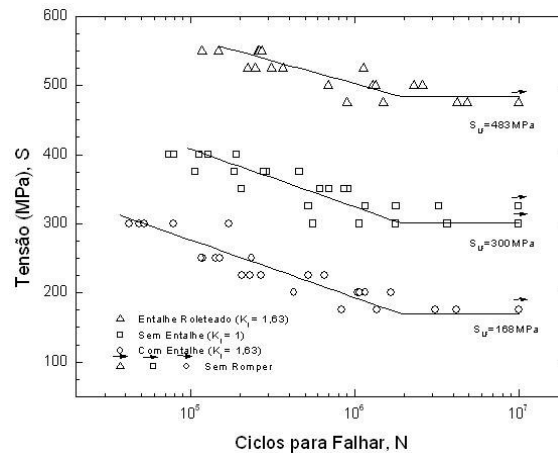


Figura 8. Gráfico da tensão em função do número de ciclos para falhar para os ensaios de fadiga em corpos de prova sem entalhe, com entalhe e com entalhe roleteado.

A partir das medidas geométricas do corpo de prova entalhado e do valor médio do limite de resistência à tração do ferro fundido nodular perlítico (GMB), foram obtidos os valores dos fatores de concentração de tensão monotônico e em fadiga, respectivamente, $K_t = 1,63$ e $K_f = 1,53$. O K_t é um fator que depende tão somente das dimensões geométricas do corpo de prova e da forma do entalhe. Já o K_f , obtido a partir de K_t (Equação 3), indica que o corpo de prova de fadiga com entalhe, apresentado na Figura 4(b), submetido a carregamento cíclico, terá seu limite de fadiga reduzido em, aproximadamente 56%, se comparado ao corpo de prova sem entalhe.⁽⁸⁾ No entanto, experimentalmente, obteve-se uma redução de 44%, bem próximo do previsto.

Em relação ao roleteamento superficial aplicado aos corpos de prova entalhados, pode-se afirmar que o teste foi realizado com sucesso, conduzindo o trabalho a resultados precisos e conclusivos, confirmando dados encontrados na literatura referentes ao assunto. O dispositivo especialmente desenvolvido para este trabalho mostrou-se eficaz na realização dos ensaios, o que tornou a operação relativamente simples e com excelente controle das principais variáveis, como força de roleteamento, rotação e número de revoluções.

As Figuras 9(a)-(c) mostram os aspectos macrográficos das superfícies de fratura. Nestas figuras estão indicadas as regiões de nucleação da trinca (N), propagação estável (Pe) e de propagação instável ou falha final (FF). Em todas as superfícies de fratura examinadas, pode-se observar uma grande quantidade de pontos escuros que são os nódulos de grafita. As regiões prováveis de início da nucleação e propagação estável da trinca por fadiga, em todas as condições, estão apresentadas com maior detalhe nas fotografias mostradas nas Figuras 10(a)-(c).

A técnica de microscopia eletrônica de varredura foi importante na análise, visualização e entendimento da nucleação da trinca, estágios de propagação e fratura final de corpos de prova submetidos a ensaio de fadiga por flexão rotativa. Esta técnica permitiu identificar os sítios de nucleação, os mecanismos de propagação estável da trinca, caracterizado pelas estrias dúcteis no estágio II e a aparência de quase-clivagem na região da fratura final, na qual a propagação é catastrófica. Uma importante indicação fornecida por esta técnica foi o efeito do

roleteamento no início da nucleação da trinca por fadiga, como mostrado na Figura 10(c). Nesta fratógrafia pode-se notar que a nucleação da trinca por fadiga ocorreu nas camadas sub-superficiais, ou seja, mais internamente, em virtude do deslocamento do pico das tensões máximas de tração da superfície para o interior do material. Isto ocorre devido ao efeito das tensões residuais compressivas introduzidas na superfície do material pela operação de trabalho a frio, o que provoca o aparecimento de uma resultante trativa menor na superfície do entalhe.

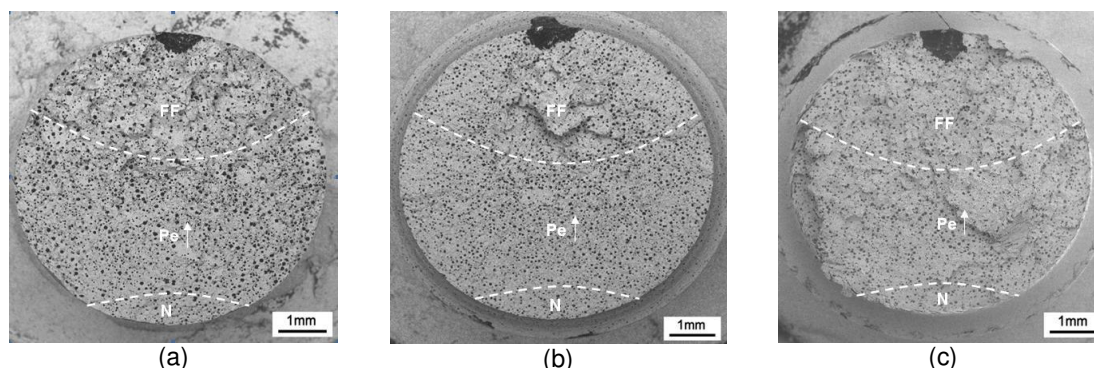


Figura 9. Aspecto macrográfico das superfícies de fratura dos corpos de prova: (a) sem entalhe, (b) com entalhe, e (c) com entalhe roleteado, obtidas pela técnica de elétrons retro-espalhados

