

# INFLUÊNCIA DO MOLIBDÊNIO NO DESEMPENHO AO DESGASTE ABRASIVO DOS FERROS FUNDIDOS BRANCOS ALTO CROMO <sup>1</sup>

*Cíntia Nunes Braga Regattieri<sup>2</sup>  
José Daniel Biasoli De Mello<sup>3</sup>  
Cherlio Scandian<sup>4</sup>*

## **Resumo**

O desempenho dos Ferros Fundidos Brancos Alto Cromo (FFBAC) no que tange ao desgaste abrasivo numa dada aplicação, é função não somente da microestrutura e propriedades do material, mas, também, de parâmetros do tribosistema. Assim, este trabalho tem como objetivo investigar os efeitos da composição química e do tribosistema sobre a resistência ao desgaste destas ligas contendo até 9% de Molibdênio. Foram utilizadas 20 diferentes ligas com uma razão Cr/C igual a 10. Os teores de cromo empregados foram 16, 20 e 24%, em peso, para as hipoeutéticas, 28% para a eutética e 32% para as ligas hipereutéticas. Os teores de molibdênio para cada composição de cromo foram de 0, 3, 6 e 9%. Para avaliação da resistência ao desgaste abrasivo foram utilizados ensaios do tipo pino sobre disco nas configurações a dois e três corpos. Para a configuração a dois corpos, isto é, pino lixa, em geral todas as ligas com matrizes ferrito-perlíticas e ferríticas apresentaram maior taxa de desgaste. Já no que se refere à configuração a 3 corpos, as ligas sem molibdênio apresentaram um aumento na taxa de desgaste com o aumento do teor de cromo. Para as ligas com Mo, o comportamento foi semelhante para todas, exceto para as hipereutéticas que apresentaram uma taxa de desgaste maior.

**Palavras-Chave:** FFBAC, Molibdênio, Abrasão.

---

<sup>1</sup> 60º Congresso Anual ABM – Internacional – Belo horizonte, M.G., 25 – 28 de Julho de 2005.

<sup>2</sup> MSc, PPGEM, UFES - ES

<sup>3</sup> Prof. Dr. da FEM/ LTM/FEM/ UFU- MG

<sup>4</sup> Prof. Dr. do PPGEM, UFES- ES.

## 1 INTRODUÇÃO

Ferro fundido branco alto cromo (FFBAC), são ligas contendo de 11 a 30% em peso de cromo e 1,8 a 3,6% em peso de carbono, com molibdênio, cobre e manganês às vezes utilizados como elementos adicionais de liga [1]. A microestrutura destas ligas consiste tipicamente de carbonetos primários duros e/ou eutéticos em uma matriz de austenita ou uma transformação destes produtos [1, 2, 3 e 4]. FFBAC são largamente utilizados em componentes industriais onde se requer elevada resistência ao desgaste abrasivo [1, 5 e 6]. Esta característica não é uma propriedade intrínseca do material, mas sim, do sistema tribológico [7,8]. Desde sua introdução perto do início do século XX uma gradual compreensão da relação entre ligas, processamento e propriedades, tem conduzido a uma evolução de várias gerações de FFBAC [1]. A adição de elementos de liga fortemente formadores de carbonetos influencia nos aspectos microestruturais destas ligas [1,9]. Tem-se, assim, certas propriedades que são de interesse em aplicações em desgaste abrasivo de alta severidade, em particular o Molibdênio (Mo) que, além de aumentar a temperabilidade da matriz, suprime a formação da perlita [2,3]. Além disso, o Mo pode também aumentar a resistência ao desgaste abrasivo a quente [10].

Para a avaliação da resistência ao desgaste abrasivo foram realizados testes de desgaste a dois e a três corpos em vinte diferentes ligas com razão Cr/C = 10 e com até 9% de molibdênio. Este trabalho tem como objetivo avaliar a influência do molibdênio no comportamento abrasivo destas ligas. Correlações entre o percentual de Mo e a taxa de desgaste são estabelecidas. Uma análise dos micromecanismos de desgaste está sendo realizada [13] para confirmar as conclusões aqui propostas, baseadas apenas na avaliação microestrutural.

