

ANÁLISE DAS PROPRIEDADES QUÍMICAS E FÍSICAS DOS CORPOS MOEDORES DO MOINHO DE BOLAS¹

Elis Regina Lima Siqueira²

Adilton Rocha da Silva³

Mara Cristina de Sousa Cardoso³

Mayron Saminez Araújo Nunes³

Márcio Corrêa Carvalho⁴

Resumo

Atualmente na indústria, o desgaste de equipamentos, componentes e materiais representam um dos maiores fatores de depreciação de capital e fontes de despesas com manutenção e/ou reposição de materiais de consumo. Em torno de 10% de toda energia gerada por meios técnicos, é dissipada por fricção e outros processos de desgaste. Em processamento mineral os corpos moedores estão entre os principais itens de custo e consumo, dessa forma, ações que visam encontrar alternativas para reduzir seus desgastes, se tornam indispensáveis. Com foco neste cenário, o trabalho em questão tem como objetivo estudar vários corpos moedores provenientes de dois fornecedores distintos para definir quais corpos moedores é mais eficiente, ou seja, apresenta melhores propriedades químicas e físicas, para aplicação em moagem de minério. Para definição do fornecedor que apresenta os melhores corpos moedores foi realizada uma metodologia de avaliação de desgaste nos corpos moedores. As técnicas instrumentais aplicadas para seleção destes corpos envolvem inspeção visual e estereoscopia, microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura, espectroscopia de raios X por dispersão em energia, espectroscopia de emissão óptica e ensaio de microdureza Vickers. Ao fim do trabalho serão apresentados os dados que comprovam o grau de eficiência entre os corpos moedores.

Palavras-chave: Corpos moedores; Microdureza; Desgaste.

ANALYSIS OF CHEMICAL AND PHYSICAL PROPERTIES OF GRINDING MEDIA OF BALL MILL

Abstract

Currently in the industry, the wear of equipments, components and materials represents a major contributor of capital depreciation and sources of maintenance expenses and/or replacement of consumables. Around 10% of all energy generated by technical ways, is dissipated by friction and other wear processes. In mineral processing the grinding media are among the main items of cost and consumption, so actions aimed at finding alternatives to reduce their wear, become indispensable. With a focus in this scenario, the work in question has to study various grinding media from two different suppliers to define which grinding media are more efficient, in other words, shows better chemical and physical properties, for use in grinding of ore. To define the supplier that has the best grinding media was carried out a methodology for evaluating the wear of grinding media. The instrumental techniques applied for selection of these media involve visual inspection and stereoscopy, optical microscopy, scanning electron microscopy, energy dispersive X-ray spectroscopy, optical emission spectroscopy and Vickers microhardness test. At the end of the work are presented data showing the degree of efficiency between grinding media.

Keywords: Grinding media; Microhardness; Wear.

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

² Engenheira de Materiais, Colaboradora da Faculdade de Engenharia de Materiais, UFPA.

³ Graduando da Faculdade de Engenharia de Materiais, Monitor do Laboratório de Ensaios Destrutivos, UFPA.

⁴ Engenheiro Químico, MSc., Professor adjunto da Faculdade de Engenharia de materiais, UFPA.

1 INTRODUÇÃO

Os minerais constituem os insumos básicos mais requeridos pela civilização moderna. Nem sempre esses minerais apresentam-se na natureza na forma em que serão consumidos pela indústria, quer seja por suas granulometrias (tamanhos) quer por estarem associados a outros minerais, que não têm interesse ou são indesejáveis para o processo industrial a que se destinam. É exatamente para a adequação dos minerais aos processos industriais que se utiliza o beneficiamento dos minérios.

A fragmentação ou redução de tamanho é uma técnica de vital importância no processamento mineral. Um minério deve ser fragmentado até que os minerais úteis contidos sejam fisicamente liberados dos minerais indesejáveis. Às vezes, a redução de tamanho visa apenas à adequação às especificações granulométricas estabelecidas pelo mercado, como, por exemplo, a fragmentação de rochas como o granito ou calcário para a produção de brita. Em todos os casos, a fragmentação é uma operação que envolve elevado consumo energético e baixa eficiência operacional, representando, normalmente, o maior custo no tratamento de minérios. A fragmentação é quase sempre dividida em várias etapas, para minimizar seus custos e não fragmentar as partículas além do necessário. As etapas iniciais da fragmentação, quando ainda são gerados tamanhos relativamente grandes de partículas, são chamadas de britagem. Quando a fragmentação visa atingir tamanhos bem menores, dá-se o nome de moagem.⁽¹⁾

A moagem é a operação de fragmentação onde é possível obter, a partir de corpos moedores, um produto de granulometria fina, através de uma combinação de mecanismos de abrasão, impacto e compressão, em ambiente a seco ou a úmido. A fragmentação é feita essencialmente pela associação dos mecanismos de abrasão e impacto, secundariamente por compressão. A carga moedora tem a função de transformar a energia recebida em energia de quebra.

