

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE CORPOS MOEDORES
PARA O MINÉRIO FOSFÁTICO DE TAPIRA - MG**

Eng^o GERALDO DA SILVA MAIA
(Engenheiro de Minas 1985, UFMG)

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE CORPOS MOEDORES

PARA O MINÉRIO FOSFÁTICO DE TAPIRA-MG

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração:
Engenharia Mineral

Orientador:
Prof. Dr. José Renato B. de Lima

São Paulo
1994

A meus filhos e minha esposa, gran
de razão e incentivo de meu aper -
feiçoamento. A minha mãe, eterna
incentivadora e exemplo de dedica-
ção.

A G R A D E C I M E N T O S

À FOSFÉRTIL S.A. que possibilitou a realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. José Renato Baptista de Lima pelas orientações objetivas, apoio e constante incentivo.

A todos que direta ou indiretamente colaboraram na execução deste trabalho, em especial Maria Elizabeth Jabace pelo auxílio inestimável.

S U M Á R I O

	Índice de tabelas	iii
	Índice de figuras	v
	Simbologia adotada	vii
	Resumo	viii
	"Abstract"	ix
1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ;.....	3
2.1	Teorias de desgaste de bolas	5
2.2	Métodos de avaliação de desempenho de corpos moedores	13
2.3	Ensaio com amostras marcadas	16
2.4	Mecanismos de desgaste	19
2.5	Materiais metálicos para fabricação de cor- pos moedores	23
3	O COMPLEXO DE MINERAÇÃO DE TAPIRA ;.....	26
3.1	O minério	28
3.2	O processo	30
4	MATERIAIS E MÉTODOS	37
4.1	Tipos de ensaios	38
4.2	Moinho utilizados	41
4.3	Metodologia dos ensaios	45
4.3.1	Ensaio com bolas e cylpebs	45
4.3.2	Ensaio com barras	48
4.3.3	Cálculo do consumo	50
4.4	Descrição dos corpos moedores ensaiados	53

4.4.1	Bolas do Grupo 1	54
4.4.2	Bolas do Grupo 2	56
4.4.3	Barras do Grupo 3	59
4.4.4	Cylpebs do Grupo 4	61
5	RESULTADOS OBTIDOS	63
5.1	Resultados dos ensaios com bolas do Grupo 1 ..	64
5.2	Resultados dos ensaios com bolas do Grupo 2 ..	70
5.3	Resultados dos ensaios com barras do Grupo 3	75
5.4	Resultados dos ensaios com cylpebs do Grupo 4	80
6	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	86
6.1	Análise dos resultados dos ensaios	87
6.2	Resultados de ensaios x resultados indus- triais	94
6.3	Análise da metodologia utilizada	97
7	CONCLUSÕES	102
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104

ÍNDICE DE TABELAS

Tab. 3.1	COMPOSIÇÃO TÍPICA DO MINÉRIO DE FOSFATO	29
Tab. 4.1	COMPOSIÇÕES QUÍMICAS MÉDIAS E DUREZA SUPERFICIAL (Grupo 1)	54
Tab. 4.2	MASSAS MÉDIAS, DESVIOS PADRÃO E DIÂME- TROS (Grupo 1)	55
Tab. 4.3	COMPOSIÇÕES QUÍMICAS MÉDIAS E DUREZA SUPERFICIAL (Grupo 2)	57
Tab. 4.4	MASSAS MÉDIAS, DESVIOS PADRÃO E DIÂME- TROS (Grupo 2)	58
Tab. 4.5	COMPOSIÇÕES QUÍMICAS MÉDIAS E DUREZA SUPERFICIAL (Grupo 3)	59
Tab. 4.6	COMPOSIÇÕES QUÍMICAS MÉDIAS E DUREZA SUPERFICIAL (Grupo 4)	62
Tab. 5.1	CONTROLE DOS ENSAIOS COM BOLAS DO GRUPO 1	64
Tab. 5.2	RESULTADOS DE CONSUMO DOS ENSAIOS (Grupo 1) ..	68
Tab. 5.3	CONSUMOS COM 2.500 HORAS DE OPERAÇÃO (Grupo 1)	69
Tab. 5.4	CONTROLE DOS ENSAIOS COM BOLAS DO GRUPO 2	70
Tab. 5.5	RESULTADOS DE CONSUMO DOS ENSAIOS (Grupo 2) ..	74
Tab. 5.6	CONSUMOS COM 2.500 HORAS DE OPERAÇÃO (Grupo 2)	74
Tab. 5.7	CONTROLE DOS ENSAIOS COM BARRAS DO GRUPO 3 ...	75
Tab. 5.8	RESULTADOS DE CONSUMO DOS ENSAIOS (Grupo 3) ..	79
Tab. 5.9	CONSUMOS COM 1.500 HORAS DE OPERAÇÃO (Grupo 3)	79

Tab. 5.10	CONTROLE DOS ENSAIOS COM CYLPEBS DO GRUPO 4 ..	80
Tab. 5.11	RESULTADOS DE CONSUMO DOS ENSAIOS (Grupo 4) ..	84
Tab. 5.12	CONSUMOS COM 1.000 HORAS DE OPERAÇÃO (Grupo 4)	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 3.1	Circuito do minério granulado	35
Fig. 3.2	Circuito do minério friável	36
Fig. 4.1	Perfil em onda dupla semelhante ao utilizado em moinhos de bolas	44
Fig. 4.2	Perfil em onda simples semelhante ao utilizado em moinhos de barras	44
Fig. 4.3	Extrapolação dos resultados de ensaio para os demais diâmetros componentes da carga moedora	51
Fig. 4.4	Micrografia típica de barras de moinho em aço-carbono	60
Fig. 5.1	Evolução do diâmetro em função do tempo de operação (Grupo 1)	65
Fig. 5.2	Evolução do diâmetro em função da produção do moinho (Grupo 1)	66
Fig. 5.3	Evolução do diâmetro em função do consumo energético do moinho (Grupo 1)	67
Fig. 5.4	Evolução do diâmetro da bola C	69
Fig. 5.5	Evolução do diâmetro em função do tempo de operação (Grupo 2)	71
Fig. 5.6	Evolução do diâmetro em função da produção do moinho (Grupo 2)	72
Fig. 5.7	Evolução do diâmetro em função do consumo energético do moinho (Grupo 2)	73
Fig. 5.8	Evolução do diâmetro em função do tempo de operação (Grupo 3)	76

Fig. 5.9	Evolução do diâmetro em função da produção do moinho (Grupo 3)	77
Fig. 5.10	Evolução do diâmetro em função do consumo energético do moinho (Grupo 3)	78
Fig. 5.11	Evolução do diâmetro em função do tempo de operação (Grupo 4)	81
Fig. 5.12	Evolução do diâmetro em função da produção do moinho (Grupo 4)	82
Fig. 5.13	Evolução do diâmetro em função do consumo energético do moinho (Grupo 4)	83
Fig. 5.14	Evolução de um cylpeb durante ensaio	85
Fig. 6.1	Problemas de fabricação frequentemente encontrados em bolas	99
Fig. 6.2	Uma bola de boa qualidade	101

SIMBOLOGIA ADOTADA

- \emptyset - Diâmetro do corpo moedor (mm)
- T - Tempo de ensaio ou de operação (horas)
- M - Massa da carga moedora (toneladas)
- θ - Constante tempo - consumo de bolas em função do tempo de ensaio ou de operação (horas)
- t - Produção do moinho em determinado período (toneladas)
- Z_m - Constante de produção - consumo de bolas em função da produção do moinho (tonelada)
- m_0 - Massa inicial da bola (gramas)
- m_1 - Massa da bola antes de t toneladas de minério moídas (gramas)
- m_2 - Massa da bola após t toneladas de minério moídas (gramas)
- b - Constante de desgaste superficial da bola
- K - Constante de Austin et al. relacionada ao parâmetro Δ
- Δ - Parâmetro de Austin et al. - descreve a distribuição de bolas no interior do moinho
- r - Raio da bola (mm)
- H - Horas de ensaio ou de operação
- E - Consumo energético do moinho em determinado período (KWh)
- cc - coeficiente de correlação

RESUMO

A avaliação de corpos moedores antes da utilização industrial permite redução de riscos operacionais, melhoria da eficiência e redução dos custos de moagem.

Objetivando apresentar uma metodologia de avaliação da qualidade de corpos moedores, são descritos e analisados os resultados de nove ensaios com diferentes tipos de corpos moedores metálicos, com variações quanto à composição da liga, tratamento térmico e forma.

Todos os ensaios foram realizados em moinhos industriais, em condições reais de operação.

As informações fornecidas pela metodologia de ensaios proposta, suas vantagens e limitações, sua aplicabilidade e a correlação de seus resultados com valores alcançados industrialmente são apresentados e discutidos.

"ABSTRACT"

The evaluation of grinding media before its industrial use allows reductions of operational risks and costs with the improvement of the milling efficiency.

With the aim of showing a methodology to grinding media quality evaluation, the results of nine tests with grinding balls, rods and cylpebs are discussed and analysed.

All the tests were carried out in industrial mills under real conditions of operation.

The informations obtained by the proposed methodology, its advantages and limitations, its applicability and correlation between tests and industrial results are showed and discussed.

1- INTRODUÇÃO

A moagem é uma etapa de significativa importância no beneficiamento de minérios, tanto em seus aspectos técnicos quanto econômicos..

Basicamente, os custos operacionais de moagem se distribuem em gastos com energia, corpos moedores e revestimentos que, na maioria dos casos, respondem pela maior parcela na composição do custo final de uma usina de beneficiamento mineral.

Qualquer esforço no sentido de redução de custos nesta etapa passa necessariamente pela otimização de corpos moedores através da melhoria de sua qualidade.

O desenvolvimento de corpos moedores alternativos, como os cylpebs e outros é também uma opção para a redução dos custos de moagem.

Paralelamente, o desenvolvimento de fornecedores alternativos, ativando a concorrência, leva à busca de reduções nos custos de fabricação, ativa o desenvolvimento de pesquisas tecnológicas pelos fabricantes, apresentando reflexos diretos nos custos dos usuários de corpos moedores.

Em qualquer hipótese, se faz necessária uma avaliação prévia do corpo moedor antes de sua utilização industrial, vi-

sando oferecer maior segurança ao operador das instalações de moagem, minimizando riscos de eventuais problemas como consumo elevado, desgaste irregular e quebras que, dependendo do nível de ocorrência, podem ocasionar graves prejuízos.

Este trabalho trata de metodologia aplicada para a realização desta avaliação prévia, descrevendo ensaios realizados no Complexo de Mineração de Tapira da FOSFÉRTIL S.A.. O objetivo é a sistematização de metodologia simples e de baixo custo, que sirva de orientação ao operador de instalações de moagem na tomada de decisões ao deparar com problemas relativos à avaliação de qualidade de corpos moedores.

Não fazem parte do escopo deste trabalho otimizações de processos de moagem, bem como não se intenciona aprofundar em discussões do processo metalúrgico e métodos de fabricação de corpos moedores. Todo o trabalho foi desenvolvido sob o ponto de vista do operador de moagem, não tendo sido aprofundada a descrição metal-urgica dos corpos moedores ensaiados.

No decorrer do trabalho procurou-se utilizar sempre grandes em unidades do Sistema Internacional porém, em alguns casos, adotou-se unidades de conhecimento mais usual como por exemplo, tamanhos de ciclones onde utilizou-se a polegada.

2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Desde o início do século, muitos estudos têm sido realizados buscando maior conhecimento sobre os corpos moedores e revestimentos em moinhos tubulares.

Esta busca pelo desenvolvimento de corpos moedores de melhor qualidade, revestimentos mais adequados a cada caso e condições operacionais mais econômicas, visando sempre uma boa qualidade do produto moído a custos compatíveis, tornou-se uma constante no beneficiamento mineral.

Com referência a corpos moedores, a grande maioria dos estudos encontrados na literatura foram desenvolvidos para moagem de bolas e mais recentemente abrangendo também moagens autógena e semi-autógena.

O desgaste de um corpo moedor, como é de conhecimento geral, é função de sua composição química e propriedades físicas, características operacionais do moinho, do minério, do revestimento, etc.

Teorias sobre desgaste de corpos moedores e métodos de avaliação de desempenho são objeto de várias publicações, sendo assunto de muita discussão como verificado nas referências bibliográficas pesquisadas.

Um fato alentador é a melhoria contínua da qualidade de bar

ras e bolas através da utilização de elementos de liga mais nobres como o cromo e o molibdênio, avanços nos processos de fabricação, além do desenvolvimento de novos tipos de corpos moedores.

2.1- TEORIAS DE DESGASTE DE BOLAS

A procura por leis empíricas que expliquem o desgaste de bolas em moinhos tubulares remonta às primeiras décadas do século XX.

Vérmeulen et al.¹ citam trabalhos de Davis e Prentice, pu-blicados respectivamente em 1919 e 1943, onde o primeiro propõe a TEORIA VOLUMÉTRICA DO DESGASTE DE BOLAS, que segun-do Menacho et al.² também é defendida por outros autores co-mo Longmore e Crocker.

De acordo com esta teoria, a razão de desgaste de uma bola é proporcional a sua massa e, por conseguinte, ao seu volume ou seja, ao cubo de seu diâmetro. A origem desta teoria está na idéia de que a maioria dos eventos na cominuição ocorrem na região da carga moedora denominada "toe", onde predomi-nam os mecanismos de impacto.

Prentice apud Vérmeulen et al.¹ propõe a TEORIA SUPERFICIAL PARA O DESGASTE DE BOLAS, defendida, segundo Menacho et al.² por vários estudiosos como White, Garm & Stevens, Norman & Loeb, Norquist & Moeller, Rose & Sullivan, Lorenzetti.

Esta teoria tem origem na idéia de que a vasta maioria dos eventos na cominuição se devem à abrasão bola-partícula-bo-la, sugerindo que a razão de desgaste será proporcional à superfície da bola, ou seja, ao quadrado de seu diâmetro.

Bond apud Menacho et al.² sugere que o desgaste de bolas é relativo ao mecanismo de moagem de cada moinho, ou seja, em ambiente onde ocorre predominância de abrasão o desgaste é proporcional à superfície da bola, enquanto em ambiente de impacto predominante, a taxa de desgaste depende da massa da bola.

As duas teorias apresentadas foram desenvolvidas com o objetivo principal de determinar a distribuição de tamanhos de bolas no interior de um moinho, sendo até hoje base de muitos estudos sobre o comportamento de cargas moedoras.

Segundo Azzaroni³, o desgaste dos corpos moedores se rege por numerosos parâmetros de grande complexidade, alguns de difícil identificação e por conseguinte, difícil medição.

Contudo, é possível reconhecer a existência de leis de desgaste para cada aplicação específica.

Assumindo a aplicabilidade da TEORIA SUPERFICIAL, Azzaroni, após alguns desenvolvimentos matemáticos relacionando às definições de volume, massa e área de uma esfera, apresenta o seguinte corolário:

"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."

Matematicamente, este enunciado se traduz por

$$d\phi/dT = -K$$

(Eq 2.1)

onde ϕ é o diâmetro da bola, T o tempo de operação e K uma constante.

Aprofundando em suas análises, Azzaroni nota que em geral , a taxa de redução do diâmetro em função do tempo tende a se afastar de uma reta, levando ao enunciado de uma nova lei de desgaste:

"O consumo de uma bola, ou a redução de sua massa devida ao desgaste, é sempre proporcional ao diâmetro da bola de expoente 'n', típico para cada aplicação particular."

Ou matematicamente:

$$d\phi/dT = -K\phi^n \quad (\text{Eq 2.2})$$

Sendo 'n' 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.

Em muitos casos, o valor de 'n' tende para zero e o conhecimento da lei de desgaste para um diâmetro qualquer pode ser estendida para todos os demais diâmetros da carga moedora , permitindo definir uma única lei de desgaste para todo o colar representativo da carga moedora.

O termo "colar" é definido por Azzaroni³ como a unidade básica de diâmetros cuja repetição compõe a carga moedora.

Estudos de consumo de bolas realizados por Vermeulen et al.¹ mostram que sendo M a massa da carga moedora e dM/dT o con-

sumo de bolas em função do tempo, a constante θ denominada constante tempo será:

$$\theta = -M/(dM/dT) \quad (\text{Eq 2.3})$$

Por ser mais usual o consumo de bolas em relação à quantidade de minério moído (t), tem-se:

$$dM/dT = (dM/dt)/(dt/dT) \quad (\text{Eq 2.4})$$

permitindo definir a constante de produção (Z_m) como

$$Z_m = -M/(dM/dt) \quad (\text{Eq 2.5})$$

ou

$$Z_m = \theta (dt/dT) \quad (\text{Eq 2.6})$$

sendo dt/dT a massa de minério moído por unidade de tempo e Z dada por unidade de massa.

Pela TEORIA VOLUMÉTRICA, se m é a massa da bola, $-dm/dT$ por conseguinte é proporcional a m , levando a

$$-dm/dT = m/Z \quad (\text{Eq 2.7})$$

onde a constante Z é denominada constante de tonelagem sendo medida na mesma unidade de t .

Disto obtém-se que:

$$m(t) = m_0 \exp(-t/\zeta) \quad (\text{Eq 2.8})$$

sendo m_0 a massa inicial da bola.

Após ζ toneladas de material moído, a massa da bola terá sido reduzida por um fator de $1/e$, ou seja:

$$m(\zeta) = m_0/e \quad (\text{Eq 2.9})$$

Se m_1 e m_2 são as massas das bolas respectivamente antes e depois de t_0 toneladas de minério moídas, tem-se que:

$$\zeta = t_0 / (\ln(m_1/m_2)) \quad (\text{Eq 2.10})$$

Ainda seguindo o desenvolvimento destes autores, pela TEORIA SUPERFICIAL m será proporcional à área da bola, levando a

$$-dm/dT = bm^{2/3} \quad (\text{Eq 2.11})$$

sendo b a constante de desgaste superficial.

Da equação 5.11 obtém-se que:

$$m^{1/3} = m_0^{1/3} - (1/3)bt \quad (\text{Eq 2.12})$$

ou

$$m(t) = (m_0^{1/3} - (1/3)bt)^3 \quad (\text{Eq 2.13})$$

Estas duas últimas equações só são válidas se as bolas mantiverem a esfericidade, ou seja, se não houver desgaste irregular que altere a geometria da bola.

Austin et al.⁴ apresentam a taxa de desgaste da bola como proporcional ao raio elevado ao expoente $2+\Delta$, sendo Δ um parâmetro desenvolvido pelos autores para descrever a distribuição de bolas no interior do moinho.

Neste trabalho são apresentados valores de $\Delta = 0, 1$ e 2 , sendo a razão desta grande diferença desconhecida pelos autores.

A equação para o consumo encontrada por eles, obtida pela introdução do parâmetro Δ em formulação de Bond é

$$-dm/dT = K r^{2+\Delta} \quad (\text{Eq 2.14})$$

onde r é o raio da bola e K uma constante cujo valor depende de Δ .

Os autores consideram a situação bastante confusa face aos valores discrepantes encontrados para Δ quando analisados experimentos reportados por vários pesquisadores como Davis⁵, Lorenzetti, Vermeulen e outros.

Por sua vez, Vermeulen⁵ faz uma análise daquele trabalho onde coloca que sendo $t=TF$ e F a taxa média de alimentação do moinho, a equação 2.14 é essencialmente dependente do tempo.

Se $\Delta = 0$, a equação corresponde à TEORIA SUPERFICIAL, enquanto se $\Delta = 1$ a equação corresponde à TEORIA VOLUMÉTRICA.

Como cada uma destas teorias assume um tipo predominante de quebra das partículas, valores de Δ entre 0 e 1 são válidos, já que os dois mecanismos de quebra, abrasão e impacto, na maioria dos casos ocorrem simultaneamente em moinhos industriais.

O parâmetro Δ é um bom indicador para a escolha do tipo de bola a ser utilizado, assim, na predominância de desgaste por abrasão, Δ tende a zero e o uso de bola de dureza mais elevada é vantajoso.

Por outro lado, se Δ tende a 1 o desgaste predominante é por impacto, levando à opção por bolas de material mais tenaz.

O conhecimento do valor de Δ não só indica características inerentes à bola mas também às condições de moagem, já que seu mecanismo é influenciado por muitas destas condições. Valores de Δ acima de 1 contudo, não recebem qualquer comentário deste autor, que afirma ser difícil a determinação deste parâmetro através de resultados de ensaios com amostras marcadas.

Vermeulen⁵ considera ensaios com amostras marcadas valiosos pelo baixo custo e pequeno tempo de execução, podendo ser utilizados na determinação da durabilidade e custo de utilização de determinado tipo de bola.

Austin et al.⁴ utilizaram em suas análises dados obtidos de diferentes tipos de ensaios, o que pode explicar os valores de Δ obtidos.

Menacho⁶, comentando o texto de Vermeulen⁵, relata que experiências em moinhos chilenos mostram que ensaios de desgaste de curta duração frequentemente obedecem relações aproximadamente lineares e o limitado número de bolas e medições, quando se utiliza amostras marcadas, enfraquecem qualquer análise estatística para se decidir com segurança se este comportamento linear do desgaste é aparente ou verdadeiro. Este autor afirma, contudo, ser possível em muitos casos a determinação de Δ através de ensaios com amostras marcadas com pouco tempo de experimentação.

Menacho et al.^{2,7} têm desenvolvido importantes trabalhos na área de corpos moedores. Segundo eles, a maioria dos ensaios com amostras marcadas desenvolvidos em escala industrial tem mostrado que a cinética do desgaste de bolas é de ordem zero. No entanto, em vários casos, o tempo de experimentação não é suficientemente longo para concluir por um comportamento desta ordem, enquanto que em outros trabalhos são apresentadas cinéticas de outra ordem.