## 2 METODOLOGIA

As amostras cilíndricas para os ensaios abrasivos foram obtidas a partir de blocos fundidos no IPT com dimensões de 40 x 40 x 70 mm. Estes blocos foram seccionados por uma máquina de serra circular a base de CBN que possui controle hidráulico – pneumático e um sistema de refrigeração, que mantém uma constante velocidade de corte. Foram então retiradas deste bloco duas seções com 40 x 40 x 20 mm e 40 x 40 x 12 mm, para os ensaios abrasivos a dois e a três corpos, respectivamente. Após a retirada, estas seções foram retificadas e lapidadas, visando garantir o paralelismo necessário para os ensaios abrasivos e, garantindo, assim, uma condição inicial, além de reduzir o tempo para atingir o regime permanente nestes ensaios.

Como as amostras para estes ensaios abrasivos são cilíndricas de elevada dureza, optou - se pelo processo de usinagem via eletroerosão. Foram retiradas por liga 6 amostras para cada ensaio, num total de 240 amostras. Os diâmetros empregados são de 6 mm e 15 mm, para os ensaios abrasivos a dois e a três corpos, respectivamente.

A análise da composição química foi realizada usando as técnicas de espectrometria de raios-X.

Para analisar a presença de porosidades e a homogeneidade das ligas foi efetuada uma análise microestrutural. As amostras ainda não atacadas foram visualizadas em um analisador de imagens Neophot 21 com diferentes escalas para verificar a

presença de porosidades. Logo após, foi feita uma análise microestrutural visando verificar a homogeneidade das ligas.

Os valores de dureza foram obtidos a partir da média de 15 medições, em escala Vickers, com carga de 10 kgf .

Para a realização dos testes abrasométricos foram utilizados o pino / lixa (2 corpos) e o teste “LTM” (3 corpos).

Na configuração a dois corpos a amostra além de rotacionar, translada sobre a lixa descrevendo uma espiral de Arquimedes (comprimento médio total de 3.2 m) assegurando, desta forma, a presença de abrasivo novo no processo e uma carga (peso morto) de massa conhecida é colocada sobre o pino [11].

Na configuração a três corpos, as amostras de 15 mm são colocadas dentro de um alvéolo feito de uma placa de material isolante (celeron usado pra confecção de circuitos impressos ou como isolantes) com furos de, aproximadamente, de 16 mm de diâmetro e 12 mm de comprimento, dispostos a 90 mm do centro do alvéolo e equidistantes de 120° permitindo deste modo, o ensaio de três corpos de prova simultaneamente [12]. Estas amostras são pressionadas por pesos mortos contra um disco, e colocados no interior de um cilindro que gira livremente em função do atrito com o disco de 300 mm de diâmetro, onde as partículas abrasivas estão livres. Os parâmetros dos ensaios abrasivos estão esquematizados na Tabela 1:

**Tabela 1.** Parâmetros usados nos ensaios abrasivo

Condições	Configuração	
	Dois Corpos	Três corpos
Disco de Ensaio	—	Ferro Fundido
Rotação do disco	25	25
Rotação da amostra	25	—
Pressão específica (N/mm <sup>2</sup> )	0,177 MPa	0.02 Mpa
Dimensão da amostra (mm)	Cilíndrica: 6 X 20	Cilíndrica: 15 x 12
Tipo de abrasivo	SiC	SiO <sub>2</sub> (areia Normal Brasileira NBR-7214)
Granulometria do grão abrasivo (#)	150	100
Tempo de ensaio	30 ± 2	Variável

A taxa de desgaste foi avaliada pelo método gravimétrico interrompido, acrescido de limpeza ultra-sonora (40 khz, 10 minutos) antes e após cada ensaio em banho de acetona. Em seguida, as amostras foram secadas a quente durante cerca de 30 segundos. Após secagem, foram desmagnetizadas por 30 segundos em função da sensibilidade da balança em relação a materiais magnetizados e, logo após,

pesadas em balança com precisão de 0,1 mg. Devido às instabilidades iniciais características do processo de desgaste, as taxas de desgaste para cada condição tribológica foram avaliadas somente após se atingir o regime permanente.

