

ESTUDO DO COMPORTAMENTO AO DESGASTE DE FERROS NODULARES AUSTEMPERADOS PARA APLICAÇÕES EM EIXO COMANDO DE VÁLVULAS¹

Amanda Souza Oliveira Pimente²
Eduardo Prudente Ferreira³
Júlio Cesar Jubilei Milan⁴
Wilson Luiz Guesse⁵

Resumo

Apresenta-se um estudo sobre resistência ao desgaste em ferros nodulares austemperados (320°C e 340°C), correspondente às classes 3 e 4 da norma ASTM, comparativamente a um nodular temperado e revenido, objetivando desenvolver alternativas para eixos comando de válvulas. Foram efetuados ensaios de pino-sobre-disco empregando pino de alumina e disco do material em teste. Todos os ferros fundidos nodulares ensaiados apresentaram dureza na faixa de 40 HRc a 46 HRc. Constatou-se o efeito da presença dos nódulos de grafita, pois os danos na matriz devido ao ensaio de desgaste concentram-se próximos aos nódulos de grafita. Verificou-se nos resultados de desgaste o bom desempenho do nodular austemperado a 320°C, comparativamente aos outros dois nodulares ensaiados, o que o qualifica para estudos posteriores de aplicação em eixos comando de válvulas.

Palavras-chave: Austêmpera; Desgaste; Eixo comando de válvulas.

STUDY OF WEAR BEHAVIOR OF AUSTEMPERED DUCTILE IRON FOR APPLICATIONS IN CAMSHAFT

Abstract

It is presented a study on wear resistance of austempered ductile iron (320°C and 340°C), corresponding to grades 3 and 4 of ASTM Standard, compared with a quenched and tempered ductile iron, looking for developing alternatives for camshafts. Tests were conducted employing the pin-on-disc test, with the pin of alumina and the disc with the ductile iron tested. All ductile irons were tested in the hardness range of 40-46 HRc. It was observed the effect of the presence of graphite nodules, promoting damage of the matrix near graphite particules. It was found good wear resistance performance of the nodular austempered at 320°C, compared to the other two tested ductile irons, which qualifies it for further studies of application in camshafts.

Key words: Austempere ductile iron; Wear; Camshaft.

¹ Contribuição técnica ao 67º Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Engenheiro de Produção. Mestre em Eng. Doutoranda na Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), Brasil.

³ Engenheiro de Fundição. Mestrando em Ciência e Eng. de Materiais, UDESC, Engenheiro na Tupy S/A., Brasil.

⁴ Engenheiro Mecânico. Dr. Professor da UDESC, Brasil.

⁵ Engenheiro Metalúrgico, Dr. Professor da UDESC, Gerente de Desenvolvimento Tecnológico e Eng. Ambiental na Tupy S/A, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Os ferros nodulares austemperados (ADI) têm encontrado aplicação em componentes solicitados ao desgaste, principalmente em situações envolvendo desgaste abrasivo. Exemplos típicos são peças em equipamentos de movimentação de terra e de mineração. Na indústria automotiva, a utilização dos nodulares austemperados concentra-se principalmente em peças submetidas a grandes esforços mecânicos, associados a solicitações de impacto, como em peças de suspensão de veículos ⁽¹⁾. Na Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC) diversos estudos foram conduzidos objetivando o estudo dos nodulares austemperados de alta tenacidade, com microestrutura de ausferrita e ferrita. ⁽²⁻⁶⁾

Uma das possibilidades ainda a ser explorada é o emprego de nodulares austemperados em eixo comando de válvulas, componente sujeito a esforços mecânicos intensos e desgaste. Eixos comando de válvula são produzidos em ferro fundido cinzento coquilhado, em ferro nodular e aços temperados superficialmente, e em alguns casos, em ferros fundidos submetidos a refusão superficial.

O objetivo do presente trabalho é o estudo do nodular austemperado como material alternativo na fabricação de eixos comando de válvulas caracterizando-se a resistência ao desgaste de dois nodulares austemperados, comparativamente a um nodular temperado e revenido, de mesma faixa de dureza.

