WILTON MASSANOBU TANI

DESGASTE POR ABRASÃO EM BOMBAS CENTRÍFUGAS DE POLPA

São Paulo
2006

WILTON MASSANOBU TANI

DESGASTE POR ABRASÃO EM BOMBAS CENTRÍFUGAS DE POLPA

Trabalho de Formatura em Engenharia de Minas do Curso de graduação do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da Universidade São Paulo.

Orientador: Prof. Dr. José Renato Baptista de Lima

São Paulo
2006

EPMI
TF-2006
T156d
Exemp 1574704

FICHA CATALOGRÁFICA

Tani, Wilton Massanobu
Desgaste por abrasão em bombas centrífugas de polpa / W. M. Tani. -- São Paulo, 2006.
20 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo.

1.Transporte em minas 2.Bombas centrífugas 3.Desgaste abrasivo I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo II.t.

M2006F

DEDALUS - Acervo - EP-EPMI

31700006089

RESUMO

Neste trabalho foram pesquisados conceitos e métodos sobre desgaste por abrasão em bombas de polpa disponíveis na literatura. Para tanto, foram descritos os mecanismos de desgaste por abrasão e alguns dos principais fatores que influenciam na vida útil deste tipo de equipamento.

Para complementação do trabalho, foi utilizado um software de seleção de bombas centrífugas de polpa de fabricante para estimativa de vida útil de equipamentos operando em diferentes condições de operação.

DESGASTE; ABRASÃO; BOMBAS CENTRÍFUGAS; MINERAÇÃO.

SUMÁRIO

RESUMO ii
SUMÁRIO iii
1 INTRODUÇÃO 1
2 DESENVOLVIMENTO 2
2.1 MECANISMOS DE DESGASTE ABRASIVO 2
2.2 EFEITO DA EROSÃO-CORROSÃO 4
2.3 VARIÁVEIS QUE AFETAM A ABRASÃO 4
2.4 TIPOS DE DESGASTE 9
2.5 TESTES EXPERIMENTAIS DE AVALIAÇÃO DA ABRASIVIDADE 10
2.6 DISPONIBILIDADE DE MATERIAIS RESISTENTES AO DESGASTE 13
2.7 PREVISÃO DO DESGASTE ABRASIVO EM EQUIPAMENTOS 15
2.8 SIMULAÇÃO DE PREVISÃO DE DESGASTE 16
3 CONCLUSÕES 18
4 REFERÊNCIAS 19
5 ANEXOS 21
5.1 ANEXO A - Resumo dos dados de entrada do Caso 1 22
5.2 ANEXO B - Resumo dos dados de entrada do Caso 2 23

1 INTRODUÇÃO

Os efeitos do desgaste na mineração são de impacto significativo, visto à enorme quantidade de equipamentos diretamente expostos a esforços desta natureza.

Dentre as operações em que verifica-se maior influência no desgaste pode-se citar as operações de britagem, moagem, escavação, transporte de polpa e peneiramento.

Este trabalho tem por finalidade descrever os mecanismos de desgaste por abrasão em bombas centrífugas de polpa, assim como mostrar diversos parâmetros determinados empiricamente por diversas publicações encontradas à disposição na literatura.

Para finalizar este trabalho, realizaram-se algumas simulações em software de um fabricante deste tipo de equipamento, nos quais foram comparadas as relações de desgaste de equipamentos em dois casos distintos.

No primeiro destes foi considerado um equipamento operando em condições extremas de rotação, enquanto no segundo, substituiu-se o equipamento por dois equivalentes, operando em série, porém operando em rotação menor.

2 DESENVOLVIMENTO

Antes de detalhar sobre a estimativa do efeito abrasivo em equipamentos é essencial entendermos os mecanismos que atuam sobre os mesmos.

2.1 MECANISMOS DE DESGASTE ABRASIVO

Segundo Chaves (1996), os mecanismos de desgaste abrasivo podem ser divididos nos sas seguintes categorias:

- Sulcamento ("golging abrasion"), característico de partículas mais grosseiras impactando superfícies de baixa dureza com velocidades altas e médias. Pedaços macroscópicos do metal ou borracha são arrancados da superfície pela ação de corte das partículas do mineral. Depende, evidentemente, do tamanho da partícula, da sua forma e dureza (abrasividade) e da dureza do material da superfície;

- Erosão, ocorre com baixas tensões e baixo impacto, no qual o movimento das partículas finas sobre a superfície vai polindo-a e erodindo-a. Depende principalmente da velocidade com que as partículas passam sobre a superfície e da sua dureza relativa à dureza da superfície;

- Riscamento, característico de altas tensões e também de impacto médio e baixo, é um comportamento intermediário entre os dois acima.

Segundo Wilson et al. (2006), os mecanismos de desgaste podem ser divididos em abrasão por escorregamento "sliding abrasion" e impacto de partículas "particle impact".

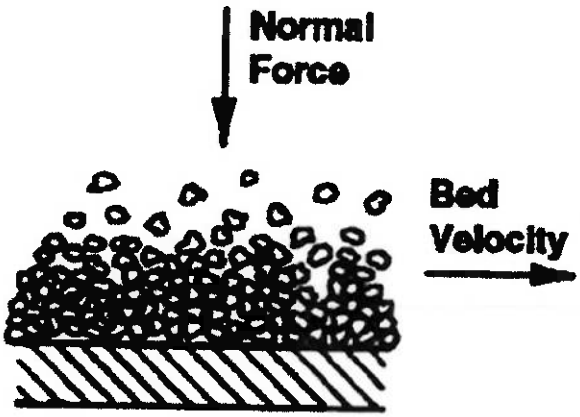

Figura 1 – Desgaste abrasivo por deslizamento

No desgaste por deslizamento os fatores que influenciam diretamente na intensidade dos mesmos são a força normal, a velocidade de escoamento e, obviamente as propriedades das partículas e da superfície. No desgaste por abrasão de tubulações, por exemplo, a força normal

atuante na superfície corresponde à força da gravidade, em bombas centrífugas há o incremento de forças centrífugas a esta componente (figura 1).