O elevado consumo de energia e de materiais de desgaste característico do processo torna a moagem, na maioria das vezes, a operação unitária de maior custo numa unidade de processamento mineral. No custo do processamento de minérios de cobre, desde a mina até o embarque do concentrado, esta operação unitária contribui com 40% dos custos totais. Assim, seja pelo elevado custo, seja pela participação fundamental da moagem no desempenho do processo como um todo, torna-se imperioso a análise de todos os fatores de operacionais e econômicos.

A importância de se obter maior eficiência na operação de fragmentação se deve ao consumo de milhares de toneladas de corpos moedores por indústrias mineradoras brasileiras todos os anos. A indústria mineral nacional consome aproximadamente, mais de 50 mil toneladas de corpos moedores por ano. Diante deste cenário, é prioritário que seja realizada pesquisa nesta linha com objetivo de fornecer soluções tecnológicas através do desenvolvimento de insumos e otimização do processo.

A taxa de desgaste dos corpos moedores deve ser cuidadosamente explorada, através de dados comparativos ou por meios de ensaios com bolas marcadas para buscar o uso do corpo moedor que leve a um menor custo.⁽²⁾

Nesse trabalho, o foco foi econômico, tendo como objetivo demonstrar a importância da metodologia aplicada no controle de qualidade dos corpos moedores de moinho de bolas, de modo a realizar uma análise comparativa da taxa de desgaste e tempo de vida útil entre estes para dar subsídio técnico às unidades de moagem industriais.

1.1 Moinhos de Bolas

O moinho de bolas (Figura 1) usa-se para moer diversos tipos de minérios e materiais, ou para selecionar minérios. Grande parte da moagem industrial é realizada em moinhos tubulares que são basicamente cilindros revestidos internamente com placas resistentes ao desgaste, dentro dos quais os corpos moedores (bolas, barras, *pebbles* e *cylpebs*) se movem livremente ao realizar o seu trabalho de cominuição sobre o material a moer. A redução de tamanho é feita pela ação do impacto e da fricção das bolas ao girar o moinho. O tipo de desgaste que prevalece nas indústrias mineradoras é o abrasivo. As perdas na indústria mineradora são de aproximadamente de 40% com corpos moedores e 20% com revestimentos de moinhos.



Figura 1. Moinho de bolas Metso 22' x 32' 12.500 HP.⁽³⁾

1.2 Corpos Moedores

A carga de corpos moedores é o componente de um moinho que produz trabalho útil. É composta de centenas de bolas desenvolvidas com propriedades mecânicas especiais para atender a necessidade de grande resistência ao desgaste a abrasão. Sua composição química é bastante diversificada e sua dureza geralmente está entre 550 Vickers e 850 Vickers.



Figura 2. Bolas de moinho.⁽³⁾

As bolas metálicas estão entre os corpos moedores mais empregados no setor, podendo ser empregadas sozinhas ou ainda com fragmentos do próprio

minério. Considera-se geralmente, que o consumo de corpos moedores é um dos principais itens de custo no processamento de minérios.

A carga moedora do moinho de bolas pode operar em dois regimes distintos: cascata e catarata. No regime de cascata é menos importante a moagem por choque, sendo a moagem por atrito mais evidenciada, usualmente utilizada quando se procura uma moagem mais fina. No regime de catarata o choque é mais evidenciado.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados neste trabalho foram cinco corpos moedores (CM), provenientes de um fornecedor identificados como M e cinco corpos moedores (CM) provenientes de outro fornecedor identificado como P, ambos com diâmetro médio de 79,17 mm.

Para realização das análises dos corpos moedores dos moinhos de bolas, se fez necessário uma divisão racional das etapas de análise devido a pouca quantidade de amostras (Figura 3).

