

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA POLITÉCNICA



Ensaio de bancada para avaliação de desgaste de bolas

Eduardo Roveri

São Paulo,

2009

EPMI
TF-2009
R769e

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

Ensaio de bancada para avaliação de desgaste de bolas

Trabalho de Formatura do programa de graduação
em Engenharia de Minas da Escola Politécnica

Área de Concentração: Tratamento de Minérios

Orientado: Eduardo Roveri
Orientador: Profº Drº Arthur Pinto Chaves

São Paulo,

2009

FICHA CATALOGRÁFICA

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Roveri, Eduardo
Ensaio de bancada para avaliação de desgaste de bolas. São Paulo, 2009.
??? p. : il. ; 30cm.
Trabalho de Formatura, apresentada à Escola Politécnica/USP –
Área de concentração:
Tratamento de Minérios.
Orientador: Chaves, Arthur Pinto
1. Desgaste. 2. Bolas. 3. São Paulo.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Eduardo Roveri
Ensaio de bancada para avaliação de desgaste de bolas

Trabalho de Formatura no Programa de Graduação em
Engenharia de Minas da Escola Politécnica

Área de Concentração: Tratamento de Minérios.

Orientador: Prof. Dr. Arthur Pinto Chaves
Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____
Instituição: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____
Instituição: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____
Instituição: _____ Assinatura: _____

TF.2009

R769e

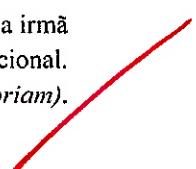
Syntex 1826567

M2009d

DEDALUS - Acervo - EP-EPMI



31700005918

À minha mãe, à minha avó e à minha irmã
pelo apoio incondicional.
Ao meu avô e ao meu tio (*in memoriam*).


Agradeço ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas, IPT por permitir que os ensaios fossem realizados no laboratório de Resíduos e Áreas Contaminadas, em especial à Sandra, à Camila, ao Nestor, ao Fabiano, ao Filipe, ao Eduardo Albertin, e aos demais colaboradores do laboratório.

Agradeço em especial pela orientação do Professor Dr. Arthur Pinto Chaves neste trabalho.

Ao Laboratório de Caracterização Tecnológica da Escola Politécnica, pelas análises cordialmente realizadas.

Aos amigos de graduação da Escola Politécnica que sempre encontraram uma maneira de tornar mais fácil a realização de nossas difíccis tarefas.

ENSAIO DE BANCADA PARA AVALIAÇÃO DE DESGASTE DE BOLAS

Eduardo Roveri
E-mail: edurov@gmail.com

RESUMO

O presente trabalho consistiu na realização de uma série de ensaios em moinho de bancada com a finalidade de avaliar a taxa de desgaste das bolas utilizadas como carga moedora. A análise foi realizada a partir do estudo da redução de diâmetro das bolas em função do tempo, obtendo-se como resultado uma taxa de desgaste média, por hora, para os dois tipos de bolas estudados. Procurou-se distinguir as componentes abrasiva e corrosiva do desgaste. Adicionalmente, foi sugerida uma alternativa às condições de processo para se tentar diminuir a taxa de desgaste apresentada.

PALAVRAS-CHAVE: moinho de bancada, bolas de moinho, desgaste, abrasão, corrosão.

ABSTRACT

The present testwork carried out some bench-scale grinding tests aiming to evaluate the wear rate of balls, used as grinding media, in function of time. It was also intended to distinguish between the abrasive and the corrosive components of wear. As results, the average wear rates were obtained, per hour, for both types of balls studied herein. In addition, it was also studied an alternative way to process conditions in order to reduce the balls wear rate.

KEY-WORDS: bench-scale mill; grinding balls; wear; abrasion, corrosion.

índice

| | |
|---------------------------------------|----|
| 1.INTRODUÇÃO..... | 3 |
| 2.OBJETIVOS..... | 3 |
| 3.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 4 |
| 3.1.Abrasão..... | 4 |
| 3.2.Corrosão | 6 |
| 3.3.Engaio com bolas marcadas..... | 7 |
| 3.4.Teorias de desgaste de bolas..... | 7 |
| 4.MATERIAIS E MÉTODOS..... | 8 |
| 4.1.Realização dos ensaios | 8 |
| 4.2.Método de ensaio..... | 9 |
| 5.CONCLUSÃO..... | 13 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 15 |
| ANEXOS..... | 16 |

1.INTRODUÇÃO

Em operações de beneficiamento de concentrados, a operação unitária de moagem pode chegar a representar 40% dos custos totais da operação, como em uma operação de cobre. Deste total, parte fundamental é constituída pelos custos envolvidos no desgaste da carga moedora, e o presente trabalho tem como objetivo estudar os principais mecanismos de desgaste associados à moagem.

Estudos em busca de conhecimentos maiores sobre corpos moedores vêm sido realizados há muito tempo. Maia (1994) ensina que muitas foram as teorias desenvolvidas pelos estudiosos da área de desgaste, à procura de leis empíricas que expliquem o desgaste em moinhos tubulares, assim como alguns métodos de avaliação de desempenho de corpos moedores.

Ainda, deve-se lembrar que toda polpa mineral tem íons em solução. Estes íons, dependendo de sua natureza, podem adicionar uma componente de desgaste corrosivo, que atua sinergicamente com a componente abrasiva. A velocidade de desgaste do processo conjunto, corrosão + abrasão é muito maior que a soma das velocidades de desgaste por corrosão e abrasão. Em especial, as águas brasileiras, frequentemente, são de caráter ácido, o que acaba valendo como regra para a região da Bacia Amazônica e para a região do Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais.

2.OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo medir o de desgaste de corpos moedores em um moinho de bancada, levando em consideração dois tipos de concentrados e dois tipos de ligas de corpos moedores. Ainda, tentará apresentar uma alternativa de processo para que se obtenham taxas de desgaste menores para os corpos moedores.

3.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1.Abrasão

O concentrado escolhido tem papel fundamental no efeito de desgaste dos corpos moedores. Por vezes, as dificuldades de operação da usina, ou ainda a necessidade de troca de frente de lavra, ou ainda mesmo a heterogeneidade intrínseca ao concentrado, fazem com que sejam alimentados diferentes tipos de concentrado dentro do moinho. Em especial, no presente estudo foram escolhidos dois tipos de concentrados, tipo *pellet feed*, para alimentar o moinho, respectivamente o BS (concentrado de ferro com baixo teor de sílica) e AS (concentrado de ferro com alto teor de sílica), ambos oriundos da região do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Segundo análises químicas realizadas com os dois tipos de concentrado, o BS possui teor de sílica em torno de 1,9% e o AS possui 6,0% de sílica em massa.

Neste sentido, quanto à variação da carga mineral utilizada, o trabalho de Siriani (1973) observou que a presença de minerais duros, como a hematita e a sílica, em especial a sílica na forma de quartzo, aumenta sobremaneira a dureza do material. Siriani lembra que a dureza da hematita seja, na escala Mohs, em torno de 6,5, enquanto que a do quartzo, em torno de 7,0. Outro fator a ser considerado é a forma das partículas. Ainda, Siriani considerou que o quartzo, ao se romper com fratura concoidal, apresenta arestas vivas que representariam concentração de pressões localizadas, em áreas muito pequenas. Desta forma, poderia ser justificado o maior poder de penetrabilidade desse material na matriz dos corpos moedores, riscando esse material e abreviando assim a vida útil desses.

Quanto ao mecanismo de desgaste, Albertin (1993) descreve esse mecanismo como uma partícula, suficientemente dura atacando uma superfície em um ângulo favorável conseguindo atuar como uma ferramenta de corte, retirando “cavacos” (microcorte). Verifica-se, entretanto, que esta ação é geralmente acompanhada por grande deformação plástica, observando-se acúmulo de material deslocado à frente do sulco e lateralmente bem como deformação subsuperficial.

Assim, passagens sucessivas de grãos abrasivos repetem ciclicamente estes deslocamentos, levando à remoção do material por fadiga de baixo ciclo, configurando assim um modelo da interação entre os grãos de quartzo e o material constituinte das bolas. Existem outros mecanismos de desgaste. Havendo o microcorte, as bordas deformadas plasticamente formam uma saliência que concentrará o desgaste erosivo.

Chaves (2009) descreve que existem diferentes mecanismos de desgaste abrasivo, entre os quais, destacam-se:

- desgaste por sulcamento: (“gouging abrasion”), que ocorre com partículas mais grosseiras que, quando impactam a superfície metálica de baixa dureza com velocidades médias a altas arrancam pedaços macroscópicos de metal (altas tensões e alto impacto). Ocorre um verdadeiro corte na superfície. Depende evidentemente do tamanho da partícula, da sua forma e dureza e da dureza superficial da bola;
- riscamento e erosão: que ocorre com partícula menores cujo impacto sobre a superfície é menor (baixas tensões e baixo impacto). O movimento das partículas sobre e contra a superfície vai riscando-a, polindo-a e erodindo-a. Depende principalmente da velocidade com que as partículas passam sobre a superfície e da sua dureza relativa à dureza da superfície;
- riscamento e moagem (lixamento), característico de altas tensões e de impacto médio e baixo, é um comportamento intermediário entre os dois anteriores.

