

PROJETO DE DESENVOLVIMENTO DE NOVA LIGA DE CORPO MOEDOR EM FERRO FUNDIDO BRANCO ALTO CROMO *

Jael Moutinho¹

Fábio Arielo Guastala²

Matheus Rodrigues Novais³

Resumo

Em função do elevado consumo de corpos moedores de alto Cromo e do alto custo de sua fabricação com matéria prima nobre, busca-se o desenvolvimento de novas ligas de corpos moedores na busca de um melhor custo benefício. Devido ao efeito sinérgico do perfil de desgaste envolvendo fenômenos corrosivos e abrasivos em bolas de moinho, o desenvolvimento de novas ligas de ferro fundido branco alto cromo tem sido uma alternativa para suportar o desgaste precoce provocado por tais fenômenos. As amostras de corpos moedores, analisados mediante ensaio de análise química, dureza, análise micrográfica e seguidos de ensaios de moagem (úmido e seco), servirão a um desempenho comparativo para se designar a melhor liga a ser aplicada nos processos de moagem secundária de minério de ferro a úmido.

Palavras-chave: Corpo Moedor; Ferro fundido Branco alto Cromo; Desgaste.

DESIGN OF DEVELOPMENT OF NEW ALLOY OF HIGH CHROME CAST IRON BODY GRINDER

Abstract

Due to the high consumption of high chrome grinding balls mill and the high cost of their manufacture with noble raw material, the development of new alloys of grinding balls mill in search of a better cost benefit is sought. Due to the synergistic effect of the wear profile involving corrosive and abrasive phenomenon on grinding balls, the development of new high chromium white cast iron alloys has been an alternative to withstand the early wear and tear caused by such phenomenon. The samples of grinding balls mill, analyzed by chemical analysis test, hardness, micrographic analysis and followed by wet and dry grinding tests, will serve a comparative performance to designate the best alloy to be applied in secondary ore grinding processes From iron to damp.

Keywords: grinding balls mill, high chrome cast iron, wear.

¹ Engenheiro metalurgista e de materiais, Engenheiro da gerencia de engenharia de manutenção, oficinas e contratos, Vale S.A, Vitória, Espírito Santo, Brasil.

² Engenheiro de materiais, Supervisor da gerencia de engenharia de manutenção, oficinas e contratos, Vale S.A, Vitória, Espírito Santo, Brasil.

³ Graduando em engenharia metalúrgica, Estagiário de engenharia de equipamentos e materiais, Engenharia de manutenção, oficinas e contratos, Vale S.A/Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, Espírito Santo, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

O processo de moagem consiste na cominuição das partículas de um material sólido, com o objetivo de aumentar a superfície específica. A diminuição do tamanho das partículas favorece a cinética da reação de uma dada matéria prima para os processos posteriores à moagem. Desse modo torna-se mais eficaz a homogeneização em moinhos de pelotização para preparação em processos na formação de pelotas. O tamanho das partículas possui alta relevância na determinação das propriedades e comportamento de um dado material, como por exemplo o comportamento reológico, confirmação, queima e características quando finalizado o produto.

Geralmente em moagem de materiais sólidos, o rendimento é direcionado pela característica da própria matéria-prima, contudo em plantas de pelotização o processo de moagem demanda alto custo energético, assim como elevado consumo de corpos moedores devido aos mecanismos de desgaste de corrosão e abrasão associados, no caso da pelotização ao minério de ferro. A dureza e a granulometria inicial são fatores que condicionam a evolução do grau de moagem e em moinhos de pelotização a pequena taxa de ocupação do interior deles corresponde a um grande consumo energético, devido ao elevado momento binário, gerado por a carga se encontrar deslocada para uma única região do moinho. Para favorecer o consumo energético e realizar a moagem de maneira mais eficiente, desenvolve-se novos materiais capazes de suportar as solicitações dos mecanismos de desgaste.

Ferros fundidos branco alto cromo (C-Cr-Fe) são caracterizados como materiais resistentes ao desgaste abrasivo e corrosivo, que são utilizados na manufatura de corpos moedores, geralmente na forma de bolas para indústria de mineração. O ferro fundido alto cromo está relacionado no diagrama C-Cr-Fe. Essa liga de ferro fundido está associada diretamente com a formação de carbeto de ferro-cromo (isto é, M₃C, M₇C₃), sendo a formação dos carbeto favorecidos com a presença de alto teor de carbono na liga. Genericamente, ferros fundidos de ferro-cromo são constituídos de elevado teor de carbono e pequenas quantidades de molibdênio, níquel, vanádio, titânio, nióbio e entre outros elementos na forma residual.

O ferro fundido branco alto cromo possui alta resistência à abrasão devido a seus carbonetos eutéticos (geralmente M₇C₃), precipitado por uma matriz austenítica ou martensítica. Pode-se obter melhor desempenho sobre os mecanismos de desgaste, adicionando Mo, V, Nb e Ti, que por sua vez atuam como elementos que geram uma melhor distribuição fina, homogeneizando a densidade planar de carbeto gerados na microestrutura. Para diminuir a quantidade de austenita retida e precipitar os carbeto na liga de FFBC, como o carboneto de cromo é uma fase metaestável e sensível a temperatura de tratamento (taxa de resfriamento) e o tempo de tratamento, ajusta-se a temperatura de desestabilização associada aos parâmetros de interesse, uma vez que a liga possui teor de cromo ideal, a interação carbono-cromo com os demais elementos de liga e a taxa de resfriamento proporcionarão a microestrutura desejada. Nas linhas de pelotização da planta de tubarão utiliza-se FFBC (Ferro fundido branco de alto cromo) como corpo moedor na moagem do minério de ferro.