No desenvolvimento de seus trabalhos, estes autores utilizam a teoria do balanço populacional, considerando o moinho como um reator e a abrasão das bolas a reação.

Neste enfoque, a TEORIA SUPERFICIAL representa uma taxa de desgaste de ordem zero, enquanto a TEORIA VOLUMÉTRICA é de primeira ordem.

2.2- MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE CORPOS MOEDORES

Segundo Barros et al.⁸, a utilização de um novo corpo moedor seja em liga ou geometria diferentes das usuais, ou mesmo quando proveniente de um novo fornecedor, requer uma avaliação prévia de desempenho onde possam ser analisados o consumo, deformações geométricas, índice de quebras e até mesmo problemas de fabricação.

De acordo com Vermeulen et al.¹, ensaios envolvendo a introdução gradual de um tipo de corpo moedor em substituição à carga usual são demorados e caros.

A colocação de uma "carga teste" completa em um moinho para avaliação do desempenho, além de onerosa, envolve, para o caso de grandes moinhos, manuseio de grandes massas, com elevados riscos operacionais, podendo ocasionar sérias consequências em casos de corpos moedores inadequados ao tipo de operação, segundo Maia et al.⁹.

Ensaaios em moinhos de laboratório ou em escala piloto baseados na perda de massa da carga moedora em condições comparáveis às encontradas em escala industrial, são outros tipos de estudo de corpos moedores.

Austin et al.⁴ afirmam que em certas circunstâncias, dados provenientes destes ensaios podem ser utilizados para se obter a lei de desgaste do corpo moedor.

Segundo Fuhrmann¹⁰, ao utilizar-se dados de laboratório, é fundamental a checagem cuidadosa de quais parâmetros de desgaste são predominantes para a escolha do tipo de ensaio a ser utilizado.

Em casos onde haja predominância de um fator influenciando o desgaste, estes ensaios permitem bons estudos de otimização de materiais para corpos moedores. Onde ocorrem vários fatores, fica evidente a necessidade de comprovação dos resultados em situação real.

Outros métodos laboratoriais buscam medidas de características do material a ser moído.

A abrasividade de um material é frequentemente determinada através de ensaios envolvendo o material abrasivo e o metal que sofrerá a abrasão. O mais largamente empregado consiste na determinação do ÍNDICE DE ABRASÃO do material a ser moído, com o qual pode-se prever o consumo metálico referente a um corpo moedor ou revestimento. Esta metodologia, desenvolvida por Bond é descrita por Austin et al.⁴, sendo encontrada em praticamente todos os manuais de moagem.

Estes autores, contudo, advertem para alguns inconvenientes destes ensaios, entre eles, que as fórmulas de Bond não consideram variações nas propriedades corrosivas do meio quando em moagem a úmido. Estes ensaios, de acordo com os autores não fornecem informações sobre a lei de desgaste do corpo moedor.

Os métodos descritos até o momento apresentam o inconveniente de lidarem com dados laboratoriais que não conseguem re-

produzir plenamente as condições reais, ou a utilização de cargas completas que demandam tempo, altos custos e riscos operacionais.

Uma alternativa atraente, segundo Vermeulen et al.¹, é a colocação, junto à carga moedora em uso, de uma quantidade de amostras marcadas, as quais são removidas do moinho, para análise, em intervalos regulares.

Este tipo de ensaio, denominado ENSAIO COM AMOSTRAS MARCADAS, é largamente utilizado, tendo sido o método empregado nos trabalhos de Norman et al.¹¹, Austin et al.⁴, Azzaroni³, Wesner et al.¹², Vermeulen et al.¹ e vários outros autores.

Vermeulen et al.¹ afirmam que este tipo de ensaio permite prever com boa precisão o consumo de bolas em um moinho.

Vermeulen⁵ contudo, afirma em outro trabalho que para estabelecer a qual teoria de desgaste, SUPERFICIAL ou VOLUMÉTRICA a bola obedece, a determinação e utilização do parâmetro Δ de Austin et al. exigem ensaios de longa duração. Ensaios com bolas marcadas com pouco tempo de experimentação, não teriam a sistemática aplicável.

Menácho⁶ contesta a afirmação acima, garantindo que este tipo de ensaio permite, em muitos casos, a determinação do referido parâmetro mesmo em experimentações de curta duração.

Divergências a parte, os ensaios com amostras marcadas, têm servido de base para a maioria dos estudos do comportamento dos corpos moedores, principalmente, frente ao desgaste.

2.3- ENSAIOS COM AMOSTRAS MARCADAS

Uma das variações destes ensaios diz respeito ao tipo de marcação das amostras a serem avaliadas.

De modo geral, conforme descrito por Fuhrmann¹⁰, a marcação pode ser através de ativação radioativa das amostras ou mecânica.

A marcação mecânica mais comumente utilizada é a execução de pequeno furo através de broca quando o corpo já está acabado ou pela utilização de "macho" durante a fundição. Neste último caso, Sinatora et al.¹³, analisando um ensaio com bolas marcadas realizado na FOSFÉRTIL e acompanhado por eles, observaram problemas originados na marcação das bolas durante o processo de fundição.

A marcação deve ser realizada com especial cuidado para evitar que micro-trincas ou qualquer outro tipo de defeito, imperceptível a primeira vista, ocorra e durante o ensaio evolua para quebras ou alterações geométricas, invalidando a observação.

Wesner et al.¹², objetivando determinar o efeito de certas propriedades físicas e químicas na resistência ao desgaste de bolas, descrevem ensaios com bolas marcadas através de radioatividade. Por trabalharem com vários tipos de bolas simultaneamente, cada grupo recebeu um nível diferente de radiação, de modo a permitir reconhecer as amostras irradi-

adas mais fracamente, enquanto o nível mais elevado se situasse dentro de limites seguros para o manuseio.

Uma terceira forma de identificação do corpo moedor a ser avaliado é a utilização de diâmetro maior que o "top size" da carga, conforme Maia et al.⁹ e Barros et al.⁸. Este método, contudo, mesmo se considerar que o desgaste independe do diâmetro, não é o mais adequado já que o corpo moedor em avaliação trabalha em condições diferenciadas em relação aos diâmetros da carga, principalmente devido à geometria dos revestimentos, podendo influenciar nos resultados.

Os procedimentos adotados neste tipo de ensaio consistem sempre na colocação de pequena amostra do material que se deseja conhecer em meio à carga moedora existente, com acompanhamento em sucessivos períodos de controle.

Certas dificuldades são frequentemente associadas com a interpretação dos resultados. Entre elas, Vermeulen et al.¹ citam:

- . O consumo de bolas decresce sistematicamente com o tempo (ou massa de material moído) de tal maneira a sugerir que o equilíbrio não é alcançado.
- . Bolas marcadas, quando do mesmo tipo das componentes da carga moedora, se mostram mais duráveis que estas. Este fenômeno é denominado pelos autores de "anomalia da bola marcada".

Esta anomalia, segundo os autores, se deve ao fato de em ensaios com amostras marcadas considerar-se apenas o consumo

devido ao desgaste, enquanto numa operação real, além do desgaste, ocorrem lascamentos, quebras e bolas que deixam o moinho por atingirem o tamanho de descarte.

Outros autores, como Azzaroni³, afirmam que os resultados de ensaios com amostras marcadas se reproduzem industrialmente com desvios da ordem de 7%.

Apesar de toda discussão sobre sua validade, o ensaio com amostras marcadas é a ferramenta mais utilizada para o conhecimento de um corpo moedor.

2.4- MECANISMOS DE DESGASTE

Fragmentos de informações dispersos pela bibliografia pesquisa permitem concluir que o consumo de corpos moedores é influenciado por vários fatores que podem ser classificados como:

- .inerentes ao minério - variações de textura, grau de metamorfismo e intemperismo, composição química, dureza, granulometria, tenacidade, composição mineralógica;
- .rotinas de operação - grau de enchimento do moinho, número de paradas, percentagem de sólidos da polpa, corte dos ciclones de classificação, plano de reposição, tempo de operação em vazio ou com água, etc;
- .intrínsecos ao corpo moedor - resistência à abrasão, corrosão e impacto, qualidade de fundição, tratamento térmico, dureza, composição química, etc;
- .características do moinho - dimensões, velocidade, tipo de revestimento, etc.

Malghan¹⁴ atribui o consumo de corpos moedores a perdas de massa devidas a efeitos mecânicos como impacto, abrasão, atrição, fadiga e/ou químicos como a corrosão. O desgaste ocorre como um descascamento das superfícies metálicas a uma taxa constante ao longo do tempo, independente do diâmetro da bola. As perdas de massa estão ligadas a parâmetros envolvendo todo o sistema de moagem como:

- . composição dos materiais envolvidos, incluindo corpos moedores, revestimentos e minério;

- . parâmetros físicos como os diâmetros do corpo moedor e do moinho, tamanho das partículas da alimentação e do produto, velocidade do moinho, dureza e abrasividade do minério, temperatura da polpa e perfil dos revestimentos;
- . parâmetros químicos como composição da água, pH e potencial de oxidação da polpa.

Ainda segundo Malghan o desgaste mecânico teria influência dos dois primeiros parâmetros enquanto, o desgaste por corrosão sofre influência dos três parâmetros simultaneamente.

Tolēy et al.¹⁵ citam estudos realizados por outros autores onde acima de 50% do consumo metálico numa moagem a úmido é atribuído à corrosão. Nestes casos, a elevada superfície da carga moedora, a abrasão constante realizando o trabalho de remoção de "filmes" protetores das superfícies metálicas, são os elementos necessários para um processo de corrosão ativa.

De acordo com Albertiñ et al.¹⁶, na indústria de mineração o desgaste mecânico de maior incidência é o do tipo abrasivo, onde há o envolvimento de sulcamentos aleatórios da superfície metálica por partículas abrasivas do minério. Neste trabalho os autores citam que a classificação mais adotada na literatura para o desgaste abrasivo é a de Avery, que o classifica em três tipos fundamentais:

- . "Gouging Abrasion" ou sulcamento, onde partículas grossas são removidas da superfície metálica pela ação de material abrasivo grosso;

- . "High Stress Grinding Abrasion" ou esmerilhamento, ocorre durante a progressiva fragmentação ou moagem de abrasivo de tamanho inicialmente pequeno. As pressões localizadas são elevadas, resultando em riscamentos microscópicos combinados com micro-trincas da superfície metálica; e
- . "Erosion and Low-Stress Scetchings", resulta no arranhamento da superfície metálica pelo movimento de partículas duras sobre ela.

Estes autores afirmam que na moagem de bolas predomina o desgaste por esmerilhamento, enquanto na moagem de barras ocorrem os três mecanismos em proporções equilibradas.

A qualidade de fabricação do corpo moedor é de fundamental importância para a eficiência de uma carga moedora. Sinatora et al.¹⁷ citam que os defeitos de fabricação devem ser tratados como constituintes da macro e da micro-estrutura do material.

As bolas fundidas, segundo eles, apresentam inúmeros defeitos de fabricação tais como "micro-rechupes", micro-trincas, desvios dimensionais e geométricos, inclusão de materiais como areia e escória, etc, que quando submetidas a esforços serão levadas a uma drástica redução de vida útil.

O desgaste irregular de bolas, usualmente chamado de deformação, é uma ocorrência normal e tolerável dentro de certos limites numa carga moedora. Este tipo de desgaste, causador da perda de esfericidade da bola, pode ser devido a problemas operacionais como movimentação inadequada da carga moedora em

em revestimentos gastos ou inadequados, distribuição/dimensionamento incorretos da carga, sub-alimentação do moinho, etc.

Os autores observaram, no entanto, que problemas de fabricação foram os principais responsáveis pelo desgaste irregular em algumas bolas ensaiadas na FOSFÉRTIL. Segundo eles, uma vez que as bolas são submetidas às condições de trabalho, os pequenos defeitos se ampliam, assumindo proporções muitas vezes extremamente danosas.

Disto, "micro-rechupes", defeitos de moldagem, quebra irregular da junção bola-bola na desmoldagem, levarão ao desgaste irregular, com perda da esfericidade pouco tempo após o início de trabalho.

2.5 - MATERIAIS METÁLICOS PARA FABRICAÇÃO DE CORPOS MOEDORES

Este capítulo pretende descrever superficialmente os materiais utilizados na fabricação de corpos moedores, não tendo a pretensão de esgotar o assunto, mas apenas repassar aspectos genéricos.

Segundo Howard¹⁸, por volta de 1900, a moagem de minérios era feita principalmente por moinhos de bolas relativamente pequenos que utilizavam bolas de 60 a 100 mm de diâmetro.

Nesta época era usual em usinas de grande porte a existência de uma fundição onde se fabricavam bolas, componentes de bombas, revestimentos de moinhos, etc.

A composição dos fundidos era função da sucata e matérias-primas disponíveis. O tamanho das bolas em consequência dos processos de fundição existentes, frequentemente eram de tamanho maior que o necessário.

Estudos buscando a melhoria dos corpos moedores, como os de Norman e al.¹¹ foram desenvolvidos e a utilização de elementos de liga levando à melhoria dos aços até então utilizados tornou-se rotineira.

Novos materiais passaram a ser utilizados na fabricação de bolas. Em 1917 foram patenteados nos E.U.A. ligas de ferro fundido branco para aplicação em revestimentos de moinhos.

Albertin et al.¹⁶ fazem uma evolução histórica da utilização de ferros fundidos brancos na fabricação de bolas e revestimentos para moinhos.

De acordo com as pesquisas destes autores, a partir de 1930 iniciou-se o uso de ligas Fe-Cr-C-Mo, empregadas indistintamente em matriz martensítica ou austenítica.

Empresas como Abex Co. e Climax dos E.U.A., Magotteaux na Bélgica, Bradley & Foster na Inglaterra, se esforçaram em pesquisar ligas de ferro fundido alto cromo, com presença de molibdênio e outros metais.

Na década de 1960 estas ligas já eram amplamente utilizadas e em 1965 a ASTM estabeleceu norma para fabricação destes materiais.

Atualmente, além do ferro fundido branco alto cromo, aços martensíticos com presença de nióbio, vanádio e outros metais, utilizados na fabricação de bolas forjadas, têm sido os materiais metálicos de maior utilização na fabricação de bolas no Brasil e no mundo, conforme pode ser verificado na bibliografia pesquisada.

As barras de moinho, em geral são laminadas, fabricadas em aço carbono, eventualmente com adição de micro-elementos de liga como cromo e molibdênio, objetivando melhoria do desempenho.

Cylpebs são fabricados no Brasil predominantemente em ferro-carbono, fundidos em coquilhas, eventualmente com adições de

de cromo e outros elementos de liga.

São encontrados também, no mercado, cylpebs em ligas bastante nobres, semelhantes àquelas usadas em bolas.

Tanto quanto a liga, o tratamento térmico do corpo moedor é de fundamental importância em seu desempenho.

Vários estudos^{11,14,16} têm sido desenvolvidos buscando composições químicas e tratamentos térmicos que levem a estruturas metalográficas mais apropriadas aos corpos moedores.

3- O COMPLEXO DE MINERAÇÃO DE TAPIRA

Como todos os ensaios foram desenvolvidos com o minério fosfático de Tapira, utilizando os moinhos da usina de concentração para beneficiamento deste minério, neste capítulo será feita uma breve descrição do complexo, do minério e do processo de concentração visando dar uma visão global da situação em que os ensaios foram realizados.

Situado no município de Tapira-MG, no oeste do estado, pertencente ao Vale do Rio Paranaíba, a aproximadamente 35Km a sudeste da cidade de Araxá, este complexo de mineração, pertencente à FOSFÉRTIL-Fertilizantes Fosfatados S.A., GRUPO FERTIFÓS, engloba atividades de lavra a céu aberto, beneficiamento do minério, mineroduto e instalações de suporte.

O objetivo é a produção de concentrado fosfático com 35,5% de P_2O_5 a partir do minério com teor de P_2O_5 da ordem de 8%.

O concentrado produzido se destina ao suprimento do Complexo Industrial de Uberaba para fabricação de fertilizantes, sendo transportado sob a forma de polpa via mineroduto com extensão aproximada de 120Km.

A chaminé alcalina onde está situada a mina possui aproximadamente 6Km de diâmetro, tendo idade Cretácea Superior (70Ma) intrusiva em rochas Pré-Cambrianas do Grupo Canastra (1.100 Ma). A rocha encaixante é formada por metassedimentos do Gru

po Canastra, xistos e quartzitos.

A rocha fresca é composta em cêrca de 80% de ultrabásicas , sendo 90% de piroxenitos e 10% de dunitos. Os 20% restantes são compostos por sienitos, traquitos, carbonatitos e silexitos.

3.1- O MINÉRIO

A tipologia mineral da chaminé alcalina de Tapira apresenta minérios friáveis derivados dos processos intempéricos, caracterizados por possuir apatita e minerais de ganga oxidados e silicatados. Estão presentes também minérios granulados caracterizados por piroxenitos silicificados em diversos graus, apresentando apatitas associadas a gangas carbonatadas e associações minerais típicas apatita-silicatos, apatita-carbonatos, etc.

Estas diferenças de tipologias minerais levaram à diferenciação dos circuitos de moagem, específicos para minério friável e minério granulado, após os circuitos de britagem/peneiramento. As etapas subsequentes também são específicas para cada um dos dois tipos de minério.

Os minerais mais frequentes encontrados na mina são os seguintes:

Apatita	-	$\text{Ca}_5(\text{F,Cl,OH})(\text{PO}_4)$
Anatásio	-	TiO_2
Calcita	-	CaCO_3
Dolomita	-	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
Perovskita	-	CaTiO_3
Shorlomita	-	$\text{Ca}_3(\text{Al,Fe,Ti})_2((\text{Si,Ti})\text{O}_4)$
Vermiculita	-	$(\text{Mg,Fe})_3((\text{Si,Al})_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Flogopita	-	$\text{KMg}_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$
Biotita	-	$\text{K}(\text{Mg,Fe})_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$

Piroxênio	-	$Mg, Fe, Ca(SiO_3)$
Quartzo	-	SiO_2
Goethita	-	$HFeO_2$
Magnetita	-	Fe_3O_4
Diopsídio	-	$CaMg(Si_2O_6)$

A tabela 3.1 apresenta a composição mineralógica típica dos minérios friável e granulado e do "run of mine".

TABELA 3.1- COMPOSIÇÃO TÍPICA DO MINÉRIO DE FOSFATO

MINERAIS	FRIÁVEL	GRANULADO	ROM
Apatita	21	16	20
Magnetita	22	19	21
Calcita/Dolomita	2	21	7
Micas	22	6	18
Quartzo	10	21	13
Diopsídio	5	5	5
Perovskita/anatásio	12	10	11
Opacos/outros	6	2	5

3.2- O PROCESSO

O processo de concentração do minério fosfático da FOSFÉRTIL engloba nas etapas de preparação a britagem primária, em britador giratório, ainda na mina.

O produto desta britagem é homogeneizado em pilhas prismáticas pelo método "chevron", são duas pilhas de aproximadamente 250mil toneladas cada, retomadas individualmente. O transporte do minério da britagem primária até o pátio de homogeneização é feito por transportadores de corrêia.

A retomada da pilha é feita por retomadora de caçamba, a uma taxa média de 1.600 t/h de minério com umidade próxima, em média, a 12%.

O minério retomado alimenta uma britagem secundária, com britador cônico, associado a peneiras vibratórias. Já neste ponto, o processo é feito a úmido devido à plasticidade do minério.

O produto da britagem/peneiramento secundário alimenta dois circuitos fechados com carga circulante única, de britagem/peneiramento terciários, também com britadores cônicos.

Nesta etapa são obtidos dois produtos, o primeiro denominado minério granulado, com granulometria teórica entre 7 e 28mm, que, através de transportadores de corrêia alimenta o circu

to de moagem granulada.

O segundo produto, chamado minério friável, corresponde ao "undersize" das peneiras de 7mm e, via bombeamento, alimenta o circuito de moagem friável.

O minério granulada alimenta dois moinhos de barras de 3,3 x 6,1 m (11'x20') que funcionam em paralelo. Os produtos destes moinhos se juntam e alimentam a separação magnética de baixo campo com separadores tipo tambor, onde a fração magnética é descartada e a não-magnética alimenta uma classificação em ciclones de 26" cujo "underflow" fecha o circuito do moinho de bolas de 4,1 x 6,1 m (13 1/2'x20').

O "overflow" alimenta a bateria de 1ªdeslamagem, com ciclones de 26". O "underflow" desta etapa, após atricionado em células mecânicas em presença de soda cáustica, alimenta uma bateria de 3ªdeslamagem, com ciclones de 15", cujo "overflow" juntamente com o "overflow" da 1ªdeslamagem alimentam a 2ªdeslamagem com ciclones de 6", cujo "overflow" constitui as lamas do circuito, sendo descartado.

O "underflow" desta etapa, juntamente com o "underflow" da etapa de 3ª deslamagem constituem, após condicionamento com amido de milho gelatinizado, a alimentação nova do circuito de flotação de granulada, desenvolvida em células mecânicas convencionais, em estágios "rougher", "scavenger", "cleaner" e "recleaner", sendo o flutuado deste último estágio o concentrado final do circuito.

O minério friável, alimenta quatro linhas de moagem em para-

lelo, sendo que normalmente opera-se com apenas três.