Segundo Chaves (2009), para resistir ao desgaste do primeiro tipo, são recomendados materiais tenazes e duros, isto é, que não sofram deformação plástica e que tenham alta resistência ao riscamento. Os materiais que apresentam essas características são os materiais susceptíveis de têmpera, tratamento térmico que mantém o núcleo tenaz e torna a superfície dura.

Para aplicações em que o material deva resistir principalmente à erosão (segundo tipo), a característica mais importante a ser buscada é a dureza superficial. Ferros fundidos brancos não ligados, ferro fundido com 28% Cr, ferros fundidos brancos martensíticos e Ni-hard, com dureza entre 550 e 700 BHN, são os mais utilizados.

Já para aplicações em que predomina o desgaste do terceiro tipo, devem ser procurados materiais de alta resistência ao cisalhamento e à compressão. Dependendo do tamanho das partículas e da sua velocidade, a energia com que elas impactam a superfície variará correspondentemente. É possível, pois, adotar uma faixa ampla de valores de tenacidade e dureza (estas duas propriedades variam inversamente – quanto mais duro o material, mais frágil ele será; quanto mais tenaz, mais mole). Os materiais mais populares são os ferros fundidos brancos martensíticos ou as ligas Ni-hard de

baixo teor de C. Neste sentido, o tratamento térmico do corpo moedor, especificamente bolas, é tão importante quanto à sua composição.

Com a realização da análise de difração de raios-X, realizada no Laboratório de Caracterização Tecnológica da Escola Politécnica da USP, para a amostra AS, ficou determinado que a imensa parte de sílica presente no concentrado está sob forma de quartzo. Além disso, a partir da realização da difração ficou identificado como hematita o minério predominante do concentrado, corroborando assim com a ideia de que a dureza do concentrado pode ser considerada, no mínimo, de 6,5 mohs.

Partindo dessa ideia, pode-se traçar um paralelo com a dureza dos corpos moedores, no caso, as bolas, utilizadas nos ensaios. Na figura 1, seguindo a tentativa de Van Vlack (1970), estabelece-se uma comparação entre as escalas de dureza mais utilizadas, em especial a Mohs e a HC (ou Rockwell C). No caso, para o quartzo, de dureza 7, ficaria mais fácil para riscar um material como o aço, de dureza HC em torno de 50, do que o FFBAC, com dureza HC superior a 60. Neste aspecto, fica claro o poder de abrasão que o concentrado pode exercer sobre o material constituinte das bolas.

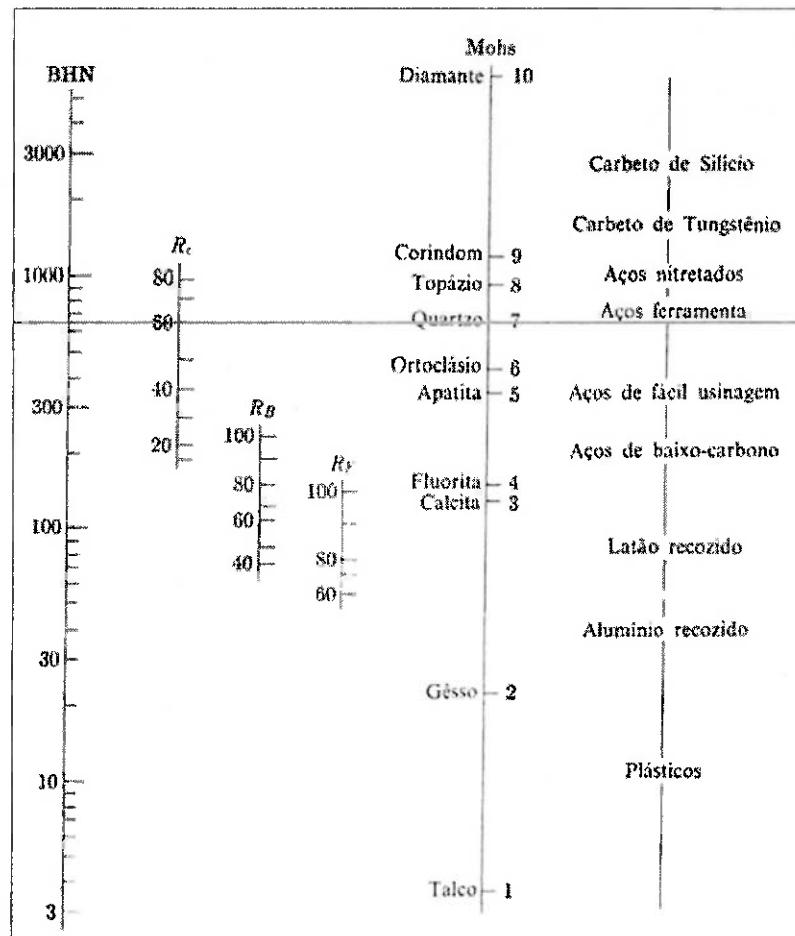


Figura 1: comparação entre escalas de dureza. Fonte: “Princípio de ciência dos materiais” –Van Vlack H.L.,1970

Quanto à dureza e à composição química dos corpos moedores utilizados neste ensaio, as bolas apresentaram, segundo ensaios realizados no laboratório de Fundição do IPT, os seguintes resultados, conforme é mostrado na tabela 1:

Tabela 1: composição química e dureza RC

| tipo de bola | %C (massa) | %Cr (massa) | Dureza (RC) |
|--------------|------------|-------------|-------------|
| Aço | 0,76 | 0,37 | 49,0 |
| FFBAC | 2,30 | 31,10 | 61,5 |

Segundo Chaves (2009), podem ser citadas as seguintes maneiras pelas quais bolas de um moinho se desgastam:

- riscamento: partículas duras riscam as superfícies das bolas, levantando metal paralelamente à direção do seu movimento, criando uma saliência lateral;
- indentação ou mordida: grãos duros, prensados entre duas bolas, indentam a superfície de uma delas, empurrando o metal para os lados, gerando um cratera, inicialmente sem remoção do material, como no riscamento descrito acima, criando uma saliência lateral;
- sulcamento: partículas duras e pesadas rasgam a superfície, arrancando metal;
- desgaste metal contra metal: o contato entre as superfícies de duas bolas, sem minério entre elas faz aparecerem áreas desgastadas com dimensões maiores que as dos demais eventos de desgaste provocados pela abrasão devida ao minério;
- “pitting corrosion”: se caracteriza por furos profundos devidos à corrosão do metal, devido à formação de pares galvânicos dentro da bola ou entre a bola e a polpa;
- lascamento (“spalling”): decorre do trincamento da bola a partir de defeitos de fundição (rechupes). A bola vai sendo lascada sucessivamente, em camadas, como uma cebola.

Segundo Maia (1994), a evolução dos materiais utilizados como carga moedora é notável. Ele relata que inicialmente era usual a existência de uma fundição anexa à usina de beneficiamento, onde as bolas, as peças de bomba, os revestimentos de moinho, e a sucata da usina eram fundidos. A composição do fundido era resultado dos materiais disponíveis. O ferro fundido branco começou a ser utilizado em 1917 e as ligas Fe-Cr-Mo, a partir de 1930. As ligas de alto cromo, incorporando ou não molibdênio e outros elementos de liga foram normalizadas pela ASTM em 1965. O tratamento térmico das bolas deve datar dos anos 30.

3.2.Corrosão

A corrosão metálica é a transformação de um material metálico ou liga metálica pela sua interação química ou eletroquímica num determinado meio de exposição, processo que resulta na formação de produtos de corrosão e na liberação de energia. Segundo Chaves (2009), pode ser descrita como um processo eletroquímico em que o ferro metálico (Fe^0) cede elétrons e recebe íons do oxigênio da polpa, tornando-o oxidado (Fe^{++}). Trata-se de um processo traçoeiro, porque, lento, quase mesmo imperceptível, muitas vezes acaba negligenciado ou esquecido.

Quase sempre, a corrosão metálica (por mecanismo eletroquímico), está associada à exposição do metal a um meio no qual existe a presença de moléculas de água, juntamente com o gás oxigênio ou íons de hidrogênio, num meio condutor.

Neste aspecto, Gentil (1982) esclarece que em especial para ligas fabricadas a partir do ferro, pode ocorrer a passivação do ferro quando este estiver em meio básico. Desta maneira, a passivação seria uma alternativa para se tentar diminuir o efeito corrosivo sobre a liga metálica, por meio da introdução de algum agente básico, como o hidróxido de sódio, na tentativa de tornar a liga mais resistente ao ataque corrosivo. Sabe-se que para meios básicos, há um consenso de que o meio não se torna prejudicial ao ferro.