1.1 Ferro Nodular Austemperado

A microestrutura do ferro nodular austemperado é constituída de grafita e matriz de ferrita acicular e austenita de alto teor de carbono. Este grupo de ferros fundidos apresenta excelentes propriedades mecânicas, resultado da matriz presente na microestrutura e da forma dos nódulos de grafita. A Tabela 1 mostra as 5 classes de ADI, segundo a norma ASTM A897M – 90. ⁽¹⁾

Tabela 1. Especificação do ADI conforme ASTM A897, mínimas propriedades

Classe	LR (MPa)	LE (MPa)	A (%)	Impacto (J)	Dureza (HB)
1	850	550	10	100	269 – 321
2	1050	700	7	80	302 – 363
3	1200	850	4	60	341 – 444
4	1400	1100	1	35	366 – 477
5	1600	1300	N/A	N/A	444 - 555

Fonte: Hayrynen et, al., 2002

A maior resistência ao desgaste do ADI é obtida nos materiais austemperados a temperaturas mais baixas, e com maior resistência mecânica, com isto as classes de maior interesse no requisito desgaste são as classes 3, 4 e 5, mostradas na Tabela 1. ⁽⁷⁾

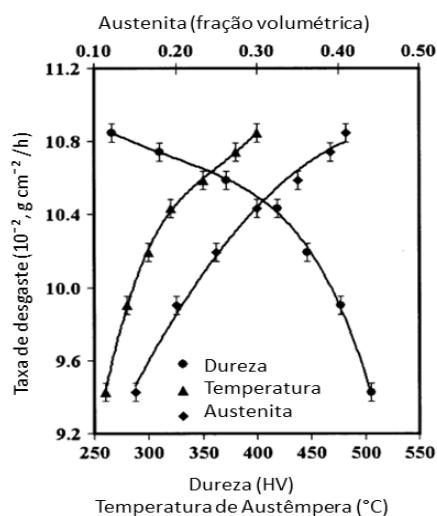
1.2 Eixo Comando de Válvulas

O eixo comando de válvula é um componente de motor a combustão interna, responsável pela abertura e fechamento das válvulas. Durante os ciclos de trabalho ocorrem regimes de lubrificação alternados, causa da geometria do came e das pressões impostas pelo processo. No conjunto do trem de válvulas, composto por eixo comando e válvulas, as pressões Hertzianas são intensas, Onesco et at. ⁽⁸⁾ demonstraram que as estas pressões variam da ordem de 18 a 2.500 MPa.

O principal mecanismo de falha de um eixo comando de válvulas é o desgaste, que se manifesta como danificações na superfície, denominadas de scuffing e pitting.^(9,10)

1.3 Desgaste em ADI

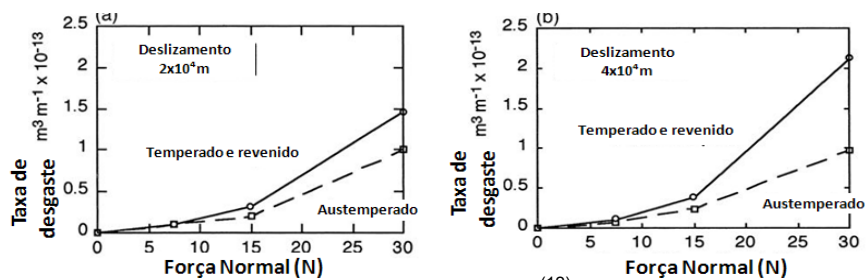
Straffelini et al⁽¹¹⁾, realizaram ensaios de desgaste a seco em ferros fundidos nodulares austemperados, em tribo-sistema do tipo Amsler, utilizando cargas de 50 N a 500N, e velocidade de rotação entre os discos com diferença de 10%. Concluíram que nestas condições a baixa taxa de desgaste do ADI é resultado da ação lubrificante da grafita, pois estas partículas são arrancadas durante o ensaio de desgaste de rolamento. Kumari & Rao⁽⁷⁾ estudaram o desgaste no ADI para diversas condições de austêmpera, utilizando equipamento pino-sobre-disco, e pressão normal de contato de 23 MPa, e mostraram que a melhor resistência ao desgaste foi obtida com baixas temperaturas de austêmpera, Figura 1.



Fonte: Kumari & Rao.⁽⁷⁾

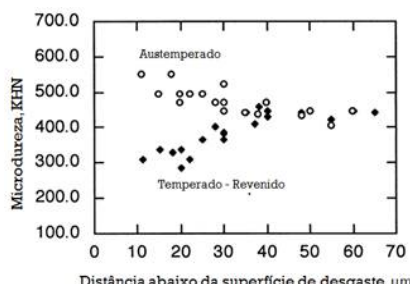
Figura 1. Efeito da quantidade de austenita retida, da dureza e da temperatura de austêmpera na taxa de desgaste.

Haseeb et al⁽¹²⁾ estudaram o desgaste sem lubrificação, utilizando equipamento pino-sobre-disco, com carga variando de 7,5 a 30N, e distância de deslizamento de 2 a 4 Km, comparando o ADI e o nodular temperado e revenido, de mesmo nível de dureza. Os autores concluíram que, em condições severas de carga e distância de deslizamento, o ADI apresenta resistência ao desgaste superior ao temperado e revenido, Figura 2. Este comportamento é causado por transformação parcial da austenita, fenômeno evidenciado na Figura 3, que mostra o aumento de dureza junto à superfície desgastada.⁽¹²⁾



Fonte: Haseeb et, al. ⁽¹²⁾

Figura 2. Comparativo entre os resultados obtidos do ensaio de desgaste entre o ADI e o nodular temperado e revenido, com mesmo nível de dureza.