Este trabalho tem como objetivo avaliar os mecanismos de desgaste abrasivos associados a corpos moedores através de caracterizações química e mecânica além de testes em moinho de bolas de bancada em laboratório.

A velocidade de desgaste e o coeficiente de resistência ao desgaste em bolas produzidas com diferentes percentuais de cromo são parâmetros associados às

avaliações comparativas. Quando se toma como base o coeficiente de desgaste igual a 1 automaticamente associa-se a liga de ferro fundido de baixo Cr. Em todos os casos, o ferro fundido de alto Cromo apresenta melhor desempenho quanto ao desgaste abrasivo, mas, porém, o seu custo é bem maior quando comparado com o custo das bolas de aço forjadas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram fornecidas pela Vale um total de 78 bolas de moinho, das quais 16 bolas com diâmetro variando entre 33,00 a 34,52 mm, 33 bolas com diâmetro variando entre 30,00 a 32,53 mm e 29 bolas com diâmetro variando entre 26,48 a 29,95 mm, todas fabricadas em ferro fundido branco de alto cromo, material de referência. Outras 60 bolas (sub-ligas) foram fabricadas pelo Instituto de Pesquisa com diâmetros variando entre 31 a 33mm, das quais 5 bolas foram utilizadas para caracterização básica do material para os estudos nas fases 3 e 4. Na fase 5 mais 63 bolas em quatro diferentes ligas foram novamente fabricadas pelo Instituto de pesquisas para continuidade das análises e 5 delas foram utilizadas para a caracterização básica.

A metodologia empregada na determinação da nova liga a ser desenvolvida foi dividida nas seguintes fases:

- 2.2.1. Fase 1.1 – Revisão Bibliográfica e análise de falha de bolas. Revisão bibliográfica sobre ferros fundidos brancos alta liga e materiais de bolas, com ênfase em aspectos como dureza, resistência ao desgaste e à corrosão.
- Fase 1.2 – Análise química, análise macrográfica, análise micrográfica óptica, análise de macrodureza, perfil de microdureza, MEV e EDX.
- 2.2.2. Fase 2 – Liga de referência – fabricação, caracterização básica, ensaios de desgaste padrões.
- Fase 2.1 – Confecção por fundição da liga de referência.
- Fase 2.2 – Caracterização básica: análise química, análise macrográfica, análise micrográfica óptica, análise de macrodureza, perfil de microdureza, MEV e EDX.
- Fase 2.3 – Ensaios de desgaste padrões: roda de borracha (ASTM G65), pino-sobre disco (ASTM G99) e impacto repetitivo.
- 2.2.3. Fase 3 – Liga de referência – fabricação de bolas e ensaios de moagem.
- Fase 3.1 – Confecção de bolas de moagem por fundição com a composição química da liga de referência.
- Fase 3.2 – Ensaios de moagem: ensaios de desgaste em moinho de bancada com as bolas fabricadas, minério de ferro e água de processo. Comparação com os ensaios de desgaste padrões.
- 2.2.4. Fase 4 – Sub-ligas – fabricação, caracterização básica, ensaios de desgaste padrões.
- Fase 4.1 – Confecção por fundição de sub-ligas com modificações de composição química e/ou processamento. Estas ligas serão comparadas à liga de referência.
- Fase 4.2 – Caracterização básica: análise química, análise macrográfica, análise micrográfica óptica, análise de macrodureza, perfil de microdureza, MEV e EDX.
- Fase 4.3 – Ensaios de desgaste padrões: roda de borracha (ASTM G65), pino-sobre disco (ASTM G99) e impacto repetitivo.

- 2.2.5. Fase 5 – Sub-ligas – fabricação de bolas e ensaios de moagem.
- Fase 5.1 – Confeção de bolas de moagem por fundição com a composição química das sub-ligas.
- Fase 5.2 – Ensaios de moagem: ensaios de desgaste em moinho de bancada com as bolas fabricadas, minério de ferro e água de processo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. INSPEÇÃO VISUAL DAS SUPERFÍCIES DAS BOLAS

A inspeção visual das superfícies das bolas foi realizada após uma limpeza com detergente, água e álcool seguida de secagem para eliminar qualquer resíduo da superfície. Este ensaio é utilizado para avaliar a superfície das amostras (bolas) antes e após o desgaste gerado pela moagem a seco com areia de quartzo e a úmido com areia de quartzo e/ou minério de Fe.