Dada a grande quantidade de íons cloreto (Cl^-) no meio, haverá grande tendência à corrosão da liga metálica, já que segundo Gentil (1982) em meios cuja concentração de cloretos seja de elevada magnitude, como na água no mar, a passivação do Ferro não ocorre, e, consequentemente, a taxa de corrosão é alta. Outro aspecto interessante sobre a corrosão é a questão da quantidade de oxigênio (O_2) dissolvida na água de processo. Quanto maior a concentração de O_2 , maior a taxa de corrosão associada. Neste sentido, Gentil (1982) recomenda a desaceleração da água a ser utilizada em operações industriais, a fim de conter o efeito destrutivo da alta concentração de O_2 presente na água.

Ainda, Chaves (2009) aponta que no caso de bolas de moinho, o processo corrosivo é acelerado pela abrasão: o produto da corrosão é um material oxidado que é facilmente removido pela ação mecânica do movimento de rolagem entre as bolas e intensificado pela presença de minerais muito abrasivos, como a sílica sob forma de quartzo. A remoção expõe uma superfície de metal fresca, quimicamente ativa e pronta para ser corroída. Deste modo, a ação conjunta de corrosão + abrasão é extremamente rápida e danosa.

3.3. Ensaio com bolas marcadas

Maia (1994) considera que o ensaio com bolas marcadas permite medir com boa precisão o consumo de bolas em um moinho. Há vários tipos de marcação, como: mecânica, radioativa, utilizar bolas com diâmetros maiores que o “top size”. No presente estudo foram utilizadas bolas com marcação feita a partir de eletroerosão, identificadas com marcas circulares que permitem, de acordo com o número de marcas, diferenciar o tipo de bola, no caso, entre as bolas de aço e de FFBAC. Ainda, dadas as diferentes composições dos dois tipos de bola, pode ser verificada, segundo a figura 2, como já pela aparência podem ser diferenciados estes dois tipos de bola, as de aço, visualmente mais escurecidas e naturalmente com traços de corrosão por pite, e as de FFBAC, mais claras, e aparentemente preservadas de ataques corrosivos:

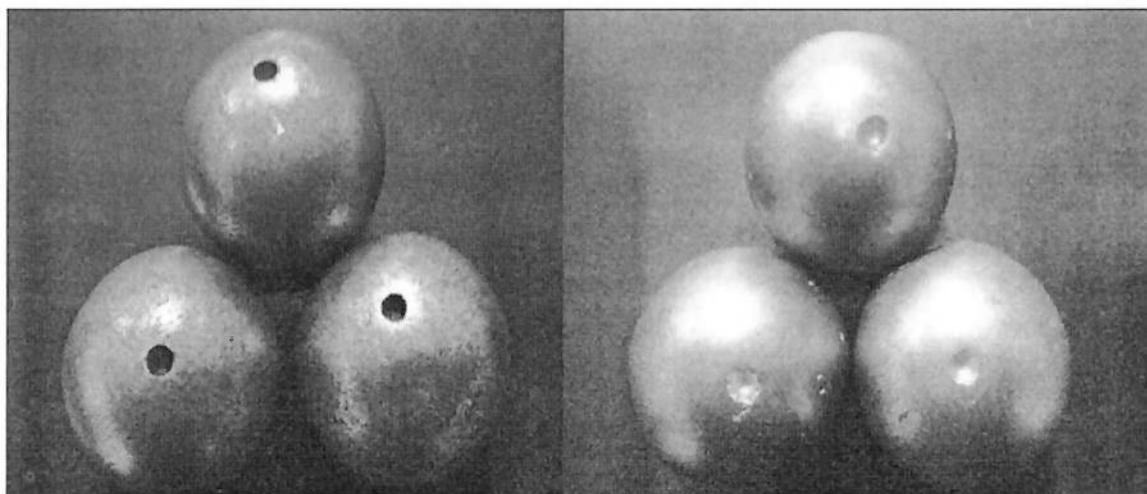


Figura 2: bolas marcadas de aço e de FFBAC

3.4. Teorias de desgaste de bolas

TEORIA VOLUMÉTRICA DO DESGASTE DE BOLAS

Segundo Maia, esta teoria afirma que a razão de desgaste de uma bola é proporcional à sua massa, por conseguinte ao seu volume, ou seja, ao cubo de seu diâmetro. Neste sentido, sustenta que a origem desta teoria está na idéia de que a maioria dos eventos na cominuição ocorre na região da carga moedora denominada “TOE”, onde predominam os mecanismos de impacto. Esta ideia seria, de um modo geral, mais aplicada a alimentações cujas distribuições granulométricas sejam maiores, nas quais haja predominância de material mais grosso, a partir da qual a cominuição dentro do moinho ocorra por mecanismo de impacto.

TEORIA SUPERFICIAL DE DESGASTE

Ainda, segundo Maia, a vasta maioria dos eventos de cominuição se deve à abrasão bola-particula-bola, sugerindo que a razão de desgaste será proporcional à superfície da bola, ao quadrado do diâmetro.

O desgaste é relativo ao mecanismo de moagem de cada moinho, em ambiente onde ocorra predominantemente a abrasão o desgaste é proporcional à superfície da bola, enquanto que em ambiente de impacto predominante, a taxa de desgaste depende da massa da bola. Portanto, conclui-se que os mecanismos de desgaste serão diferentes para a moagem fina e grossa em moinhos.

Segundo Azzaroni (1987), a aplicabilidade da teoria de desgaste superficial se dá da seguinte maneira: a redução do diâmetro de uma bola, devido ao desgaste, é constante e uniforme em relação ao tempo de operação ou à produção do moinho:

$$\frac{df}{dt} = -k \quad [1]$$

Com o tempo:

$$\frac{d\theta}{dt} = -k\theta^n \quad [2]$$

Na qual n é função das características da moagem, distribuição da dureza ao longo do raio do corpo moedor e outras variáveis, podendo ser diferente de um moinho para outro.

Assim, observa-se que para a avaliação das taxas de desgaste da carga moedora, seria necessário se determinar somente, com precisão, a variação da massa do corpo moedor, imediata e anteriormente à entrada no moinho, e imediata e posteriormente à sua saída do moinho. Com essa variação em mãos, seria possível, por meio da densidade do material, se determinar, em função da variação de volume, e, por conseguinte de diâmetro, qual seria a taxa de desgaste para um dado corpo moedor.

4.MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho mediou o desgaste ocorrido em um moinho, em escala de bancada, realizando estudos de desgaste que simulam a interação entre os corpos moedores, no caso bolas de aço e bolas de ferro fundido branco de alto cromo (30% de Cr) em relação a dois tipos de concentrado de ferro, tipo *pellet feed*, originários de Minas Gerais, sendo o primeiro, denominado de Baixa Sílica (BS) e o outro de Alta Sílica (AS), respectivamente contendo, aproximadamente 2% e 6% SiO₂.

4.1.Realização dos ensaios

Primeiramente, os concentrados de ferro BS e AS foram homogeneizados em pilha alongada e alíquotas foram retiradas para análise química. Uma vez confirmados os teores de Fe e SiO₂ em cada tipo de concentrado, deu-se início à etapa de realização dos ensaios em moinho de batelada.

O ensaio de moagem no moinho de batelada foi conduzido misturando, sempre as seguintes quantidades de concentrado e de água, conforme a tabela 2::

Tabela 2: massa inicial de concentrado e de água adicionada

| | |
|------------------------------|----------|
| massa inicial de concentrado | 2617,90g |
| massa de água adicionada | 372,00g |

As massas de concentrado e de água foram calculadas a partir do volume crítico ocupado dentro do moinho. Para o caso, adotou-se, segundo o manual do fabricante do moinho, o VC de 40%. Ainda a porcentagem de sólidos na polpa alimentada é de 87%.

O moinho utilizado para a realização dos ensaios, em escala de bancada, é do tipo batelada e apresenta as seguintes características funcionais:

- Dimensão interna do cilindro: Ø 200 x 250 mm.
- Dimensão total: comprimento 900 x largura 500 x altura 980 mm.
- Rotação do cilindro: 73 rpm.
- Massa do equipamento: 50,0 kg.
- Motor: 0,2 kw, monofásico, 100V, 60 Hz.
- 2 rolamentos UCP – 206

Para a realização do ensaio, foram utilizadas bolas marcadas, por electroerosão, e identificadas segundo o número de marcas na superfície. Para completar a carga do moinho, foram utilizadas bolas não-marcadas, denominadas de bolas de enchimento, a fim de completar a carga moedora.

Desta forma, de acordo com o material em estudo, foram utilizadas, segundo a disponibilidade de bolas marcadas no laboratório, 15 bolas de aço e 15 bolas de ferro fundido de alto cromo, e após a pesagem de cada lote de bolas, foi então completada a massa de carga moedora no moinho.