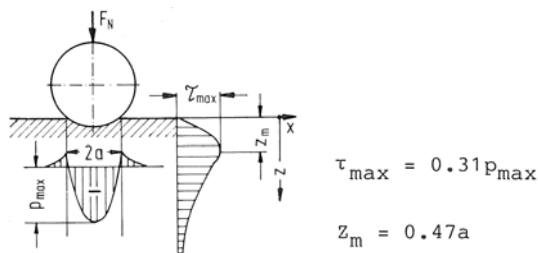
Fonte: Haseeb et, al. ⁽¹²⁾

Figura 3. Resultado da dureza abaixo da superfície dos corpos de prova ao fim do ensaio de desgaste.

Lerner & Kingsbury⁽¹³⁾, estudaram o desgaste do ADI comparando com outros materiais, em dois tribo-sistemas, rolamento a seco e abrasivo com partículas de alumina. Nos testes de rolamento a pressão aplicada foi de 7,5 MPa e velocidade de 0,31 m/s, e como contra-corpo foi empregado pino de 10 mm de diâmetro de aço 1045 temperado e revenido, com 48 a 52 HRC. Concluíram que o aumento da resistência ao desgaste do ADI ocorreu devido ao aumento da dureza, causado por transformações da austenita ocorridas durante os ensaios.

Diversos trabalhos caracterizam ainda a contribuição da grafita do ferro fundido nodular no desgaste. Magalhães et. al. ⁽¹⁴⁾ realizaram ensaios de fadiga de contato em ADI, utilizando equipamento de disco duplo, com pressão de contato de 4 GPa. Estes autores concluíram que a presença de nódulos subsuperficiais, bem próximos à superfície, são destacados e atuam como lubrificantes. Quando os nódulos de grafita abaixo da superfície encontram-se a uma distância crítica, correspondente às máximas tensões cisalhantes de Hertz, Figura 4, ocorre a nucleação de trinca na camada metálica e posterior arrancamento desta.

Diversos estudos foram realizados na Universidade Tecnológica do Paraná (UTFPR)⁽¹⁵⁻¹⁷⁾, com ensaios de desgaste metal/metal, em condições de rolamento. Nos ferros fundidos nodulares aparece claramente o efeito da presença de grafita, contribuindo para a nucleação de trincas superficiais e subsuperficiais.



Fonte: Zum Gahr, 1987, p. 52 – 53. ⁽¹⁸⁾

Figura 4. Diagrama de tensão para esfera em contato com plano.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

As amostras de ferro fundido nodular no estado bruto de fusão foram fornecidas pela empresa Tupy S/A, na classe FE80002 conforme a norma ABNT NBR 6916. Para aumentar a temperabilidade, foram empregados cobre (0,73%) e molibdênio (0,17%).

O metal foi tratado com 1,6% de liga nodularizante, pelo processo sanduiche, utilizando também pré-inoculação de 0,4%, durante a transferência de ferro para a panela de vazamento e pós-inoculação (no jato de metal) de 0,3% durante o vazamento, a fim de reduzir o efeito de fadiga do inoculante, e manter a máxima constância na nucleação dos corpos de prova. Assim foram vazados corpos de prova em blocos Y conforme a ASTM A897. moldados em areia a verde (molde não rígido). As amostras usinadas foram tratadas com os seguintes parâmetros;

- Austenitização, 900°C por 1 hora.
- Austêmpera, amostras A, 320°C por uma hora.
- Austêmpera, amostras B, 340°C por uma hora.

O tratamento térmico de têmpera e revenido seguiu o procedimento abaixo:

- Austenitização 900°C, por uma hora.
- Resfriamento rápido à temperatura de 60°C em banho de óleo.
- Resfriamento à temperatura ambiente.
- Revenido à temperatura de 450°C e manutenção por 2 horas.
- Resfriamento a 200°C, e resfriamento ao ar.

O ensaio de desgaste por deslizamento do tipo “pino sobre disco” foi realizado no laboratório de desgaste da UDESC, conforme a norma ASTM G99, com equipamento modelo CZ1000. A medida do coeficiente de desgaste foi obtida da média dos primeiros 80 metros do ensaio, e, ao fim do ensaio, com a média geral. Como contra corpo foi utilizada esfera de alumina com diâmetro de 6 mm. A carga do ensaio foi de 10N, compreendendo uma pressão de contato de 1.100 MPa, sendo que a distância de deslizamento foi de 500 m, 1.000 m, 1.500 m e 2.000 metros.