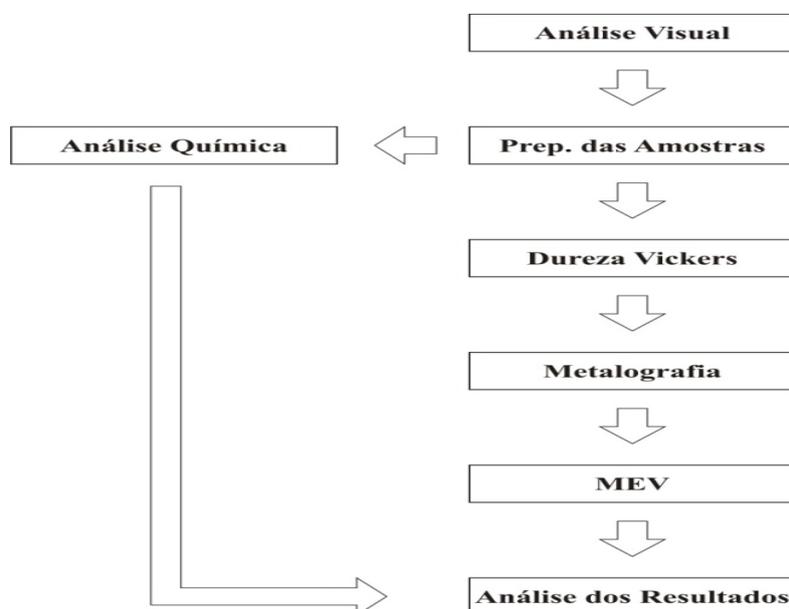


Figura 3. Histograma das etapas para análise dos corpos moedores.

2.1 Análise Visual e Estereoscopia

A análise visual corresponde a uma descrição das condições superficiais das amostras, como por exemplo, corrosão por oxidação, rugosidade, rebarbas etc. A inspeção visual e estereoscopia foram realizadas no Laboratório da Faculdade de Engenharia de Materiais. O equipamento utilizado para realização da estereoscopia foi o Estereoscópio trinocular Tecnival.

2.2 Preparação da Amostra

As amostras foram preparadas por procedimento padrões de acordo com a Norma NBR 8653 – Metalografia e tratamentos térmicos das ligas Fe-C. As amostras foram cortadas através de cortes com discos específicos obtendo-se dois espécimes de

cada corpo moedor, um para análise química e outro para ensaio de dureza, análise metalográfica e microscopia de varredura⁽⁴⁾.

2.3 Análise Química

A análise química fornece informações químicas ou físicas sobre uma amostra. Para este trabalho é necessário uma análise mais criteriosa e aprofundada, por isso é de fundamental importância para conhecer a composição química do material em estudo e a quantidade de cada componente.

A análise quantitativa é a análise mais criteriosa, além de saber do que se trata o material ainda é preciso saber o teor de carbono, de cromo e dos elementos de liga. Essa análise foi realizada através da técnica instrumental de espectroscopia de emissão óptica no espectrômetro de emissão óptica 3460 ARL.

2.4 Ensaio de Dureza Vickers

As amostras usadas no ensaio de dureza foram lixadas com a seguinte sequência de lixas: 100, 180 e 240 na lixadeira automática Arotec, modelo Aropol 2V.

O ensaio de dureza realizado foi de Dureza Vickers, no LED - Laboratório de Ensaios Destrutivos da Femat - Faculdade de Engenharia de Materiais, UFPA, no equipamento MHV2000 Digital – Microhardness tester. As indentações nas amostras foram feitas a partir da extremidade em direção ao centro com carga de 2.94 N, de acordo com a norma NBR-6672⁽⁵⁾.

2.5 Ensaio Metalografico

As amostras foram lixadas e polidas com pasta de diamante e atacadas superficialmente com reagente Nital 2% de acordo com a Norma NBR 8108 – Ataque com reativos metalográficos das ligas Fe-C⁽⁶⁾.

Após a realização do ensaio de dureza Vickers as amostras foram aproveitadas para análise de microscopia ótica, então precisaram ser novamente lixadas com as lixas 180 e 240 para retirada das indentações Vickers ocasionadas no ensaio e posteriormente também lixadas com a seguinte sequência de lixas: 320, 400, 600, 800, 1.200 na lixadeira automática. Em seguida, as amostras foram polidas usando suspensões de diamante de 9µm, 6µm, 3µm e ¼ µm na politriz de marca Arotec, modelo Aropol 2V. O microscópio ótico usado foi de marca Olympus, modelo BX41M equipado com câmera digital Motic 1000, 1.3 Mpixel. As imagens foram obtidas em aumentos de 200 vezes e 800 vezes.

2.6 Microscopia Eletrônica de Varredura

Para a caracterização microestrutural através do Microscópio Eletrônico de Varredura foram extraídos amostras dos corpos moedores. Para garantir uma boa qualidade das imagens, as amostras foram lixadas e polidas e observadas em microscópio Hitachi modelo TM 3000.