3.2. ANÁLISE QUÍMICA

Análises químicas foram realizadas por espectrometria de emissão óptica com resultados reportados em % em peso. Os resultados obtidos foram comparados com os materiais fofo alto-Si (liga de referência fofo alto-Cr e o especificado pela Vale)

Identificação	C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	V	Ni	Mo	Ti	Fe
Fofo Alto-Si+4%Cr (3%V)	1,0	1,00	14,5	NE	NE	0,34	4,0	3,0	NE	0,2	NE	Bal
Fofo Alto-Cr (5%Si)	2,02	0,48	5,0	0,032	0,008	0,014	27,82	0,007	0,35	0,083	0,001	Bal
Fofo Alto-Cr (2%V+2%Mo)	2,02	0,48	0,75	0,032	0,008	0,014	27,82	2,0	0,35	2,0	0,001	Bal
Fofo alto-Cr (3%V+2%Mo+0,5%Ti)	2,02	0,48	0,75	0,032	0,008	0,014	27,82	3,0	0,35	2,0	0,50	Bal
Fofo Alto-Si	0,75	0,58	14,5	NE	NE	0,34	4,0	NE	NE	0,5	NE	Bal
Fofo Alto-Cr	2,02	0,48	0,75	0,032	0,008	0,014	27,82	0,007	0,35	0,083	0,001	Bal
Especificado pela Vale	2,10- 2,45	0,30- 0,60	0,30- 0,60	0,06 max	0,06 max	NE	28,0- 32,0	NE	NE	NE	NE	Bal

Figura 1 – Análise química dos corpos moedores analisados.

3.3. DUREZA E PERFIL DE DUREZA

Para a realização do ensaio foi utilizado o Durômetro Rockwell C, com carga de 150kgf, penetrador cônico de diamante. As medidas de dureza foram feitas segundo a norma ASTM E18-11. A amostra a ser medida foi seccionada diametralmente e foram realizadas 5 impressões aleatórias em cada amostra. O perfil de dureza foi realizado radialmente, com espaçamento de 2mm partindo da borda em direção ao centro da bola.

Identificação	Drezas (HRC)					Média
	1º	2º	3º	4º	5º	
Fofo Alto-Si+4%Cr (3%V)	40	38	39	40	41	40
Fofo Alto-Cr (5%Si)	45	44	46	44	44	45
Fofo Alto-Cr (2%V+2%Mo)	64	65	64	63	64	64
Fofo alto-Cr (3%V+2%Mo+0,5%Ti)	62	62	63	62	62	62
Fofo Alto-Si (liga)	54	53	54	54	53	54
	51	50	51	52	50	51
Fofo Alto-Cr (material de referência)	61	60	62	63	62	62
	62	58	60	58	60	60

Figura 2 – Análise de dureza dos corpos moedores, medida de referencia Rockwell C.

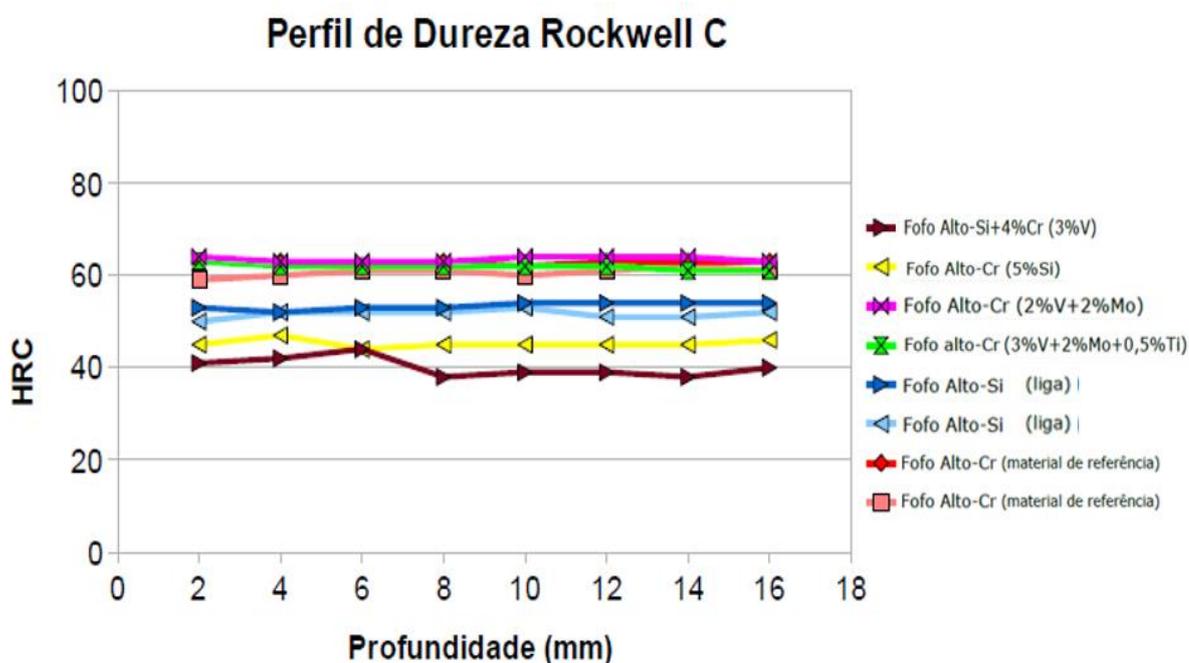


Figura 3 – Perfil de dureza das ligas desenvolvidas para corpos moedores

3.4. ANÁLISE METALGRÁFICA

Após a fabricação das bolas para esta análise, foi escolhida aleatoriamente uma bola que foi cortada e embutida em baquelite. Em seguida a amostra foi lixada manualmente com lixas de granulometria de 80, 100, 150, 240, 360, 400, 600, 1200 e 2000. Após o lixamento a amostra foi polida inicialmente com óxido de cromo (10 mm) e posteriormente em diamante de 1mm. Na sequência foram atacadas com uma solução de Nital 2% ou Vilela. A documentação metalográfica foi registrada através da câmera digital acoplada ao microscópio óptico.