As amostras no estado bruto de fusão foram analisadas por microscopia ótica, no laboratório da Tupy S/A, com microscópio Olympus modelo BX 51 e analisadas quantitativamente com auxílio do software Image pró-plus. Após ensaio de desgaste as amostras foram submetidas ao microscópio eletrônico de varredura. Foram ainda realizadas medida de desgaste no laboratório de metrologia da UDESC, com auxílio de um perfilômetro modelo CV2000. Os dados do desgaste obtidos no perfilômetro foram plotados (amplitude em relação à distância) figura 5a, em seguida foi realizado a aproximação da curva e obtido o volume perdido, pela área abaixo da curva conforme figura 5b; neste procedimento foi utilizado o programa “Desgaste” do laboratório de desgaste da UDESC.

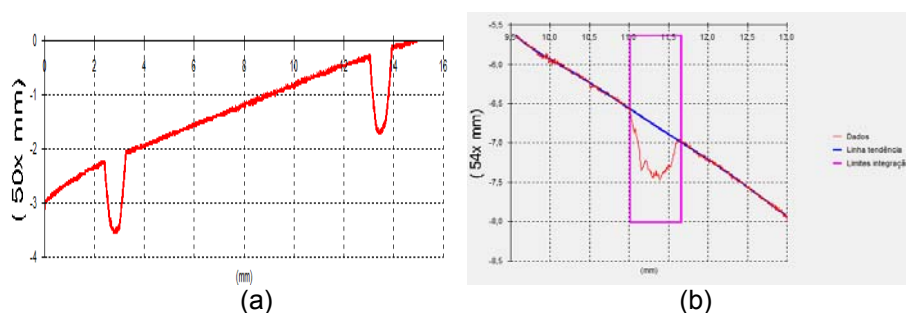


Figura 5. Perfil inteiro após ensaio de desgaste (a), perfil interno e aproximação da área abaixo da curva na pista de desgaste (b).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Propriedades Mecânicas

Os resultados do ensaio de tração são apresentados na Tabela 4. Verifica-se que os resultados de resistência mecânica classificam as amostras austemperadas como das classes 4 e 3 da norma ASTM (Tabela 2). Os valores mais baixos de alongamento provavelmente são devidos à presença de microporosidades de contração, já que os blocos Y foram produzidos em moldes de areia a verde.

Tabela 2. Resultados de ensaios mecânicos das amostras

	Bruto			320°C A		340°C B	
σ_r (MPa)	823	842	808	1359	1373	1221	1227
σ_e (MPa)	501	533	522	1109	1097	997	991
A(%)	3,8	3,5	2,7	2,6	2,4	2,4	2,5

Resultados de dureza são apresentados na Tabela 3, tanto para as amostras austemperadas como para a temperada e revenida. Esta amostra temperada e revenida mostrou valor de dureza intermediário entre as austemperadas, conforme planejado.

Tabela 3. Resultado de dureza Rockwell C das amostras

Dureza Rockwell C			
Bruto	Amostras A	Amostras B	Amostras T
22,8	45,5	40	43,7

3.2 Análise Metalográfica

A Figura 6 e a Tabela 4 mostram os resultados de ensaios metalográficos nas amostras brutas de fundição. Estes resultados mostram que a forma da grafita é adequada (nodulização maior que 95% e número de nódulos superior a 100 nod/mm²), sendo a matriz predominantemente perlítica, o que era esperado dado o uso de elementos de liga (Cu e Mo).

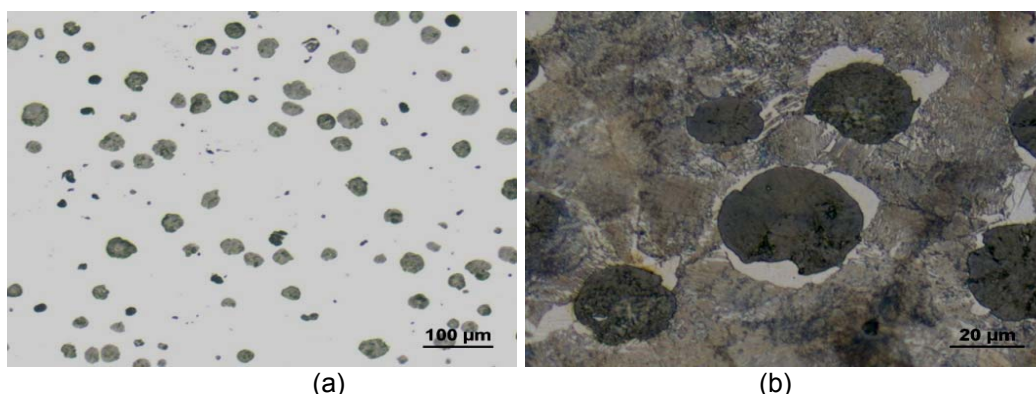


Figura 6. Amostras brutas de fusão (a) sem ataque, (b) ataque nital 4%.