A tabela 3 mostra as quantidades de bolas marcadas utilizadas ao longo do ensaio, bem como a massa, em gramas, do total de bolas utilizado:

Tabela 3:bolas utilizadas para o ensaio

| corpo moedor | quantidade de bolas marcadas | massa (g) |
|----------------|------------------------------|-----------|
| bolas de aço | 15 | 1789,30 |
| bolas de FFBAC | 15 | 1812,34 |

Para se completar o total de corpos moedores no moinho, foram utilizadas bolas fundidas de alto cromo também, cujos valores de massa podem ser observados na tabela 4:

Tabela 4: massa da carga de enchimento

| Carga de enchimento (g) | Bolas marcadas |
|-------------------------|----------------|
| 12210,70 | Aço |
| 12157,66 | FFBAC |

Cabe ainda a observação de que as massas foram determinadas com duas casas decimais para conferir precisão às medidas de desgaste de bolas.

4.2.Método de ensaio

As bolas, no início de cada ensaio, foram submetidas a uma rodada de moagem, a seco, com areia de fundição. Este processo tem como objetivo retirar eventuais protuberâncias causadas por oxidação dos materiais, deixando o material limpo para dar inicio ao ensaio de desgaste, efetivamente. A massa de areia utilizada foi de 1487,19g.

O ensaio de desgaste consiste nas seguintes etapas:

- 1) Pesagem dos corpos moedores marcados e anotação da massa individual de cada corpo moedor.
- 2) Pesagem da carga de enchimento para completar a carga de corpos moedores no moinho.
- 3) Pesagem da alíquota de concentrado de ferro.
- 4) Pesagem do volume de água necessário.
- 5) Colocação do concentrado, dos corpos moedores e da água dentro do moinho.
- 6) Acionamento do moinho por período de 1h.
- 7) Ao término de 1h, o moinho é então aberto, as bolas são retiradas e lavadas com lavador de alta pressão.
- 8) A polpa restante nas paredes e no fundo do moinho é retirada.
- 9) Carrega-se o moinho novamente com a mesma massa de concentrado de ferro, água e corpos moedores.
- 10) Aciona-se novamente o moinho e, decorrida 1h, repete-se o passo 7 para mais uma rodada de moagem em batelada.

As etapas de colocação do concentrado juntamente com as bolas e a água no interior do moinho podem ser ilustradas conforme a figura 4:



Figura 2: conjunto moinho + concentrado + água

Como norma de ensaio, adotou-se o período de moagem de 8 h para cada conjunto concentrado, corpo moedor e tipo de água utilizada.

Transcorridas 8h de ensaio, as bolas foram retiradas do moinho e lavadas com lavador de alta pressão. Para retirar de forma eficaz todas as eventuais partículas retidas na superfície das bolas, essas foram submetidas a imersão, por período de 15 minutos, em água, em equipamento de emissão ultrassom modelo Thornton. Decorridos os 15 minutos, as bolas foram retiradas do aparelho de ultrassom, e então foram submetidas a banho de imersão em acetona e novamente, por um período de 15 minutos, foram submetidas ao equipamento de ultrassom para retirar as eventuais partículas restantes, ao mesmo tempo em que se tem como objetivo retirar a água residual na superfície das bolas, evitando-se assim o processo de corrosão precoce das bolas. Por último, antes da pesagem, as bolas foram colocadas sob lâmpadas incandescentes de 1.000 W pelo período de 10 minutos para que se retirasse toda a umidade residual sobre as bolas. Ao cabo dessa etapa as bolas foram então pesadas em balança.

O método consiste em comparar as massas dos corpos moedores ao término de cada rodada de moagem. Com os novos valores de massa em mãos, geram-se os dados necessários para a obtenção da taxa de desgaste dos corpos moedores e assim, obtém-se um parâmetro para avaliação do desgaste dos corpos moedores.

As taxas de desgaste foram obtidas a partir da variação de massa obtida, individualmente, para cada bola. Entretanto, é mais adequada para o cálculo da taxa média de desgaste a variação de diâmetro de cada bola, podendo assim ser comparado com os valores de referência da literatura. Para isso, foi adotado que as bolas poderiam ser representadas por esferas e assim, com o valor de densidade, pôde-se, a partir dos dados de pesagem das bolas, obter o diâmetro equivalente referente à massa medida. Assim, com a variação nos valores de diâmetro, pôde-se obter, a variação de diâmetro para cada bola. Os valores de densidade para as bolas foram, respectivamente, 7,5 g/cm³ para as bolas de FFBAC e de 7,85 g/cm³ para as bolas de aço. A taxa de desgaste para cada bola era então calculada, representando essa variação de diâmetro e, consequentemente, a taxa média, por hora, era calculada em relação ao lote de bolas marcadas utilizadas no ensaio:

$$\phi_{equivalente} = \sqrt[3]{8 \left(\frac{3.m}{4.\pi.\rho} \right)} \quad [3]$$

Na qual:

m: massa da bola

ρ: densidade da liga da bola

$$\text{taxa média de desgaste} = \frac{\phi_{eq} \text{ inicial} - \phi_{eq} \text{ final}}{\Delta t} \quad [4]$$

Na qual:

ϕ_{eq} inicial :: diâmetro equivalente no início do ensaio

ϕ_{eq} final : diâmetro equivalente ao término do ensaio

Δt : intervalo de tempo de ensaio

Foram realizados os seguintes ensaios para a avaliação da taxa de desgaste:

Primeiro ensaio:

Foram utilizados os seguintes materiais para este primeiro ensaio, conforme descrito na tabela 5:

Tabela 5:materiais utilizados para o primeiro ensaio

| | |
|--------------|---|
| corpo moedor | bolas de Aço |
| concentrado | BS (baixa Sílica) |
| água | água da rede de abastecimento – Sabesp pH 8,5 |

Segundo ensaio:

Foram utilizados os seguintes materiais para este segundo ensaio, conforme descrito na tabela 6:

Tabela 6:materiais utilizados para o segundo ensaio

| | |
|--------------|--|
| corpo moedor | bolas de FFBAC (30%Cr) |
| concentrado | BS (baixa Sílica) |
| água | água da rede de abastecimento –Sabesp pH 8,5 |

Terceiro ensaio:

Foram utilizados os seguintes materiais para este segundo ensaio, conforme descrito na tabela 7:

Tabela 7: materiais utilizados para o terceiro ensaio

| | |
|--------------|--|
| corpo moedor | bolas de aço |
| concentrado | AS (baixa Sílica) |
| água | água da rede de abastecimento –Sabesp pH 8,5 |

Quarto ensaio:

Foram utilizados os seguintes materiais para este segundo ensaio, conforme descrito na tabela 8:

Tabela 8: materiais utilizados para o quarto ensaio

| | |
|--------------|--|
| corpo moedor | bolas de FFBAC (30%Cr) |
| concentrado | AS (baixa Sílica) |
| água | água da rede de abastecimento –Sabesp pH 8,5 |

Resultados obtidos:

A tabela 9 ilustra as taxas médias de desgaste obtidas, de acordo com o método de ensaio realizado:

Tabela 9: taxas médias de desgaste obtidas

| taxa média de desgaste ($\mu\text{m/h}$) | bola de aço | bola FFBAC 30% Cr |
|--|-------------|-------------------|
| concentrado BS | 2,85 | 1,06 |
| concentrado AS | 3,12 | 1,10 |

Ainda, dadas as condições de ensaio, e de acordo com a ideia inicial de que a taxa de desgaste pode ser entendida como um resultado do efeito sinergético dos mecanismos de abrasão e de corrosão, foram realizados ainda mais quatro ensaios, nos quais se variou o pH da água utilizada para compor a polpa do concentrado. Nesta etapa, foi utilizado hidróxido de sódio, em escamas, 70% de alcalinidade, na quantidade de 0,6g para o volume de água utilizado a fim de aumentar o pH de 8,5 para 10,5, tornando o meio ainda mais básico. Dessa forma, os seguintes ensaios foram conduzidos:

Quinto ensaio:

Foram utilizados os seguintes materiais para este segundo ensaio, conforme descrito na tabela 10:

Tabela 10: materiais utilizados para o quinto ensaio

| | |
|--------------|---|
| corpo moedor | bolas de Aço |
| concentrado | BS (baixa Sílica) |
| água | água Sabesp + hidróxido de Sódio (pH=10,5) |

Sexto ensaio:

Foram utilizados os seguintes materiais para este segundo ensaio, conforme descrito na tabela 11:

Tabela 11: materiais utilizados para o sexto ensaio

| | |
|--------------|---|
| corpo moedor | bolas FFBAC (30% Cr) |
| concentrado | BS (baixa Sílica) |
| Água | água Sabesp + hidróxido de Sódio (pH=10,5) |

Sétimo ensaio:

Foram utilizados os seguintes materiais para este segundo ensaio, conforme descrito na tabela 12:

Tabela 12: materiais utilizados para o sétimo ensaio

| | |
|--------------|---|
| corpo moedor | bolas de Aço |
| concentrado | AS (alta Sílica) |
| Água | água Sabesp + hidróxido de Sódio (pH=10,5) |

Oitavo ensaio:

Foram utilizados os seguintes materiais para este segundo ensaio, conforme descrito na tabela 13:

Tabela 13: materiais utilizados para o oitavo ensaio

| | |
|--------------|---|
| corpo moedor | bolas FFBAC (30% Cr) |
| concentrado | AS (alta Sílica) |
| Água | água Sabesp + hidróxido de Sódio (pH=10,5) |

Resultados obtidos:

A tabela 14 ilustra as taxas médias de desgaste obtidas, de acordo com o método de ensaio:

Tabela 14: taxas médias de desgaste obtidas

| taxa média de desgaste ($\mu\text{m}/\text{h}$) | bola de aço | bola FFBAC 30% Cr |
|---|-------------|-------------------|
| concentrado BS | 2,52 | 0,99 |
| concentrado AS | 2,99 | 1,04 |

5.CONCLUSÃO

Desta forma, observam-se alguns resultados que corroboram com a ideia inicial de que a corrosão possui influência sobre a taxa de desgaste das bolas, e ainda, que variando o pH, obtém-se uma condição em que há diminuição da taxa de desgaste, em especial para as bolas de aço, mais suscetíveis ao desgaste do que as bolas de alto cromo.