A partir de uma única caixa acoplada a quatro bombas, onde é feita a distribuição de massa para as linhas de moagem, cada bomba alimenta uma pré-classificação em ciclones de 26", sendo que o "underflow" alimenta um moinho de bolas de 4,1x6,1m. O "overflow" é enviado para a 2ª deslamagem do circuito, com ciclones de 6", sendo o "overflow" descartado por se tratar de lamas. O "underflow", juntamente com a descarga do moinho, são direcionados para a separação magnética de baixo campo, onde o produto magnético é descartado. O não magnético alimenta uma classificação com ciclones de 26" cujo "underflow" fecha circuito alimentando o moinho.

O "overflow" da classificação, produto final da moagem, alimenta a 1ª deslamagem, com ciclones de 26". Já nesta etapa os produtos da moagem se juntam dois a dois, formando duas linhas de deslamagem.

O "underflow" da 1ª deslamagem, após atricionado em células mecânicas em presença de soda cáustica, é direcionado para a 3ª deslamagem, com ciclones de 15", cujo "underflow" após condicionamento com amido de milho gelatinizado constitui, juntamente com o produto da outra linha de deslamagem, a alimentação nova do circuito de flotação de grossos friável realizada nas etapas "rougher", "scavenger", "cleaner" e "recleaner" sendo o flutuado deste último estágio o concentrado final do circuito.

O "overflow" da 1ª deslamagem, juntamente com o "overflow" da

3ª deslamagem, alimentam a 4ª deslamagem, realizada em ciclos de 4", cujo "overflow" é descartado por se tratar de lamas.

O "underflow", após condicionado com amido de milho gelatinizado, juntamente com o da outra linha de deslamagem, constituiu-se na alimentação nova do circuito de flotação de finos friável, onde os estágios "rougher" e "scavenger" são realizados em células mecânicas convencionais, enquanto a etapa "cleaner" é feita em célula de coluna.

O concentrado da coluna alimenta a etapa "rougher" do circuito de grossos friável, juntamente com os demais produtos já citados.

Os afundados das etapas "scavenger" nos três circuitos são rejeitos finais da flotação.

Os concentrados finais dos circuitos de flotação de granulado e de grossos friável se juntam e são remoídos em dois moinhos, de 3 x 3 m (10'x10') e 3 x 4,9 m (10'x16'), que operam em circuito fechado com ciclones, cujo produto final apresenta de 4 a 8% da massa retida em 100 mesh tyler, para adequação ao transporte por mineroduto.

Este produto, após espessado em operação conjunta espessador /ciclone, é enviado para tanques de homogeneização que alimentam o mineroduto.

Os produtos da usina constituem-se em média por 15% de rejeito magnético, 20% de lamas, 14% de concentrado fosfático e

51% de rejeitos de flotação.

Os reagentes utilizados na flotação são o amido de milho gelatinizado com soda cáustica como depressor, o "tall oil" e óleos vegetais como de arroz e soja+uva saponificados com soda cáustica, além de coletores sintéticos. O regulador de pH é a própria soda cáustica. Não são utilizados aditivos de moagem.

As figuras 3.1 e 3.2 mostram fluxogramas simplificados dos circuitos de tratamento da usina da FOSFÉRTIL.

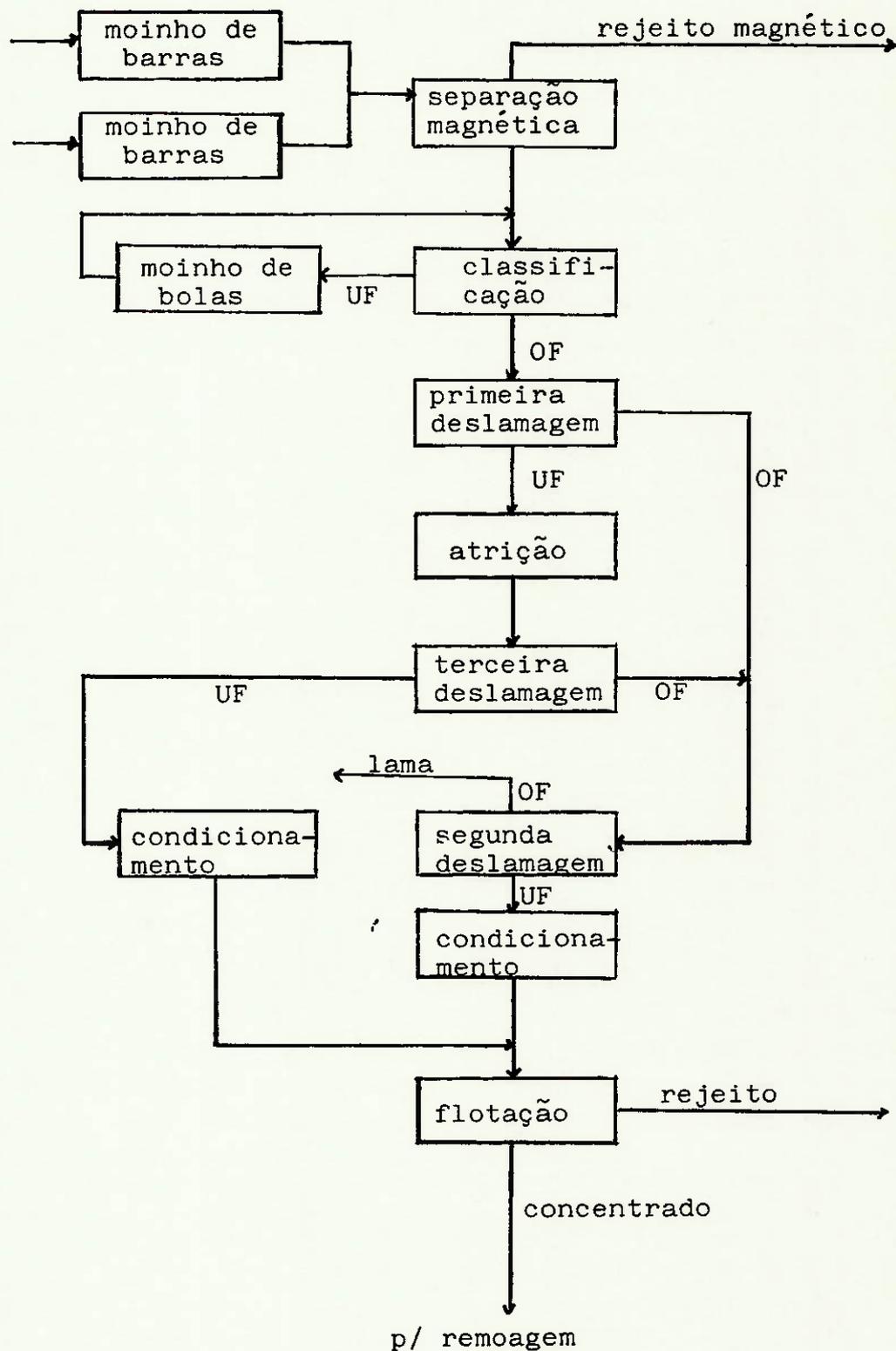


Fig. 3.1 Circuito do minério granulado

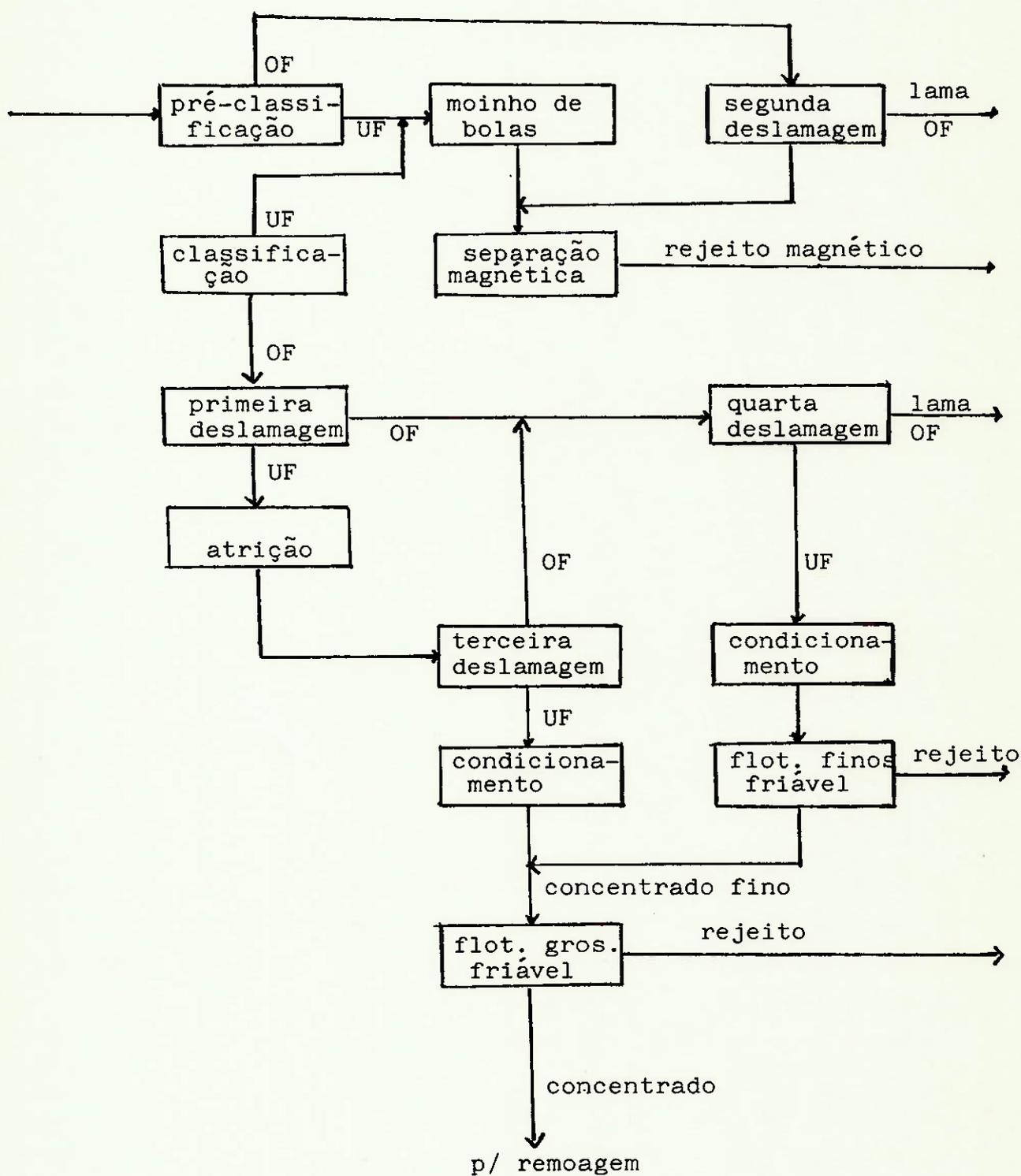


Fig. 3.2 Circuito do minério friável

4- MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os tipos de ensaios e os moinhos onde estes foram realizados, as metodologias utilizadas nos ensaios e no cálculo do consumo.

É feita uma descrição dos corpos moedores ensaiados, sendo que as composições químicas apresentadas, em sua maioria foram informadas pelos próprios fabricantes, cujos nomes são omitidos para evitar a exploração comercial deste trabalho.

4.1- TIPOS DE ENSAIOS

Os vários ensaios já realizados na FOSFÉRTIL, utilizaram a colocação de uma quantidade relativamente pequena de corpos moedores junto à carga moedora usual, com acompanhamento periódico de seu desempenho. Os ensaios, além de fornecerem o consumo do corpo moedor, por apresentarem grande sensibilidade, permitem identificar problemas de fabricação caso existam.

O lote em avaliação deve possuir características que permitam sua fácil identificação no interior do moinho.

As condições operacionais do circuito de moagem, onde se realiza o ensaio, também influenciam os resultados.

Disto, o moinho escolhido para o ensaio deve apresentar boa estabilidade quanto à alimentação de minério a ser moído e ao consumo energético.

A carga moedora deve estar equilibrada e os revestimentos em boas condições para sua movimentação.

É recomendável a não realização de ensaios com revestimentos recentemente substituídos ou em vias de substituição. A não realização de trocas de revestimentos durante o ensaio deve estar assegurada.

A experiência da FOSFÉRTIL relatada por Barros et al.¹⁹, mostra uma enorme influência do item revestimento no comportamento da carga moedora.

O tamanho do lote a ser avaliado é função, entre outros fatores, do grau de dificuldade na coleta de amostras em meio à carga moedora. Estando, portanto, fortemente ligado às características da instalação de moagem.

Na FOSFÉRTIL são utilizados lotes de 1500 a 2.000 Kg para ensaios com bolas ou cylpebs, sendo estes últimos corpos moedores tronco-cônicos, enquanto para ensaios com barras são utilizados lotes mínimos de 12.000 Kg, correspondendo a aproximadamente 40 unidades.

Para este trabalho foram selecionados quatro grupos de ensaios de avaliação, obedecendo como critérios de seleção o tipo de corpo moedor, a época e condições operacionais em que foram realizados e a forma de identificação adotada. Os grupos são os seguintes:

GRUPO 1: bolas com mesmo diâmetro de reposição, marcadas com furos de profundidade mínima de 10 mm e diâmetro de 6 mm. São comparados três tipos de bolas com variações quanto a composição química e tratamento térmico.

GRUPO 2: bolas identificadas através do diâmetro superior ao de reposição. São descritos dois ensaios com bolas de composições químicas muito próximas e resultados de desempenho sensivelmente diferentes.

GRUPO 3: barras laminadas em aço SAE 1095, marcadas através

de furo em uma das extremidades com profundidade de 20 mm e diâmetro aproximado de 10 mm. São descritos ensaios com dois tipos de barras diferentes quanto à composição química.

GRUPO 4: cylpebs coquilhados em ferro fundido de baixa liga. São avaliados os desempenhos de dois tipos de cylpebs com diferentes participações de cromo e outros elementos. Vale ressaltar que os ensaios foram realizados colocando-se os lotes em meio à carga de bolas, já que não havia moinho com carga de cylpebs e o objetivo era justamente avaliar a resistência deste tipo de corpo moedor nas condições mais severas possíveis.

Não é apresentado nenhum ensaio utilizando como identificação das amostras por traço radioativo devido às dificuldades inerentes a este método.

4.2- MOINHOS UTILIZADOS

Os ensaios com bolas e cylpebs foram realizados em moinhos tubulares de 4,1 x 6,1 m (13 1/2 x 20 ft). A alimentação destes moinhos é feita por sistema de "spout feeder" e a descarga por diafragma de nível baixo, fabricado em borracha e com área livre total de 0,84 m². Estes moinhos trabalham a 15,9 rpm, correspondendo a 75% da velocidade crítica.

Utilizam motores de 1850 KW, acionamento por coroa/pinhão e acoplamento por embreagem. A potência de trabalho situa-se próxima a 1750 KW.

Os revestimentos do corpo, fabricados em ferro fundido branco alto cromo, apresentam perfil em onda dupla com topo arredondado semelhante ao mostrado na figura 4.1.

Nestes moinhos é cominuído o minério friável que é alimentado em forma de polpa a 70% de sólidos em peso e pH próximo a 8. A alimentação do moinho apresenta d80 de 2.500 µm e WI de Bond entre 10 e 12 KWh/st. A temperatura da polpa na descarga do moinho é aproximadamente 40°C. O produto da moagem ("overflow" da classificação) apresenta d80 de 210 µm.

A taxa de alimentação situa-se na faixa de 300 a 350 t/h, e uma carga circulante de aproximadamente 150%. O circuito é fechado com ciclones de 26", apex de 5 1/2", vortex de 10"

e pressão de trabalho de 0,5 Kgf/cm²

As cargas de bolas destes moinhos são de 140 t com a seguinte distribuição de tamanhos:

50 mm - 40%

40 mm - 45%

30 mm - 15%

A reposição é feita com bolas de 50 mm e por vezes, quando se faz necessária correção, utiliza-se bolas de 40 mm.

Em situação de equilíbrio a carga moedora evolui para a seguinte distribuição média:

50 mm - 3%

40 mm - 38%

30 mm - 26%

25 mm - 22%

20 mm - 9%

15 mm - 2%

Após desgastadas, as bolas são descartadas do moinho através das grelhas, com diâmetro final próximo a 15 mm, já bastante deformadas pelo desgaste irregular.

O grau de enchimento destes moinhos situa-se na faixa de 38 a 40% do volume interno.

Os ensaios realizados com barras utilizaram moinhos de 3,3 x 6,1 m (11 x 20 ft) com motor síncrono de 1100 KW e potência de trabalho da ordem de 750 KW, acionamento por coroa/pinhão e acoplamento por embreagem pneumática. A alimentação é feita pelo sistema "spout feeder", sendo a descarga por "overflow".

A velocidade de operação destes moinhos é de 15,7 rpm, correspondendo a 68% da velocidade crítica.

Os revestimentos do corpo são também fabricados em ferro fundido branco alto cromo, em perfil onda simples semelhante ao mostrado na figura 4.2.

Estes moinhos são responsáveis pela moagem primária do minério granulado, que é alimentado bitolado na faixa 7 a 28mm, com d80 médio de 20 mm. O produto moído apresenta na descarga do moinho de 1,2 mm. O produto destes moinhos alimenta a separação magnética, cujo produto não magnético será moído no moinho de bolas do circuito.

A taxa de alimentação dos moinhos de barras oscila entre 190/220 t/h por moinho, função da participação do minério granulado na alimentação da usina.

A carga moedora utilizada é da ordem de 110 t com a seguinte distribuição:

90 mm	- 23%
76 mm	- 36%
63 mm	- 25%
50 mm	- 16%

Para este nível de carga, o grau de enchimento dos moinhos situa-se na faixa de 36 a 38% do volume interno.

A reposição é feita com barras de 90 mm de diâmetro e 6.020 mm de comprimento. As barras, ao atingirem o diâmetro de a-

proximadamente 38 mm, se quebram e são expelidas do moinho juntamente com a polpa. Diferente da reposição de bolas que se faz com o moinho em operação, a reposição de barras, por implicar em parada do equipamento, é feita duas vezes por semana. Desta forma, as cargas de barras sofrem oscilações constantes de quantidade e distribuição, não atingindo o equilíbrio desejável.

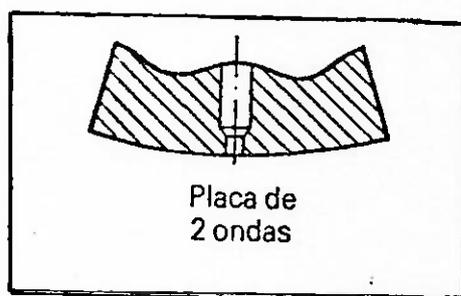


fig. 4.1 Perfil em onda dupla semelhante ao utilizado nos moinhos de bolas.

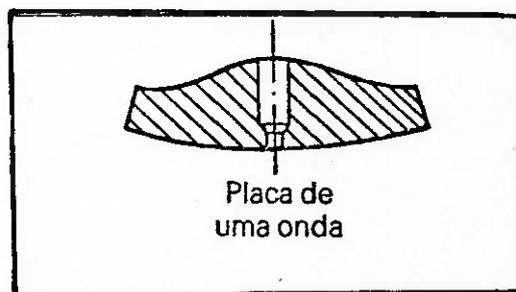


fig. 4.2 Perfil em onda simples semelhante ao utilizado nos moinhos de barras.

4.3- METODOLOGIA DOS ENSAIOS

4.3.1- ENSAIOS COM BOLAS E CYLPEBS

Devido às grandes dimensões dos moinhos da FOSFÉRTIL e à ausência de motor auxiliar para giro lento, o que dificulta a localização e coleta de amostras no interior do moinho, o lote mínimo que se obteve após alguns ensaios é de 2.000 Kg de bolas ou cylpebs.

Imediatamente após o recebimento do lote é feita uma inspeção visual e coleta de aproximadamente 50 unidades que são limpas para retirada de óleo, resíduos de oxidação e de fundição. Estas amostras são pesadas em balança com precisão de 0,01g, cujo peso médio é adotado como peso inicial do corpo moedor.

Conhecidos os pesos individuais, são feitas análises estatísticas quanto a desvios, dispersões, etc., que indicarão o grau de homogeneidade do lote.

Algumas unidades são separadas para testemunho e realização de análises que se fizerem necessárias.

Nova análise visual é realizada, por vezes com auxílio de lupa, para identificação de possíveis defeitos de fabricação.

Seleciona-se um mínimo de 5 unidades para medição do volume por deslocamento de líquido.

Uma vez conhecidos o peso médio e o volume médio, calcula-se o diâmetro médio que passará a ser adotado como o diâmetro inicial da bola.

O interior do moinho onde se realizará o teste é inspecionado para verificação de suas condições gerais. Neste ponto são anotados os valores dos totalizadores de energia consumida, horas de operação e massa de minério alimentado. A seguir todo o lote é colocado no moinho de uma única vez.

A partir daí o moinho entra em operação normal e periodicamente são feitas paradas quando inspeciona-se seu interior, coleta-se amostras que são pesadas, observadas visualmente e, se necessário, submetidas a ensaios específicos como medição de dureza superficial, análise visual do interior após serradas, etc. Algumas unidades são guardadas como testemunho e as demais retornam ao moinho.

Conhecido o peso médio das unidades coletadas, calcula-se o diâmetro médio, cuja evolução passa a ser acompanhada para o cálculo do desgaste.

Nestas inspeções periódicas, são avaliadas situações do corpo moedor quanto a lascamentos, trincas, quebras e desgaste irregular.

