

INFLUÊNCIA DOS NÓDULOS NA RESISTÊNCIA AO DESGASTE DO FERRO FUNDIDO NODULAR PERLÍTICO EM DESLIZAMENTO COM A CHAPA DE AÇO PARA ESTAMPAGEM EXTRA PROFUNDA – INTERSTICIAL FREE (EEP-IF)

COBEF2017-1142

Sergio Luiz Manenti¹, sergio.manenti27@gmail.com
Paulo Victor Prestes Marcondes², marcondes@ufpr.br
Paulo Soares¹, pa.soares@pucpr.br
Ricardo Diego Torres¹, ricardo.torres@pucpr.br

¹Pontifícia Universidade Católica, PUC-PR, Rua Imaculada Conceição, 1155 CEP80215-901, Curitiba, Pr – Brasil

²Departamento de Engenharia Mecânica - Centro Politécnico – Universidade Federal do Paraná - Caixa Postal 19011, 81531-990 – Curitiba – Paraná – Brasil.

Resumo: Este trabalho tem como objetivo avaliar a influência dos nódulos na resistência ao desgaste de pinos de ferro fundido nodular em deslizamento recíproco contra uma chapa de aço para estampagem extra profunda – Intersticial free (EEP-IF). Os pinos de ferro fundido foram extraídos de uma barra redonda obtida por fundição contínua, processo FUCO®, nas seguintes posições: superfície da barra (maior velocidade de resfriamento), meio raio da barra (velocidade de resfriamento intermediária) e centro da barra (menor velocidade de resfriamento). Através da extração dos pinos em diferentes posições na barra foi possível variar o número dos nódulos de grafita. Por caracterização microestrutural foi possível determinar valores de 1535 nod/mm² na superfície e 627 nod/mm² no centro da barra. Para se obter uma matriz perlítica nas três posições o ferro fundido nodular foi submetido a um tratamento térmico de normalização. O comportamento tribológico foi investigado nas três posições em contato com a chapa de aço para conformação extra profunda - intersticial free (EEP-IF), utilizando a técnica de ensaio por deslizamento recíproco, baseado na norma ASTM 133-05. Nos resultados, o coeficiente atrito para o par tribológico não mostra diferenças significativas entre as três posições. O volume removido nos ensaios tribológicos foi determinado em função da calota esférica desgastada na ponta dos pinos para cada posição, onde observa-se maior desgaste em volume, na posição superfície com maior número de nod/mm². A chapa de aço apresenta trilhas com desgastes severos, característico de desgaste abrasivo com adesão de material.

Palavras-chave: Ferro Fundido Nodular, Tribologia, Desgaste, Conformação.

1. INTRODUÇÃO

Ocorrências relacionada a desgastes em matriz para conformação de chapas na indústria automotiva, estão associadas principalmente a otimizações, que buscam melhorias durante o processo produtivo por estampagem. Em destaque cita-se como principal a substituição do aço (chapa), modificação indevida, mas comum na indústria para redução de custos no produto acabado.

Porém os resultados normalmente são transmitidos para as ferramentas de conformação, onde, raios da matriz em particular suportam tensões elevadas e severas no ponto de vista tribológico. Segundo Michael P. Pereira, et al. (2009) em uma peça embutida há uma região que separa o material polido que percorreu a superfície do raio da matriz e outras livre do contato, indicando claramente que os efeitos do desgaste estão localizados nos raios de entrada da matriz.

Na Fig. 1, Cora et al. (2012), classifica as regiões 1 e 2, como regiões de deslizamento (movimento relativo) da chapa em relação a matriz e o prensa-chapas. Nesta região a chapa também sofre esforços de compressão na direção circunferencial. É importante controlar a pressão da prensa chapas, para evitar o enrugamento da chapa, pois estas rugas se propagam da borda para o interior da matriz, podendo concentrar trincas ou causar o travamento ou “engripamentos” das peças durante o processo de conformação, ocasionando rompimento na lateral da peça. À medida que o material segue em conformação na direção da cavidade da matriz, a chapa é dobrada na região 3. Na sequência, a região 4 ocorre a deformação plana, responsável pela uniformização da espessura de parede através do estiramento do material. Na região 5 ocorre o dobramento da chapa, seguindo o raio do punção. Finalmente, na região 6 ocorre a definição final da geometria da peça, em contato do punção com o fundo da matriz.

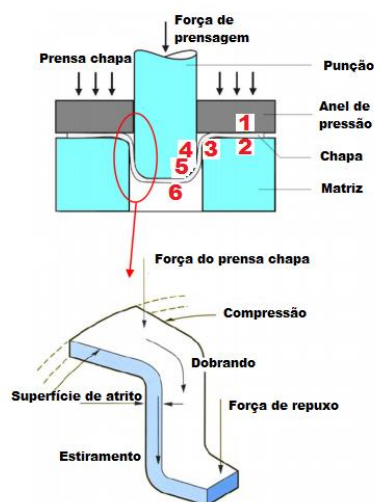


Figura 1. – Superfícies de contato durante um embutimento exemplo copo (Cora et al., 2012)

Em outro estudo Groche *et al.* (2011), utilizam o Ferro fundido nodular de classe (GGG70L, EN-GJS-700-2L, 0,7070L), em experimento de deslizamento com chapa de aço DP600, classe de aço que fazem parte de uma linha de aços avançados de alta resistência, *AHSS – Advanced High Strength Steel*. No experimento o ferro fundido nodular foi utilizado sem tratamento térmico e sem revestimento, a chapa de aço DP600 com 1,6 mm de espessura revestida com zinco. Nos resultados os autores identificam que no desgaste abrasivo o molde depende exclusivamente da pressão de contato, e no desgaste adesivo o fator predominante é na velocidade de deslizamento, concluindo em experimento que quanto maior a força aplicada de contato maior será o desgaste abrasivo. E quanto maior a velocidade de deslizamento maior será o desgaste adesivo.