As micrografias ópticas de todas as amostras analisadas apresentam uma microestrutura de um ferro fundido branco alto cromo hipoeutético, consistindo de carbeto secundários numa matriz martensítica e numa matriz austenítico-martensítica conforme pode ser visto na figura 4.

As microestruturas das amostras (fofo alto-Cr) apresentam uma microestrutura típica de um ferro fundido branco alto cromo hipoeutético, consistindo de carbeto secundários numa matriz martensítica (amostra (fofo alto-Cr)) e numa matriz austenítica-martensítica;

As microestruturas das amostras (fofo alto Si+Cr) apresentaram uma microestrutura constituída por carbonetos primários grosseiros, grafita fina e Fe-Si em solução sólida. Nota-se maior concentração dos elementos C, Si, Cr e Fe, evidenciando a formação de carbonetos complexos tipo $Fe+Fe_3Si_2+C$ e carbonetos de cromo.

A microestrutura da sub-liga Fofo Alto-Si+4%Cr (3%V) na condição como fundida indica a presença de carbonetos grosseiros distribuídos na matriz ferro-silício. É mostrada a microestrutura da sub-liga fofo alto-Cr (5%Si) na condição como fundida, constituída de carbonetos aciculares de cromo em matriz ferrítica. As sub-ligas fofo alto-Cr (2%V+2%Mo) e fofo alto-Cr (3%V+2%Mo+0,5%Ti), tratadas termicamente a 1.050°C por 2 horas e resfriadas ao ar forçado, apresentaram uma microestrutura composta de carbonetos eutéticos descontínuos em uma matriz metálica formada por carbonetos secundários de cromo e vanádio, martensita e austenita retida.

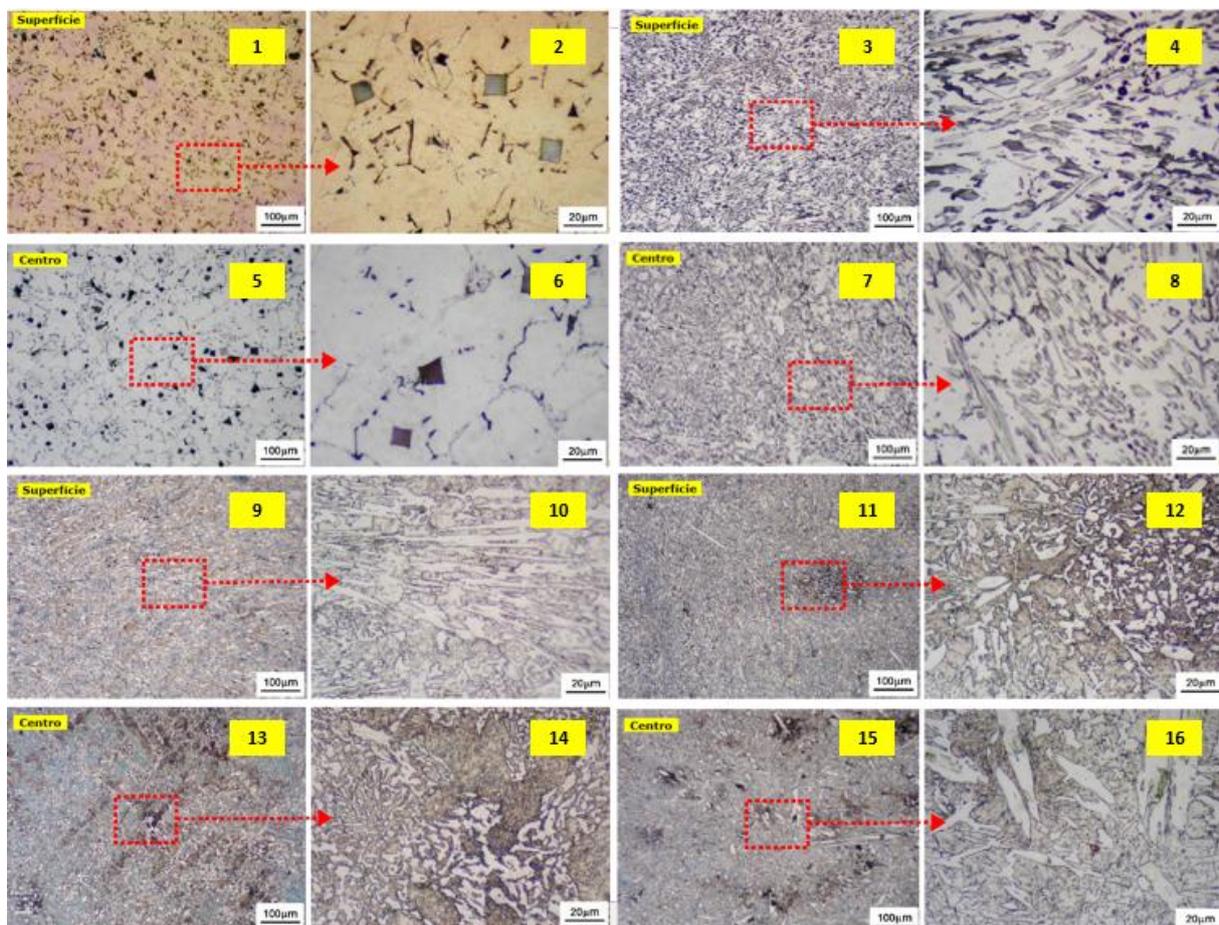


Figura 4 - Micrografia ótica das amostras 1,2,5 e 6 são da liga Fofo Alto-Si+4%Cr (3%V), 3,4,7 e 8 da Fofo Alto-Cr (5%Si), 9,10,13 e 14 da liga Fofo Alto-Cr (2%V+2%Mo) e 11,12,15 e 16 da liga Fofo alto-Cr (3%V+2%Mo+0,5%Ti).