O ensaio, caso não ocorra nenhuma anormalidade, segue em desenvolvimento por um período mínimo de 2.500 horas ou até as amostras não puderem mais ser identificadas.

No caso de cylpebs, o procedimento é basicamente o mesmo, sendo que a duração do ensaio oscila em torno de 1.000 horas, uma vez que sua durabilidade é menor devido à qualidade inferior dos tipos testados.

Durante o ensaio a reposição de bolas é feita normalmente, conforme o plano de reposição previsto para o moinho.

4.3.2- ENSAIOS COM BARRAS

Para possibilitar a localização das barras em avaliação no interior do moinho, verificou-se que a quantidade mínima é de 12.000 Kg.

Antes da colocação no moinho, o lote é inspecionado visualmente e, com auxílio de paquímetro, trena e régua metálica, são aferidos o diâmetro, comprimento, ovalização e empenamento.

Pela dificuldade de manuseio, cada barra pesa aproximadamente 300 Kg, o peso inicial considerado é o peso médio do carregamento verificado em balança rodoviária, com todas as imprecisões inerentes à falta de controle desta pesagem.

Eventualmente, algumas barras são separadas e, com o auxílio de serra mecânica, retira-se um pequeno fragmento para análises e ensaios.

As barras são colocadas de uma única vez no moinho com o topo furado virado para a descarga com a finalidade de facilitar sua localização.

Periodicamente o moinho é parado e as barras metálicas têm o diâmetro medido em três pontos ao longo do comprimento ou seja, a um, três e cinco metros. O diâmetro médio de cada barra obtido pela média ponderada destas três medidas, uti

lizando como ponderador para a medida central o valor três e um para as outras duas, já que o desgaste é diferenciado ao longo do comprimento, sendo mais acentuado nas extremidades.

O ensaio só é dado como encerrado quando ocorre a quebra das barras. Neste momento fragmentos descartados do moinho com vestígios do furo de identificação são localizados, permitindo não só a confirmação da quebra, bem como conferir em que diâmetro ela ocorreu.

A quebra da barra ao atingir o diâmetro aproximado de 38 mm é de suma importância, para o caso da FOSFÉRTIL, uma vez que a partir desta dimensão ela tende a empenar, elevando os riscos de "engaiolamento".

4.3.3- CÁLCULO DO CONSUMO

Inicialmente faz-se a transformação dos dados obtidos em ensaio com um diâmetro inicial qualquer para o diâmetro máximo usado na reposição.

Para se ter uma melhor sensibilidade do ensaio plota-se em gráfico a evolução do diâmetro versus a variável desejada, extrapolando a reta encontrada para os demais diâmetros da carga moedora equilibrada (fig. 4.3).

Com os dados do ensaio, através de regressão linear, encontra-se a equação representativa da lei da evolução do diâmetro em função do tempo, produção e consumo energético.

Estipula-se em que ponto deve ser levantado o consumo, neste trabalho são utilizadas 2.500 horas para bolas, 1.000 horas para cylpebs e 1.500 horas para barras.

Determina-se o diâmetro do ponto escolhido, aqui chamado diâmetro residual, verifica-se pelas equações os valores correspondentes de produção e consumo energético.

Determina-se a carga moedora residual, ou seja, a remanescente após o tempo de operação estipulado, considerando que não houve recarga no período.

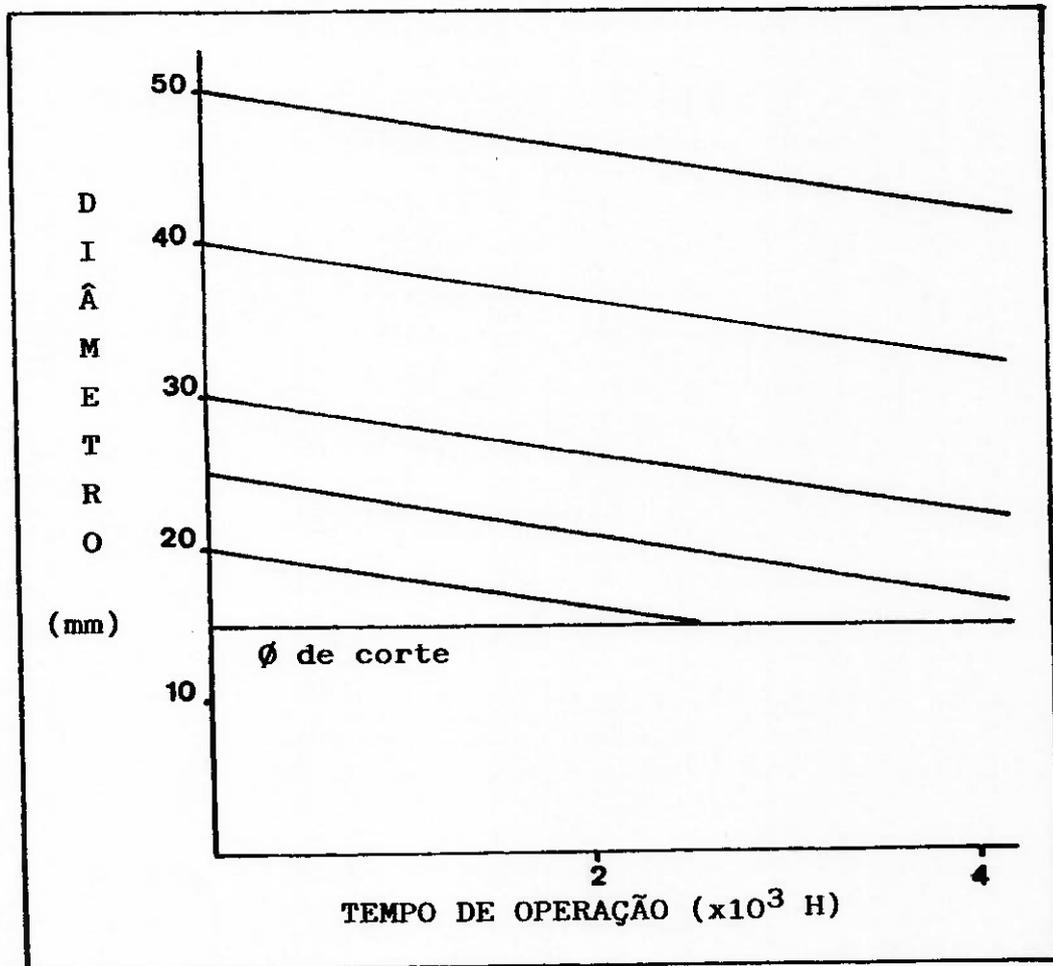


fig. 4.3 Extrapolação dos resultados de ensaio para os demais diâmetros componentes da carga moedora

Por diferença entre a carga inicial e a residual, obtém-se a massa metálica consumida, que ao ser dividida pela produção ou pelo consumo energético, fornece os consumos específicos em massa metálica por tonelada de minério moído (g/t) ou por unidade de energia consumida (g/KWh).

Como exemplo, considerando-se um ensaio realizado com bola de diâmetro inicial 50 mm que, ao atingir 2.500 horas de operação apresentou um diâmetro residual de 41 mm, tendo sido moídas 750.000 t de minério e consumidos 4.375.000 KWh, o consumo obtido neste ensaio será:

Ø inicial	-	carga inicial	-	Ø residual	-	carga residual
50 mm	-	4.200 Kg	-	41 mm	-	2.315 Kg
40 mm	-	53.200 Kg	-	31 mm	-	24.763 Kg
30 mm	-	36.400 Kg	-	21 mm	-	12.485 Kg
25 mm	-	30.800 Kg	-	16 mm	-	8.074 Kg
20 mm	-	12.600 Kg	-	11 mm	-	0
15 mm	-	<u>2.800 Kg</u>	-	6 mm	-	<u>0</u>
		140.000 Kg				47.637 Kg

Cálculo da carga residual = $\left(\frac{\text{Ø residual}^3}{\text{Ø inicial}^3}\right) \times$
carga inicial no diâmetro

Massa metálica consumida = carga inicial - carga residual
= 140.000 - 47.637 = 92.363 Kg

Consumos específicos:

- . em função da produção = $(92.363/780.000) \times 1.000 = 118,4$ g/t
- . em função do cons. en. = $(92.363/4.375.000) \times 1.000 = 21,1$ g/KWh.

4.4- DESCRIÇÃO DOS CORPOS MOEDORES ENSAIADOS

Neste ítem são apresentados os corpos moedores objetos de ensaios realizados na FOSFÉRTIL, de acordo com procedimentos descritos anteriormente.

No caso dos cylpebs o objetivo é avaliar sua resistência às condições de moagem da FOSFÉRTIL para possibilitar numa segunda etapa a avaliação de sua influência no processo de moagem, por se tratar de corpo moedor de menor custo.

4.4.1- BOLAS DO GRUPO 1

As três bolas utilizadas nestes ensaios foram fabricadas em ferro fundido branco alto cromo. Análises ao microscópio indicaram estrutura constituída por carbonetos de cromo muito bem distribuídos em matriz martensítica.

Os fabricantes não fornecem detalhes sobre o tratamento térmico utilizado por considerá-lo segredo industrial.

Sabe-se, contudo, que as bolas normalmente são revenidas e resfriadas em óleo ou ao ar. A bola A, contudo, foi submetida a um duplo tratamento térmico para compensar o menor conteúdo de cromo.

TABELA 4.1- COMPOSIÇÕES QUÍMICAS MÉDIAS E DUREZA SUPERFICIAL

ELEMENTO	COMPOSIÇÃO (%)		
	BOLA A	BOLA B	BOLA C
CARBONO	3,37	3,00	2,86
CROMO	12,50	20,10	20,03
FÓSFORO	0,054	0,033	0,030
ENXOFRE	0,027	0,007	0,020
SILÍCIO	0,83	0,75	0,61
MANGANÊS	0,44	0,22	0,42
MOLIBDÊNIO	0,02	-	0,72
DUREZA (HRc)	64/66	60/63	62/65

Em termos dimensionais, os três tipos de bolas apresentaram

desvios de esfericidade desprezíveis, indicando bom controle da moldagem durante a fabricação.

Também não foram encontrados defeitos superficiais em nenhuma das amostras.

As pesagens realizadas com amostras iniciais mostraram uniformidade muito grande nos três lotes, com destaque para a bola C, que apresentou um desvio padrão muito baixo em relação aos valores normalmente encontrados.

TABELA 4.2- MASSAS MÉDIAS, DESVIOS PADRÃO E DIÂMETROS

BOLA	MASSA (g)	DESVIO PADRÃO	DIÂMETRO (mm)
A	515,03	7,09	52,2
B	472,40	7,86	50,7
C	460,40	1,43	49,2

4.4.2- BOLAS DO GRUPO 2

Nestes ensaios foram usadas bolas com diâmetro de 70mm, fabricadas em ferro fundido branco alto cromo. As ligas utilizadas na fabricação destes dois tipos de bolas são bastante semelhantes em termos de conteúdo de cromo. Teoricamente, o tratamento térmico aplicado aos dois tipos de bolas foram iguais. No entanto, os valores de dureza obtidos são muito diferentes.

Análises realizadas em laboratórios metalúrgicos mostraram que a bola E apresenta uma matriz martensítica com carbonetos de cromo bem distribuídos. A bola D, entretanto, foi caracterizada como constituída por matriz martensítica com carbonetos secundários grosseiros e mal distribuídos, chegando a estarem ausentes em algumas regiões.

Estas informações sugeriram que, apesar do elevado teor de cromo, a bola D apresentaria desgaste elevado devido a estes problemas metalúrgicos e sobretudo à baixa dureza encontrada.

Os problemas verificados mostraram sérias deficiências de tratamento térmico que, além de alto consumo, poderiam levar a quebras, lascamentos, desgaste irregular, etc..

A análise visual realizada nos dois tipos de bolas antes do

início do ensaio não detectou problema algum com a bola E. Com relação à bola D, foram encontradas incrustações superficiais de areia e pequenos vazios, indicando possíveis problemas de vazamento e de moldagem.

TABELA 4.3- COMPOSIÇÕES QUÍMICAS MÉDIAS E DUREZA SUPERFICIAL

ELEMENTO	COMPOSIÇÃO (%)	
	BOLA D	BOLA E
CARBONO	2,35	2,84
CROMO	20,18	19,12
FÓSFORO	0,035	0,018
ENXOFRE	0,024	0,033
SILÍCIO	0,93	1,29
MANGANÊS	0,44	0,32
MOLIBDÊNIO	0,04	-
NÍQUEL	0,27	-
DUREZA (HRc)	57/60	61/63

Bolas de diâmetros mais elevados tendem a apresentar maiores variações de massa entre unidades. Contudo, o desvio padrão obtido na pesagem das bolas D foi o dobro do verificado nas bolas E. Este fato indica problemas de fabricação, evidenciando heterogeneidade do produto por possível deficiência na moldagem.

TABELA 4.4- MASSAS MÉDIAS, DESVIOS PADRÃO E DIÂMETROS.

BOLA	MASSA (g)	DESVIO	DIÂMETRO (mm)
D	1370,1	25,10	69,80
E	1490,0	13,22	71,45

As diferenças de qualidade verificadas entre estas duas bolas, como poderá ser visto no capítulo de resultados, ficaram bastante evidenciadas quando submetidas às condições de trabalho.

4.4.3- BARRAS DO GRUPO 3

Nestes ensaios foram utilizados dois tipos de barras lamina das em aço-carbono SAE 1095, com composições químicas seme lhantes, sendo que a barra B apresenta uma adição balancea da dos micro-elementos de liga cromo e molibdênio, visando a redução de consumo.

TABELA 4.5- COMPOSIÇÕES QUÍMICAS MÉDIAS E DUREZA SUPERFICIAL

ELEMENTO	COMPOSIÇÃO (%)	
	BARRA A	BARRA B
CARBONO	0,97	1,06
MANGANÊS	0,81	0,79
SILÍCIO	0,22	0,21
FÓSFORO	0,021	0,024
ENXOFRE	0,01	0,02
CROMO	0,05	0,39
MOLIBDÊNIO	0,02	0,08
NÍQUEL	0,01	0,02
DUREZA (HBN)	285	300

Observando a composição química dos dois tipos de barras, nota-se que os teores de cromo e molibdênio da barra A são unicamente residuais, oriundos da matéria prima utilizada, enquanto a barra B possui adições controladas destes elemen tos.

A estrutura metalográfica das duas barras ensaiadas indica uma normalização realizada, constituída basicamente por per_lita e cementita, estrutura esta típica dos aços-carbono.

A figura 4.4 apresenta uma micrografia típica, com ampliação de 100X, de uma barra de moinho semelhante às utilizadas nestes ensaios.

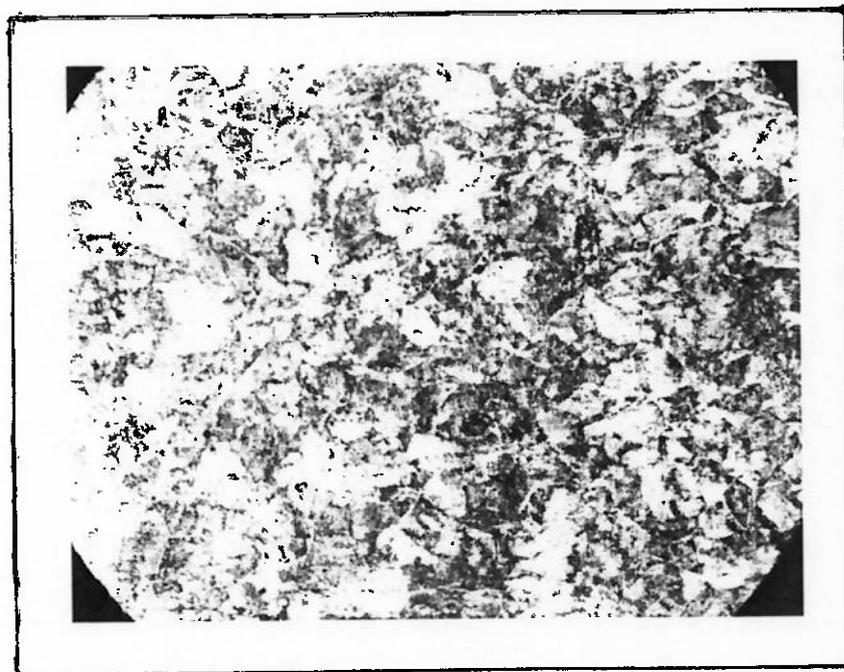


fig. 4.4 Micrografia típica de barras de moinho em aço-carbono.

4.4.4- CYLPEBS DO GRUPO 4

Em 1986 a FOSFÉRTIL realizou um teste industrial de carga completa com cylpebs coquilhados comuns, onde é utilizado como matéria prima o ferro gusa, cujos resultados se mostraram inviáveis devido ao consumo extremamente elevado e ocorrência de quebras.

A partir de 1990, passaram a ser realizados ensaios utilizando cylpebs de fabricação mais elaborada, com melhoria do processo de fabricação, especialmente no tocante a tempo de resfriamento e adições de cromo em baixo nível, buscando melhoramento da liga.

Os dois ensaios aqui apresentados mostram cylpebs com diferentes ligas, especialmente em termos do teor de cromo.

Os dois tipos avaliados apresentavam características superficiais muito semelhantes, chamando a atenção a presença de vazios superficiais, comuns neste tipo de fundidos.

As dimensões dos cylpebs avaliados, bem como os demais já ensaiados e não constantes neste trabalho, são de 50 x 50mm.

A tabela 4.6 apresenta as composições químicas médias dos dois cylpebs ensaiados, onde chama a atenção as diferenças de teores principalmente dos elementos cromo e manganês.

TABELA 4.6- COMPOSIÇÕES QUÍMICAS MÉDIAS E DUREZA SUPERFICIAL

ELEMENTO	COMPOSIÇÃO (%)	
	CYLPEB A	CYLPEB B
CARBONO	4,08	3,50
MANGANÊS	0,25	0,68
SILÍCIO	0,48	1,21
FÓSFORO	0,12	0,23
CROMO	2,09	0,48
ENXOFRE	0,013	0,020
DUREZA (HRc)	53	49

5- RESULTADOS OBTIDOS

Este capítulo descreve os resultados obtidos com os diversos grupos de corpos moedores ensaiados.

Para a apresentação gráfica dos resultados e equações obtidas por regressão linear, os diâmetros dos corpos moedores encontrados nos ensaios foram recalculados para um diâmetro inicial, no caso de bolas 50 mm, uma vez ser este o diâmetro de interesse, por se tratar do "top size" usual das cargas moedoras.

O diâmetro de corte indicado em algumas figuras corresponde ao diâmetro em que a bola ou cylpeb é expurgada pelas grelhas do moinho ou, quando se tratar de barras, o diâmetro em que deve ocorrer a quebra.

A boa qualidade do ensaio é indicada pelo coeficiente de correlação (cc), cujo valor quanto mais próximo da unidade indica também a melhor qualidade do corpo moedor.

O coeficiente de correlação foi calculado como:

$$cc = (\sum xy - (\sum x \sum y) / n) / ((\sum x^2 - (\sum x)^2 / n) (\sum y^2 - (\sum y)^2 / n))^{0,5}$$

onde: x = valor da abscissa
 y = valor da ordenada
 n = número de pares ordenados

5.1- RESULTADOS DOS ENSAIOS COM BOLAS DO GRUPO 1

A tabela 5.1 apresenta os dados referentes a cada período de controle dos ensaios com bolas deste grupo.