Baseado em um processo de conformação para indústria automotiva, o objetivo deste trabalho é investigar o efeito da quantidade de nódulos na resistência ao desgaste do ferro fundido nodular perlítico em deslizamento com a chapa de aço para estampagem extra profunda – intersticial free (EEP-IF).

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para o estudo, a análise da influência dos nódulos na resistência ao desgaste do ferro fundido nodular perlítico em deslizamento contra a chapa de aço EEP-IF segue as seguintes etapas:

2.1 Análise Microestrutural

Para o estudo foi selecionado o ferro fundido nodular obtido pelo processo de fundição contínua FUCO®, devido à facilidade de se obter em um único corpo de prova, neste caso, uma barra de 120 mm de diâmetro por 25 mm de espessura, com variações na quantidade de nódulos por unidade de área.

O tamanho de nódulos tem uma relação direta com o número de nódulos, ou seja, um elevado número de nódulos normalmente está associado a nódulos menores. (Guesser, 2009). A taxa de solidificação (espessura do fundido), inoculação e composição química atuam no tamanho dos nódulos. Elevados teores de carbono e silício tendem a formar nódulos maiores, assim como taxa de solidificação mais lenta (peças espessas), uma inoculação mais eficiente tende a gerar nódulos menores.

Durante a fabricação, a barra fundida é processada por lingotamento contínuo denominado FUCO®, que passa por diversas operações, porém, na última denominada resfriador, tem a função de controlar a taxa de resfriamento durante a solidificação da barra. Neste material em específico, a barra recebe um resfriamento maior, em seu corpo externo do que no núcleo da barra, que segundo (Guesser, 2009), modifica a microestrutura do ferro fundido nodular, e principalmente para este trabalho, altera a quantidade de nódulos por unidade de área.

Desta forma, o material foi dividido para as análises em três posições, conforme a Figura 2, em: (S) - superfície, (MR) - meio raio e (C) - centro.

Com auxílio do microscópio óptico e integrado ao software Olympus analySIS Image Processing, foram realizadas as caracterizações conforme a norma (ASTM A247-67).



Figura 1. – Identificação das posições na barra em estudo (O autor, 2017)

2.2. Ensaio de Dureza

Para o ensaio de dureza, foi realizado na escala Brinell (HB), recomendada para medição de dureza em aços e ferros fundidos. Nos ensaios foram realizadas medições baseado na norma (NBR 6394-80). Referenciado pela norma, foi aplicado fator de carga 30, com esfera de aço de 2,5 mm, força de 1840 N e tempo de aplicação da carga de 10 a 15 segundos por medição.

2.3. Fabricação dos Pinos e Preparação das Chapas de Aço

Para fabricação das amostras iniciais adotou-se o mesmo critério nas identificações do material, posições (S) – superfície, (MR) - Meio Raio e (C) – Centro.

Utilizou-se para preparação inicial das amostras as máquinas: serra, para cortar o material em cada posição (S, MR e C), prevendo sobremetal, e posterior usinagem na fresadora convencional usinando o material com dimensões de 25x25 mm, conforme desenho esquemático na Figura 3.

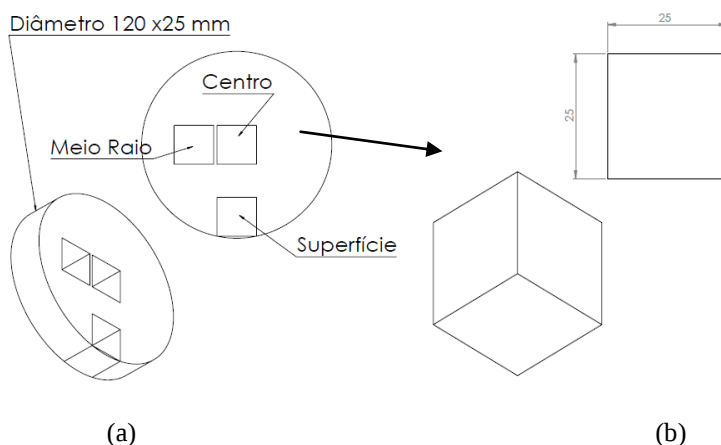


Figura 3. – Desenho esquemático da preparação da amostra (a) – Identificação de posição e corte da barra (b) – Cubo fresado (O autor, 2017)

As dimensões dos cubos (25 x 25 mm) de ferro fundido nodular foram baseadas na literatura de (Guesser, 2009) que conforme Fig. 4 define 2 horas em forno atingindo temperatura entre 850 a 920°C para cada 25 mm de material a ser normalizado com resfriamento ao ar forçado. O tratamento térmico de normalização tem como objetivo nos ferros fundidos nodulares a transformação para fase perlítica.

As amostras foram aquecidas no forno a 900° C, mantido após atingir a temperatura por 2 horas e resfriado ao ar forçado.