3.5. DESGASTE PINO-SOBRE-DISCO

As superfícies das amostras antes e após o ensaio de desgaste tipo pino-sobre disco são mostradas na figura 5. Observam-se superfícies quase lisas e com arrancamento do material, os resultados de desgaste apresentados mostram uma

ligeira perda de massa das amostras de fofo alto-Cr). Este comportamento pode ser devido a sua dureza e microestrutura, constituída de carbonetos, grafita fina e Si-Fe da amostra fofo alto Si+Cr e de carbonetos secundários numa matriz martensítica (amostra fofo alto-Cr) e numa matriz austenítica-martensítica.



Figura 5 – fotografias das trilhas de desgaste das amostras de liga de referência.

Material		Dureza (HRC)		T (°C)	Δm disco (mg)			Δm esfera (mg)		
Disco	Esfera/Pino	CP	Esfera		M	δ	M	δ		
Fofo Alto-Si+Cr	E1	52	60	25	0,9	1,3	0,4	0,3	0,2	0,1
	E2	54			1,3			0,1		
	E3	51			1,7			0,3		
Fofo Alto-Cr	E4	61	60		1,1	1,2	0,7	1,0	1,1	0,2
	E5	60			0,5			1,3		
	E6	62			1,9			1,0		

Figura 6 -Perda de massa através do ensaio pino sobre disco das ligas de referência. (Δm – perda de massa; M – média; δ - desvio padrão.).

3.6. DESGASTE POR IMPACTO REPETITIVO

A figura 7 apresenta os resultados de perda de massa durante o desgaste por impacto repetitivo bola-contra-bola antes e após os ensaios de impacto repetitivo qualitativamente. Observam-se as marcas deixadas pelo impacto da bola, mas apesar do grande número de impactos durante o ensaio (6h) não houve perda de massa significativa da bola. A micrografia via MEV permite a observação de alguns buracos (seta amarela), microfissuras e esmagamento resultado dos impactos.