A análise qualitativa identifica a composição do material e essa foi realizada pela técnica de espectrometria de energia dispersiva (EDS) feita juntamente com a Microscopia Eletrônica de Varredura, pois o microscópio eletrônico possui um equipamento de microanálise acoplado (Oxford, modelo Swift ED 3000) que permite a obtenção de informações químicas em áreas da ordem de micrometros. As

informações, qualitativas e semi quantitativas, sobre os elementos presentes foram obtidas pela captação dos raios X característicos resultantes da interação do feixe primário com as amostras.

Atualmente quase todos os MEV são equipados com detectores de raios X, sendo que devido à confiabilidade e principalmente devido à facilidade de operação, a grande maioria faz uso do detector de energia dispersiva (EDX).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da inspeção visual e estereoscopia foi possível observar a distinção do acabamento superficial entre os corpos moedores: As amostras do fornecedor M apresentam um melhor acabamento com superfície menos rugosa que as amostras do fornecedor P e estas apresentam porosidades superficiais e algumas rebarbas oriundas do processo de fabricação mais acentuadas que as amostras M, no entanto, todas as amostras encontravam-se oxidadas que foram observadas pela inspeção visual (Figura 4).

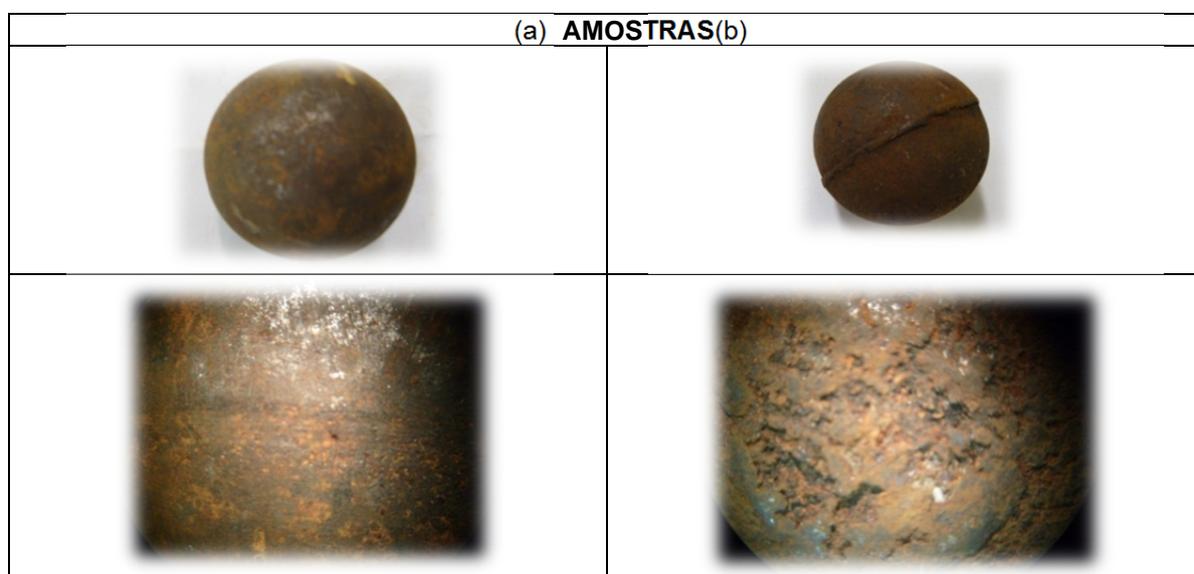


Figura 4. (a) Amostra M; (b) amostra P.

Os resultados da análise química quantitativa por espectroscopia de emissão óptica são mostrados na Tabela 1, os teores médios de carbono e ferro das amostras M e P caracterizam o material dos dois tipos de CM's como aço de alto carbono e baixa liga. As amostras M apresentaram um maior teor médio de carbono e cromo que as amostras P, o carbono aumenta a resistência mecânica do aço e a temperabilidade que aumentam proporcionalmente a resistência mecânica, quanto maior a resistência mecânica maior a resistência ao desgaste abrasivo e menor a resistência ao impacto. Quanto maior o teor de cromo no aço maior a capacidade de formação de uma camada de óxido passivante, portanto, os aços M terão uma maior resistência ao desgaste por corrosão. O Manganês aumenta a resistência ao desgaste por abrasão, entretanto, os teores médios obtidos para os dois materiais apresentaram-se praticamente os mesmos. Os teores médios de enxofre e fósforo da amostra P apresentaram valores acima de 0,025% recomendados pela literatura. O teor elevado de fósforo no aço baixa a tenacidade, ou seja, reduz a resistência ao impacto, essa influência é tanto mais séria quanto maior o teor de carbono do aço. O enxofre é um elemento indesejável ao aço, se combinado com o

ferro na forma de sulfeto deixa o aço quebradiço, reduzindo a resistência ao impacto.⁽⁷⁾ O alumínio e o silício são os principais responsáveis pela formação de inclusões não metálicas, esses elementos encontram-se em teores mais elevados nos CM's da amostra P. As demais variações podem ser consideradas como residuais não tendo relevância, em comparação aos teores médios dos resultados obtidos para os elementos citados anteriormente.