Tabela 4. Análise metalográfica quantitativa dos corpos de prova brutos de fundição

Nodularização (%)	>90	
Nódulos (mm ²)	170	
Matriz metálica	Perlitica > 95%	
Tamanho Grafita (µm)	27	
Tamanho das grafitas	Grafitas (%)	Faixa (mm)
8	23,21	0,01 a 0,015
7	36,01	0,015 a 0,03
6	40,22	0,03 a 0,06
5	0,57	0,06 a 0,12

Resultados de metalografia após o tratamento térmico de autêmpera podem ser vistos na Figura 7, para as duas temperaturas de austêmpera. Em ambos os casos a matriz é constituída de ausferrita, finamente distribuída.

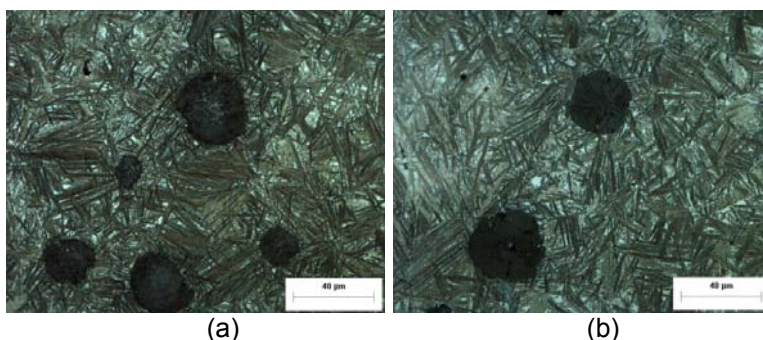


Figura 7. Austêmpera, (a) 320°C Cp. A, e (b) 340°C Cp. B aumento de 500X, ataque nital 4%.

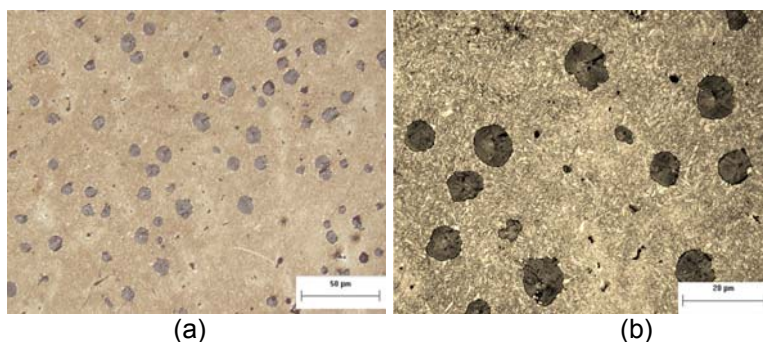


Figura 8. Micrografias do ferro fundido nodular submetido a têmpera e revenido (a) Aumento 200x, (b) 500x, ataque nital 3%.

A microestrutura resultante do tratamento térmico de têmpera e revenido pode ser vista na Figura 8, e consiste em nódulos de grafita e matriz de martensita revenida.

3.3 Resultados de Desgaste

Os resultados do coeficiente de atrito (Figura 9) mostram que, no início do teste, (média dos primeiros 80 metros) o coeficiente foi menor em todas as amostras, e ao final do teste ocorreu aumento significativo deste, Sherrington & Hayhurst⁽¹⁹⁾, estudaram este efeito em aços submetidos ao ensaio de desgaste de contato. Os autores mostraram que com o aumento do tempo de deslizamento durante o ensaio ocorre um aumento na densidade de detritos sobre a amostra, e este aumento teve forte influência no resultado do coeficiente de atrito.⁽¹⁹⁾

Observa-se ainda na Figura 9 que o nodular temperado e revenido apresentou menores valores de coeficiente de atrito que os austemperados.

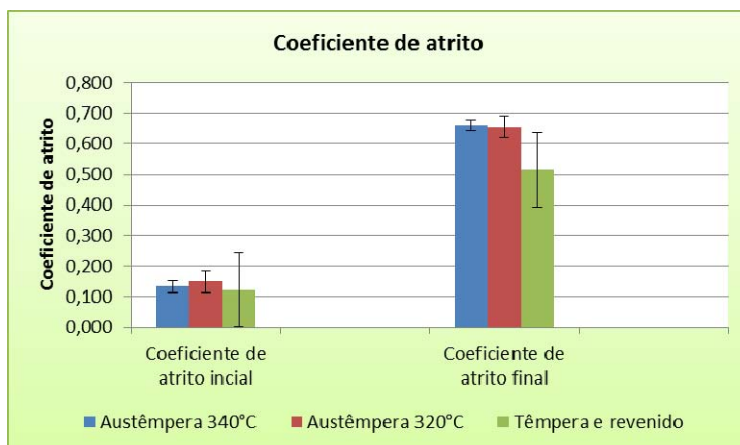


Figura 9. Resultados do coeficiente de atrito obtido da média dos primeiros 80 m de ensaio, e da média de 1.000 m.