Neste sentido, as seguintes composições de resultados podem ser elaboradas, como podem ser verificadas nas tabelas 15 e 16:

Composição 1:

Tabela 15: taxa de desgaste ($\mu\text{m/h}$) das ligas versus variação de pH – concentrado de baixo teor de Silica (BS)

| de variação liga | | variação de pH | | $\Delta (\%)$ taxa de desgaste | |
|-----------------------------------|----------------|----------------|---------------|--------------------------------------|---------------|
| | | dureza(RC) | 8,5 | | |
| | | 10,5 | | | |
| de variação liga | bolas de aço | 49,01 | 2,85 | 2,52 | -15,10 |
| | bolas de FFBAC | 61,50 | 1,06 | 0,99 | -7,07 |
| $\Delta (\%)$ taxa de desgaste | | | -62,82 | -59,09 | |

Assim, neste caso, fica mostrado que para a mesma bola, e o mesmo tipo de concentrado, na situação em que se elevou o pH para 10,5 obteve-se a maior variação para a bola de aço, com decréscimo de 15,10% na taxa de desgaste. Não obstante, deve-se ainda lembrar que também se verificou uma diminuição na taxa de desgaste para a bola FFBAC, de 7,07% na taxa de desgaste.

Ainda, cabe observar a grande diferença de desempenho entre as ligas já esperada, para o mesmo tipo de concentrado, mas que aparentemente, mantiveram-se em seus patamares de diferença, fazendo a ressalva que para o caso a variação foi obtida em relação à taxa inicial referenciada na bola de aço.

Composição 2:

Tabela 16: taxa de desgaste ($\mu\text{m/h}$) das ligas versus variação de pH – concentrado de alto teor de Silica (AS)

| de variação liga | | variação de pH | | $\Delta (\%)$ taxa de desgaste | |
|-----------------------------------|----------------|----------------|---------------|--------------------------------------|--------------|
| | | dureza(RC) | 8,5 | | |
| | | 10,5 | | | |
| de variação liga | bolas de aço | 49,01 | 3,12 | 2,99 | -4,16 |
| | bolas de FFBAC | 61,50 | 1,10 | 1,04 | -5,76 |
| $\Delta (\%)$ taxa de desgaste | | | -64,74 | -65,21 | |

Desta forma, fica evidenciado que para o concentrado de AS (com alto teor de sílica) a variação no pH não resultou em uma diminuição significativa na taxa de desgaste das bolas de aço (4,16%) como nas bolas de FFBAC (5,76%), ressaltando o aspecto abrasivo que o alto teor de sílica pode causar na taxa de desgaste das bolas. Outro efeito percebido aqui é que a diferença de desempenho entre as ligas se mantém praticamente no mesmo patamar, deixando a impressão de que dado o alto caráter abrasivo da mistura, a diferença na taxa de corrosão não parece influenciar de forma substancial a taxa de desgaste das bolas.

Outro aspecto interessante, comparando a composição 1 com a composição 2, é o de que quando há concentrado de baixa sílica, o aumento no valor de pH favorece a utilização das bolas de aço, enquanto que quando se trata de concentrado de alta sílica, ainda recomenda-se a utilização de bolas de FFBAC, na condição de pH da própria rede de abastecimento. Dessa forma, apesar da grande diferença de desempenho quanto às taxas de desgaste, pode-se pensar em recomendar a bola de aço, para concentrado de ferro com baixo teor de sílica, desde que seja introduzido no sistema o hidróxido de sódio, a fim de diminuir a taxa de desgaste e contribuir para o menor custo da operação.

No entanto, cabe ainda a ressalva de que outros custos, como o de mão-de-obra de reposição de bolas bem como o de maior estoque, devem ser levados em consideração, mas também a maior facilidade e rendimento de produção que as bolas de aço, forjadas, apresentam, podem indicar uma nova maneira de encarar a forma de compra de corpos moedores dentro da operação.

Como uma continuidade do trabalho, sugere-se que seja realizado um ensaio em planta de moagem em escala piloto, a fim de que sejam verificadas as tendências de desgaste apresentadas no presente trabalho. Desta maneira, este trabalho poderia servir como suporte para facilitar a alocação de recursos em ensaios cujos custos sejam mais elevados, como na operação de uma planta piloto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Maia, G.S. Avaliação da qualidade dos corpos moedores para minério fosfático de Tapira – MG. São Paulo, 1994. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
2. Alves Sampaio, J., Napoli Barbato C. Ensaios de moagem em laboratório. In.: Tratamento de minérios – Práticas Laboratoriais. Alves Sampaio, J., Alves França, S.C., Almeida Braga, P.F. (editores). Cetem/MCT, Rio de Janeiro, p 169-178. 2007.
3. Van Vlack, L. H. Anexo II: Comparação entre as escalas de dureza. In: Princípio de ciência dos materiais. Camargo Ferrão, P.(editor). Blücher, São Paulo, p.323. 1970.
4. Gentil, V. Corrosão em meio aquosos. In: Corrosão. Editora Guanabara Dois S.A, Rio de Janeiro, p 189-195. 1982.
5. Albertin E. Efeito da porcentagem de carbonetos e da microestrutura da matriz metálica sobre a resistência ao desgaste de ferros fundidos brancos de alto cromo – ensaios em moinhos de bolas. São Paulo, 1993. 297p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
6. Chaves, A.P., Peres, C. E. A. Teoria e prática do tratamento de minérios – Volume 3: Britagem, Peneiramento e Moagem.6º edição. Editora Signus, São Paulo, 2009.
7. Chaves, A.P., Peres, C. E. A. Teoria e prática do tratamento de minérios – Volume 1. 6º edição . Editora Signus. São Paulo, 2009.
8. Siriani, F.A., Características gerais de desgaste de mandíbulas em britadores. São Paulo, 1973. 281p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
9. Kaneta, P.D., Ensaios de desgaste de bolas de moinho em escala laboratorial validação do ensaio. São Paulo, 2002. 36p. Trabalho de Formatura – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
10. Azzaroni, E. Consideraciones acerca del desempeño de bolas para molienda y sus posibles efectos en la determinacion de la ley de desgaste. Anales do V Simposium sobre Molienda, p.151, Viña del Mar, Chile, 1987.

ANEXOS

Tabela i: desgaste bolas de aço com concentrado de BS e pH 8,5

| Alimentação | | | Pesagem 8 h | | | |
|------------------------------------|-----------|---------------|------------------------------------|-----------|--------------|--------------|
| bola nº | massa (g) | Ø equiv. (mm) | bola nº | massa (g) | Ø equiv.(mm) | desgaste(mm) |
| 1 | 118,10 | 30,63 | 1 | 117,84 | 30,61 | 0,022 |
| 2 | 118,28 | 30,64 | 2 | 118,03 | 30,62 | 0,022 |
| 3 | 118,39 | 30,65 | 3 | 118,05 | 30,62 | 0,029 |
| 4 | 118,51 | 30,66 | 4 | 118,22 | 30,64 | 0,025 |
| 5 | 118,51 | 30,66 | 5 | 118,26 | 30,64 | 0,022 |
| 6 | 118,81 | 30,69 | 6 | 118,54 | 30,67 | 0,023 |
| 7 | 119,20 | 30,72 | 7 | 118,96 | 30,70 | 0,021 |
| 8 | 119,32 | 30,73 | 8 | 119,07 | 30,71 | 0,021 |
| 9 | 119,35 | 30,74 | 9 | 119,08 | 30,71 | 0,023 |
| 10 | 119,52 | 30,75 | 10 | 119,27 | 30,73 | 0,021 |
| 11 | 119,52 | 30,75 | 11 | 119,27 | 30,73 | 0,021 |
| 12 | 119,57 | 30,76 | 12 | 119,28 | 30,73 | 0,025 |
| 13 | 119,71 | 30,77 | 13 | 119,45 | 30,74 | 0,022 |
| 14 | 120,01 | 30,79 | 14 | 119,76 | 30,77 | 0,021 |
| 15 | 122,48 | 31,00 | 15 | 122,22 | 30,98 | 0,022 |
| Média | 119,29 | 30,73 | Média | 119,02 | 30,71 | 0,023 |
| Desvio | 1,06 | 0,09 | Desvio | 1,07 | 0,09 | 0,002 |
| Ø equiv. médio (mm) | | | Ø equiv. médio (mm) | | | |
| TD média($\mu\text{m}/\text{h}$) | | | TD média($\mu\text{m}/\text{h}$) | | | |