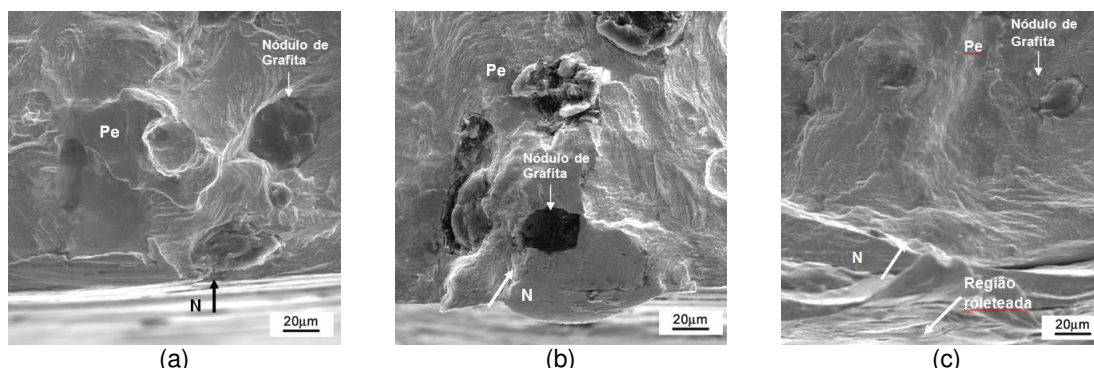


Figura 10. Aspecto micrográfico da superfície de fratura de corpos de prova: (a) sem entalhe, (b) entalhado, e (c) entalhado e roleteado.

A Figura 11 apresenta um aspecto micrográfico da região de propagação estável para a amostra com entalhe roleteado. Pode-se notar a existência de estrias dúcteis de propagação de trincas por fadiga em estágio II, com espaçamento entre estrias de aproximadamente $0,3\mu\text{m}$, em áreas de ferrita. Os aspectos microscópicos das superfícies de fratura na região de propagação estável da trinca é uniforme para as 3 condições estudadas.

As micrografias do ferro fundido nodular estão apresentadas nas Figuras 12(a)-(b), mostrando respectivamente a distribuição dos nódulos de grafita na matriz e um nódulo de grafita envolvido por ferrita (região clara) numa matriz perlítica (lamelas), microestrutura conhecida como “olho de boi”.

A análise metalográfica revelou um ferro fundido nodular perlítico, bruto de fusão, de ótima qualidade em termos microestruturais, ou seja, as condições de tamanho, distribuição média e a forma dos nódulos de grafita são muito boas, nódulos pequenos, bem formados e bem distribuídos. A ferrita livre, cuja porcentagem média foi de 15%, concentra-se apenas ao redor dos nódulos de grafita, formando uma microestrutura característica chamada de olho de boi,

conforme se observa na Figura 12(b). A perlita, microconstituente predominante da matriz, apresenta-se em lamelas finas e bem definidas (Figura 12(b)).

A combinação de nódulos de pequeno tamanho, bem formados e bem distribuídos, envoltos por ferrita livre numa matriz perlítica, sem carbonetos livres, proporciona ao ferro fundido nodular obter ótimas propriedades mecânicas. Esta mesma microestrutura pode ser observada nas Figuras 13(a)-(b), que apresentam o perfil do entalhe roleteado de um corpo de prova. A microestrutura próxima à superfície fica deformada e a região adquire maior resistência à nucleação de trincas por fadiga.

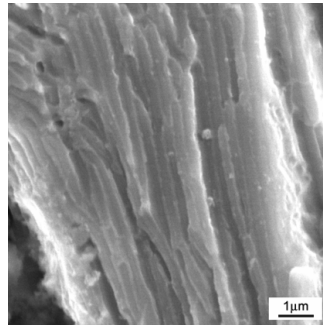
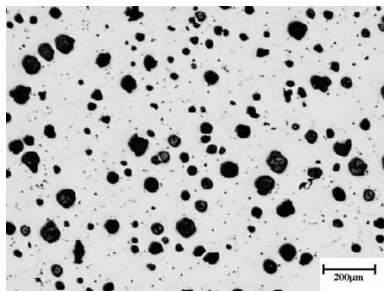
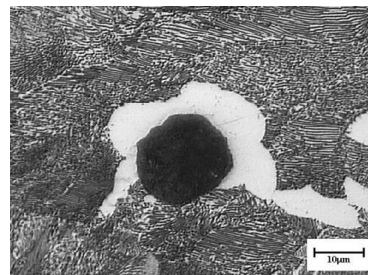


Figura 11. Aspecto micrográfico da superfície da fratura obtido com grande aumento da região de propagação estável do corpo de prova entalhado e roleteado.