Na Figura 10 constam resultados de desgaste para 1.000 m de deslizamento. Esta condição de ensaio é recomendada pela norma ASTM, e grande parte dos resultados publicados na literatura é apresentada nesta condição. Observa-se que a perda de volume das amostras temperadas e revenidas foi menor que as austemperadas. Segue-se o nodular austemperado a 320 C, e por último o nodular austemperado a 340 C. Resultados similares foram obtidos por Kumari & Rao ⁽⁷⁾, que também registraram maior resistência ao desgaste com baixas temperaturas de austêmpera.

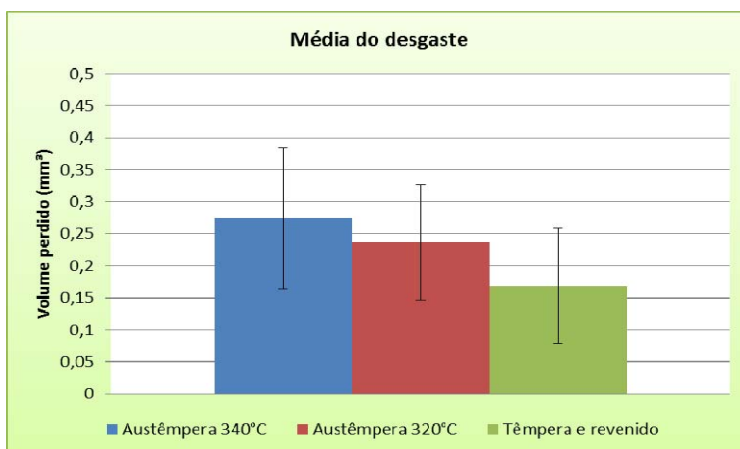


Figura 10. Resultado do desgaste das amostras com distância de deslizamento de 1.000 m.

Aumentando a distância de deslizamento até 2.000 m (Figura 11), verifica-se que o nodular austemperado a 320°C apresenta a maior resistência ao desgaste, comparativamente aos outros dois nodulares testados. A taxa de desgaste (Figura 12), avaliada pelo coeficiente angular da reta da Figura 11, sugere que no nodular austemperado a 320°C ocorram transformações junto à superfície que resultem em aumento da resistência ao desgaste. Não está claro o motivo da diferença entre os dois nodulares austemperados. Uma possibilidade é que a menor temperatura de austêmpera resulta em menor teor de carbono na austenita retida, o que facilitaria a sua transformação em martensita durante a solicitação de desgaste. Entretanto, não se conseguiu medir aumento de dureza junto à superfície para nenhuma amostra.

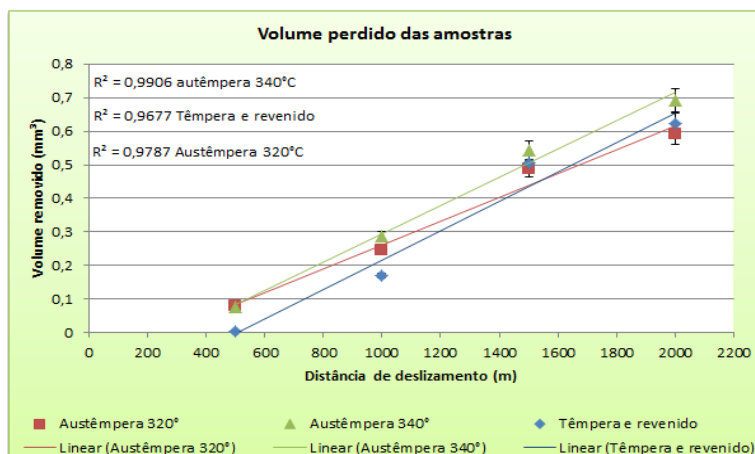


Figura 11. Resultado do desgaste das amostras, variando a distância de deslizamento.