Tabela 1. Resultados da análise química quantitativa

Amostra	Composição %															
	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Al	Cu	Ti	Nb	Sn	Pb
P01	96,924	0,830	0,364	0,925	0,027	0,041	0,502	0,027	0,007	0,008	0,057	0,182	0,003	0,003	0,008	0,013
P02	96,866	0,813	0,365	0,955	0,028	0,031	0,503	0,048	0,096	0,006	0,036	0,183	0,001	0,003	0,011	0,004
P03	97,227	0,605	0,314	0,893	0,022	0,020	0,572	0,043	0,071	0,004	0,036	0,154	0,001	0,003	0,010	0,003
P04	96,982	0,737	0,321	0,917	0,034	0,020	0,438	0,036	0,120	0,005	0,037	0,172	0,001	0,004	0,010	0,004
P05	97,109	0,737	0,322	0,850	0,030	0,029	0,515	0,038	0,076	0,006	0,024	0,228	0,001	0,003	0,010	0,004
M01	97,119	0,968	0,253	0,939	0,017	0,012	0,633	0,001	0,019	0,011	0,001	0,010	0,017	0,003	0,001	0,001
M02	97,078	0,987	0,225	0,939	0,022	0,010	0,650	0,002	0,018	0,015	0,002	0,017	0,027	0,003	0,000	0,001
M03	97,296	0,902	0,218	0,871	0,019	0,009	0,617	0,001	0,017	0,011	0,001	0,012	0,017	0,003	0,001	0,001
M04	97,120	0,940	0,205	0,908	0,011	0,000	0,638	0,008	0,026	0,005	0,025	0,088	0,005	0,002	0,007	0,001
M05	97,281	0,902	0,211	0,887	0,021	0,003	0,615	0,001	0,014	0,020	0,001	0,012	0,024	0,002	0,001	0,001
Med. P	97,022	0,744	0,337	0,908	0,028	0,028	0,506	0,038	0,074	0,006	0,038	0,184	0,002	0,003	0,010	0,006
Med. M	97,179	0,940	0,222	0,909	0,018	0,007	0,631	0,003	0,012	0,012	0,006	0,028	0,018	0,003	0,002	0,001

As amostras M e P apresentaram um perfil médio de microdureza Vickers com elevada dureza na superfície diminuindo na direção do centro (Figura 5). As amostras P, têm maior dureza na superfície comparando-se com às amostras M e os desvios padrões nas superfícies das amostras são semelhantes, porém às amostras M apresentam maior dureza no centro em relação às amostras P e também um menor desvio padrão (Tabela 2). A partir dos valores obtidos de dureza e o perfil de microdureza para as duas amostras estima-se que houve a realização de tratamento térmico para ambas. As amostras P apresentam valores médios de microdureza mais elevados, valores altos de microdureza aumentam a resistência ao desgaste, entretanto valores muito altos diminuem a resistência ao impacto.