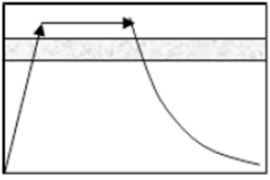
Normalização	Cinza e Nodular
Velocidade de aquecimento	50 a 100 °C/h
Temperatura	850 a 920 °C
Tempo de manutenção	2 h até 25 mm de espessura + 1h por 25 mm que exceder
Resfriamento	Ar forçado
Ciclo térmico	

Figura 4. – Tratamento térmico de normalização (Guesser, 2009)

Os pinos foram fabricados por usinagem em eletro-erosão a fio, e cada cubo normalizado foi retirado 3 pinos de cada posição (S, MR e C). As dimensões são de 6 mm de diâmetro e 25 mm de comprimento conforme Fig. 5 (a). Para análise microestrutural, foi cortado 5 mm da ponta pino e embutido em baquelite par facilitar a preparação e análise em microscópio óptico das amostras.

Para realização dos ensaios tribológicos os pinos foram usinados em uma máquina CNC (comando numérico computadorizado) de 3 eixos interpolando uma meia esfera de raio 3 mm na ponta dos pinos conforme Fig. 5 (b), seguido de polimento com lixas 500, 800, 1000 e 1200. Conforme Fig 5 (c).

As chapas de aço EEP-IF, laminada com espessura de 0,75 mm, foram cortadas em uma guilhotina, em retângulos de 30 mm x 25 mm, para possibilitar e facilitar o aperto na morsa do tribômetro durante o ensaio.

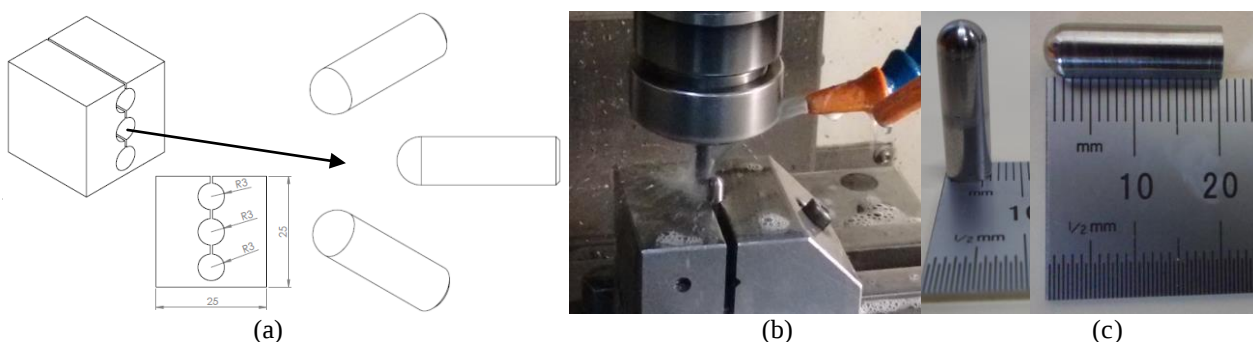


Figura 5. – Pinos de Ferro Fundido Nodular (a) – desenho esquemático corte eletro-erosão (b) – Usinagem em centro de usinagem por interpolação (c) – Pino acabado (O autor, 2017)

2.4. Ensaios Tribológicos

Os ensaios tribológicos foram baseados pela norma ASTM G133-05 (2010), que consiste em um ensaio de deslizamento recíproco. Os ensaios foram realizados a seco, no laboratório de Tribologia do LACEM / PUC-PR. O equipamento utilizado foi um tribômetro universal (CSM Instruments), conforme mostra a Fig. 6.

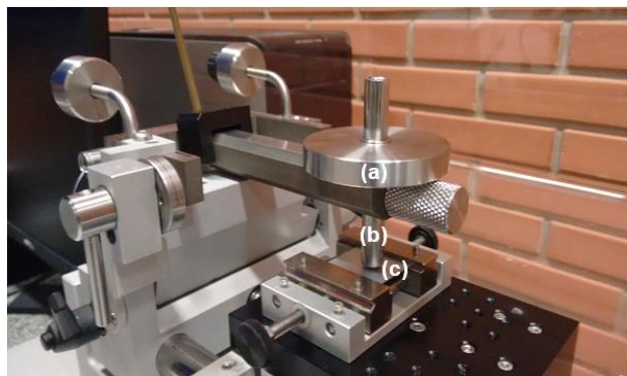


Figura 6. – Tribômetro de deslizamento recíproco do laboratório de tribologia PUC-PR. (a) Carga normal, (b) Amostra Ferro fundido nodular, (c) Chapa EEP-IF (O Autor, 2017)

Os parâmetros para os ensaios tribológicos são indicados na Tab. 1.

Tabela 1. Parâmetros dos ensaios de tribologia (O autor, 2017)

Parâmetro	Valor
Amplitude de movimento	2 mm
Velocidade Máxima	0,5 cm/s
Distância de ensaio	10 m
Carga normal	2 N

Para cada condição, foram realizados três ensaios. Os dados da variação do coeficiente de atrito foram analisados com o programa *TriBox 4.4* (CSM Instruments).

Para as análises de microscopia eletrônica de varredura foi utilizado o equipamento MEV/EDS Vega 3 LV (Tescan), do Laboratório de Microscopia Eletrônica da PUC-PR.

Para calcular o desgaste em volume foram realizadas medições do raio desgastado após ensaios tribológicos em cada pino, (S, MR e C) com MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura), conforme figura 7(a). As dimensões estão representadas na figura 7(b). O volume removido em cada posição foi obtido através da aplicação da Eq. (1) e Eq. (2).