Tabela ii: desgaste bolas de aço com concentrado AS e pH 8,5

| Alimentação | | | Pesagem 8 h | | | |
|------------------------------------|-----------|--------------|------------------------------------|-----------|--------------|--------------|
| bola nº | massa (g) | Ø equiv.(mm) | bola nº | massa (g) | Ø equiv.(mm) | desgaste(mm) |
| 1 | 117,84 | 30,61 | 1 | 117,580 | 30,58 | 0,023 |
| 2 | 118,03 | 30,62 | 2 | 117,750 | 30,60 | 0,024 |
| 3 | 118,05 | 30,62 | 3 | 117,860 | 30,61 | 0,016 |
| 4 | 118,22 | 30,64 | 4 | 117,940 | 30,61 | 0,024 |
| 5 | 118,26 | 30,64 | 5 | 117,970 | 30,62 | 0,025 |
| 6 | 118,54 | 30,67 | 6 | 118,260 | 30,64 | 0,024 |
| 7 | 118,96 | 30,70 | 7 | 118,680 | 30,68 | 0,024 |
| 8 | 119,07 | 30,71 | 8 | 118,770 | 30,69 | 0,026 |
| 9 | 119,08 | 30,71 | 9 | 118,810 | 30,69 | 0,023 |
| 10 | 119,27 | 30,73 | 10 | 118,850 | 30,69 | 0,036 |
| 11 | 119,27 | 30,73 | 11 | 118,970 | 30,70 | 0,026 |
| 12 | 119,28 | 30,73 | 12 | 118,980 | 30,70 | 0,026 |
| 13 | 119,45 | 30,74 | 13 | 119,140 | 30,72 | 0,027 |
| 14 | 119,76 | 30,77 | 14 | 119,400 | 30,74 | 0,031 |
| 15 | 122,22 | 30,98 | 15 | 121,990 | 30,96 | 0,019 |
| Média | 119,02 | 30,71 | Média | 118,73 | 30,68 | 0,025 |
| Desvio | 1,07 | 0,09 | Desvio | 1,06 | 0,09 | 0,004 |
| Ø equiv. médio (mm) | | | Ø equiv. médio (mm) | | | |
| TD média($\mu\text{m}/\text{h}$) | | | TD média($\mu\text{m}/\text{h}$) | | | |

Tabela iii: desgaste bolas de aço com concentrado BS e pH 10,5

| Alimentação | | | Pesagem 8 h | | | |
|------------------------------------|-----------|---------------|------------------------------------|-----------|--------------|--------------|
| bola nº | massa (g) | Ø equiv. (mm) | bola nº | massa (g) | Ø equiv.(mm) | desgaste(mm) |
| 1 | 117,24 | 30,55 | 1 | 117,00 | 30,53 | 0,021 |
| 2 | 117,41 | 30,57 | 2 | 117,18 | 30,55 | 0,020 |
| 3 | 117,51 | 30,58 | 3 | 117,27 | 30,56 | 0,021 |
| 4 | 117,62 | 30,59 | 4 | 117,38 | 30,57 | 0,021 |
| 5 | 117,64 | 30,59 | 5 | 117,41 | 30,57 | 0,020 |
| 6 | 117,93 | 30,61 | 6 | 117,68 | 30,59 | 0,022 |
| 7 | 118,36 | 30,65 | 7 | 118,12 | 30,63 | 0,021 |
| 8 | 118,40 | 30,65 | 8 | 118,14 | 30,63 | 0,022 |
| 9 | 118,47 | 30,66 | 9 | 118,28 | 30,64 | 0,016 |
| 10 | 118,57 | 30,67 | 10 | 118,34 | 30,65 | 0,020 |
| 11 | 118,65 | 30,68 | 11 | 118,42 | 30,66 | 0,020 |
| 12 | 118,66 | 30,68 | 12 | 118,44 | 30,66 | 0,019 |
| 13 | 118,81 | 30,69 | 13 | 118,57 | 30,67 | 0,021 |
| 14 | 119,14 | 30,72 | 14 | 118,90 | 30,70 | 0,021 |
| 15 | 121,62 | 30,93 | 15 | 121,40 | 30,91 | 0,019 |
| Média | 118,40 | 30,65 | Média | 118,17 | 30,63 | 0,020 |
| Desvio | 1,06 | 0,09 | Desvio | 1,07 | 0,09 | 0,001 |
| Ø equiv. médio (mm) | | | Ø equiv. médio (mm) | | | |
| TD média($\mu\text{m}/\text{h}$) | | | TD média($\mu\text{m}/\text{h}$) | | | |

Tabela iv: degaste de bolas de aço com concentrado AS e pH 10,5

| Alimentação | | | Pesagem 8 h | | | |
|------------------------------------|-----------|--------------|------------------------------------|-----------|--------------|--------------|
| bola nº | massa (g) | Ø equiv.(mm) | bola nº | massa (g) | Ø equiv.(mm) | desgaste(mm) |
| 1 | 117,57 | 30,58 | 1 | 117,340 | 30,56 | 0,020 |
| 2 | 117,73 | 30,60 | 2 | 117,510 | 30,58 | 0,019 |
| 3 | 117,82 | 30,60 | 3 | 117,640 | 30,59 | 0,016 |
| 4 | 117,95 | 30,62 | 4 | 117,660 | 30,59 | 0,025 |
| 5 | 117,97 | 30,62 | 5 | 117,670 | 30,59 | 0,026 |
| 6 | 118,24 | 30,64 | 6 | 117,930 | 30,61 | 0,027 |
| 7 | 118,66 | 30,68 | 7 | 118,360 | 30,65 | 0,026 |
| 8 | 118,78 | 30,69 | 8 | 118,400 | 30,65 | 0,033 |
| 9 | 118,82 | 30,69 | 9 | 118,470 | 30,66 | 0,030 |
| 10 | 118,94 | 30,70 | 10 | 118,570 | 30,67 | 0,032 |
| 11 | 118,97 | 30,70 | 11 | 118,650 | 30,68 | 0,028 |
| 12 | 118,98 | 30,70 | 12 | 118,750 | 30,68 | 0,020 |
| 13 | 119,14 | 30,72 | 13 | 118,940 | 30,70 | 0,017 |
| 14 | 119,47 | 30,75 | 14 | 119,290 | 30,73 | 0,015 |
| 15 | 121,92 | 30,96 | 15 | 121,620 | 30,93 | 0,025 |
| Média | 118,73 | 30,68 | Média | 118,45 | 30,66 | 0,024 |
| Desvio | 1,07 | 0,09 | Desvio | 1,05 | 0,09 | 0,006 |
| Ø equiv. médio (mm) | | | Ø equiv. médio (mm) | | | |
| TD média($\mu\text{m}/\text{h}$) | | | TD média($\mu\text{m}/\text{h}$) | | | |

Tabela v: desgaste bolas FFBAC com concentrado de BS e pH 8,5

| Alimentação | | | Pesagem 8 h | | | |
|---------------------|-----------|------------------|---------------------|-----------|--------------|--------------|
| bola nº | massa (g) | Ø equiv. (mm) | bola nº | massa (g) | Ø equiv.(mm) | desgaste(mm) |
| 1 | 99,300 | 29,35 | 1 | 99,190 | 29,34 | 0,011 |
| 2 | 100,400 | 29,46 | 2 | 100,330 | 29,45 | 0,007 |
| 3 | 106,130 | 30,01 | 3 | 106,040 | 30,00 | 0,008 |
| 4 | 106,190 | 30,02 | 4 | 106,090 | 30,01 | 0,009 |
| 5 | 112,610 | 30,61 | 5 | 112,520 | 30,60 | 0,008 |
| 6 | 114,410 | 30,77 | 6 | 114,320 | 30,76 | 0,008 |
| 7 | 117,740 | 31,07 | 7 | 117,640 | 31,06 | 0,009 |
| 8 | 118,500 | 31,13 | 8 | 118,410 | 31,13 | 0,008 |
| 9 | 120,230 | 31,28 | 9 | 120,140 | 31,28 | 0,008 |
| 10 | 120,770 | 31,33 | 10 | 120,660 | 31,32 | 0,010 |
| 11 | 127,730 | 31,92 | 11 | 127,640 | 31,91 | 0,007 |
| 12 | 136,710 | 32,65 | 12 | 136,600 | 32,64 | 0,009 |
| 13 | 136,910 | 32,67 | 13 | 136,800 | 32,66 | 0,009 |
| 14 | 145,390 | 33,33 | 14 | 145,280 | 33,32 | 0,008 |
| 15 | 147,230 | 33,47 | 15 | 147,120 | 33,46 | 0,008 |
| Média | 120,683 | 31,27 | Média | 120,585 | 31,26 | 0,009 |
| Desvio | 15,338 | 1,32 | Desvio | 15,331 | 1,316 | 0,001 |
| Ø equiv. médio (mm) | | | Ø equiv. médio (mm) | | | |
| TD média(µm/h) | | | TD média(µm/h) | | | |