TABELA 5.1- CONTROLE DOS ENSAIOS COM BOLAS DO GRUPO 1

BOLA	1	2	3	4	5	6	7
A	início	-	-	-	515,0	52,2	50,0
	1º	783	224	1.266	478,5	50,9	48,7
	2º	1.140	333	1.815	470,6	50,6	48,4
	3º	1.517	458	2.446	449,6	49,9	47,7
	4º	2.029	611	3.355	427,8	49,0	46,8
	5º	2.539	776	4.282	410,0	48,4	46,2
	6º	2.847	870	4.229	397,7	47,9	45,7
	7º	3.336	1.020	5.734	380,3	47,2	45,0
B	início	-	-	-	472,4	50,7	50,0
	1º	407	125	716	451,2	49,9	49,2
	2º	1.030	310	1.799	403,7	48,1	47,4
	3º	1.870	560	3.238	352,3	46,0	45,3
	4º	2.599	782	4.523	302,5	43,7	43,0
C	início	-	-	-	460,4	49,2	50,0
	1º	692	291	1.212	427,1	48,0	48,8
	2º	1.267	378	2.251	394,3	46,7	47,5
	3º	1.764	538	3.121	367,1	45,6	46,4
	4º	2.375	716	4.172	342,9	44,6	45,4
	5º	2.970	964	5.138	322,3	43,7	44,5

legenda: 1- período de controle
 2- tempo de operação em horas
 3- produção acumulada do moinho em mil toneladas
 4- consumo energético acumulado do moinho em MWh
 5- massa média das bolas em cada controle em gramas
 6- diâmetro médio das bolas em cada controle em mm
 7- diâmetro recalculado para o "top size" em mm

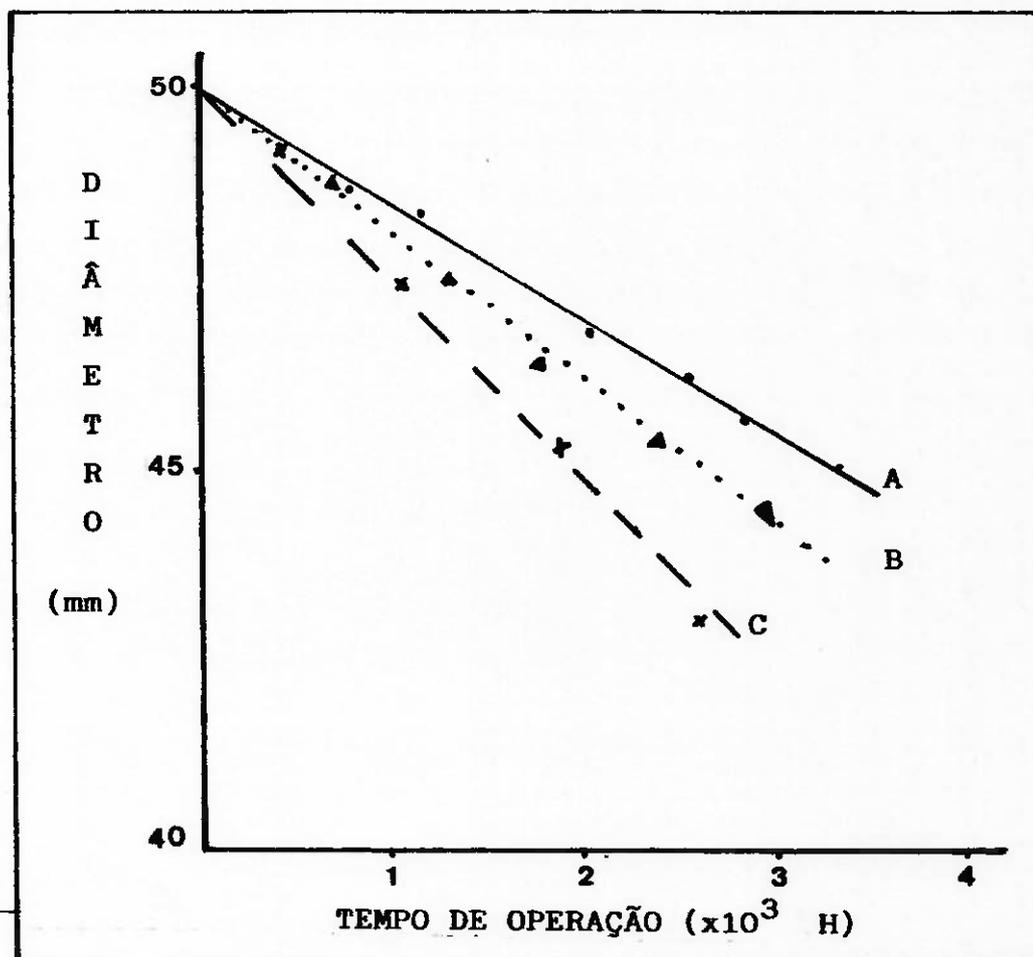


fig. 5.1 Evolução do diâmetro em função do tempo de operação

Equações da evolução do diâmetro(ϕ) em função do tempo de operação(H):

$$\text{Bola A} - \phi = -0,0015H + 49,97 ; cc = -0,9988 \quad (\text{Eq 5.1})$$

$$\text{Bola B} - \phi = -0,0027H + 50,16 ; cc = -0,9985 \quad (\text{Eq 5.2})$$

$$\text{Bola C} - \phi = -0,0019H + 49,97 ; cc = -0,9975 \quad (\text{Eq 5.3})$$

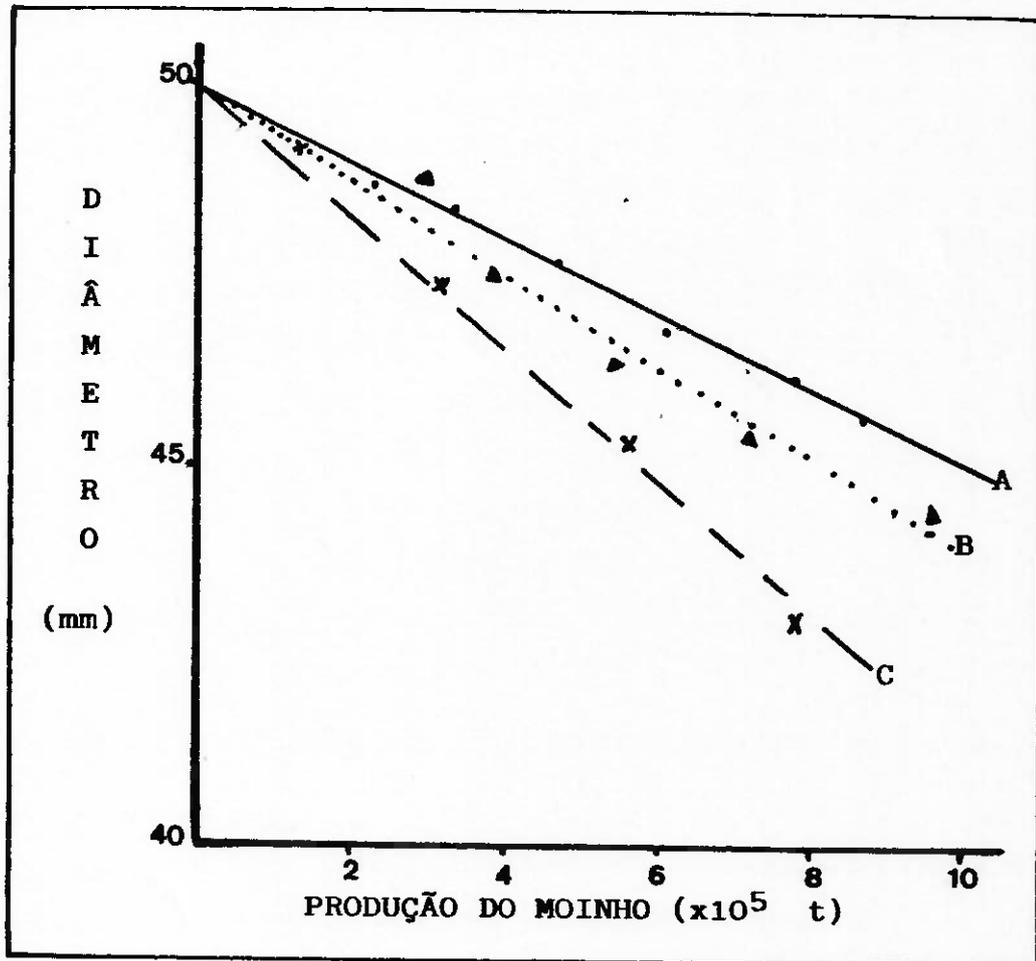


fig. 5.2 Evolução do diâmetro em função da produção do moinho

Equações da evolução do diâmetro(ϕ) em função da produção do moinho(t):

$$\text{Bola A} - \phi = -4,86 \times 10^{-6}t + 49,92 \quad ; \quad cc = -0,9985 \quad (\text{Eq 5.4})$$

$$\text{Bola B} - \phi = -8,99 \times 10^{-6}t + 50,18 \quad ; \quad cc = -0,9985 \quad (\text{Eq 5.5})$$

$$\text{Bola C} - \phi = -6,06 \times 10^{-6}t + 50,01 \quad ; \quad cc = -0,9947 \quad (\text{Eq 5.6})$$

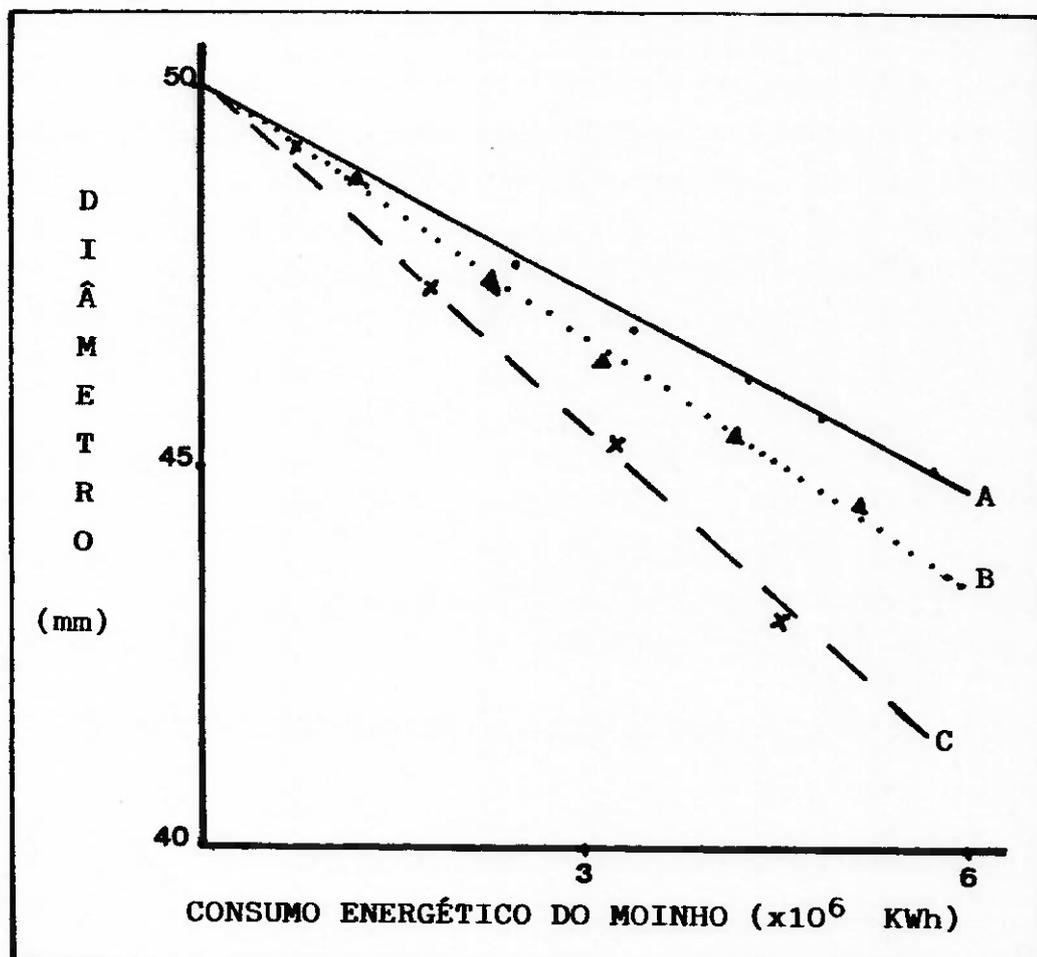


fig. 5.3 Evolução do diâmetro em função do consumo energético do moinho

Equações da evolução do diâmetro(ϕ) em função do consumo energético do moinho(E):

$$\text{Bola A} - \phi = -0,86 \times 10^{-6} E + 49,89 ; cc = -0,9982 \quad (\text{Eq 5.7})$$

$$\text{Bola B} - \phi = -1,55 \times 10^{-6} E + 50,17 ; cc = -0,9985 \quad (\text{Eq 5.8})$$

$$\text{Bola C} - \phi = -1,09 \times 10^{-6} E + 50,00 ; cc = -0,9984 \quad (\text{Eq 5.9})$$

Com os dados apresentados na tabela 5.1 e as equações presentes nas figuras 5.1 a 5.2, representativas das retas mostradas nestas figuras, são calculados os consumos de cada bola no período de controle e acumulado até cada controle, conforme mostrado na tabela 5.2.

TABELA 5.2- RESULTADOS DE CONSUMO DOS ENSAIOS

BOLA	CONTROLE	CONSUMO NO PERÍODO		CONSUMO ACUM. ATÉ O PERÍODO		DESVIO PADRÃO DAS MASSAS NO PERÍODO
		g/t	g/KWh	g/t	g/KWh	
A	início	-	-	-	-	7,09
	1º	84,8	15,0	84,8	15,0	5,36
	2º	33,6	6,7	68,0	12,5	4,74
	3º	66,0	13,1	67,5	12,6	4,17
	4º	65,3	11,0	66,9	12,2	5,72
	5º	37,9	6,8	60,7	11,0	5,67
	6º	53,2	9,2	59,9	10,8	7,34
	7º	44,7	7,4	57,7	10,3	5,23
B	início	-	-	-	-	7,86
	1º	142,1	17,7	142,1	17,7	6,78
	2º	149,7	20,0	146,8	19,1	13,40
	3º	112,5	15,1	131,2	17,3	17,93
	4º	102,7	14,9	122,6	16,6	24,37
C	início	-	-	-	-	1,43
	1º	116,0	20,1	116,0	20,1	5,63
	2º	52,2	8,5	87,6	14,7	7,36
	3º	74,8	13,7	83,8	14,4	12,43
	4º	56,0	9,5	76,9	13,2	11,93
	5º	53,4	13,7	70,8	13,3	10,81

A partir das equações de evolução do diâmetro, tem-se os seguintes resultados de consumo das bolas com 2.500 horas de operação, como pode ser visto na tabela 5.3.

TABELA 5.3- CONSUMO COM 2.500 HORAS DE OPERAÇÃO.

BOLA	PRODUÇÃO DO MOINHO (t)	ENERGIA CONSUMIDA (KWh)	Ø (mm)	CONSUMO ESPEC.	
				g/t	g/KWh
A	781.893	4.418.604	46,2	68,6	12,1
B	756.396	4.387.097	43,2	103,3	17,8
C	793.729	4.403.669	45,2	72,2	13,0

Os resultados apresentados na tabela 5.3 são os considerados representativos dos ensaios.

A figura 5.4 mostra a evolução do diâmetro da bola C, constituindo-se em um exemplo típico da evolução do diâmetro em ensaios deste tipo.

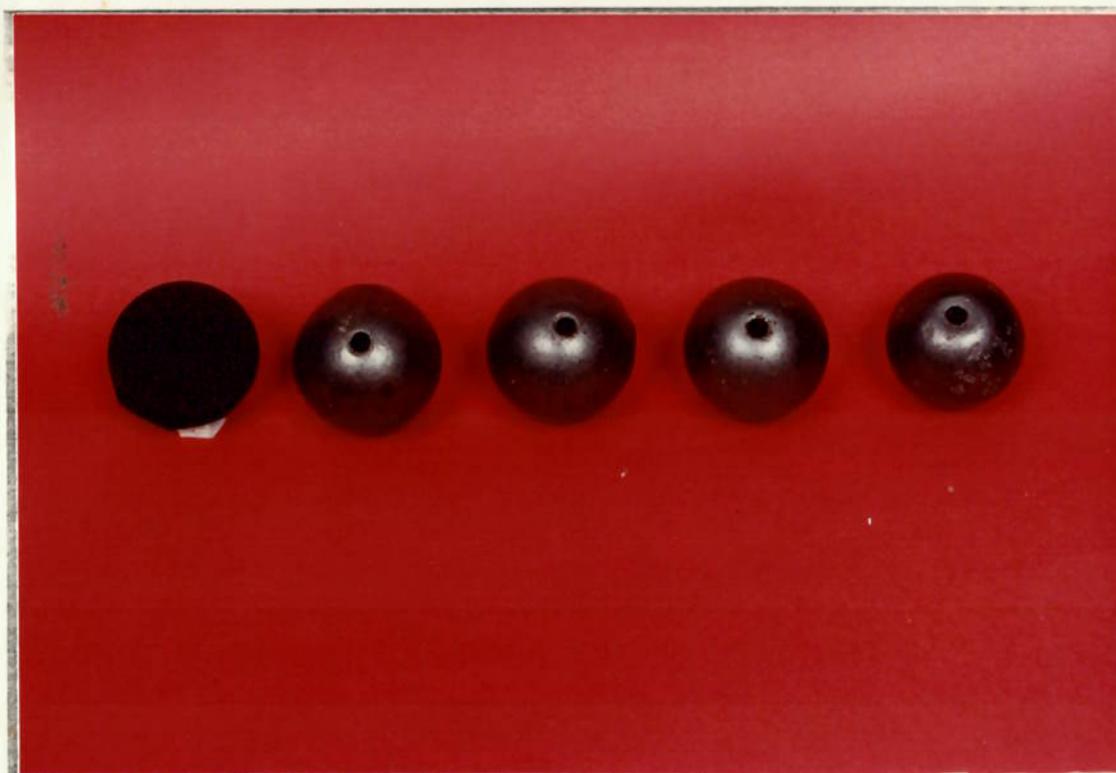


fig. 5.4 Evolução do diâmetro da bola C

5.2- RESULTADOS DOS ENSAIOS COM BOLAS DO GRUPO 2

A tabela 5.4 apresenta os dados referentes a cada período de controle dos ensaios com as bolas deste grupo.

TABELA 5.4- CONTROLE DOS ENSAIOS COM BOLAS DO GRUPO 2

BOLA	1	2	3	4	5	6	7
D	início	-	-	-	1.370,1	69,8	50,0
	1º	590	178	1.017	1.266,8	68,0	48,2
	2º	1.485	442	2.634	1.031,6	63,5	43,7
	3º	2.069	618	3.685	870,2	60,0	40,2
	4º	2.860	857	5.103	688,7	55,5	35,7
E	início	-	-	-	1.490,0	71,5	50,0
	1º	441	132	807	1.426,2	70,4	48,9
	2º	782	257	1.431	1.358,9	69,5	48,0
	3º	1.360	438	2.440	1.311,9	68,5	47,0
	4º	2.105	608	3.762	1.172,1	66,0	44,5
	5º	2.851	846	5.079	1.107,8	64,7	43,2

legenda: 1- período de controle
 2- tempo de operação em horas
 3- produção acumulada do moinho em mil toneladas
 4- consumo energético acumulado do moinho em MWh
 5- massa média das bolas em cada controle em gramas
 6- diâmetro médio das bolas em cada controle em mm
 7- diâmetro recalculado para o "top size" em mm

As figuras 5.5 a 5.7 apresentam a evolução do diâmetro em função do tempo de operação, produção e consumo energético do moinho, juntamente com suas equações representativas.

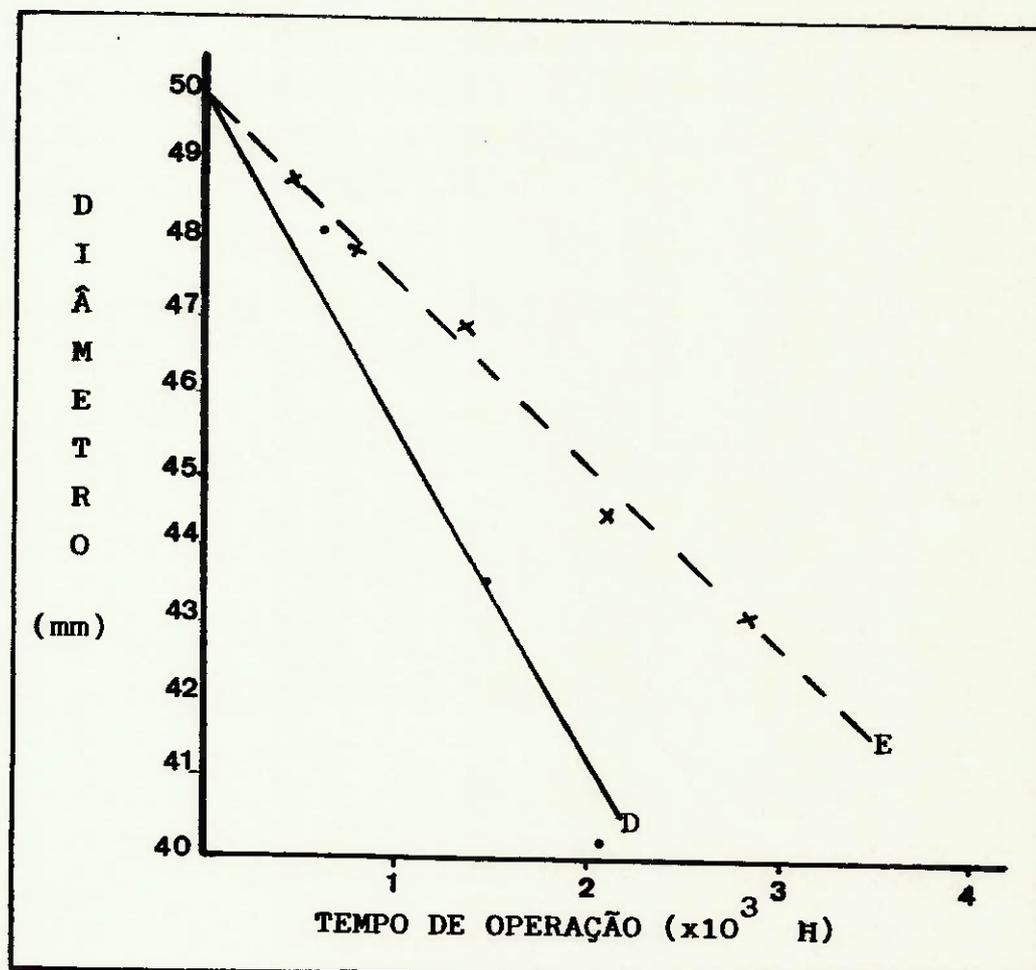


fig. 5.5 Evolução do diâmetro em função do tempo de operação

Equações da evolução do diâmetro(ϕ) em função do tempo de operação(H):

$$\text{Bola D} - \phi = -0,0051H + 50,69 \quad ; \quad cc = -0,9954 \quad (\text{Eq 5.10})$$

$$\text{Bola E} - \phi = -0,0024H + 49,99 \quad ; \quad cc = -0,9961 \quad (\text{Eq 5.11})$$