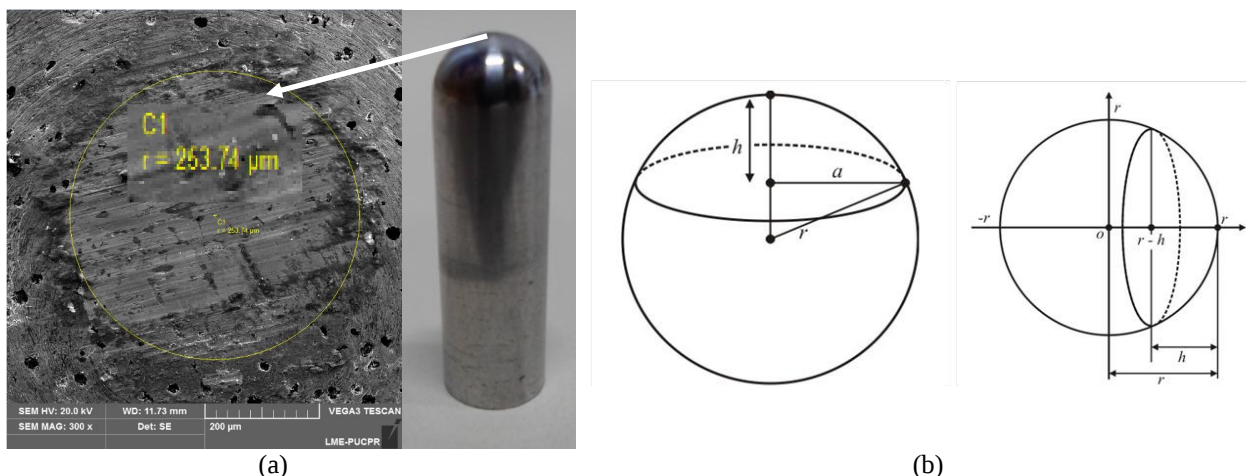


Figura 7. – (a) - Raio projetado da calota esférica desgastada 300x. (b) Desenho esquemático das dimensões

$$h = r - (\sqrt{r^2 - a^2}) \quad (1)$$

$$V = \frac{1}{3} \pi h^2 (3r - h) \quad (2)$$

Onde:

- V = volume removido;
- a = raio da calota medido no (MEV) ;
- r = raio do pino;
- h = altura da calota desgastada;

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 8, mostram imagens em microscópio óptico com ampliação 100x, e resultados para cada posição (S, MR e C) da quantidade de nódulos por mm², realizado na barra de ferro fundido nodular

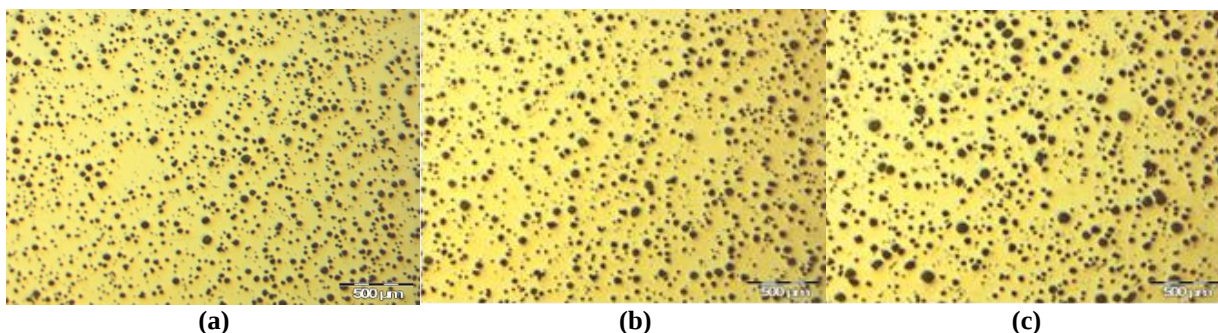


Figura 8. – Posição na barra – (a) - Superfície - 1535 nod/mm², (b) – Meio Raio – 1148 nod/mm², (c) – Centro – 627 nod/mm² (O autor, 2017)

Com a caracterização microestrutural, determinou valores de 1535 nódulos/mm² na posição (S) – superfície, 1148 nódulos/mm² na posição (MR) – meio raio e 627 nódulos/mm² na posição (C) - centro. Tratado termicamente por normalização o ferro fundido ficou característico perlítico e mantém a mesma dureza de 195 HB, nas três posições.

O gráfico do coeficiente de atrito entre as posições (S, MR e C) em função da distância metros é representado na Fig. 11.

Durante o estudo tribológico observa-se um comportamento típico inicial de “running-in” com aumento no coeficiente de atrito em valores de até 0,85 µm. Após este aumento, e também característico dos ensaios tribológicos, as asperezas das superfícies são quebradas e o coeficiente de atrito é reduzido em todas as amostras se mantendo em uma média de 0,55µm ao longo dos 10 m de ensaio realizado.