Tabela vi: desgaste bolas FFBAC com concentrado de AS e pH 8,5

| Alimentação | | | Pesagem 8 h | | | |
|---------------------|-----------|---------------|---------------------|-----------|--------------|--------------|
| bola nº | massa (g) | Ø equiv. (mm) | bola nº | massa (g) | Ø equiv.(mm) | desgaste(mm) |
| 1 | 99,35 | 29,36 | 1 | 99,19 | 29,34 | 0,016 |
| 2 | 100,40 | 29,46 | 2 | 100,35 | 29,45 | 0,005 |
| 3 | 106,13 | 30,01 | 3 | 106,09 | 30,01 | 0,004 |
| 4 | 106,19 | 30,02 | 4 | 106,09 | 30,01 | 0,009 |
| 5 | 112,61 | 30,61 | 5 | 112,52 | 30,60 | 0,008 |
| 6 | 114,41 | 30,77 | 6 | 114,32 | 30,76 | 0,008 |
| 7 | 117,74 | 31,07 | 7 | 117,64 | 31,06 | 0,009 |
| 8 | 118,55 | 31,14 | 8 | 118,44 | 31,13 | 0,010 |
| 9 | 120,31 | 31,29 | 9 | 120,20 | 31,28 | 0,010 |
| 10 | 120,79 | 31,33 | 10 | 120,66 | 31,32 | 0,011 |
| 11 | 127,73 | 31,92 | 11 | 127,68 | 31,92 | 0,004 |
| 12 | 136,79 | 32,66 | 12 | 136,69 | 32,65 | 0,008 |
| 13 | 136,98 | 32,67 | 13 | 136,80 | 32,66 | 0,014 |
| 14 | 145,45 | 33,33 | 14 | 145,28 | 33,32 | 0,013 |
| 15 | 147,24 | 33,47 | 15 | 147,19 | 33,47 | 0,004 |
| Média | 120,71 | 31,27 | Média | 120,61 | 31,26 | 0,009 |
| Desvio | 15,35 | 1,32 | Desvio | 15,34 | 1,32 | 0,004 |
| Ø equiv. médio (mm) | | | Ø equiv. médio (mm) | | | |
| TD média(µm/h) | | | TD média(µm/h) | | | |

Tabela vii: desgaste bolas FFBAC com concentrado de BS e pH 10,5

| Alimentação | | | Pesagem 8 h | | | |
|---------------------|-----------|--------------|---------------------|-----------|--------------|--------------|
| bola nº | massa (g) | Ø equiv.(mm) | bola nº | massa (g) | Ø equiv.(mm) | desgaste(mm) |
| 1 | 99,16 | 29,34 | 1 | 99,11 | 29,33 | 0,023 |
| 2 | 100,30 | 29,45 | 2 | 100,21 | 29,44 | 0,024 |
| 3 | 106,01 | 30,00 | 3 | 105,90 | 29,99 | 0,016 |
| 4 | 106,06 | 30,00 | 4 | 105,99 | 30,00 | 0,024 |
| 5 | 112,50 | 30,60 | 5 | 112,39 | 30,59 | 0,025 |
| 6 | 114,30 | 30,76 | 6 | 114,18 | 30,75 | 0,024 |
| 7 | 117,62 | 31,06 | 7 | 117,51 | 31,05 | 0,024 |
| 8 | 118,38 | 31,12 | 8 | 118,29 | 31,11 | 0,026 |
| 9 | 120,11 | 31,27 | 9 | 119,99 | 31,26 | 0,023 |
| 10 | 120,64 | 31,32 | 10 | 120,53 | 31,31 | 0,036 |
| 11 | 127,61 | 31,91 | 11 | 127,53 | 31,90 | 0,026 |
| 12 | 136,56 | 32,64 | 12 | 136,48 | 32,63 | 0,026 |
| 13 | 136,79 | 32,66 | 13 | 136,66 | 32,65 | 0,027 |
| 14 | 145,24 | 33,32 | 14 | 145,19 | 33,31 | 0,031 |
| 15 | 147,03 | 33,45 | 15 | 146,99 | 33,45 | 0,019 |
| Média | 120,55 | 31,26 | Média | 120,46 | 31,25 | 0,025 |
| Desvio | 15,32 | 1,32 | Desvio | 15,33 | 1,32 | 0,004 |
| Ø equiv. médio (mm) | | | Ø equiv. médio (mm) | | | |
| TD média(µm/h) | | | TD média(µm/h) | | | |

Tabela viii: desgaste bolas FFBAC com concentrado AS e pH 10,5

| Alimentação | | | Pesagem 8 h | | | |
|---------------------|-----------|---------------|---------------------|-----------|--------------|--------------|
| bola nº | massa (g) | Ø equiv. (mm) | bola nº | massa (g) | Ø equiv.(mm) | desgaste(mm) |
| 1 | 99,07 | 29,33 | 1 | 98,97 | 29,32 | 0,010 |
| 2 | 100,18 | 29,44 | 2 | 100,11 | 29,43 | 0,007 |
| 3 | 105,90 | 29,99 | 3 | 105,81 | 29,98 | 0,008 |
| 4 | 105,96 | 29,99 | 4 | 105,85 | 29,98 | 0,010 |
| 5 | 112,39 | 30,59 | 5 | 112,31 | 30,58 | 0,007 |
| 6 | 114,18 | 30,75 | 6 | 114,09 | 30,74 | 0,008 |
| 7 | 117,50 | 31,05 | 7 | 117,39 | 31,04 | 0,010 |
| 8 | 118,26 | 31,11 | 8 | 118,17 | 31,10 | 0,008 |
| 9 | 119,99 | 31,26 | 9 | 119,89 | 31,25 | 0,009 |
| 10 | 120,53 | 31,31 | 10 | 120,44 | 31,30 | 0,008 |
| 11 | 127,48 | 31,90 | 11 | 127,38 | 31,89 | 0,008 |
| 12 | 136,45 | 32,63 | 12 | 136,35 | 32,62 | 0,008 |
| 13 | 136,66 | 32,65 | 13 | 136,55 | 32,64 | 0,009 |
| 14 | 145,10 | 33,31 | 14 | 145,00 | 33,30 | 0,008 |
| 15 | 146,96 | 33,45 | 15 | 146,86 | 33,44 | 0,008 |
| Média | 120,44 | 31,25 | Média | 120,34 | 31,24 | 0,008 |
| Desvio | 15,32 | 1,32 | Desvio | 15,32 | 1,32 | 0,001 |
| Ø equiv. médio (mm) | | | Ø equiv. médio (mm) | | | |
| TD média(µm/h) | | | TD média(µm/h) | | | |