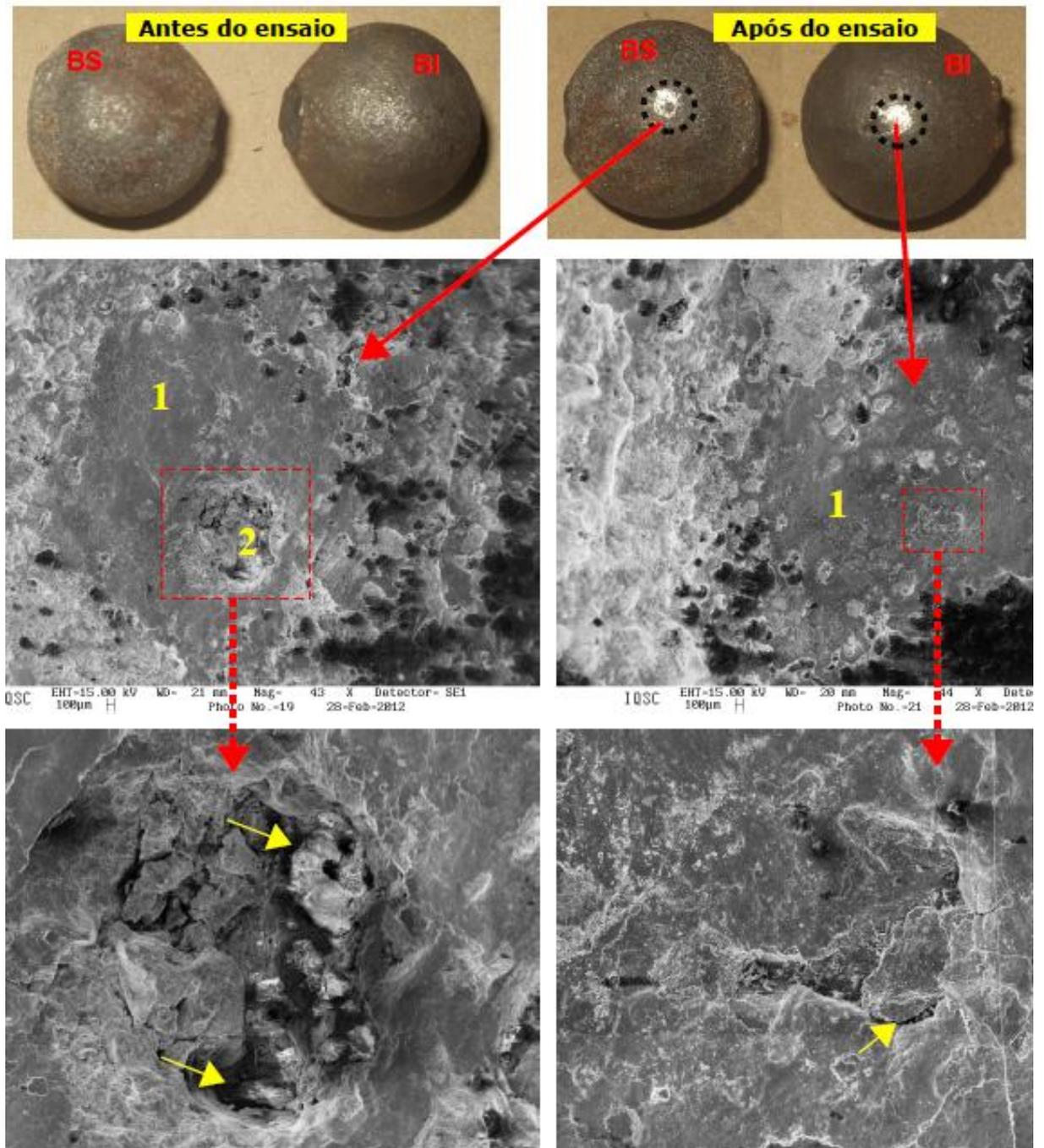


Figura 7 – (a) aspecto visual das bolas, antes e após o ensaio (círculo tracejado preto) e Inspeção por MEV na região de impacto das bolas BS (bola superior) e BI (bola inferior).

3.7. DESGASTE POR MOAGEM

Os resultados dos ensaios demonstraram que a maior perda de massa nas bolas foi observada nas moagens a úmido com areia e com minério de ferro. Portanto, foram realizados ensaios de moagens a úmido com areia e com minério de ferro. Além desses ensaios, também foram realizados ensaios de moagem a úmido com areia alterando o pH da água utilizada na moagem com o objetivo de avaliar o efeito do meio no processo de moagem. Os ensaios de moagem foram realizados em um moinho de bolas, com dimensões de 300mm de altura e 210mm de diâmetro,

operando à frequência de 1Hz. Foram utilizadas bolas com diâmetros entre 31,00mm e 33,00mm. A pesagem dos corpos moedores, antes e após cada ciclo de desgaste foram efetuadas em uma balança analítica com precisão de 0,1mg. Com o objetivo de eliminar as diferenças superficiais das bolas como resultado da fundição e moagem, realizou-se o *run-in* por 10h. O desgaste das bolas foi avaliado por meio da taxa de desgaste e observação visual.

Na moagem a úmido utilizaram-se como material abrasivo areia de quartzo AFS 60/70 e minério de ferro mais água comum. As mesmas juntamente com as bolas de moinho preencheram o 50% do volume total do cilindro. O tempo total de ensaio foi de 60 horas, com paradas a cada 10 horas para troca do material abrasivo (areia de quartzo e minério de Fe). Após a moagem as bolas foram limpas, secas e preparadas para pesagem. O pH da água utilizada na moagem a úmido de areia foi de 7 e 10, para aumentar o pH foi utilizado hidróxido de sódio. Na moagem de minério de ferro o pH da polpa foi de 8.

Os resultados de perda de massa progressiva e de taxa de desgaste na moagem de minério de ferro das sub-ligas fofo alto-Si+4%Cr (3%V), fofo alto-Si+4%Cr (3%V), fofo alto-Cr (2%V+2%Mo) e fofo alto-Cr (3%V+2%Mo+0,5%Ti) são apresentados nas figuras 8 e 9. Nelas também são apresentados os resultados do material de referência fofo alto-Cr e da liga fofo alto-Si (Liga do relatório da fase 4), em termos comparativos. Analisando os resultados observa-se que as menores taxa de desgaste foram obtidos na liga de referência fofo alto-Cr e nas sub-ligas fofo alto-Cr (2%V+2%Mo) e fofo alto-Cr (3%V+2%Mo+0,5%Ti), quando comparadas com a liga fofo alto-Si (Liga) e a sub-liga fofo alto-Si+4%Cr (3%V). Este comportamento foi devido a sua elevada dureza e microestrutura com melhor distribuição de carbonetos secundários, favorecendo à resistência abrasivo/corrosivo.