O ciclo para cada ensaio abrasivo a três corpos durou 75 minutos, sendo que os primeiros 35 minutos foram tomados antes de se atingir o regime permanente, não sendo utilizada esta perda de massa nos resultados. Assim a evolução da taxa de desgaste com o tempo até a sua estabilização e, a partir deste tempo, foi calculada a taxa de desgaste. Foi acompanhada numa média de pelo menos 18 ensaios.

O ciclo de cada ensaio abrasivo a dois corpos foi de 300 segundos, sendo que os resultados da taxa de desgaste foram utilizados após os 210 segundos, onde o regime transitório inicial desaparece. A taxa de desgaste foi avaliada numa média de pelo menos 9 ensaios.

Uma avaliação das características das partículas abrasivas empregadas neste trabalho, isto é, partículas de SiC (2 corpos) e SiO<sub>2</sub> (3 corpos) foi realizada [13].

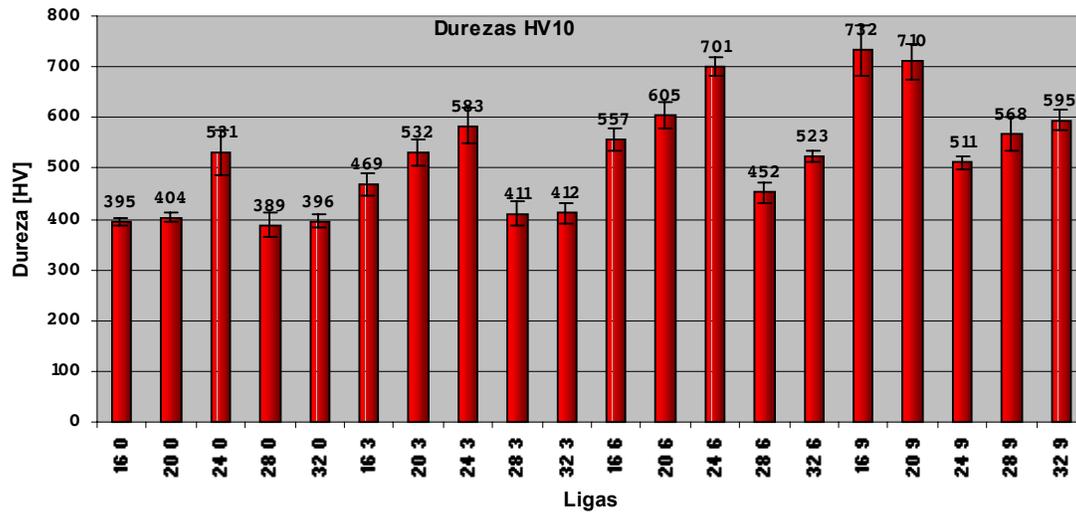
### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise da composição química das ligas mostra uma boa correlação entre os valores nominais e os analisados dos elementos cromo, carbono e molibdênio, destacando que a razão Cr/C = 10 foi obedecida, como mostra a Tabela 2.

**Tabela 2.** Composição química das ligas em percentagem de peso.

Liga	Elemento		
	Cr	C	Mo
16-0	17,16	1,82	0,0588
20-0	21,39	2,1	0,0282
24-0	24,86	2,2	0,0276
28-0	28,71	2,52	0,089
32-0	32,59	3,08	0,0484
16-3	16,09	1,52	3,05
20-3	19,62	1,97	3,44
24-3	23,44	2,36	3,2
28-3	27,46	2,61	3,31
32-3	31,94	3,34	3,93
16-6	16,07	1,73	6,05
20-6	19,44	2	6,5
24-6	23,36	2,24	6,22
28-6	27,77	2,74	6,38
32-6	32,59	3,38	7,11
16-9	15,79	1,65	8,64
20-9	19,68	2,13	8,69
24-9	23,56	2,46	9,54
28-9	27,74	2,75	9,73
32-9	31,8	3,34	9,01