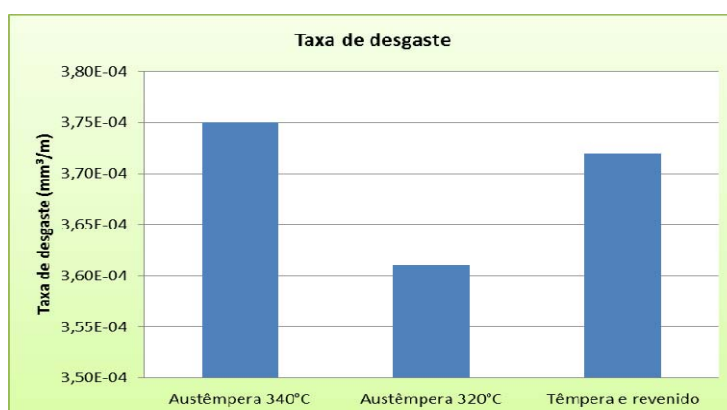


Figura 12. Taxa de desgaste das amostras, obtida através do coeficiente angular da curva, Figura 9.

3.4 Microscopia Eletrônica de Varredura

Com auxílio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram identificados os mecanismos de desgaste envolvidos no processo. A Figura 13 mostra imagens retiradas da pista de desgaste, nota-se a presença de sinais de abrasão, que podem ter sido causados pela esfera de alumina, de alta dureza e/ou pelos fragmentos de desgastes causados durante os ensaios. Também observa-se danificação da matriz em torno da grafita, o que revela o efeito desta partícula em concentrar tensões na matriz envolvente. Estas observações foram identificadas em todas as condições e amostras do ensaio. As Figuras 14 e 15 mostram ainda a contribuição das partículas de grafita na superfície, concentrando danos na matriz situada em seu entorno, conforme também verificado por Brunetti⁽¹⁵⁾; Martinez⁽¹⁶⁾; Leite⁽¹⁷⁾.

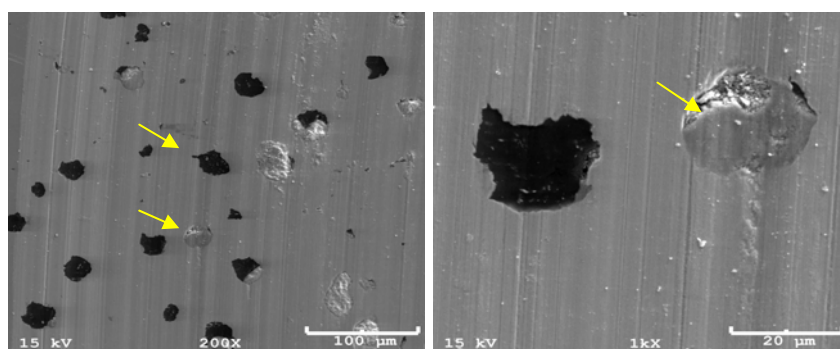


Figura 13. Imagens de MEV, austêmpera 340°C.

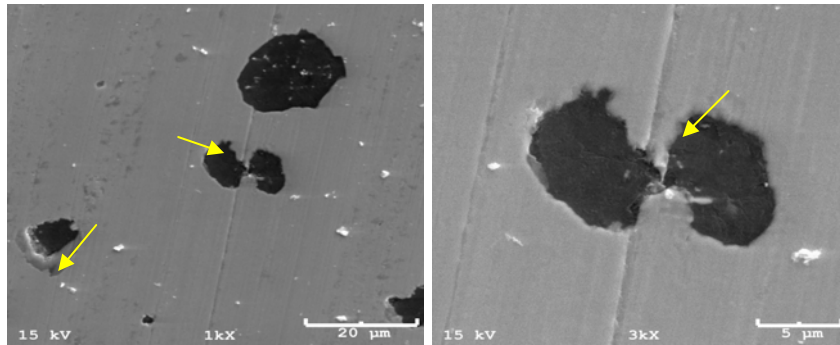


Figura 14. Imagens de MEV, austêmpera 320°C.

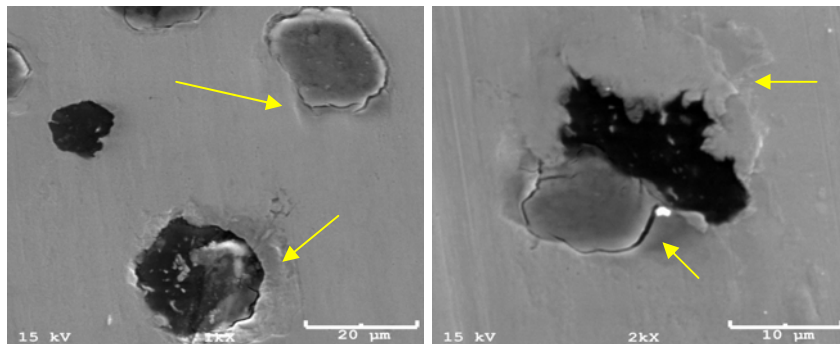


Figura 15. Imagens MEV, têmpera e revenido.