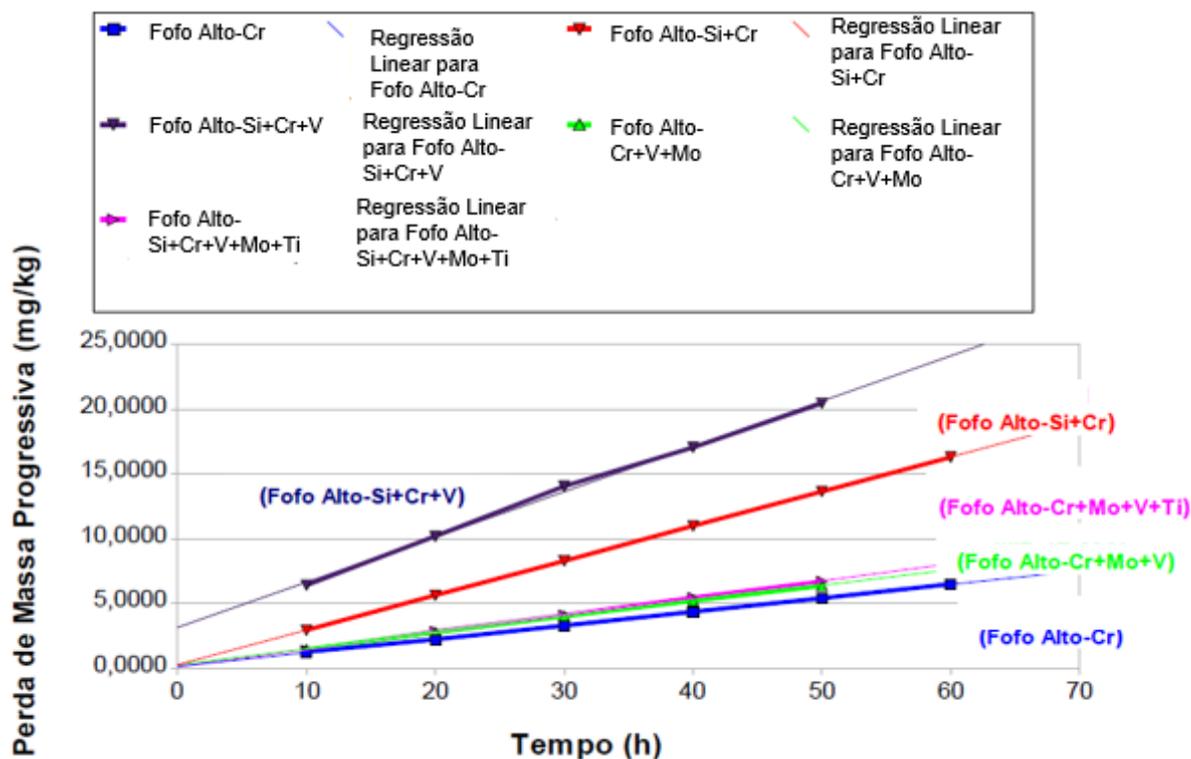


Figura 8 - Perda de massa progressiva em valor absoluto das bolas no desgaste por moagem com minério de ferro.

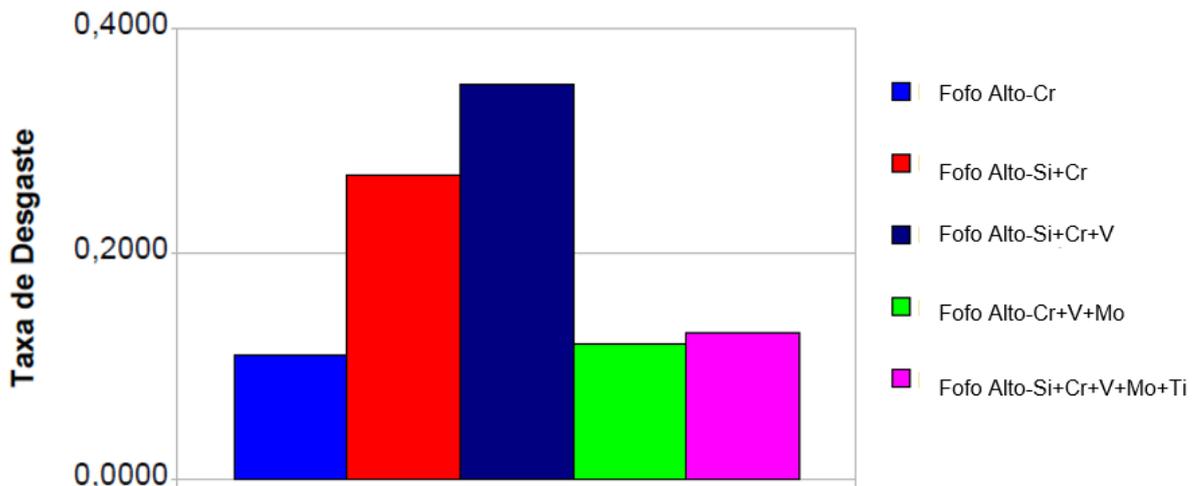


Figura 9 – Análise comparativa da taxa de desgaste na moagem com minério de ferro.

As microestruturas de matriz martensítica ou austenítica-martensítica não são muito favoráveis ao comportamento sinérgico corrosivo/abrasivo, resultado das bolas após submetidas ao processo de moagem a úmido. O sinergismo ocorre porque a matriz sofre um ataque corrosivo e não sustenta mais os carbonetos contra os ataques abrasivos. A matriz martensítica é mais agressivamente atacada pelo processo corrosivo, deixando os carbonetos eutéticos expostos ao impacto abrasivo.

As microestruturas de matrizes ferrítica relativamente menos duras (371 a 421HB), não são muito favoráveis ao mecanismo sinérgico abrasivo/corrosivo devido à baixa resistência ao desgaste abrasivo. Já microestruturas de matriz martensítica são mais agressivamente atacadas pelo processo corrosivo, deixando os carbonetos eutéticos expostos ao impacto abrasivo. No entanto, em microestruturas constituídas de matriz austenítica-martensítica com carbonetos secundários finos e de alta dureza, o comportamento sinérgico abrasivo/corrosivo pode ser favorável, devido ao fato de que a matriz austenítica proporciona melhor resistência à corrosão ao redor dos carbonetos, resultando em melhor proteção dos mesmos.

4 CONCLUSÃO

O provável mecanismo de dano que acelera a perda de massa sob condições de moagem a úmido está associado a processos de fragilização por hidrogênio devido a microtrincamentos superficiais. Desenvolver um processo que contribua na melhor distribuição granulométrica e aumento de dureza de carbonetos, favorece um aumento global da resistência ao desgaste e possivelmente, uma melhora na resistência ao ataque por hidrogênio pela diminuição de microtrincamentos.

A introdução de elementos de liga mais nobres, tal como Mo, V e Ti aumentam significativamente o custo da liga, sem um aumento de desempenho justificável.