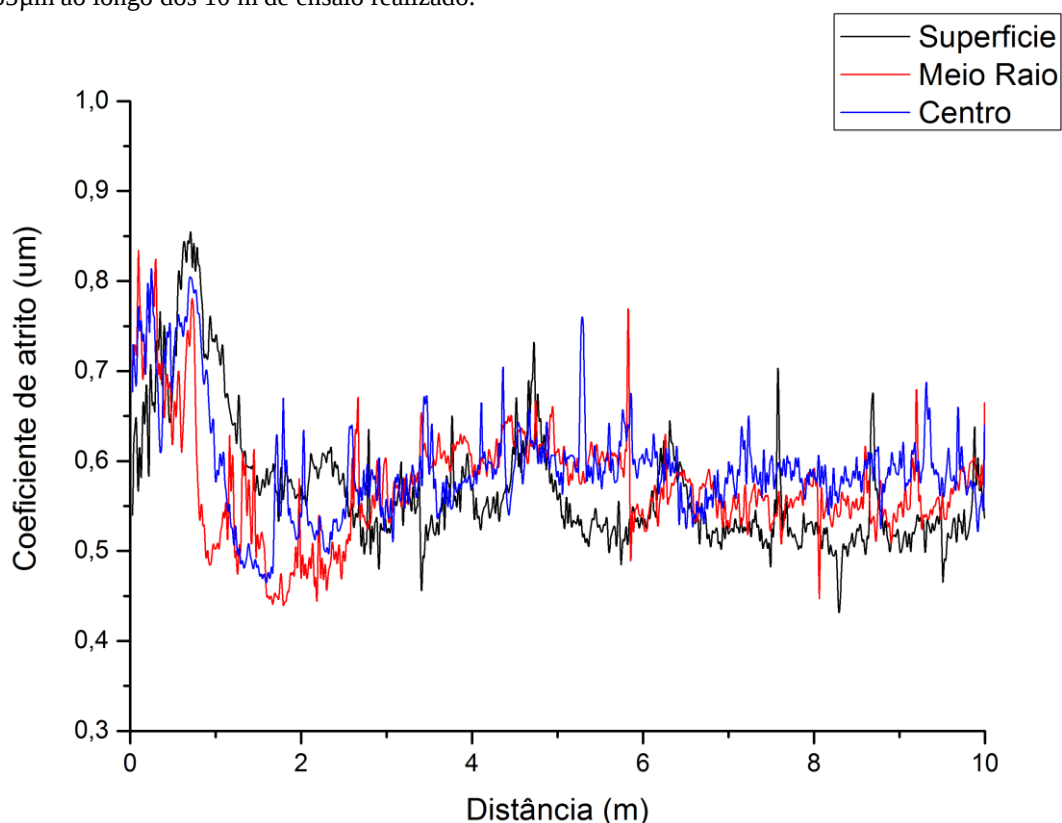


Figura 11. – Coeficiente de atrito em função da distância para cada posição S, MR, C (O autor, 2017)

As Figuras 12, 13 e 14, mostram as imagens das trilhas de desgastes na chapa de aço, e nos pinos obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), nas 3 posições da barra (S, MR e C).

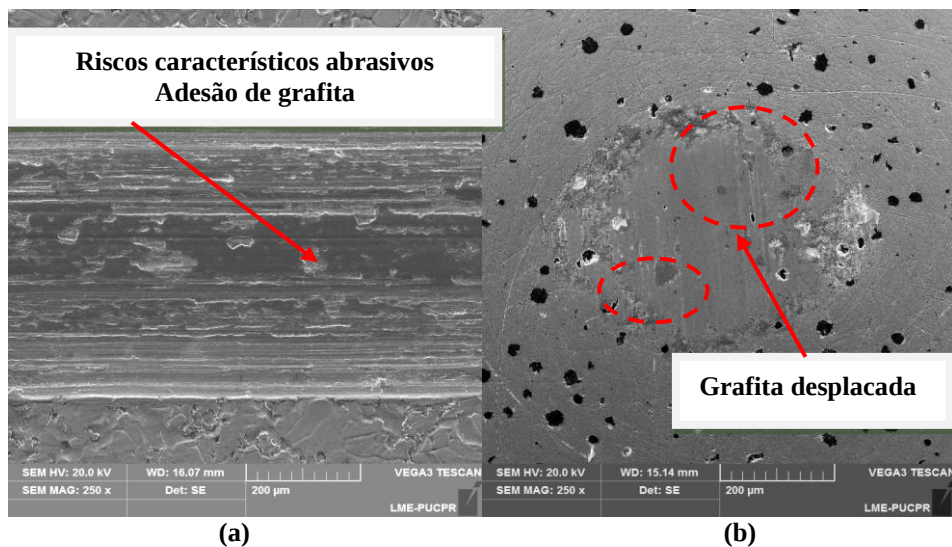


Figura 12. – (a) – Trilha de desgaste da chapa IF x pino posição S - superfície (b) Área de desgaste do pino de ferro fundido nodular na posição S - superfície (O autor, 2017)