4 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos pode-se concluir que:

- O coeficiente de atrito aumentou durante o decorrer do ensaio, para os três ferros nodulares testados.
- Para longas distâncias de deslizamento, os menores valores de taxa de desgaste foram obtidos com o nodular Austemperado a 320°C, quando comparado ao nodular austemperado a 340°C e ao nodular temperado e revenido.
- Nas condições testadas, o desgaste ocorre principalmente por abrasão e por nucleação e propagação de trincas na matriz. As partículas de grafita tem especial influência neste segundo mecanismo, concentrando danos na matriz envolvente.

Agradecimentos

Ao aluno de engenharia mecânica, Victor Olah e ao Técnico Metalúrgico Moacir José Bento.

REFERÊNCIAS

- 1 HAYRYNEN, K. L.; KEOUGH, J. R.; The production of autempered ductile iron (ADI), World Conference on ADI, 2002
- 2 FRANCO, E.; Estudo da Influência dos Parâmetros de Austenitização Sobre a Microestrutura do Ferro Fundido Nodular Austemperado A Partir da Zona Crítica. Dissertação de Mestrado, UDESC, 2008.

- 3 FRANCO, E; Costa, C E; GUESSER, W L. Estudo dos Parâmetros de Austenitização Para Fabricação do Ferro Nodular Austemperado Usinável. 8^o Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica, Cusco, 23 a 25 de Outubro, 2007.
- 4 LUSSOLI, C. Estudo da influência das temperaturas de austenitização nas propriedades mecânicas do ferro nodular austemperado a partir da zona crítica. Dissertação de Mestrado, UDESC, 2009.
- 5 GUESSER, W. L.; FRANCO, E.; LUSSOLI, C.; COSTA, C. E.; Ferro nodular austemperado a partir da zona crítica 14^o Congresso de Fundição ABIFA - CONAF – São Paulo, 2009
- 6 SANTOS, H.; Mecanismo de fratura de ferro fundido nodular austemperado a partir da zona crítica. Dissertação de Mestrado, UDESC, 2010.
- 7 KUMARI, R. U.; RAO, P. P.; Study of wear behavior of austempered ductile iron, J. Mater Sci 44, 2009, p. 1082 – 1093.
- 8 ONESCO, C.; POPA, N.; VIERU, I.; The influence of the cam profile design on the cam and tappet hertz stresses and wear. Machine Design, 2010.
- 9 MICHALSKI, J.; MARSZALEK, J. KUBIAK, K.; An experimental study of diesel engine cam and follower wear with particular reference to the properties of the materials, Wear 240, 2000, p. 168 – 179.
- 10 HUA, D. Y.; FARHANG, K.; SEITZMAN, L. E.; A multi-scale system analysis and verification for improved contact fatigue life cycle of a cam – roller system.; Journal of Tribology, vol. 129, 2007, p. 321 – 325.
- 11 STRAFFELINI, G.; GIULIARI, C.; PELLIZZARI, M.; VENERI, E.; BRONZATO, M.; Dry rolling-sliding wear of austempered cast iron; Wear 271, 2011, p. 1602 – 1608.
- 12 HASSEB, A. S. M. A.; ISLAM, M. A.; BEPARI. A.; Tribological behavior of quenched and tempered, and austempered ductile iron at the same hardness level; Wear 244, 2000, p. 15 – 19.
- 13 LERNER, Y. S.; KINGSBURY, G. R.; Wear resistance of austempered ductile iron; Journal of Materials Engineering and Performance, vol. 7, 1998, p. 48 – 52.
- 14 MAGALHÃES, L.; SEABRA, J.; SÁ, C.; Experimental observations of contact fatigue crack mechanisms for austempered ductile iron (ADI) discs; Wear 246, 2000, p. 134 - 148.
- 15 BRUNETTI, C.; Efeito da preparação de corpos de prova na vida em fadiga de contato de rolamento de ferro fundido nodular austemperado; Dissertação de mestrado Universidade Tecnológica Federal do Paraná UTFPR, 2008.
- 16 MARTINEZ, J. A. B.; Comparação da resistência ao desgaste por fadiga de contato de engrenagens fabricadas em aço AISI 4140 e ferro fundido nodular austemperado; Dissertação de mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR, 2011.
- 17 LEITE, M. V.; Análise dos mecanismos de desgaste por fadiga de contato, Dissertação de mestrado Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR, 2005.
- 18 ZUM GAHR, K. H. ; Microstructure and wear of materials; Elsevier science publishers B.V. Amsterdam – Oxford, New York, 1987, Vol. 10.
- 19 SHERRINGTON, I.; HAYHURST, P.; Simultaneous observation of the evolution of debris density and friction coefficient in dry sliding steel contacts; Wear 249, 2001, p. 182 – 187.