A perda de massa progressiva no desgaste a seco em areia, a úmido em areia e com minério de ferro foi maior na sub-liga (fofo alto Si+Cr), quando comparada com a liga de referência (fofo alto-Cr). A amostra de fofo de alto Si+4%Cr não necessita de tratamento térmico, o que por si só é uma grande vantagem, visto que ele representa uma parcela significativa dos custos de fabricação.

Carbonetos de matriz martensítica são mais suscetíveis ao desgaste corrosivo, propiciando o desgaste por impacto e abrasão nos carbonetos uma vez que os

carbetos ficam desprotegidos, isto é, sem ancoragem devido a sinergia do desgaste envolvido. A matriz austenítica proporciona melhor resistência à corrosão ao redor dos carbonetos resultando em melhores desempenho de resistência ao desgaste, entretanto a matriz austenítica resulta em menor microdureza da matriz.

AGRADECIMENTOS

Aos colegas de trabalho que contribuíram direta ou indiretamente para o desenvolvimento desse estudo.

5. REFERÊNCIAS

- [1]. AMORIN, L. C. (2010). DEFINIÇÃO DA MELHOR LIGA METÁLICA PARA OS CORPOS MOEDORES DA USINA DE PELOTIZAÇÃO DE FÁBRICA. MONOGRAFIA – ESPECIALISTA EM BENEFICIAMENTO MINERAL. UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO, MG, P.25.
- [2]. BARROS, L. A. (1991). TESTES DE AVALIAÇÃO DE CORPOS MOEDORES. IN: SEMINÁRIO SOBRE MATERIAIS RESISTENTES AO DESGASTE, 2, 1991. UBERLÂNDIA, MG. ANAIS, SÃO PAULO: ABM, P.481-502.
- [3] CASSOLA, M. S.; MORAIS, S. L.; ALBERTIN, E. (2004). ENSAIOS DE MOAGEM PILOTO: REFERÊNCIA PARA AVALIAÇÃO DA TAXA DE DESGASTE DE CORPOS MOEDORES. TECNOLOGIA EM METALURGIA E MATERIAIS, V.1, N.2, P.28-33, OUT. – DEZ.
- [4] CHIAVERINI, V. (2008). AÇOS E FERROS FUNDIDOS. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS – ABM, SÃO PAULO – SP.
- [5] GATES, J. D. ET. AL. (1995). SYNERGISTIC CORROSION-ABRASION OF CAST WEAR-RESISTANT MATERIALS IN HNO₃. CAST METALS, VOL.8, PP.73-90.
- [6] HOWAT, D. D. (1983). AN ASSESSMENT OF THE MERITS OF VARIOUS TYPES OF BALLS IN THE MILLING OF ORES. MINTEK REPORT M117. COUNCIL FOR MINERAL TECHNOLOGY, RANDBURG, SOUTH AFRICA.
- [7] IWASALI, I. (1988). NATURE OF CORROSIVE WEAR IN BALL MILL GRINDING. INTERNATIONAL JOURNAL OF MINERAL PROCESSING, V.22, N.1-4, P.345-360.
- [8] JACUINDE, A. B.; ARIAS, L.; HERNÁNDEZ, B. (2003). Kinetics of secondary carbides precipitation in a high-chromium white iron, Journal of Materials Engineering and Performance, v.12, p.371-382.
- [9] LAIRD G.; GUNDLACH, R, & ROHRIG, K. (2000). ABRASION – RESISTANT CAST IRON HANDBOOK. AMERICAN FOUNDRY SOCIETY – AFS. DES PLAINES, ILLINOIS, UNITED STATE OF AMERICAN, 2000.
- [10] MADSEN, B. W. (1988). MEASUREMENT OF EROSION-CORROSION SYNERGISM WITH A SLURRY WEAR TEST APPARATUS. WEAR OF MATERIALS, V.123, PP.127-142
- [11] METALS HANDBOOK. (1988). Casting, 9th ed. American Society for Metals International, v.4, p.1485-1497.
- [12] MOORE, M. A.; PEREZ, R.; GANGOPADHYAY, A.; EGGERT, J. F. (1988). FACTOR AFFECTING WEAR IN TUMBLING MILLS: INFLUENCE OF COMPOSITION AND MICROSTRUCTURES. INTERNATIONAL JOURNAL OF MINERAL PROCESSING, V.22, N.1-4, P.313-343.
- [13] NETO, B. J.; LIMA, J. R. B. (1998). MÉTODOS DE ACOMPANHAMENTO DO DESGASTE DE REVESTIMENTO DE MOINHO. IN: SEMINÁRIO DE DESGASTE

(DESGASTE E PROTEÇÃO), 4. SÃO PAULO. ANAIS SEMINÁRIO SOBRE MATERIAIS RESISTENTES AO DESGASTE. ABM, P.349-364.

[14] RAJADOPAL, V.; IWASAKI, I. (1992) NATURE OF CORROSIVE AND ABRASIVE WEAR OF CHROMIUM-BEARING CAST IRONS GRINDING MEDIA. CORROSION, PP.132-139.

[15] RAJADOPAL, V.; IWASAKI, I. (1992). WEAR BEHAVIOR OF CHROMIUM-BEARING CAST IRONS IN WET GRINDING. WEAR, V.154, PP.241-258.

[16] SINGLETON, D. J. & BLICKENSDECKER, R. (1985). WEAR AND CORROSION OF 12 ALLOY DURING OF THE LABORATORY MILLING OF PHOSPHATE ROCK IN PHOSPHORIC ACID WASTE WATER. BUREAU OF MINES RI 8919, PP.16.