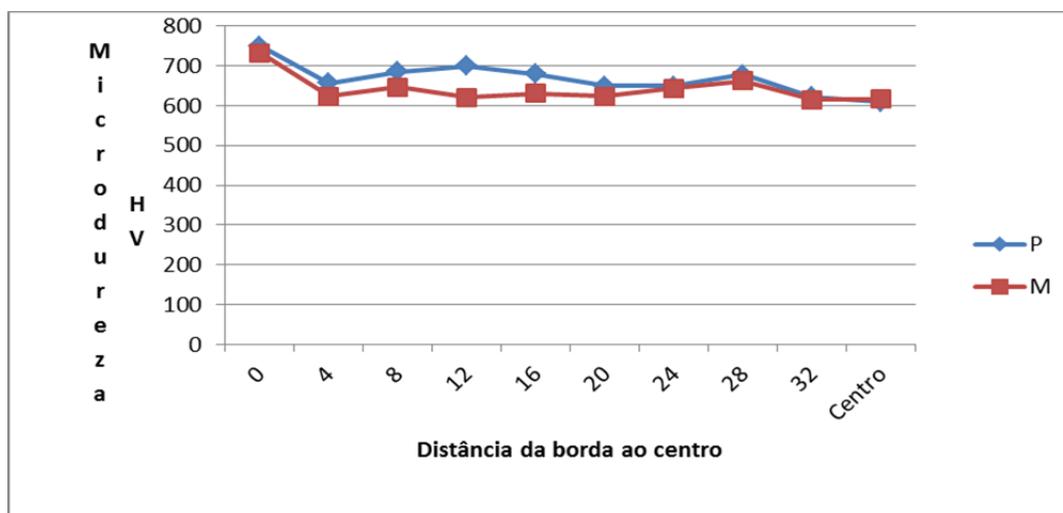


Figura 5. Perfil de Microdureza das amostras M e P.

Tabela 2. Resultados do ensaio de microdureza Vickers

Amostra	Comp. (mm)	Dureza HV - Distância do Centro (mm) – Carga - 2,94 N									
		0	4	8	12	16	20	24	28	32	Centro
P01	36,44	809	738	673	687	729	685	745	731	734	643
P02	36,09	807	785	772	768	697	697	667	680	669	646
P03	38,28	631	593	603	650	605	614	556	570	515	461
P04	36,48	663	598	726	756	714	719	660	713	702	635
P05	38,59	839	569	650	638	653	529	619	694	490	661
M01	40,29	877	548	630	635	699	708	696	638	546	533
M02	36,33	637	517	545	489	497	490	549	756	593	627
M03	36,64	643	660	682	666	699	646	672	686	741	608
M04	35,6	741	638	650	590	613	653	710	639	607	691
M05	35,07	767	758	724	719	642	621	586	593	590	623
Med. P		749,8	656,6	684,8	699,8	679,6	648,8	649,4	677,6	622	609,2
Desvio Padrão P		95,4	97,8	65,8	59,7	50,5	77,7	69,3	63,2	111,8	83,4
Med. M		733	624,2	646,2	619,8	630	623,6	642,6	662,4	615,4	616,4
Desvio Padrão M		99,1	95,8	66,8	86,9	83,1	81,2	71,1	61,8	73,8	56,5

As amostras M e P foram observadas no microscópio óptico e no MEV (Figuras 6 e 7), ambas apresentaram uma microestrutura mista de ripas e agulhas de martensita, estas estruturas são características de aços com altos teores de carbono submetidos ao tratamento térmico de têmpera seguido ou não de revenimento, as microestruturas das amostras M apresentaram maior teor de ripas comparando-se com as amostras P, isto ocorre devido ao teor de carbono mais elevado das amostras P. A microestrutura martensítica proporciona ao material uma elevada resistência mecânica e ao desgaste por abrasão, entretanto reduz a tenacidade à fratura, e portanto, a resistência ao impacto.