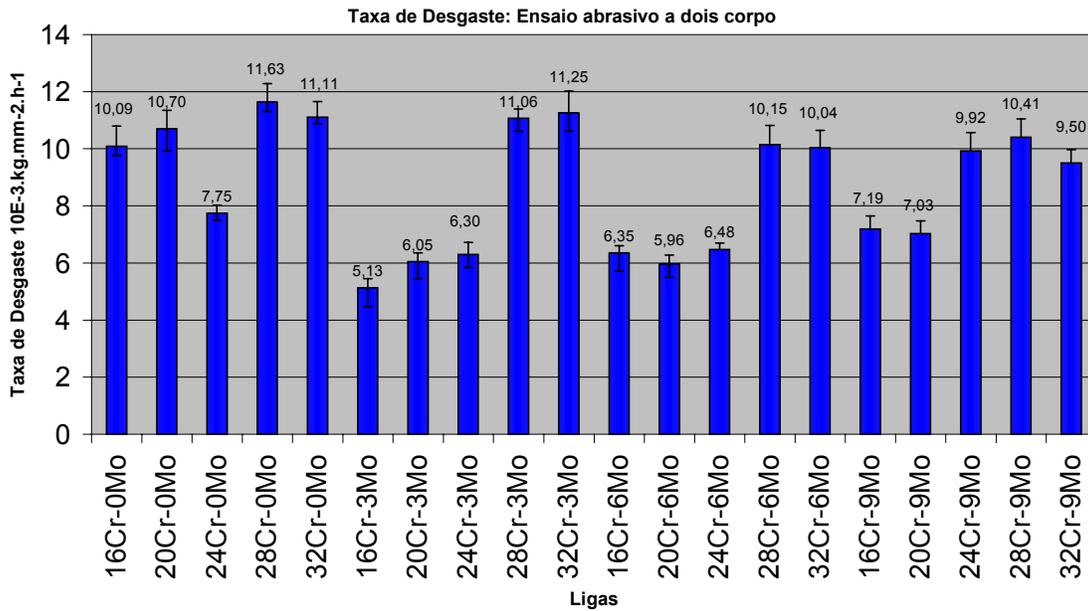
A Tabela 3 mostra os resultados de dureza das ligas analisadas:



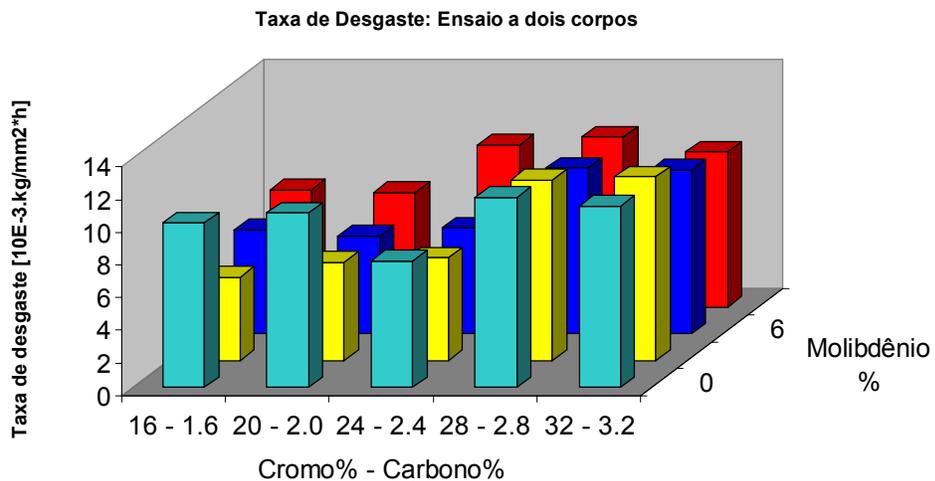
Analisando este gráfico, verificamos que para uma mesma quantidade de Mo, aumentando a razão Cr/C há um aumento da dureza nas ligas hipoeutéticas (16, 20, 24 % de Cr) e um decréscimo nas ligas eutéticas (28% de Cr) e hipereutéticas (32% de Cr), devido à presença de uma matriz ferrítica, possivelmente de ferrita  $\delta$  devido à proximidade com o campo desta fase no diagrama Fe-Cr-C [14]. A alta dureza vista na liga 24-0 foi devido a matriz martensítica, provavelmente, com alguma perlita [14].