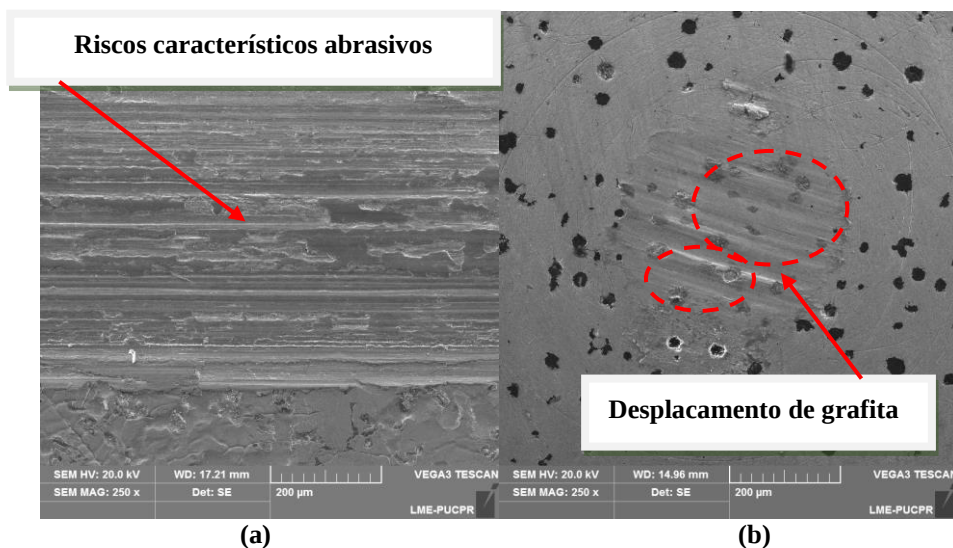


Figura 13. – (a) – Trilha de desgaste da chapa IF x pino posição MR – meio raio (b) Área de desgaste do pino de ferro fundido nodular na posição MR – meio raio (O autor, 2017)

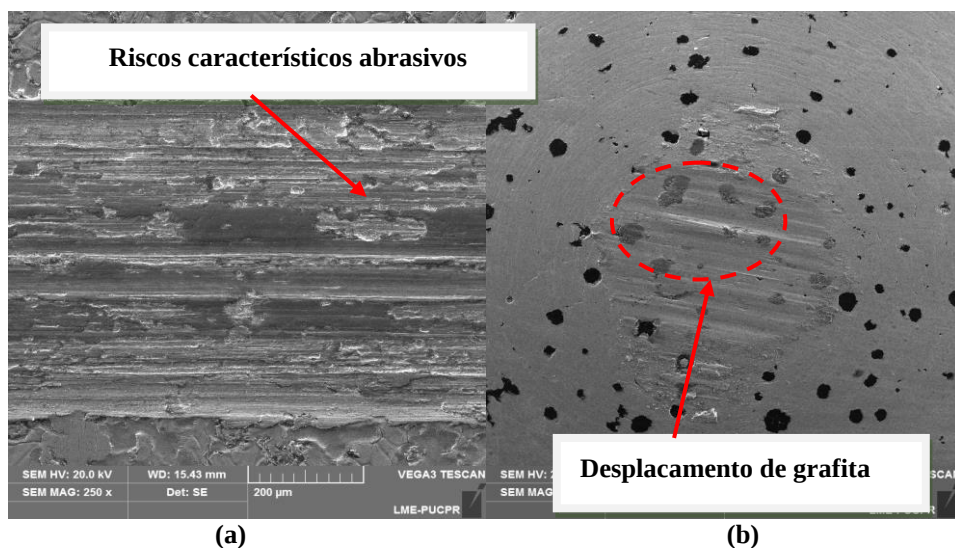


Figura 14. – (a) – Trilha de desgaste da chapa IF x pino posição C – centro (b) Área de desgaste do pino de ferro fundido nodular na posição C – centro (O autor, 2017)

A trilha de desgaste formado nas chapas de aço observa-se riscos severos, característico abrasivo, com remoção de material. Os pinos de ferro fundido nodular também evidenciam o desgaste abrasivo, porém observa-se menor intensidade na posição superfície (S) região de maior quantidade de nódulos/mm².

Em todas as posições a grafita do ferro fundido nodular é arrancada durante o ensaio e reagem no deslizamento como lubrificante.

Na Figura 15, mostra o gráfico por posição, (S, MR e C), com a taxa de desgaste em volume (mm³).

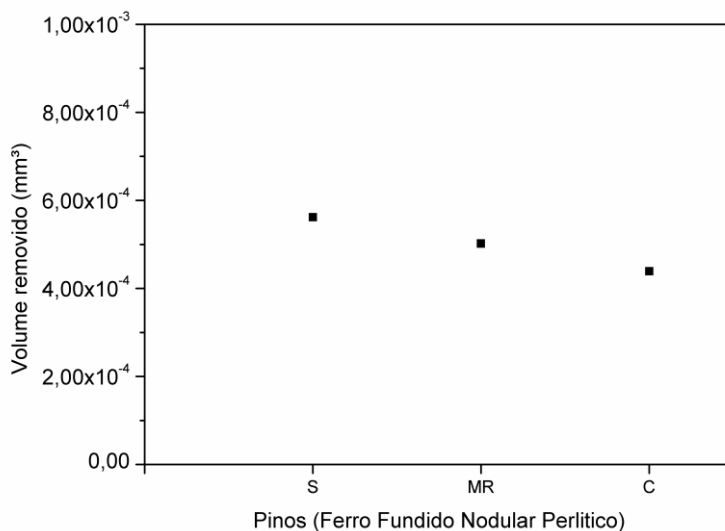


Figura 15. – Gráfico do desgaste em volume dos pinos de ferro fundido nodular perlítico em cada posição S, MR, C. (O autor, 2017)

Com os cálculos da taxa de desgaste, é possível observar uma tendência de maior remoção de volume na posição (S) superfície, posição de maior quantidade de nódulos/mm².

As Figuras 16, 17 e 18, mostram as imagens por EDS, nas 3 posições da barra (S, MR e C).