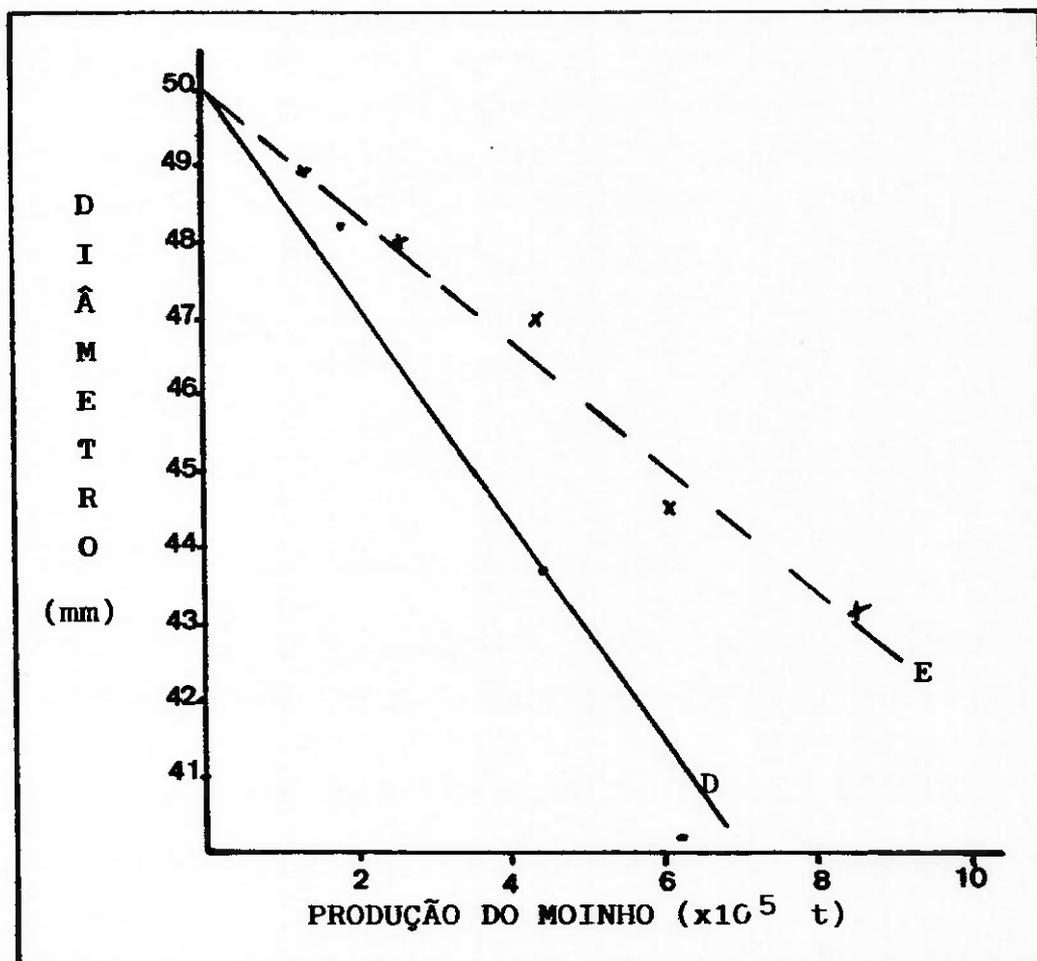


fig. 5.6 Evolução do diâmetro em função da produção do moinho

Equações da evolução do diâmetro(ϕ) em função da produção do moinho(t):

$$\text{Bola D} - \phi = -1,70 \times 10^{-5}t + 50,69 ; cc = -0,9955 \quad (\text{Eq 5.12})$$

$$\text{Bola E} - \phi = -8,26 \times 10^{-6}t + 50,07 ; cc = -0,9909 \quad (\text{Eq 5.13})$$

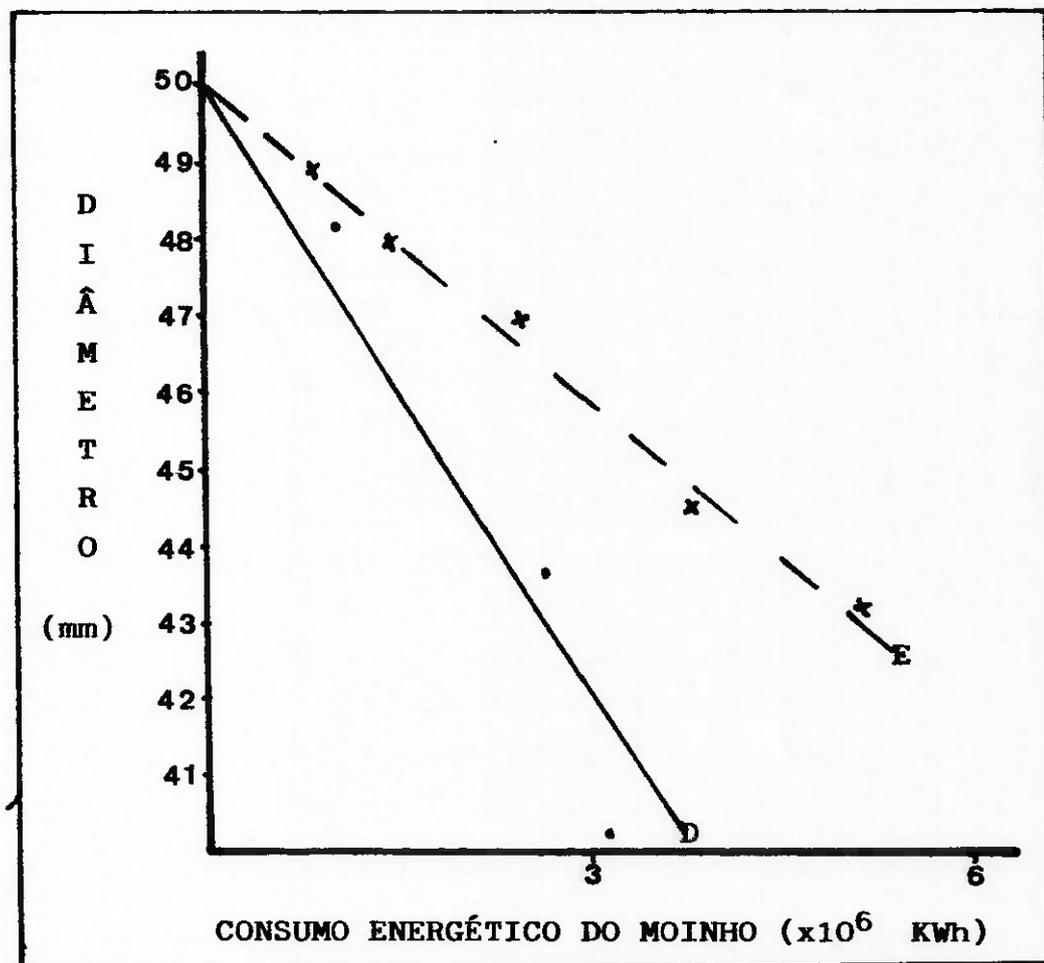


fig. 5.7 Evolução do diâmetro em função do consumo energético do moinho

Equações da evolução do diâmetro(ϕ) em função do consumo energético do moinho(E):

$$\text{Bola D} - \phi = -2,85 \times 10^{-6} E + 50,64 \quad ; \quad cc = -0,9959 \quad (\text{Eq 5.14})$$

$$\text{Bola E} - \phi = -1,37 \times 10^{-6} E + 50,01 \quad ; \quad cc = -0,9962 \quad (\text{Eq 5.15})$$

A tabela 5.5 apresenta os resultados de consumo das bolas nos períodos de controle e acumulados em cada período.

TABELA 5.5- RESULTADOS DE CONSUMO DOS ENSAIOS

BOLA	CONTROLE	CONSUMO NO PERÍODO		CONSUMO ACUM. ATÉ O PERÍODO		DESVIO PADRÃO DAS MASSAS NO PERÍODO
		g/t	g/KWh	g/t	g/KWh	
D	início	-	-	-	-	25,10
	1º	140,4	24,6	140,4	24,6	26,15
	2º	187,3	32,8	168,4	28,2	28,46
	3º	127,5	21,3	156,8	26,3	54,90
	4º	93,4	15,7	139,1	23,3	60,41
E	início	-	-	-	-	13,22
	1º	114,9	18,8	114,9	18,8	15,16
	2º	97,9	19,5	106,6	19,1	26,24
	3º	54,4	9,7	85,0	15,3	30,37
	4º	182,1	23,5	112,3	18,2	38,26
	5º	37,9	6,8	91,4	15,2	40,28

Para 2.500 horas de operação os resultados são mostrados na tabela 5.6.

TABELA 5.6 CONSUMO COM 2.500 HORAS DE OPERAÇÃO

BOLA	PRODUÇÃO DO MOINHO (t)	ENERGIA CONSUMIDA (KWh)	Ø mm	CONS. ESPEC.	
				g/t	g/KWh
D	750.000	4.473.684	37,9	149,8	25,1
E	734.866	4.386.861	44,0	98,4	16,5

5.3- RESULTADOS DOS ENSAIOS COM BARRAS DO GRUPO 3

A tabela 5.7 apresenta os dados referentes aos ensaios com as barras deste grupo.

TABELA 5.7- CONTROLE DOS ENSAIOS COM BARRAS DO GRUPO 3

BARRA	1	2	3	4	5
A	início	-	-	-	88,9
	1ª	703	125	489	69,4
	2ª	1.115	201	779	61,1
	3ª	1.567	284	1.100	49,6
B	início	-	-	-	88,9
	1ª	537	97	385	75,8
	2ª	1.162	205	817	62,4
	3ª	1.509	271	1.056	57,1
	4ª	1.902	344	1.327	49,9

legenda: 1- período de controle
 2- tempo de operação em horas
 3- produção acumulada do moinho em mil toneladas
 4- consumo energético acumulado do moinho em MWh
 5- diâmetro médio das barras em mm.

As figuras 5.8 a 5.10 apresentam a evolução do diâmetro em função do tempo de operação, produção e consumo energético do moinho e suas equações representativas.

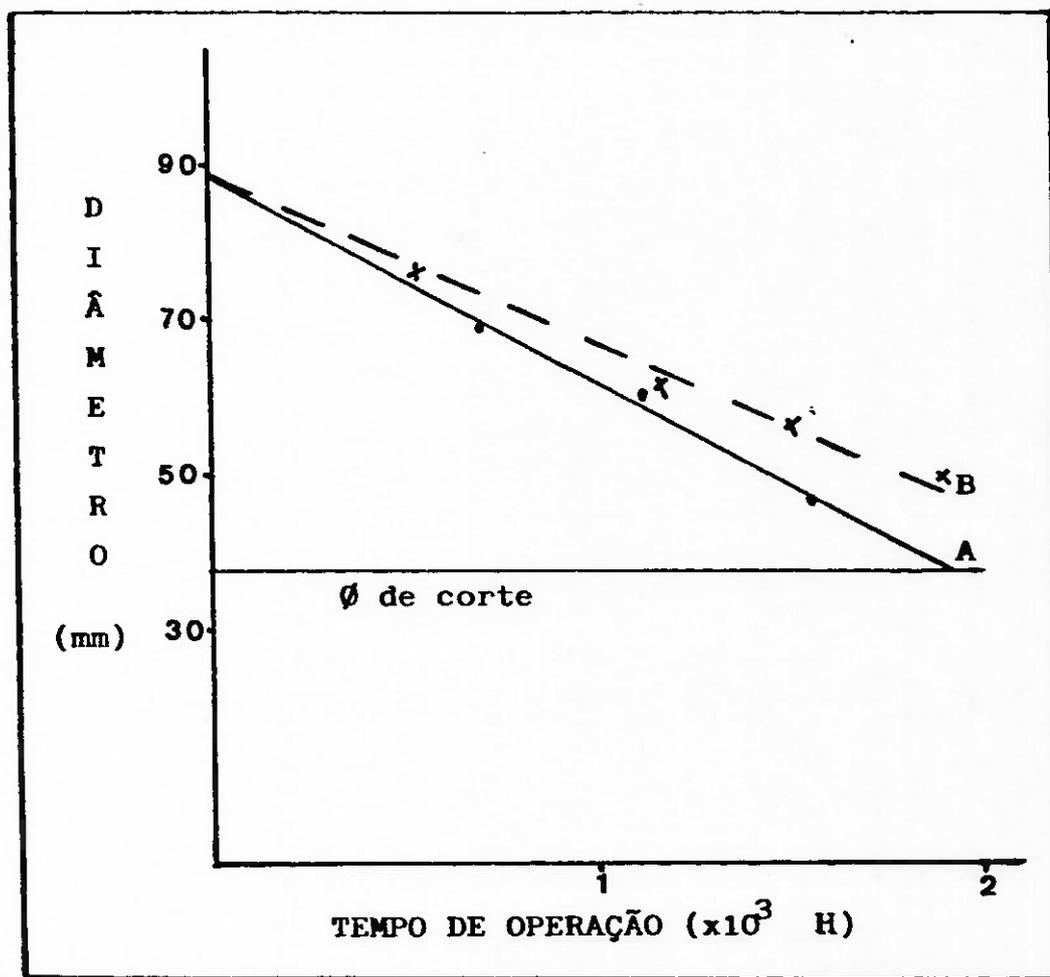


fig. 5.8 Evolução do diâmetro em função do tempo de operação

Equações da evolução do diâmetro(ϕ) em função do tempo de operação(H):

$$\text{Barra A} - \phi = -0,0263H + 88,8 ; cc = -0,9979 \quad (\text{Eq 5.16})$$

$$\text{Barra B} - \phi = -0,0204H + 87,7 ; cc = -0,9969 \quad (\text{Eq 5.17})$$

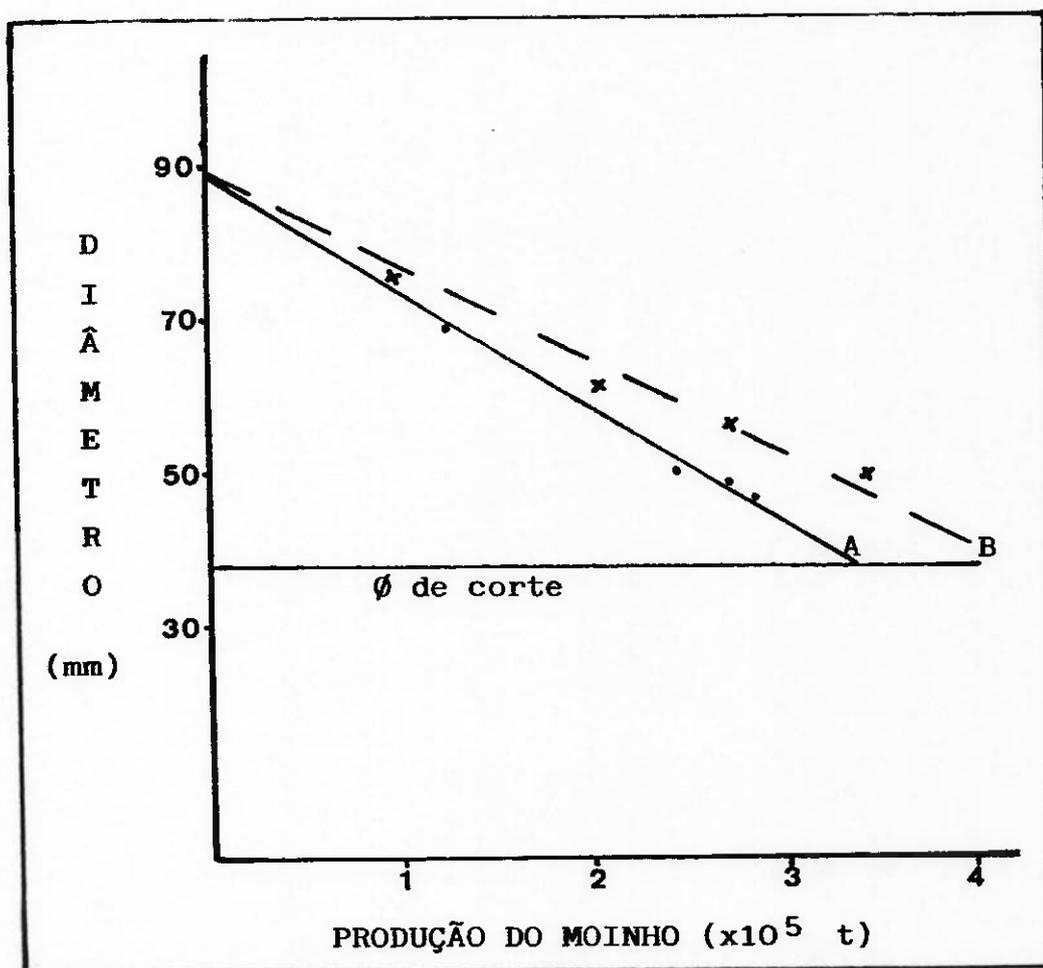


fig.5.9 Evolução do diâmetro em função da produção do moinho

Equações da evolução do diâmetro(ϕ) em função da produção do moinho(t):

$$\text{Barra A} - \phi = -0,145 \times 10^{-3}t + 88,7 ; cc = -0,9976 \quad (\text{Eq 5.18})$$

$$\text{Barra B} - \phi = -0,113 \times 10^{-3}t + 87,6 ; cc = -0,9960 \quad (\text{Eq 5.19})$$

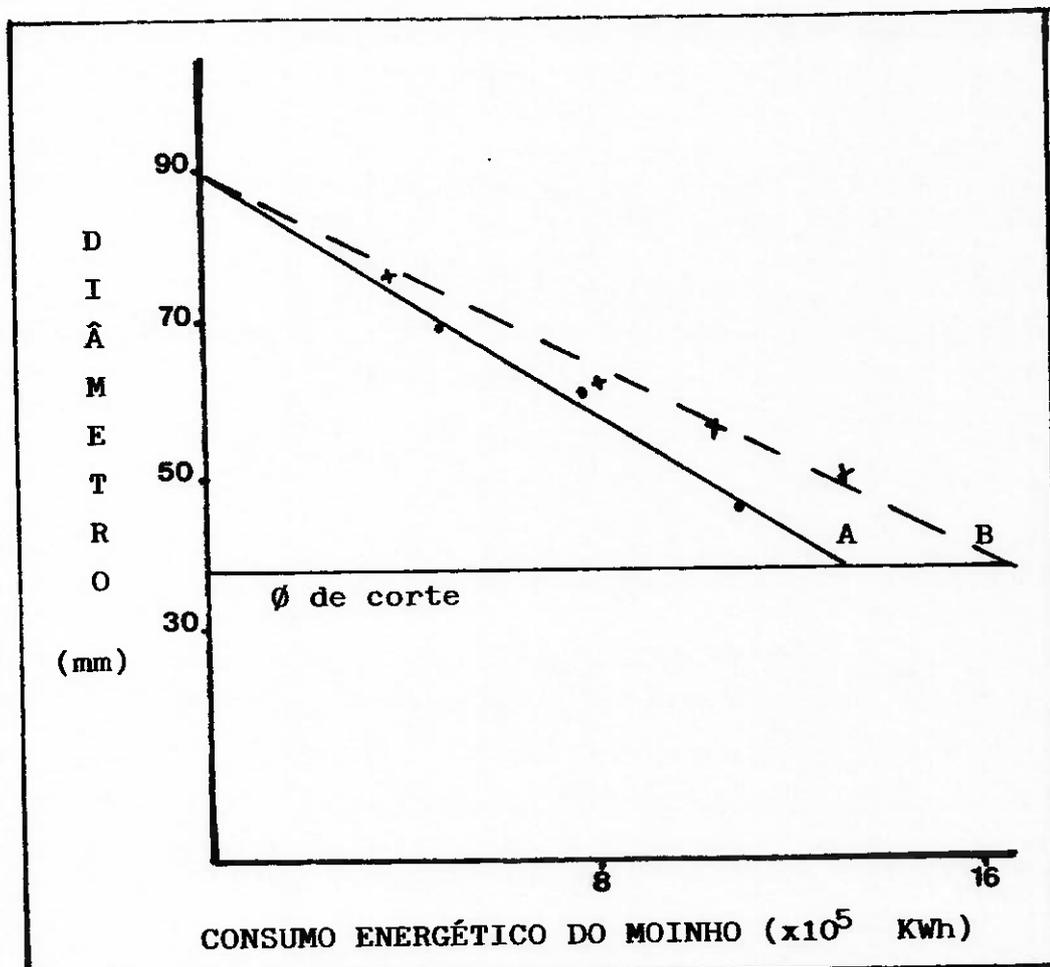


fig. 5.10. Evolução do diâmetro em função do consumo energético do moinho

Equações da evolução do diâmetro(ϕ) em função do consumo energético do moinho(E):

$$\text{Barra A} - \phi = -3,70 \times 10^{-5} E + 88,8 ; cc = -0,9978 \quad (\text{Eq 5.20})$$

$$\text{Barra B} - \phi = -2,93 \times 10^{-5} E + 87,8 ; cc = -0,9975 \quad (\text{Eq 5.21})$$

A tabela 5.8 apresenta os resultados de consumo das barras A e B nos períodos de controle e a tabela 5.9 os consumos para 1.500 horas de operação.