Aumentando a % de Mo, aumenta a dureza, possivelmente pelo endurecimento por solução sólida da matriz, causado pelo Mo na ferrita  $\delta$  e/ou pelo aumento da fração volumétrica dos carbonetos [14]. Sendo que para as ligas com 9% de Mo observou-se uma queda da dureza na liga hipoeutética 24-9 devido ao desaparecimento da fase  $\gamma$  [14].

As taxas de desgaste para o ensaio abrasivo a dois corpos estão destacadas nas Figuras 4 e 5.



**Figura 4.** Taxa de Desgaste do ensaio abrasivo a dois corpos



**Figura 5.** Taxa de Desgaste do ensaio abrasivo a dois corpos via tridimensional

No teste pino sobre disco, que implica num severo desgaste abrasivo, as ligas isentas de Mo mostram claramente uma relação inversa entre taxa de desgaste e dureza das ligas. As ligas ferrito-perlíticas (16 e 20) e ferríticas  $\delta$  com carbonetos primários (28 e 32) apresentam as maiores taxas de desgaste e de mesma ordem. A liga com 24% de Cr tem a menor taxa de desgaste e a maior dureza, sendo sua matriz constituída de martensita e, provavelmente, alguma perlita.

Para as ligas contendo Mo, independentemente do teor, as eutéticas e hipereutéticas que possuem matrizes ferríticas ( $\delta$ ) mais carbonetos primários apresentaram maior taxa de desgaste, do mesmo modo que nos FFBC sem Mo. Para as ligas hipoeutéticas (matriz austeno-ferríticas/martensíticas [14]), a taxa de desgaste é menor e, a priori, não é afetada pela dureza. A exceção se faz na liga 24-9 (também hipoeutética), cuja matriz é ferrítica [14].

As taxas de Desgaste para o ensaio abrasivo a três corpos estão destacadas nas Figuras 6 e 7.