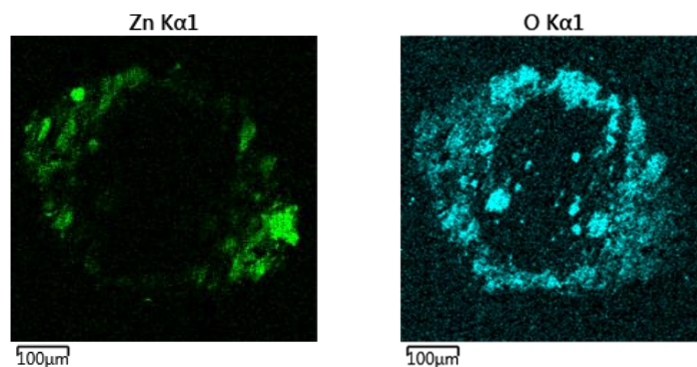


Figura 16. Imagem EDS adesão de zinco no pino posição (S) superfície. (O autor, 2017)

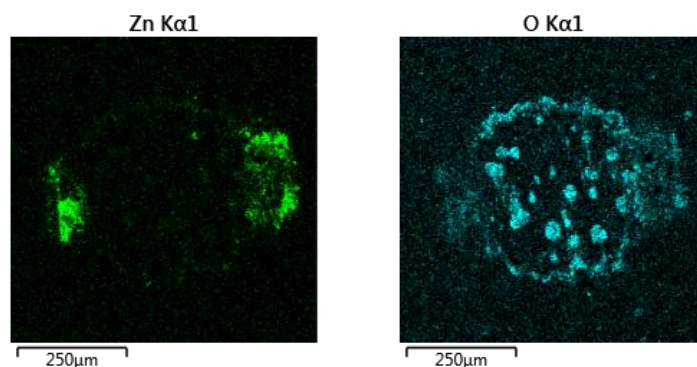


Figura 17. Imagem EDS adesão de zinco no pino posição (MR) meio raio. (O autor, 2017)

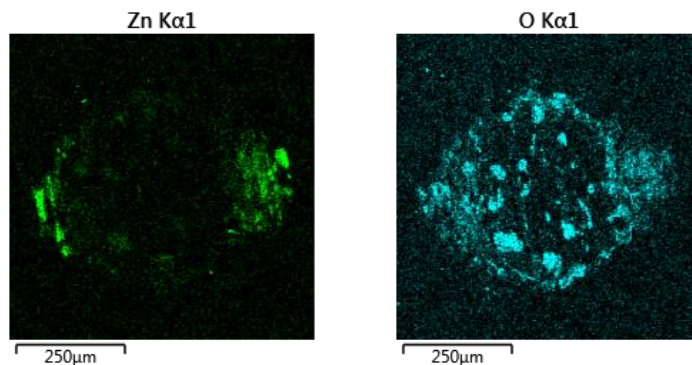


Figura 18. Imagem EDS adesão de zinco no pino posição (C) centro. (O autor, 2017)

Nas imagens obtidas por EDS nos pinos observa-se adesão de óxido de zinco em todas as posições, porém é possível notar uma maior concentração na posição S superfície, posição de maior quantidade de nódulos/mm².

4. CONCLUSÃO

Durante os estudos tribológicos, todas as amostras de ferro fundido nodular (S, MR e C), mostraram resultados semelhantes no coeficiente de atrito, inicialmente atingem valores de 0,85 μm no “running in”, decrescem quando quebram as asperezas entre as superfícies e seguem uniforme em todas as amostras em uma média de 0,55 μm até o final do ensaio com distância de 10 m, não havendo diferenças significativas entre as posições.

Calculando a taxa de desgaste, foi possível identificar uma tendência de maior volume desgastado na amostra de posição (S) – superfície, posição de maior número de nódulos/mm². Observe-se também nas imagens obtidas pelo MEV menor evidência de riscos no pino posição superfície (S), esta condição pode ser associada a um melhor desempenho dos nódulos na lubrificação, que para esta posição (S) são menores e uniformemente espalhados.

Por tanto com este estudo conclui-se que quanto maior a quantidade de nódulos/mm² maior é o desgaste em volume, porém, menor é a evidência de riscos característicos abrasivos, devido o efeito lubrificante dos nódulos em maior quantidade na posição superfície - (S), outra avaliação é nas imagens por EDS, onde, observa-se maior adesão de óxido de zinco da chapa no pino, também na posição superfície (S), um dos motivos deste resultado é devido a maior quantidade de nódulos de grafita aderir no zinco e vice-versa, típico de materiais com baixa dureza.