TABELA 5.8- RESULTADOS DE CONSUMO DOS ENSAIOS

BARRA	CONTROLE	CONSUMO NO PERÍODO		CONSUMO ACUM. ATÉ O PERÍODO	
		g/t	g/KWh	g/t	g/KWh
A	início	-	-	-	-
	1º	343,3	87,9	343,3	87,9
	2º	197,8	51,9	288,2	74,4
	3º	259,5	66,6	279,9	72,2
B	início	-	-	-	-
	1º	308,6	78,0	308,6	78,0
	2º	238,4	59,6	271,7	68,3
	3º	133,5	36,9	238,1	61,2
	4º	147,7	39,5	219,0	56,8

TABELA 5.9- CONSUMO COM 1.500 HORAS DE OPERAÇÃO

BARRA	PRODUÇÃO MOINHO (t)	ENERGIA CONSUMIDA (KWh)	Ø mm	CONS. ESPEC.	
				g/t	g/KWh
A	271.724	1.067.567	49,3	280,3	71,3
B	269.911	1.033.670	57,1	239,4	62,5

5.4- RESULTADOS DOS ENSAIOS COM CYLPEBS DO GRUPO 4

A tabela 5.10 apresenta os dados obtidos nos ensaios com os cylpebs deste grupo.

TABELA 5.10- CONTROLE DOS ENSAIOS COM CYLPEBS DO GRUPO 4

CYLPEB	1	2	3	4	5	6
A	início	-	-	-	629,0	50,0
	1º	478	139	858	404,1	40,1
	2º	1.441	540	2.501	334,8	36,5
B	início	-	-	-	668,7	50,0
	1º	171	71	302	531,5	43,9
	2º	327	119	589	470,7	41,9
	3º	1.058	315	1.830	238,2	29,8

legenda: 1- período de controle
 2- tempo de operação em horas
 3- produção acumulada do moinho em mil toneladas
 4- consumo energético acumulado do moinho em MWh
 5- massa média dos cylpebs em cada controle em gramas
 6- diâmetro médio dos cylpebs em mm.

As figuras 5.11 a 5.12 apresentam a evolução do diâmetro em função do tempo de operação, produção e consumo energético do moinho. A tabela 5.11 apresenta os consumos de cada cylpeb sendo que os consumos no período não foram considerados devido ao pequeno número de amostragens realizadas.

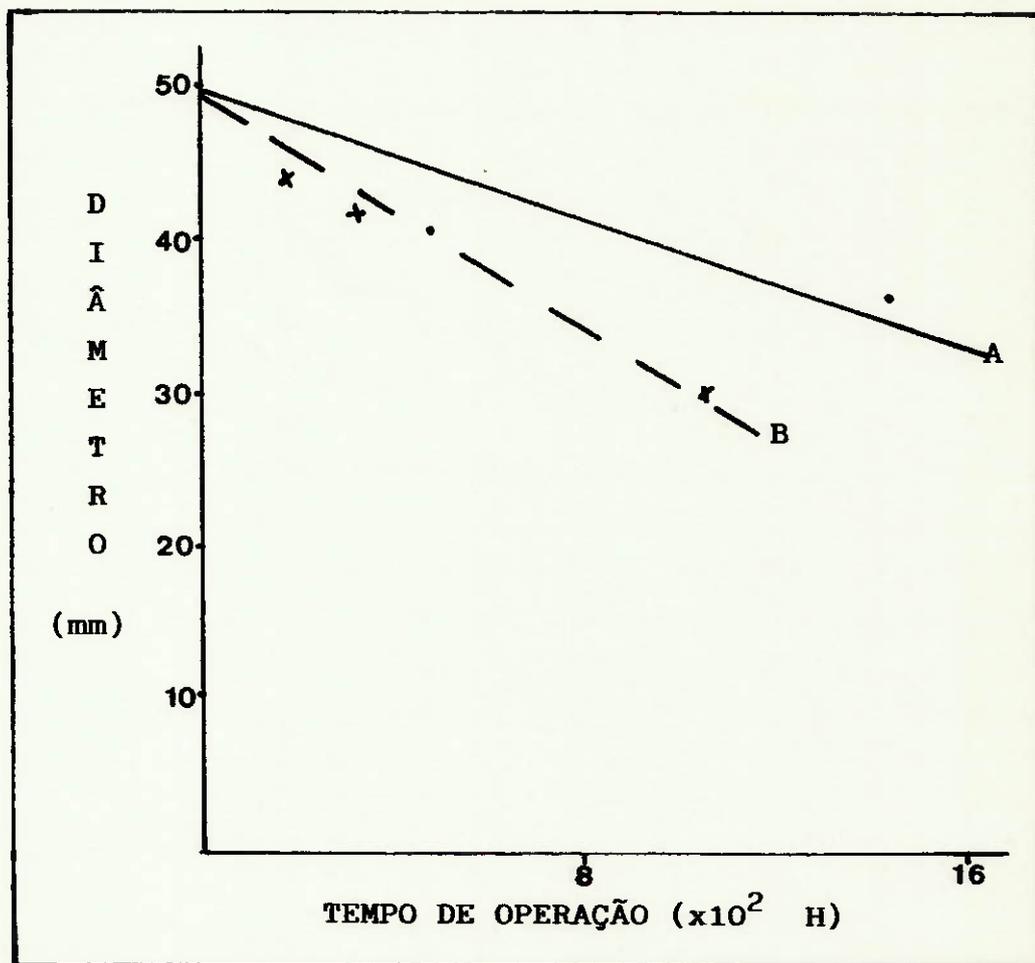


fig. 5.11 Evolução do diâmetro em função do tempo de operação

Equações da evolução do diâmetro(ϕ) em função do tempo de operação(H):

$$\text{Cylpeb A} - \phi = -0,0085H + 47,67 \quad ; \quad cc = -0,8983 \quad (\text{Eq 5.22})$$

$$\text{Cylpeb B} - \phi = -0,0180H + 48,39 \quad ; \quad cc = -0,9879 \quad (\text{Eq 5.23})$$

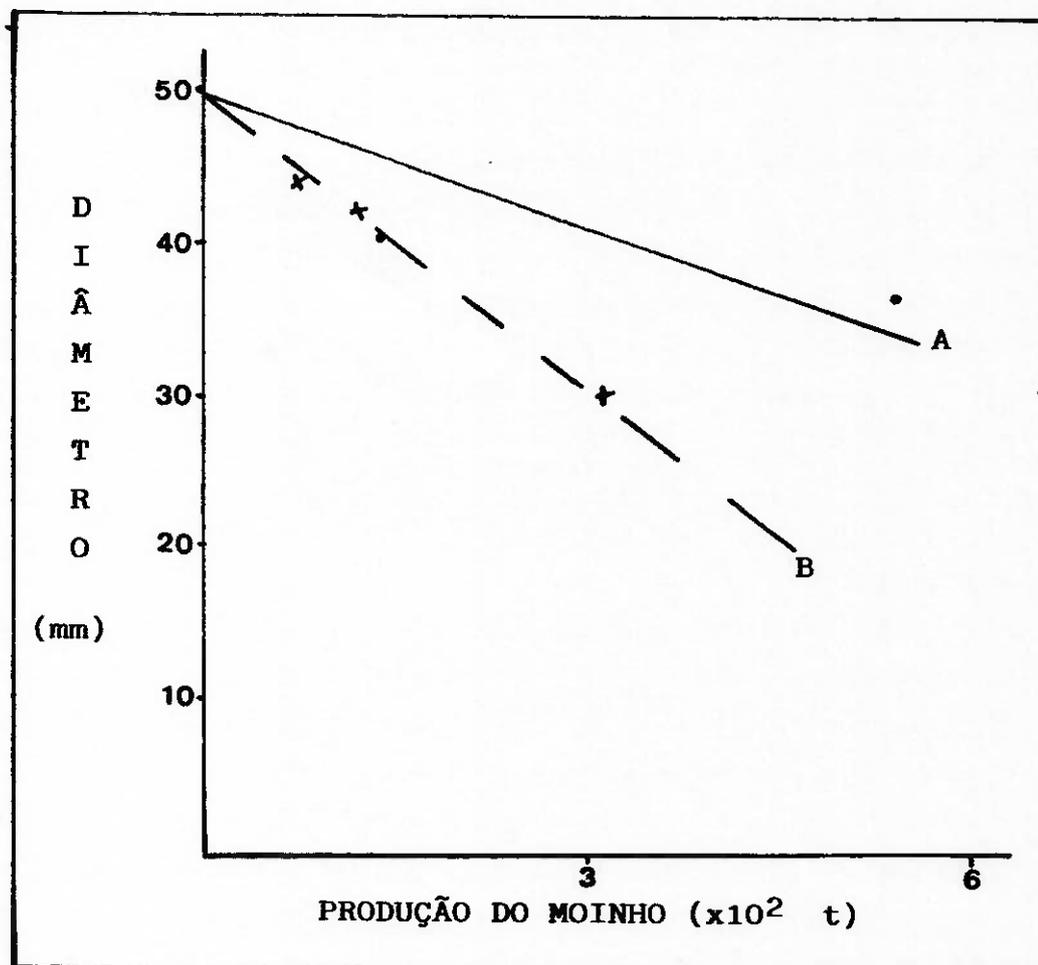


fig. 5.12 Evolução do diâmetro em função da produção do moinho

Equações da evolução do diâmetro(ϕ) em função da produção do moinho(t):

$$\text{Cylpeb A} - \phi = -0,21 \times 10^{-4}t + 47,05 \quad ; \quad cc = -0,8599 \quad (\text{Eq 5.24})$$

$$\text{Cylpeb B} = \phi = -0,63 \times 10^{-4}t + 49,30 \quad ; \quad cc = -0,9966 \quad (\text{Eq 5.25})$$

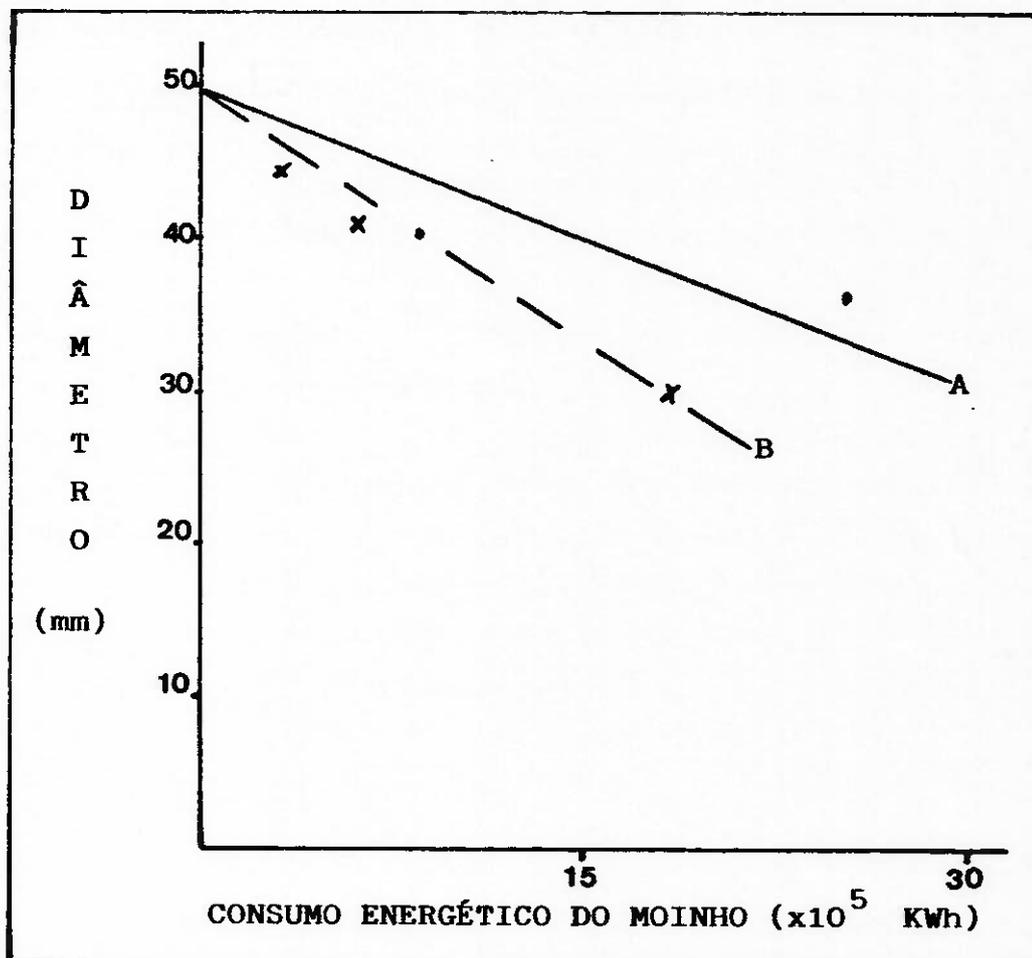


fig. 5.13 Evolução do diâmetro em função do consumo energético do moinho

Equações da evolução do diâmetro(ϕ) em função do consumo energético do moinho(E):

$$\text{Cylpeb A} - \phi = -0,05 \times 10^{-4} E + 47,76 ; cc = -0,9037 \quad (\text{Eq 5.26})$$

$$\text{Cylpeb B} - \phi = -0,10 \times 10^{-4} E + 48,49 ; cc = -0,9889 \quad (\text{Eq 5.27})$$

TABELA 5.11- RESULTADOS DE CONSUMO DOS ENSAIOS

CYLPEB	CONTROLE	CONSUMO AC. ATÉ O PERÍODO		DESVIO
		g/t	g/KWh	
A	início	-	-	17,04
	1º	358,2	58,2	52,44
	2º	121,0	26,1	38,33
B	INÍCIO	-	-	38,21
	1º	451,8	106,3	49,04
	2º	348,6	70,7	53,43
	3º	286,8	49,3	60,25

TABELA 5.12- CONSUMOS COM 1.000 HORAS DE OPERAÇÃO

CYLPEB	PRODUÇÃO DO MOINHO (t)	ENERGIA CONSUMIDA (KWh)	Ø mm	CONS. ESPEC.	
				g/t	g/KWh
A	373.809	1.712.000	39,2	144,3	31,5
B	300.000	1.809.000	30,4	294,1	48,8

A figura 5.14 mostra a evolução do diâmetro de um cylpeb ensaiado na FOSFÉRTIL.



fig. 5.14 Evolução de um cylpeb durante ensaio

6- DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão discutidos em um primeiro tópico os resultados dos ensaios realizados, fazendo-se uma comparação entre os tipos de corpo moedor, grupo a grupo, e seus respectivos desempenhos.

Para alguns dos corpos moedores constantes deste trabalho é possível uma comparação entre resultados de ensaios e resultados industriais, constituindo-se no assunto do segundo tópico. A título de esclarecimento, esta comparação não foi possível para todos os corpos moedores ensaiados devido à não utilização industrial de alguns deles ou por alterações operacionais que impossibilitaram o paralelo.

No terceiro tópico será analisada a metodologia empregada, fazendo-se comparações entre os tipos de ensaios realizados e informações fundamentais, além do consumo, que tais ensaios propiciam.

Neste capítulo, sempre quando for citada a regressão linear dos dados obtidos nos ensaios, está sendo feita referência à evolução do diâmetro em função do tempo de operação, produção e consumo energético do moinho.

6.1- ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS

Um primeiro ponto a ser analisado nestes ensaios se refere à homogeneidade do lote de cada corpo moedor submetido à avaliação de desempenho.

Isto é verificado através do desvio padrão das massas das amostras retiradas do moinho em cada período de controle.

A tabela 5.2 apresenta os desvios obtidos nos ensaios do Grupo 1, onde se nota primeiramente que todos os três tipos de bolas apresentaram boa homogeneidade.

Quanto menor for a variação do desvio padrão entre os períodos de controle, mais homogêneo será o lote, significando o processo de fabricação estar mais bem controlado.

É normal um crescimento do desvio padrão ao longo do tempo de ensaio, devido a alterações do corpo moedor, principalmente em termos de dureza, que varia ao longo do diâmetro. Este fato se explica pela penetração do tratamento térmico, cuja temperatura utilizada não atinge os mesmos níveis em todo o diâmetro.

No caso da bola A, cuja variação do desvio padrão se destaca das demais, fica evidenciado um tratamento térmico extremamente bem controlado, garantindo uma dureza praticamente

constante ao longo de todo o diâmetro. Medições de dureza realizadas na superfície e no núcleo de bolas deste tipo mostraram valores idênticos, 66 HRc, nos dois pontos, tanto para bolas novas como para bolas com 2.000 horas de operação. Este fato a diferencia de outras bolas de boa qualidade, cuja variação de dureza superfície/núcleo situa-se na faixa de 2 a 3 pontos HRc.

Em termos de composição química, a presença de cromo, como evidenciado na bibliografia pesquisada, propicia sensíveis melhorias na qualidade do corpo moedor.

A experiência com a bola A, contudo, mostra que através de tratamento térmico a deficiência deste metal pode ser suprida em um corpo moedor, já que analisando apenas em termos de composição química, esta bola deveria apresentar um desempenho inferior às demais.

As figuras 5.1 a 5.3 mostram graficamente como o diâmetro evolui durante o ensaio. Fazendo-se uma regressão linear dos dados dos ensaios, obtém-se equações do comportamento do corpo moedor, cujo grau de representatividade é medido pelo coeficiente de correlação.

No caso do Grupo 1, as três bolas têm suas leis de desgaste muito bem definidas pelas equações levantadas já que os coeficientes de correlação se encontram muito próximos da unidade.

Coeficientes de correlação distantes de um indicam problemas com o corpo moedor que, por motivos inerentes a ele, não obedece a uma lei de desgaste linear ou problemas com o ensaio, que pode não ter sido bem conduzido.

Sob este aspecto, os ensaios realizados com o Grupo 1 são perfeitamente válidos.

Analisando a variação do consumo em cada período de controle, nota-se uma forte variação, fato que entre outros fatores pode ser explicado por variações do minério alimentado durante o ensaio, variações de condições operacionais como taxa de alimentação, paradas do moinho, etc., fatores estes inerentes a uma operação industrial onde nem todos podem ser controlados ou mantidos constantes.

Quando se analisa o consumo acumulado até cada período, devido à diluição das variações operacionais ao longo do tempo, não ocorrem mais oscilações, assumindo o consumo uma tendência decrescente bastante suave, sem contudo, se estabilizar.

As bolas B e C apresentam composições químicas muito próximas, porém, os resultados de consumo apresentados na tabela 5.3 são bastante diferentes. A explicação para este fato se refere mais uma vez a diferenças de tratamento térmico. Enquanto a bola B foi revenida para alívio de tensões, visando reduzir riscos de quebras e lascamentos, a bola C não so

freu este processo.

O revenimento provoca redução de dureza que, por sua vez, es tá diretamente ligada à resistência ao desgaste.

A bola B, tendo uma dureza superficial da ordem de 60 HRc, é de se esperar que tenha um consumo maior que a bola C cuja dureza situa-se sempre acima de 63 HRc.

Nos ensaios realizados com as bolas do Grupo 2 são notados desvios maiores que os encontrados nos ensaios do Grupo 1. Isto é natural por se tratar de bolas com massas muito maiores.

No entanto, a bola D apresenta desvios no decorrer do ensaio muito maiores que os encontrados no ensaio com a bola E, sen do um primeiro indício de problemas de controle do processo de fabricação.

Com relação a consumo, as observações feitas para o Grupo 1 são válidas para este grupo, sendo que a bola D desde o início do ensaio apresentou consumos bastante superiores aos ob tidos com a bola E.

Embora as duas bolas tenham composições químicas muito aproximadas, e mesmo a bola D tendo um maior percentual de cro mo, sua baixa dureza superficial indica um tratamento térmico inadequado, conforme já descrito no item 4.4.2.

No ítem 6.3 será discutido mais profundamente os problemas de fabricação ocorridos com esta bola.

Ainda em termos de consumo, além da menor dureza, a bola **D** apresentou sérios problemas de lascamentos contribuindo ainda mais para sua menor durabilidade.

Todos os problemas verificados na análise visual inicial citados no ítem 4.4.2 se ampliaram durante o ensaio, assumindo proporções preocupantes.

Conforme mostrado pelos coeficientes de correlação, os ensaios com as duas bolas foram bem conduzidos, ficando evidente que os problemas da bola **D** se referem exclusivamente a ela e não à metodologia de avaliação empregada.

Os ensaios do Grupo 3 mostram que pequenas alterações de micro-elementos de liga podem levar a resultados consideravelmente diferentes no consumo de barras de moino.

Neste caso, ficaram asseguradas as mesmas condições de fabricação das duas barras uma vez que são do mesmo fornecedor. Assim, as diferenças de desempenho verificadas são devidas exclusivamente aos níveis de cromo e molibdênio existentes em cada barra.

Mantendo-se a mesma composição química básica do aço-carbono SAE 1095 e alterando a presença de cromo e molibdênio i

nicialmente em níveis apenas residuais, para uma proporção que praticamente não altera os custos de fabricação, conseguiu-se uma elevação da dureza superficial de 15 pontos Brinel, tornando o consumo aproximadamente 14% menor.

Uma dúvida no início da experiência se relacionava ao diâmetro de quebra da barra. Devido à elevação da dureza, esta torna-se mais frágil e assim poderia ocorrer a quebra antes de atingir os 38 mm esperados, contrabalançando a redução de consumo conseguida pela maior resistência ao desgaste e invalidando a modificação de composição da liga efetuada.

Após o ensaios, esta dúvida ficou totalmente dissipada, uma vez que as quebras não só ocorreram em diâmetros próximos ao desejado, bem como a fragmentação se efetuou em pequenos pedaços, bastante menores em comparação com as barras comuns.

Este fato é significativamente vantajoso uma vez que minimiza a possibilidade de "engaiolamentos".

O controle de ensaios com barras, bem como a análise dos resultados, não são tão eficientes quanto aos realizados com bolas devido às dimensões das barras que não permitem manuseio para pesagens nos períodos de controle e às próprias características deste tipo de moagem, cujo equilíbrio da carga moedora e controle operacional são bem mais difíceis.