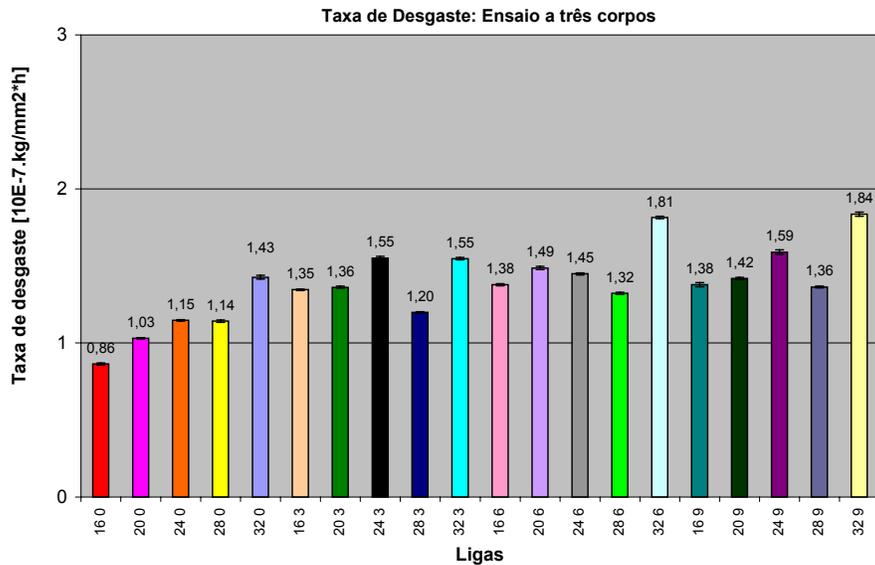


Figura 6. Taxa de desgaste no ensaio abrasivo a três corpos

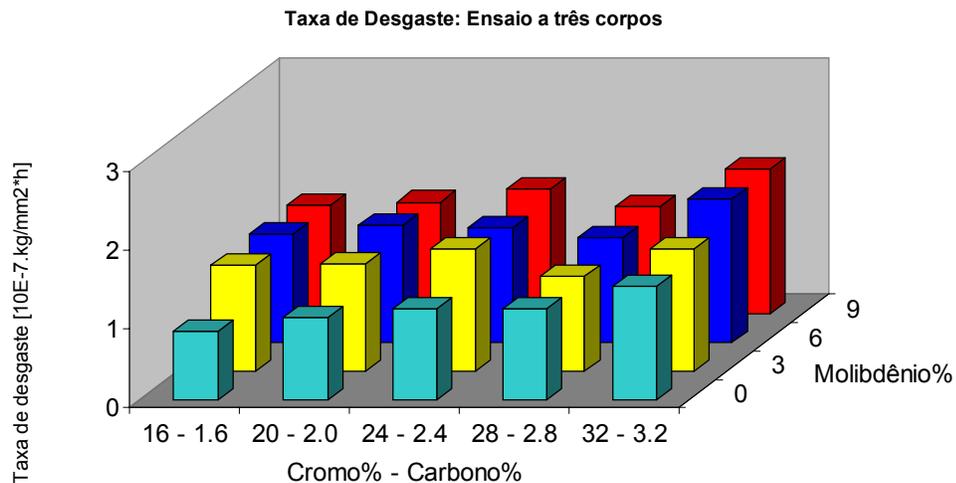


Figura 7. Taxa de Desgaste do ensaio abrasivo a três corpos via tridimensional.

Para os ensaios a três corpos, isto é baixa tensão, não correlação entre dureza e taxa de desgaste. De modo geral, a adição de Mo foi prejudicial à resistência ao desgaste.

Nas ligas isentas de Mo, quanto maior o teor de cromo maior a taxa de desgaste. Aparentemente, seria a fração volumétrica de carbonetos que afeta negativamente a taxa de desgaste.

As ligas com Mo apresentaram resultados similares nas taxas de desgaste, exceto para as hipereutéticas que tem marcadamente as maiores taxas de desgaste devido possivelmente à presença de carbonetos primários grosseiros. As ligas eutéticas apresentaram os melhores resultados, possivelmente devido ao tamanho, forma e distribuição do carboneto  $M_7C_3$ .

#### **4 CONCLUSÕES**

Apesar de não se ter concluído a análise dos micromecanismos de desgaste a avaliação das microestruturas sugere as seguintes conclusões:

1. Para a configuração a dois corpos, isto é, pino lixa, em geral todas as ligas com matrizes ferrito-perlíticas e ferríticas apresentaram maior taxa de desgaste.
2. Já no que se refere à configuração a 3 corpos, as ligas sem molibdênio apresentaram um aumento na taxa de desgaste com o aumento do teor de cromo. Para as ligas com Mo, o comportamento foi semelhante para todas, exceto para as hipereutéticas que apresentaram uma taxa de desgaste maior.

#### **Agradecimentos**

Os autores agradecem a Cia. Siderúrgica de Tubarão pelo apoio financeiro, especialmente aos Engenheiros Edson Harano e Afonso Ribeiro Nasser. Aos amigos do LTM e ao Prof. Dr. Marcelo Camargo Severo de Macêdo pelas discussões oportunas.

#### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- 1 C, P. Tabrett, I.R. Sare and M. R. Ghomashchi, International Materials Reviews, 1996, vol. **41**, nº 2, 59-82.
- 2 Dr K. Rohrin, Climax molybdenum GmbH, Dusseldorf, west Germany, 269-289.
- 3 MARATRAY, F. & USSEGLIO, N. R. Factors affecting the structure of chromium and chromium – molybdenum White irons. Paris, Climax Molybdenum, 1970, 32p.
- 4 O. N. Dogan, J.A. HAWK, and G. LAIRDII, Metallurgical and materials transactions A, Volume 28 A, June 1997 – 1315.
- 5 Santana A.S., J.D. Mello, ABM, 48 (1993) 457 – 476.
- 6 K. H. Zum Gahr, William G. scholz, Journal of metals, october 1980, 38-44 [7] Zum Gahr Livro.

- 7 S. Turenne, F. Lavallée, J. Masounave, Industrial materials research Institute, "The effect of matrix microstructure on the abrasion resistance of high – Cr white cast irons', 105- 113.
- 8 J.D.Mello, Hamar – Thibault S. And M. Durand – Charre, ABM, Vol. 41 n°335, outubro 1985, 563568.
- 9 Minoru Ikeda, takaretu Umeda, ching ping Tong, Toshio Suzuki, Naotaka Niwa and Osamu Kato, ISIJ International, 32 (1992) 1157 – 1162.
- 10 Franco, S.D.; Zumpano, Jr; DE MELLO, J.D.B.; "Abordagem global do estudo do processo abrasivo – Parte II: Desenvolvimento e avaliação do abrasômetro a 2 e 3 corpos"; anais do I Seminário sobre materiais resistentes ao desgaste; São Paulo (SP); 1989; 47-62.
- 11 Costa Henara, J.D.Mello, "Desenvolvimento de um novo abrasômetro a três corpos", anais COBEM 2001.
- 12 C.N. B. Regattieri, Dissertação de Mestrado, PPGEM/UFES (2005).
- 13 S.M. Carvalho, Dissertação de Mestrado, PPGEM/UFES (2005).
- 14 MARATRAY, F. choice of appropriate compositions for chromium molybdenum White irons – Transactions of the american Foundrymen's Society, 79: 121-4, 1971.

# INFLUENCE OF MOLYBDENUM ON THE HIGH CHROMIUM CAST IRON ABRASION WEAR PERFORMANCE<sup>1</sup>

*Cíntia Nunes Braga Regattieri<sup>2</sup>  
José Daniel Biasoli de Mello<sup>3</sup>  
Cherlio Scandian<sup>4</sup>*

## **Abstract**

The performance of high chromium white cast iron (HCWCI) regarding to the abrasive wear is function of the materials microstructure and properties and also of the tribosystems parameters. Thus, this work intends to evaluate the effects of the chemical composition and tribosystems on the wear resistance of HCWCI with different molybdenum contents (0, 3, 6 and 9 wt%). Twenty different alloys were studied with a fixed Cr/C ratio equal to 10. The chromium contents were 16, 20 and 24 wt% for the hypoeutectic, 28 wt% for the eutectic and 32 wt% for the hypereutectic alloys. The abrasive wear resistance were evaluated by pin-on-disk (two-body configuration) and a three-body abrasometer tests. For the two-body configuration, the alloys which presents ferritic and perlitic matrix shows the higher wear rates. The wear rates of Mo free alloys tested in three-body configuration present a increase with the chromium content. For the compositions with Mo alloying, the behavior were almost the same, except for the hypereutectic alloys which have higher wear rates.

**Key-words:** Abrasion; High chromium white cast iron; Molybdenum.

---

<sup>1</sup> 60th ABM Congress – International – 25 – 28 July 2005 – MG - Brazil

<sup>2</sup> MSc, PPGEM, UFES – ES- Brazil

<sup>3</sup> Dr., LTM/FEM/UFU- MG- Brazil- Member of ABM

<sup>4</sup> Dr., PPGEM/UFES – ES –Brazil- Member of ABM