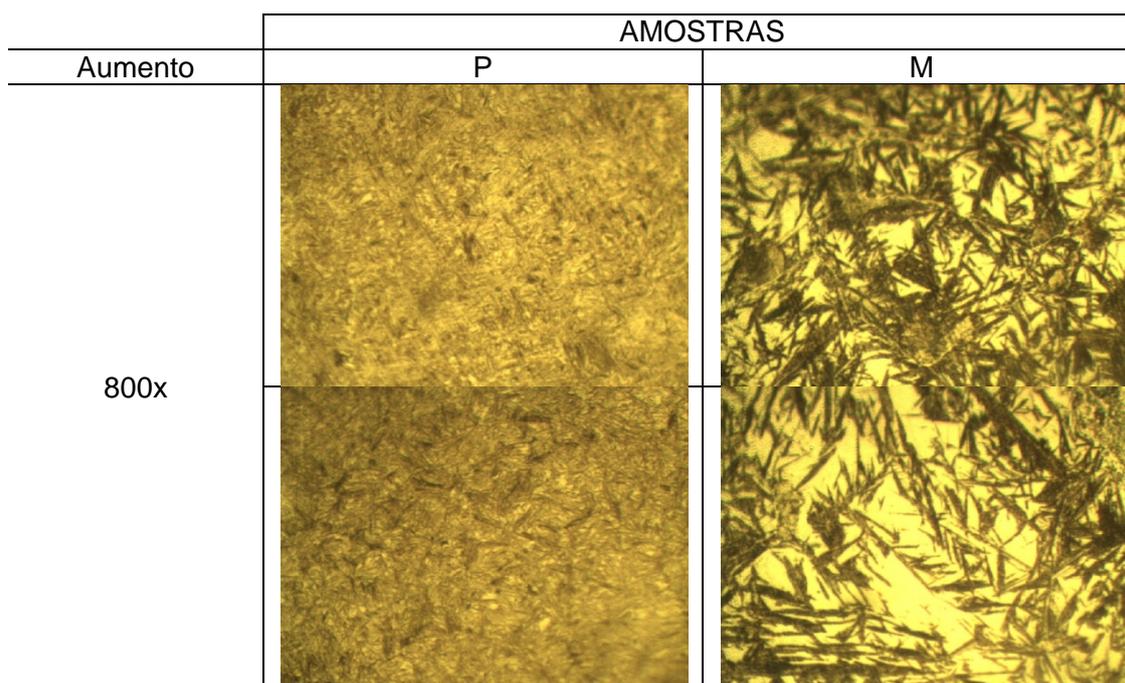


Figura 6. Microscopia óptica dos CM's P e M, ataque nital 2%.

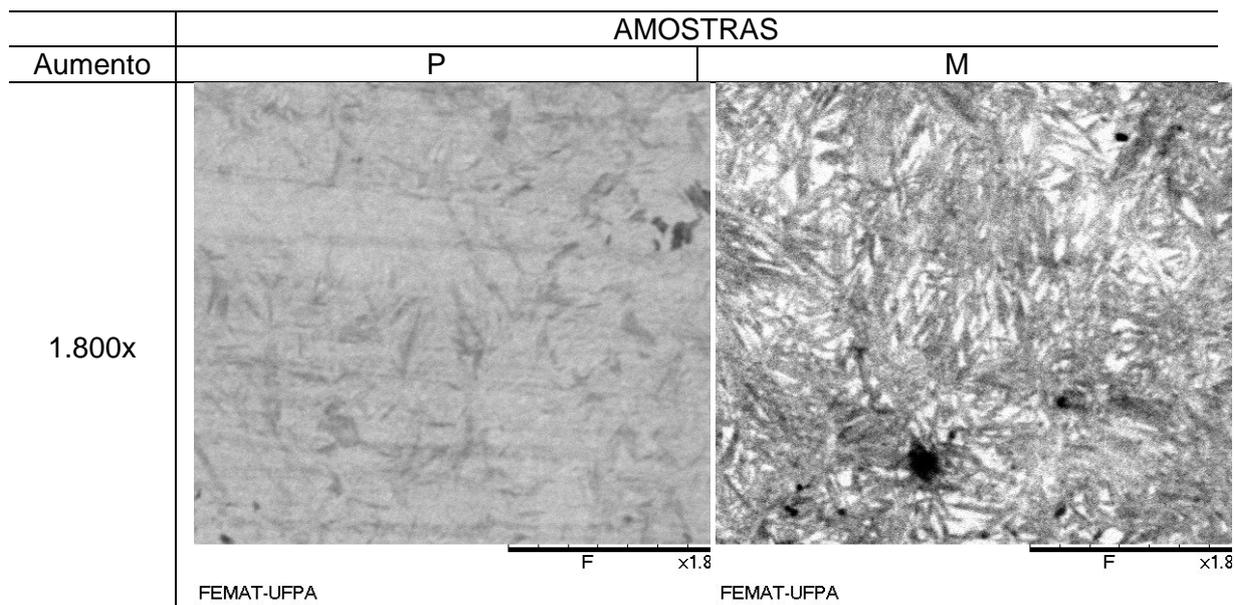


Figura 7. Microscopia eletrônica de varredura-MEV dos CM's P e M, ataque nital 2%.

As análises químicas semi-quantitativas por EDX das amostras P e das amostras M (Figuras 8 e 9), detectaram principalmente a presença de ferro, entretanto, outros elementos de liga como Cr, Mn, Nb, e Si, também foram detectados. Estas análises mostraram a semelhança dos espectros das amostras P e M.