Os ensaios do Grupo 4 apresentam características bastante diferentes dos demais grupos, pela qualidade dos cylpebs que levam a tempos de ensaio muito curtos, gerando poucos pontos de controle.

Os coeficientes de correlação obtidos, embora ainda relativamente elevados, não são bastante seguros também devido ao pequeno número de pontos de controle.

Apesar disto, já que os dois ensaios foram realizados em condições semelhantes, algumas análises relativas podem ser feitas.

Pela composição química, o cylpeb A, com quatro vezes mais cromo que o B, além do menor nível dos contaminantes fósforo e enxofre, apresenta um resultado de consumo significativamente menor.

Seguramente, pode-se afirmar que o cylpeb B apresenta condições de fabricação bastante inferiores, o que é evidenciado pelos elevados desvios obtidos.

Um fato comum a todos os corpos moedores ensaiados se refere ao decréscimo do consumo com o tempo de ensaio, apresentando não alcançar o equilíbrio.

6.2- RESULTADOS DE ENSAIOS X RESULTADOS INDUSTRIAIS

Como já relatado no início do capítulo, muitos dos ensaios não puderam ter seus resultados comparados com desempenhos industriais.

A bola A, ainda não foi utilizada em escala industrial, o mesmo ocorrendo com os cylpebs.

As barras A e B, embora utilizadas em escala industrial não podem ter seus resultados de consumo comparados devido a alterações de processo ocorridas na moagem de barras. Contudo, durante um pequeno período de utilização industrial, ficou evidenciado que as barras A se quebram em diâmetros muito próximos a 38 mm, em pequenos fragmentos, enquanto as barras B se quebram em diâmetros mais elevados, próximos a 45 mm e, invariavelmente em fragmentos acima de 1 m, que ao serem expurgados do moinho apresentam-se bastante envergados, confirmando informações fornecidas pelos ensaios.

Por sofrer menor influência das condições operacionais, os resultados serão analisados sempre em termos de g/KWh.

A bola B, que com 2.500 horas de ensaio apresentou consumo específico de 17,8 g/KWh, para utilização industrial teve seu tratamento térmico alterado com a eliminação do revenimento e conseqüente elevação da dureza superficial para 62 HRc. Apresentou após um ano de utilização ininterrupta no

mesmo moinho onde foi realizado o ensaio, o consumo de 17,1 g/KWh.

A bola C, com 2.500 horas de ensaio apresentou consumo específico de 13,0 g/KWh, enquanto na moagem industrial, também com um ano de utilização ininterrupta, foi alcançado o valor de 15,1 g/KWh, ou seja, 16% maior que o consumo do ensaio.

Apesar da alteração realizada na bola B para sua utilização industrial, durante o ensaio, seu consumo foi 37% superior ao da bola C. Industrialmente, mesmo após a modificação, o consumo ainda se manteve 13% superior. Fato explicado pela diferença de durezas ainda remanescente entre as duas bolas.

As bolas D e E foram ensaiadas em moinho alimentado com minério granulado, cujo consumo é bastante superior ao verificado em moinhos alimentados com minério friável, onde foram ensaiadas as bolas A, B e C.

A bola D com 2.500 horas de ensaio apresentou um consumo 52% superior ao obtido com a bola E com o mesmo tempo de ensaio.

Em utilização industrial, a bola D obteve um consumo de 35,1 g/KWh após um ano de utilização, enquanto a bola E, para o mesmo tempo de utilização e no mesmo moinho apresentou um consumo de 20,1 g/KWh. Ou seja, industrialmente a bola D apresentou consumo 74% superior à bola E.

Comparando os resultados industriais com os de ensaio, a bola E apresentou industrialmente um consumo 22% superior, enquanto para a bola D o consumo industrial foi 40% superior.

A bola D em concordância com observações já relatadas, se mostrou durante a utilização industrial extremamente problemática, com consumos além de elevados muito erráticos, dificultando a manutenção dos planos de reposição, ocasionando variações bruscas do nível de enchimento do moinho. Estes inconvenientes podem ser a explicação da forte discrepância da relação consumo industrial x consumo de ensaio.

De modo geral, comparações de consumo industrial com consumo de ensaios com bolas mostram, em ensaios realizados na FOSFÉRTIL, para a operação industrial um valor em média 20% superior ao obtido em ensaios com 2.500 horas de duração, valor concordante com os apresentados pelas bolas C e E.

6.3- ANÁLISE DA METODOLOGIA UTILIZADA

A metodologia de ensaios com bolas marcadas mostrou boa coerência entre os resultados obtidos em ensaios e os industriiais, inclusive quando utilizadas bolas diferenciadas da carga moedora pelo diâmetro maior que o de reposição.

O método de cálculo do consumo utilizado neste trabalho em ensaios com bolas busca minimizar o efeito da "anomalia da bola marcada" descrito por Vermeulen et al.¹ através da aplicação dos resultados obtidos com um diâmetro para a carga moedora completa. Este objetivo é razoavelmente alcançado uma vez que, além do consumo devido ao desgaste, o método considera o consumo devido ao expurgo de bolas do moinho ao atingirem o diâmetro de corte.

O cálculo de Vermeulen et al.¹, considera que a carga é composta exclusivamente pelo diâmetro ensaiado, provocando maior distanciamento dos resultados de ensaio dos industriais.

Todos os ensaios apresentados confirmam a existência de uma lei de desgaste seguida pelo corpo moedor, que no caso da moagem do minério de Tapira, é representada pela equação de uma reta.

Outro fato descrito por Vermeulen et al.¹ e confirmado nos ensaios aqui apresentados, refere-se ao decréscimo do consumo no decorrer do experimento, sem que ocorra uma estabilização, o que determina a estipulação de um tempo no qual a análise comparativa dos resultados possa ser realizada.

Os ensaios com o Grupo 3 são de especial interesse já que na pesquisa bibliográfica realizada não foram encontradas referências a métodos de avaliação para barras de moinhos.

Neste trabalho foi feita uma extrapolação das teorias existentes para bolas, aplicando-as em ensaios com barras.

Os resultados aplicados têm se mostrado muito bons, indicando a aplicabilidade da metodologia.

Com referência aos cylpebs, os ensaios objetivavam a busca de corpos moedores de menor custo, já que bolas de qualidade inferior não atendem às necessidades da moagem da FOSFÉR TIL e, por suas características de geometria, cylpebs em baixa liga poderiam apresentar resultados interessantes.

Apesar dos resultados ainda ruins, os ensaios com cylpebs permitiram a definição de uma linha de estudos a ser desenvolvida.

Os tipos de ensaios realizados apresentam como vantagem complementar a possibilidade de identificação de defeitos de

fabricação, muitas vezes imperceptíveis antes dos corpos moedores serem submetidos às condições de trabalho.

A figura 6.1 apresenta os problemas mais frequentemente encontrados em bolas e que são facilmente detectados em ensaios com amostras marcadas.

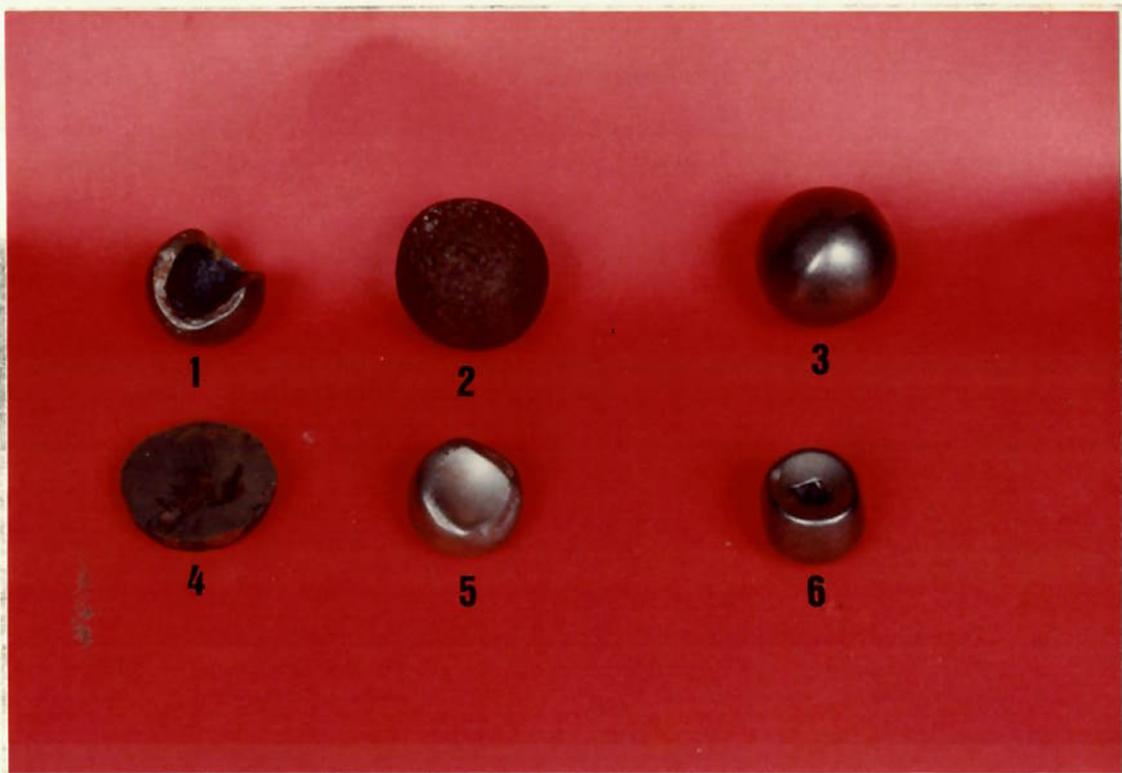


fig. 6.1 Problemas de fabricação frequentemente encontrados em bolas.

Neste figura, as bolas nº 1,4 e 6 apresentam problemas de fundição responsáveis pelos rechupes, que ocasionam desgaste acentuado. Estes vazios interiores evoluem para um conse-

terior.

A bola nº2 apresenta outro problema que facilmente é detectado em ensaios com amostras marcadas, que é a corrosão, de consequências muito danosas essencialmente em moagem a úmido.

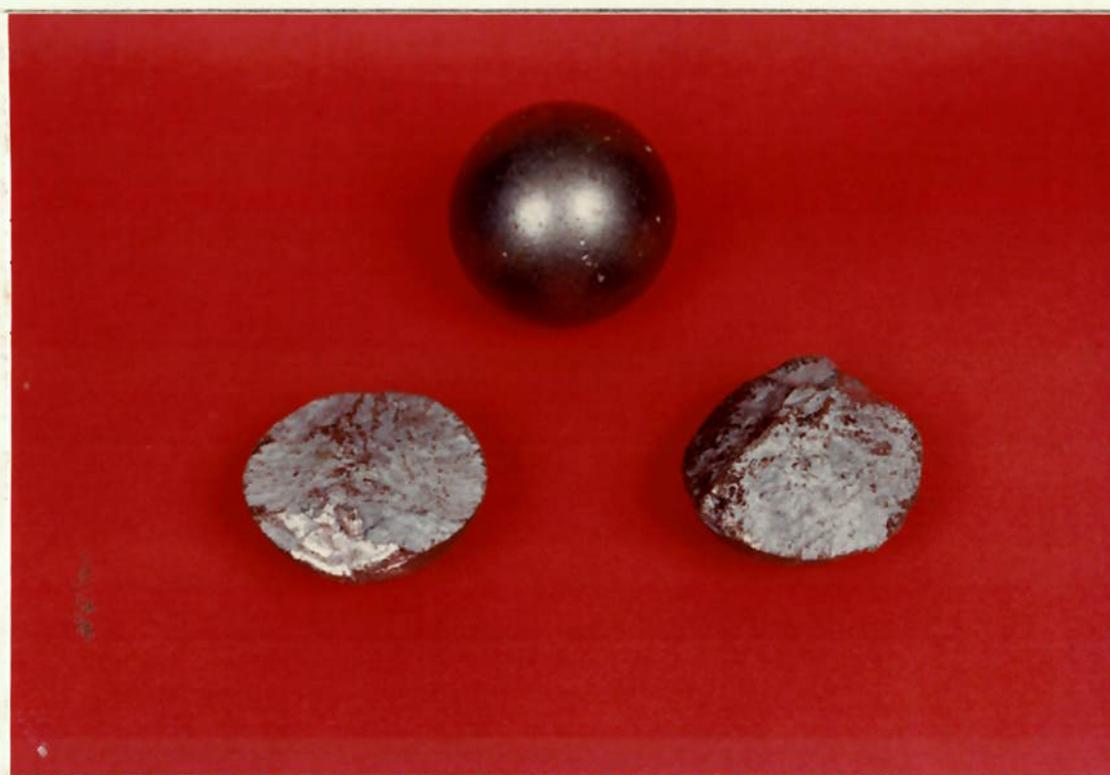


fig. 6.2 Uma bola de boa qualidade.

Os ensaios com amostras marcadas, além de defeitos, permitem reconhecer um corpo moedor de boa qualidade, como é mostrado na figura 6.2, onde pode ser observada uma superfície lisa, completamente esférica e um interior livre de rechupes, inclusões de escória ou areia, etc..

quente desgaste irregular, pioram a eficiência da carga moedora, provocam a ocorrência de quebras, etc..

A bola nº4 merece especial atenção por se tratar de uma amostra da bola D, o que possibilitou a explicação de muitos dos problemas ocorridos durante o ensaio e posteriormente em sua utilização industrial.

A presença de rechupes de variados tamanhos encontrados nesta bola ainda na fase de ensaio, juntamente com os problemas de tratamento térmico, levaram, após um ano de utilização industrial, a inúmeras tentativas de recuperação da carga através da reposição com bolas retratadas pelo fornecedor, culminando com a queda de eficiência do moinho e necessidade de substituição da totalidade da carga.

A bola nº3 representa um problema relativamente comum que ocorre devido a desencontro dos modelos durante a fundição, muitas vezes não detectado em análises visuais e se acentuam após início de trabalho, levando à perda de esfericidade da bola.

A bola nº5 apresenta a ocorrência de lascamentos que, após algum tempo de trabalho, evoluíram para um desgaste irregular acentuado, gerando a perda total da geometria inicial.

Fato semelhante é mostrado pela bola nº6 onde o desgaste irregular foi ocasionado pela presença de rechupes em seu in-

7- CONCLUSÕES

O primeiro passo na avaliação de um corpo moedor é a análise de suas características físicas e químicas, que devem ser estudadas conjuntamente.

Um erro comum é a consideração do corpo moedor apenas por sua composição química, onde o teor de cromo de imediato chama a atenção.

Indiscutivelmente, a presença deste metal em um corpo moedor traz enormes benefícios ao seu desempenho, aumentando sua resistência ao desgaste abrasivo e à corrosão.

A bola D, por sua excelente composição química deveria ter apresentado os melhores resultados. Porém, como foi visto, falhas de fabricação tornaram-na desastrosa.

Uma boa medida para evitar problemas deste tipo é o usuário acompanhar a fabricação do lote. Na fábrica, além do conhecimento dos controles de processo, amostras podem ser colhidas na linha de fabricação, analisadas química e fisicamente e quebradas para visualização do interior. Desta forma, antes da expedição do lote, o usuário já teria uma boa noção das perspectivas do corpo moedor a ser avaliado, mesmo tendo poucos conhecimentos de metalurgia.

Ao contrário da bola D, a bola A por sua composição química deveria ter apresentado resultado de consumo piores. Neste caso, fica evidenciada a importância do tratamento térmico, muitas vezes esquecido de ser analisado pelo usuário.

A elevação da dureza do corpo moedor, obtida por alterações do tratamento térmico ou de liga ou ambos simultaneamente, eleva a resistência ao desgaste, reduzindo o consumo. Por outro lado, é uma prática que pode ser perigosa por fragilizar o corpo moedor, tornando-o mais propício a quebras e lascamentos. Assim, sempre que esta medida for adotada, algum cuidado deve ser tomado. A realização de ensaio com amostra marcada, mesmo que de pouca duração e com poucas amostras, é um procedimento muito útil, notando-se que as quebras geralmente ocorrem nas primeiras horas de operação.

A verificação dimensional do corpo moedor seria o segundo passo. Oscilações dimensionais indicam processo de fabricação mal controlado e desempenho oscilante no moinho.

Por fim, a realização dos ensaios nas condições reais de operação completaria a avaliação do corpo moedor.

A metodologia apresentada tem se mostrado muito eficiente, o que é comprovado pelos resultados dos ensaios descritos.

A extrapolação dos resultados do diâmetro ensaiado para o restante da carga moedora corrige razoavelmente os valores

de consumo e, neste caso, quanto mais fracionada for a distribuição granulométrica da carga moedora usada no cálculo, mais próximo do real será o valor de consumo obtido. A coincidência do consumo de ensaio com o industrial contudo, dificilmente poderá ocorrer já que todo corpo moedor apresenta problemas de lascamentos, desgaste irregular, etc., difíceis de serem inseridos no cálculo de consumo de ensaios. A "anomalia da bola marcada", portanto, continuará existindo.

A aplicação de teorias de avaliação de bolas em ensaios com barras foi um passo importante, demonstrando que qualquer tipo de corpo moedor pode ser avaliado através de ensaios com amostras marcadas, trazendo mais uma ferramenta para os operadores de moagem aumentarem a eficiência e reduzirem os custos operacionais de suas instalações.

Pelos ensaios apresentados e respectivos resultados, a metodologia se mostra perfeitamente aplicável, constituindo-se em instrumento eficaz para avaliar o desempenho de qualquer corpo moedor, sendo um procedimento de baixo custo, reduzido tempo de experimentação e simplicidade de execução.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. VERMEULEN, L.A. et al. Theories of ball wear and the results of a marked-ball test in tumbling milling. **Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy**, p.190-198, Aug. 1983.
2. MENACHO, J.M.; CONCHA, F.J. Mathematical model of ball wear in grinding mills. II- General Solution. **Powder Technology**, n.52, p.267-277, 1987.
3. AZZARONI, E. Determinacion de la ley de desgaste y distribucion del tamaño de las bolas en los molinos de bola. In: SIMPOSIUM SOBRE MOLIENDA, 2., Viña Del Mar, 1977. **Anais. Viña Del Mar, ARMCO-CHILE, 1977** p.114-188.
4. AUSTIN, L.G.; KLIMPEL, R.R. Ball wear and ball size distributions in tumbling ball mills. **Powder technology**, n.41, p.297-286, 1985.
5. VERMEULEN, L.A. A contribution to "Ball wear and ball size distributions in tumbling ball mills". **Powder Technology**, n.46, p.281-285, 1986.
6. MENACHO, J.M.; CONCHA, F.J. Comments on "A contribution to ball wear in tumbling mills" by L.A. Vermeulen. **Powder Technology**, n.47, p.97-99, 1986.
7. MENACHO, J.M.; CONCHA, F.J. Mathematical model of ball wear in grinding mills. I- Zero order wear rate. **powder Technology**, n.47, p.86-96, 1986.
8. BARROS, L.A. et al. Testes de avaliação de corpos moedores. In: SEMINÁRIO SOBRE MATERIAIS DE DESGASTE, 2., Uberlândia, 1991. **Anais. São Paulo, ABM, 1991.** p.481-502.
9. MAIA, G.S. et al. Testes de avaliação de corpos moedores através de amostras marcadas. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E HIDROMETALURGIA, 15., São Lourenço, 1992. **Anais. Belo Horizonte, ABTM, 1992,** Parte A, v.1., p.292-309.
10. FUHRMANN, L.E. Determination of wear in grinding balls. **Zement-Kalk-Gips**, n.4, p.90-95, 1990, Translation of n.2/90, p.99-109, 1990.
11. NORMAN, T.E.; LOEB Jr, C.M. Wear tests in grinding balls. **Metals Technology**, TP2319, AIME, p.330-360, Apr., 1948.

12. WESNER, A.L. et al. Study of grinding-ball wear employing a radioactive-tracer technique, **AIME Trans.**, v.217, p.429-434, 1960.
13. SINATORA, A.; ALBERTIN, E. Análise da fratura e do desgaste irregular de bolas de moinho de ferro fundido branco com alto cromo. In: SEMINÁRIO SOBRE MATERIAIS RESISTENTES AO DESGASTE, 2., Uberlândia, 1991. **ANAIS.** São Paulo, ABM, 1991, p.503-523.
14. MALGHAN, S.G. Methods to reduce steel wear in grinding mills. **Mining Engineering**, v.34, n.6, p.684-690, Jun. 1982.
15. TOLLEY, W.K. et al. Corrosion rates of grinding media mill water. Report of Investigation 8882, p.1-13, Salt Lake City Research Center, Bureau of Mines, Salt Lake City, s.d.
16. ALBERTIN, E. et al. Ferros fundidos brancos resistentes ao desgaste. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FUNDIÇÃO, 3., São Paulo, 1985. **Anais.** São Paulo, 1985, S.p.
17. SINATORA, A.; ALBERTIN, E. Considerações técnicas e econômicas sobre a fabricação e utilização de bolas de moinho fundidas. In: SEMINÁRIO SOBRE MATERIAIS RESISTENTES AO DESGASTE, 2., Uberlândia, 1991. **Anais.** São Paulo, ABM, 1991, p.85-122.
18. HOWARD, H.M. Grinding media. **Canadian Mining Journal**, p.59-64, Jun., 1970.
19. Barros, L.A. et al. Aspectos industriais de revestimentos de moinhos. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E HIDROMETALURGIA, 15., São Lourenço, 1992. **Anais.** Belo Horizonte, ABTM, 1991, Part A, v.1., p.310-328.