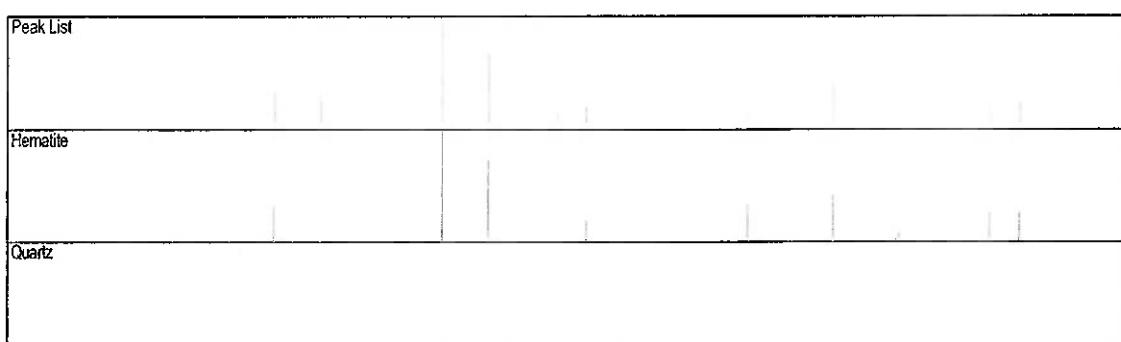
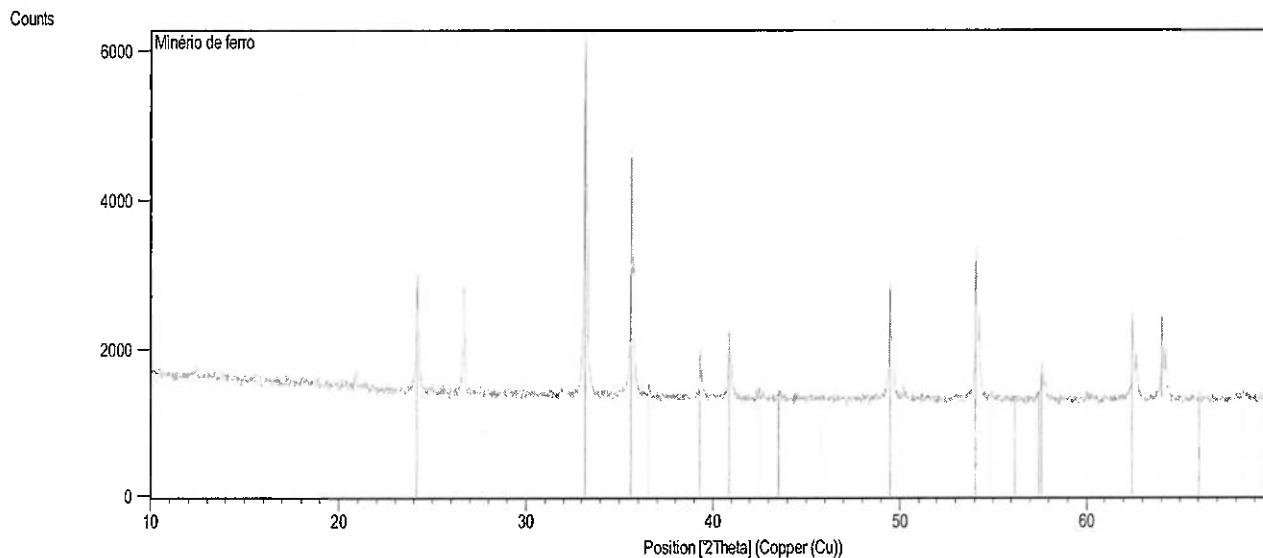
Análise por difração de Raios-X

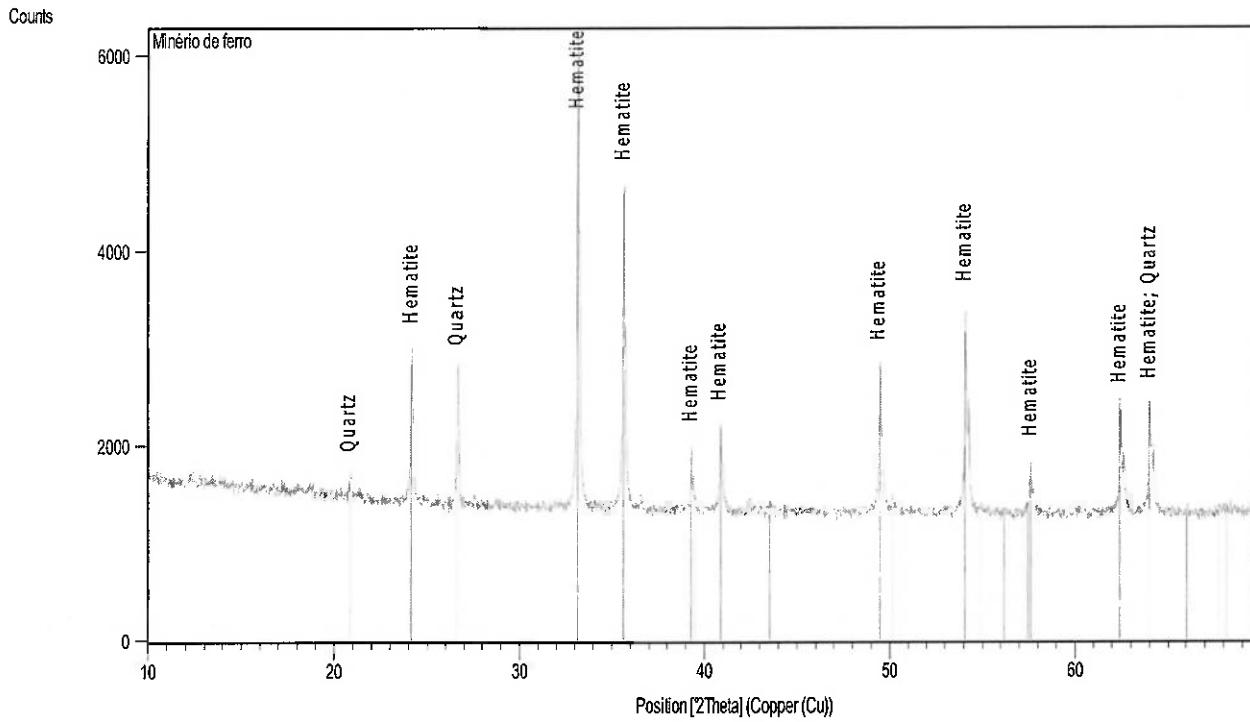
O estudo foi efetuado através do método do pó, mediante o emprego de difratômetro de raios X, marca PANalytical, modelo X'Pert PRO com detector X'Celerator.

As condições instrumentais de coleta do difratograma foram: tubo de raios X de cobre, energia 45kV/40mA, intervalo de coleta de 2,5-70°, passo 0,02° e tempo/passo de 10s.

A identificação das fases cristalinas foi obtida por comparação do difratograma da amostra com os bancos de dados PDF2 do ICDD - International Centre for Diffraction Data (2003).

A determinação semiquantitativa das fases foi feita pelo método de RIR - Ratio Intensity Reference utilizando estruturas cristalinas do banco de dados ICSD - Inorganic Crystal Structures Database (2007).







**Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo**

Laboratório de Caracterização Tecnológica – LCT

Av. Prof. Mello Moraes, 2373 - CEP 05508-030 São Paulo - SP e-mail: lct@lct.poli.usp.br
TEL: (0XX11) 3091-5151 FAX (0XX11) 3091-6037 www.lct.poli.usp.br



RESULTADOS DE ANÁLISE QUÍMICA

CERTIFICADO: 703/09

REQ. 717/09

DATA: 13/07/09

CLIENTE: ARTHUR PINTO CHAVES

TIPO DE ANÁLISE: Quantitativa, por espectrometria de fluorescência de raios X

Resultados em %

| | |
|--------------------------------|------------------|
| Nº LCT | 5989/09 |
| Amostra | Minério de Ferro |
| Fe | 67,3 |
| SiO ₂ | 6,03 |
| Al ₂ O ₃ | 0,71 |
| P | <0,01 |
| Mn | 0,28 |
| TiO ₂ | <0,10 |
| CaO | <0,10 |
| MgO | 0,31 |
| Na ₂ O | <0,10 |
| K ₂ O | <0,10 |
| PF | 0,45 |

Dra. Giuliana Ratti
Pesquisadora do LCT – EPUSP
Química - CRQ 04105009-4³R

Freud S. Campbell
Pesquisador do LCT – EPUSP
Químico - CRQ 04200380-4³R

Prof. Dr. Henrique Kahn
Coordenador do LCT

Tabela ix : distribuição granulométrica da alimentação do moinho - concentrado AS

| Tyler | A.B.N.T mm | μm | % peso retida | |
|-------|---------------|---------------|---------------|-----------|
| | | | simples | acumulada |
| 4 | 4,8 | 4800,0 | | |
| 6 | 3,4 | 3400,0 | 0,13 | 0,13 |
| 9 | 2,0 | 2000,0 | 0,22 | 0,34 |
| 14 | 1,2 | 1200,0 | 1,25 | 1,60 |
| 28 | 0,600 | 600,0 | 8,12 | 9,71 |
| 65 | 0,210 | 210,0 | 23,13 | 32,84 |
| 100 | 0,150 | 150,0 | 12,47 | 45,31 |
| 150 | 0,105 | 105,0 | 12,25 | 57,57 |
| 200 | 0,075 | 75,0 | 11,00 | 68,57 |
| 325 | 0,044 | 44,0 | 17,11 | 85,68 |
| <325 | 0,044 | 44,0 | 14,32 | 100,00 |

Tabela x: análise granulométrica alimentação do moinho – concentrado BS

| Tyler | A.B.N.T mm | μm | % peso retida | |
|-------|---------------|---------------|---------------|-----------|
| | | | simples | acumulada |
| 4 | 4,8 | 4800,0 | 0,82 | 0,82 |
| 6 | 3,4 | 3400,0 | 0,33 | 1,14 |
| 9 | 2,0 | 2000,0 | 0,59 | 1,73 |
| 14 | 1,2 | 1200,0 | 0,72 | 2,45 |
| 28 | 0,600 | 600,0 | 1,40 | 3,85 |
| 65 | 0,210 | 210,0 | 4,31 | 8,15 |
| 100 | 0,150 | 150,0 | 3,78 | 11,94 |
| 150 | 0,105 | 105,0 | 9,07 | 21,00 |
| 200 | 0,075 | 75,0 | 12,72 | 33,72 |
| 325 | 0,044 | 44,0 | 29,39 | 63,11 |
| <325 | 0,044 | 44,0 | 36,89 | 100,00 |