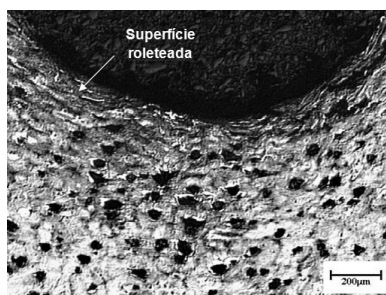


(a)

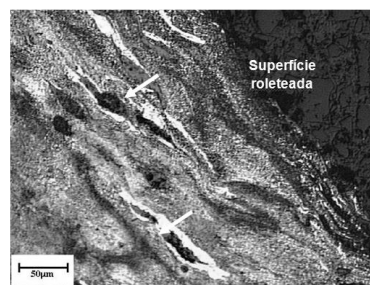


(b)

Figura 12. Micrografia do ferro fundido nodular perlítico, bruto de fusão: (a) distribuição dos nódulos de grafita na matriz. Sem ataque. (b) nódulo de grafita envolvido por ferrita (região clara) numa matriz perlítica (lamelas), microestrutura conhecida como "olho de boi". Ataque com Nital 2%.



(a)



(b)

Figura 13. Micrografias do (a) entalhe roleteado e (b) região do entalhe roleteado mostrando com maior aumento a microestrutura deformada. As setas mostram locais em que a microestrutura "olho de boi" foi completamente deformada. Ataque com reagente Nital 2%.

A microdureza equivalente da matriz, obtida de dados microestruturais de microdureza e porcentagem de fases presentes, permitiu que se chegasse a um valor estimado de limite de fadiga de 310 MPa, muito próximo àquele obtido

experimentalmente, 300 MPa. Isto confirma a ótima aplicabilidade deste método para a previsão de limite de fadiga de ferros fundidos nodulares comerciais.

4 CONCLUSÕES

Na microscopia eletrônica de varredura, particularmente na Figura 10(c), que apresenta a amostra entalhada e roleteada, mostra que a origem da trinca deixou de ocorrer na superfície, em virtude da deformação localizada e de tensões residuais compressivas nesta região, que deslocam o pico de tensões trativas, responsável pela nucleação, da superfície para o interior do corpo de prova.

O efeito nocivo do entalhe sobre o limite de fadiga ficou evidente, pois o reduziu em 44%, em comparação com os limites de fadiga dos corpos de prova sem entalhe. Já o limite de fadiga dos corpos de prova com entalhe roleteado foi aumentado em 61% comparado com o limite dos corpos de prova sem entalhe e 188% em relação aos apenas entalhados. Desta forma, pode concluir que o roleteamento superficial aplicado aos corpos de prova entalhados foi realizado com sucesso, confirmando dados encontrados na literatura referentes ao assunto.

O dispositivo de roleteamento e a metodologia desenvolvida neste trabalho mostraram ser eficazes e relativamente simples, além de proporcionarem excelente controle dos parâmetros de roleteamento, tais como força de roleteamento, rotação e número de revoluções.

O valor estimado do limite de fadiga através da microdureza equivalente da matriz (310 MPa) conduziu a um resultado muito próximo ao do experimental (300 MPa).

Agradecimentos

À General Motor do Brasil, pelo fornecimento do material, e ao Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística da EESC - USP, pelo uso de seus equipamentos e instalações.

REFERÊNCIAS

- 1 QIT-Fer et Titane Inc. *Ductile Iron Data for Engineers*. Montreal, 1990.
- 2 HEMANTH, J. *Fracture toughness of austempered chilled ductile iron*. *Materials and Design*. v.19, p. 269-277, 1998.
- 3 KINAP, P.E.B. Tratamentos térmicos para a obtenção de cementita esferoidizada em ferro fundido nodular. Dissertação de Mestrado, IFSC/IQSC/EESC, São Carlos, 2001.
- 4 BERETTA, S., BLARASIN, A., ENDO, M., GIUNTI, T., MURAKAMI, Y. *Defect tolerant design of automotive components*. *International Journal of Fatigue*, v.19, n.4, p. 319-333, 1997.
- 5 WANG, G., TAYLOR, D., BOUQUIM, B., DEVLUKIA, J., CIEPALOWICZ, A. *Prediction of fatigue failure in a camshaft using the crack modeling method*. *Engineering Failure Analysis*, n.7, p. 189-197, 2000.
- 6 MALUF, O., SPINELLI, D. Influência do roleteamento nas propriedades de fadiga de um ferro fundido nodular perlítico. In: III Simpósio em Ciência e Engenharia de Materiais, 26 e 27 de novembro de 2001. *Anais*, IFSC/IQSC/EESC, São Carlos, 2001.
- 7 Anon. *Internal Standard GMW10MIR-C-N600-3*. General Motors do Brasil, São Paulo, Brasil.
- 8 PETERSON, R.E. *Stress Concentration Factors*. 1.ed, Wiley, New York, 1974.