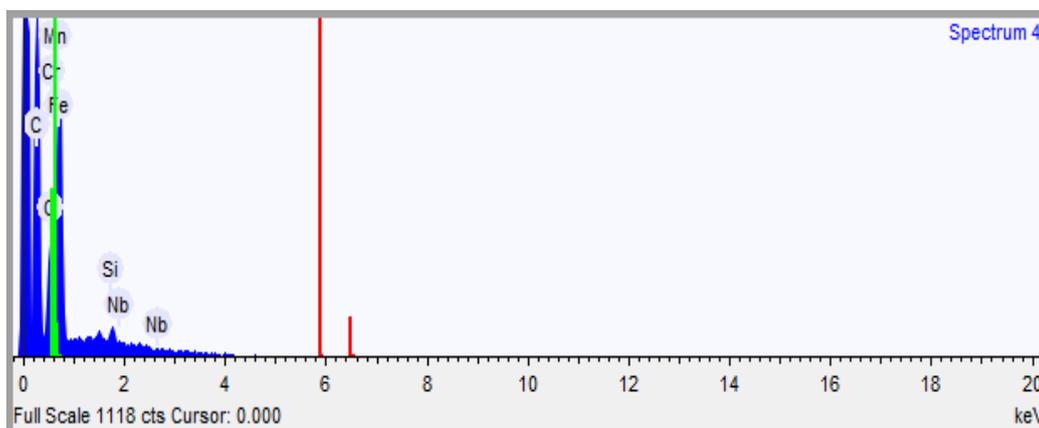


Figura 8. Gráfico de EDX das amostras P.

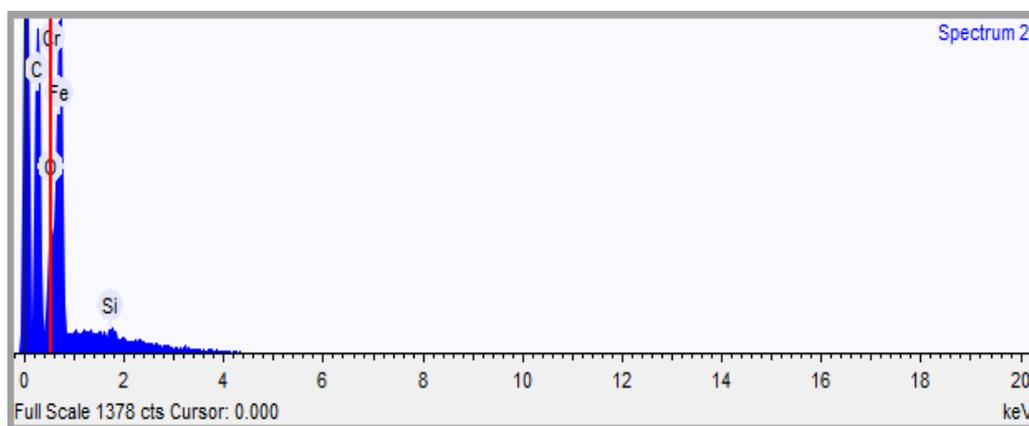


Figura 9. Gráfico de EDX das amostras M.

4 CONCLUSÕES

A inspeção visual e a estereoscopia mostraram que todos os corpos moedores (CM's) sofreram corrosão, sendo que os CM's das amostras P apresentaram porosidades e rebarbas mais acentuadas que os das amostras M.

As amostras M e P, apresentaram microestruturas martensíticas. Esta análise comprova que os materiais analisados sofreram tratamento térmico de têmpera.

Os teores de ferro e carbono obtidos através de análises químicas quantitativas caracterizaram o material empregado na fabricação das amostras P e M como aço de alto carbono e baixa liga. Os corpos moedores da amostra M apresentaram maiores teores de carbono e cromo comparados aos corpos moedores da amostra P, tornando este material mais resistente a compressão e a corrosão. Os CM's das amostras P apresentaram teores de enxofre e fósforo mais elevados que o recomendado na literatura, tornando o material mais susceptível à formação de inclusões não metálicas reduzindo a sua resistência ao impacto.

De acordo com os resultados obtidos pode-se concluir que os corpos moedores provenientes do fornecedor M apresentam melhores propriedades mecânicas e maior resistência à corrosão quando comparados aos corpos moedores do fornecedor P, sendo mais indicados para o processo de moagem em moinhos de bolas do minério de cobre.

REFERÊNCIAS

- 1 ALMEIDA, S. L. M. & LUZ, A. B. **COMINUIÇÃO**. 4. ed. Rio de Janeiro: Cetem, 2004. p 113–194
- 2 BERALDO, J.L., **Moagem de minérios em moinhos tubulares**. 1.ed. São Paulo: Edgar Blücher, 1987. p.1-47.
- 3 VALE. Manual de Moagem. Sossego, 2003.
- 4 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NORMA ABNT - NBR 8653 - Metalografia e Tratamentos Térmicos das Ligas Fe-C**. Rio de Janeiro, 1984
- 5 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NORMA ABNT – NBR 6672 – Ensaio de microdureza Vickers para materiais metálicos**. Rio de Janeiro, 1981.
- 6 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NORMA ABNT - NBR 8108 - Ataque com Reativos Metalográficos das Ligas Fe-C**. Rio de Janeiro, 1983
- 7 RIZZO, E. M. S., **INTRODUÇÃO AOS PROCESSOS SIDERÚRGICOS**. 1. ed. São Paulo: ABM, 2005.