5. REFERÊNCIAS

- Abedi H.R., Fareghi A., Saghafian H., Kheirandish S.H., “Sliding wear behavior of a ferritic–pearlitic ductile cast iron with different nodule count” – Wear, 268 (2010) – pg 622 – 628.
- Ângelo JR., Edvaldo Casagrande. Caracterização de Ferro Fundido Nodular Obtido por Fundição Contínua. PUC-PR, Curitiba/Pr. Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, agosto de 2003.
- Antoni Wladyslaw Orłowicz, Andrzej Trytek “Effect of rapid solidification on sliding wear of iron castings” - Wear 254 (2003), pg 154 – 163.
- ASM Handbook, (1992), “Friction, Lubrication, and Wear Technology”, V.18, ASM International.
- ASTM International G133-05 (2010), Standard Test Method For Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear. Catálogo Técnico Fundição Tupy – Fundição Contínua- FUCO®, 2007, www.tupy.com.br.
- DIN EN 10204: 2004., Norma europeia “Produtos Metálicos – Tipos de Certificados e Ensaio”.
- DIN EN 10327: 2004., Norma europeia “Continuously Hot-Dip Coated Strip and Sheet of Low Carbon Steels for Cold Forming”
- DIN EN 1563., Norma europeia “Fundição Ferros Fundidos com Grafita Esférica” Versão alemã EN 1563 : 1997 + A1:2002 + A2:2005.
- Dommarco R.C., Jaureguiberry A.J., Sikora J.A., “Rolling contact fatigue resistance of ductile iron with different nodule counts and matrix microstructures” – Wear, 261 (2006), pg 172 – 179.
- Dommarco R.C., Sousa M.E., Sikora J.A., Abrasion resistance of high nodule count ductile iron with different matrix microstructures – Wear, 257 (2004), pg 1185 – 1192.
- Groche P., Moeller N., Hoffmann H., SUH J., Influence of gliding speed and contact pressure on the wear of forming tools, Wear, 271 (2011) pg 2570-2578.
- Guesser, Wilson Luiz. Propriedades mecânicas dos ferros fundidos – São Paulo: Editora Blucher, 2009.
- Hutchings I.M. Tribology Friction and Wear of Engineering Materials. Edward Arnold, London, 1992.
- Kirkhorn L., Bushiya, V., Andersson M., Stahl J.-E., The influence of tool steel microstructure on friction in sheet metal forming, Wear, 302 (2013) pg1268-1278.

Laino S., Sikora J.A., Dommarco R.C. “Development of wear resistant carbidic austempered ductile iron (CADI)” – Wear, 265 (2008), pg 1 – 7.

Le Roux S., Boher C., Penazzi L., Dessain C., Tavernier B., A methodology and new criteria to quantify the adhesive and abrasive wear damage on a die radius using white light profilometry, Tribology International, 52 (2012) pg 40-49.

Lukasz Wojciechowski., Thomas G. Mathia., Conjecture and paradigm on limits of boundary lubrication, Tribology International, 82 (2015) pg 577-585.

Mark Beltowski., Peter J. Blau., Qu J., Wear of spheroidal graphite cast irons for tractor drive train components, Wear, 267 (2009) pg 1752-1756.

Meric C., Sahin S., Backir B., Koksai N.S., “Investigation of the boronizing effect on the abrasive wear behavior in cast Irons” - Materials and Design, 27 (2006) 751–757.

Michael P. Pereira., John L. Duncanb., Wenyi Yanc., Bernard F. Rolfed “Contact pressure evolution at the die radius in sheet metal stamping” - journal of materials processing technology, 209 (2009) 3532–3541.

Mircea Terheci., Microscopic investigation om the origin of wear by surface fatigue in dry sliding, Materials Characterization, 45 (2000) pg 1-15.

Miyauchi T., Tsujimura T., Handa K., Nakayama J., Shimuzu K. “Influence of silicon carbide filters in cast iron composite brake blocks on brake performance and development of a production process” – Wear, 267 (2009), pg 833 – 838.

Pintaude G., Bernardes F.G., Santos M.M., Sintora A., Albertin E. “Mild and severe wear of steels and cast irons in sliding abrasion” – Wear, 267 (2009), pg 19 – 25.

Sugwon Kim, Cockcroft S.L., Omran A.M., “Optimization of the process parameters affecting the microstructures and properties of compacted graphite iron” - Journal of Alloys and Compounds, 476 (2009) 728–732.

INFLUENCE OF THE NODULES ON THE WEAR RESISTANCE OF PERLITICAL NODULAR CAST IRON IN RECIPROCAL SLIDING AGAINST AN DEEP-DRAWING STEEL SHEET - INTERSTITIAL FREE (EEP-IF)

COBEF2017-1142

Sergio Luiz Manenti¹, sergio.manenti27@gmail.com

Paulo Victor Prestes Marcondes², marcondes@ufpr.br

Paulo Soares¹, pa.soares@pucpr.br

Ricardo Diego Torres¹, ricardo.torres@pucpr.br

¹Pontifícia Universidade Católica, PUC-PR, Rua Imaculada Conceição, 1155 CEP80215-901, Curitiba, Pr – Brasil

²Departamento de Engenharia Mecânica - Centro Politécnico – Universidade Federal do Paraná - Caixa Postal 19011, 81531-990 – Curitiba – Paraná – Brasil.

Abstract. The objective of this work was to evaluate the influence of nodules on the wear resistance of nodular cast iron pins in reciprocal sliding against a steel sheet for extra deep stamping - Interstitial free (EEP-IF). The cast iron pins were extracted from a round bar obtained by continuous casting, FUCO® process, in the following positions: bar surface (higher cooling speed), half bar radius (intermediate cooling speed) and bar center (Speed of cooling). Through the extraction of the pins in different positions in the bar it was possible to vary the number of the graphite nodules. By microstructural characterization it was possible to determine values of 1535 nod / mm² on the surface and 627 nod / mm² in the center of the bar. In order to obtain a perlite matrix in the three positions the nodular cast iron was subjected to a normalization heat treatment. The tribological behavior was investigated in the three positions in contact with the steel plate for deep drawing conformation - interstitial free (EEP-IF), using the reciprocal sliding technique, based on ASTM 133-05. In the results, the coefficient friction for the tribological pair does not show significant differences between the three positions. The volume removed in the tribological tests was determined as a function of the worn spherical cap on the tip of the pins for each position, where greater wear in volume is observed in the position with the highest number of nod / mm². The sheet of steel presents tracks with severe wear, characteristic of abrasive wear with adhesion of material.

Keywords: Nodular Cast Iron, tribology, wear, Conformation.