No desgaste provocado pelo impacto de partículas, a remoção de material ocorre por deformação "deformation", corte "cutting", fatiga "fatigue cracking", ou por uma combinação das mesmas. Pode-se observar melhor uma descrição deste fenômenos através da figura 2), Wilson sup cit.

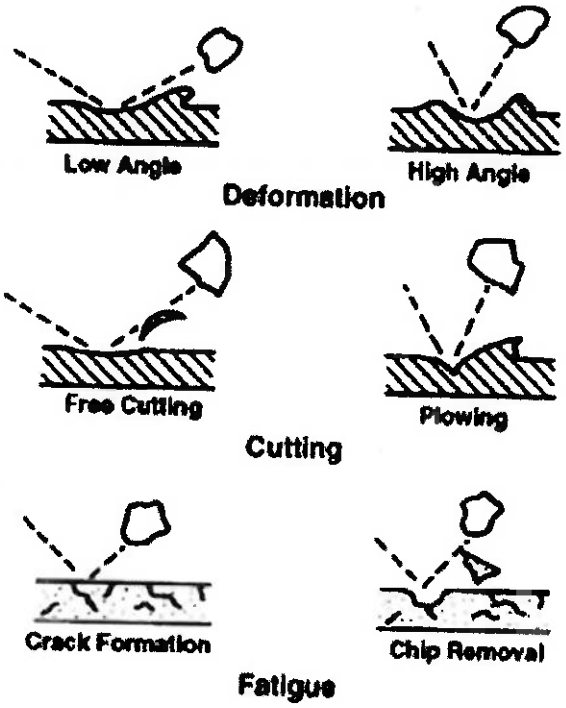

Figura 2 – Mecanismos de erosão por impacto de partículas

Assim, a intensidade de cada um destes mecanismos, explicados de modos diferentes por Chaves (1996) e Wilson (2006), de desgaste influenciam diretamente na intensidade do desgaste abrasivo nos equipamentos, sendo que estes sofrem influência direta de parâmetros como dureza do material do equipamento e dureza dos sólidos que atuam contra as paredes do equipamento, e no caso de polpas, também influenciam no desgaste o formato das partículas, concentração de sólidos e velocidade de contato.

Assim, Chaves (1996) recomenda a utilização de materiais tenazes e duros para desgaste por sulcamento, isto é, que não sofram deformação plástica e que tenham alta resistência ao riscamento; para desgaste por erosão, recomenda a escolha de materiais de alta dureza superficial; para desgaste por riscamento, recomenda a utilização de materiais de alta resistência ao cisalhamento e à compressão.

2.2 EFEITO DA EROSÃO-CORROSÃO

Além dos mecanismos de desgaste por abrasão descritos anteriormente, outros fatores influenciam no desgaste dos equipamentos. Entre estes destaca-se o efeito combinado entre a erosão e a corrosão.

Este fenômeno pode ocorrer tanto de modo uniforme como localizado, e se dá quando duas ou mais reações eletroquímicas agem sobre uma superfície exposta à abrasão, assim, a camada da superfície atacada é facilmente removida por erosão (Wilson et al., 2006).

Ainda, segundo Toro (2001), Wang-Xu (1983) e Madsen (1983, 1986, 1988) mostraram a extrema importância dos fenômenos corrosivos na erosão de metais em meios lamacentos, em especial quando as partículas abrasivas apresentam baixa angulosidade, e mesmo nos casos em que o material desgastado é considerado resistente à corrosão. Isto porque os resultados destes pesquisadores permitiram concluir que o efeito combinado de erosão e corrosão é maior do que a soma dos efeitos isolados, e foram propostos alguns mecanismos "mistos" para explicar o que foi chamado de "processos de sinergia erosão-corrosão".

Segundo Weir (2006), a resistência à corrosão é função da solubilidade de cromo na matriz ferrosa, que pode variar entre 5 a 25% em peso. Além disso, explica que o efeito do sinergismo se dá pela remoção prematura das partículas de carbonetos ("spalling"), provocada pela remoção da camada de óxido passivo na matriz ferrosa e nos carbonetos. Ainda explica que como a concentração de cromo na matriz ferrosa e nos carbonetos é diferente, há a possibilidade de ocorrer corrosão inter-fase na interface das mesmas, resultando em corrosão intergranular, que interfere negativamente em diversas propriedades destas ligas.

Chaves (1996) descreve algumas medidas de controle e mitigação de impactos ocasionados pela corrosão em tubulações de minerodutos, que pode ser acelerada devido à concentração de oxigênio na polpa, formação de correntes elétricas no solo e ação corrosiva de bactérias.

2.3 VARIÁVEIS QUE AFETAM A ABRASÃO

Após a compreensão e conhecimento dos mecanismos de desgaste abrasivo em materiais, é importante conhecer um a um quais as variáveis que influenciam na intensidade de atuação dos mecanismos anteriormente citados.

2.3.1 Efeito da velocidade das partículas

A resistência ao desgaste abrasivo, de modo geral, diminui com o aumento da velocidade impacto.

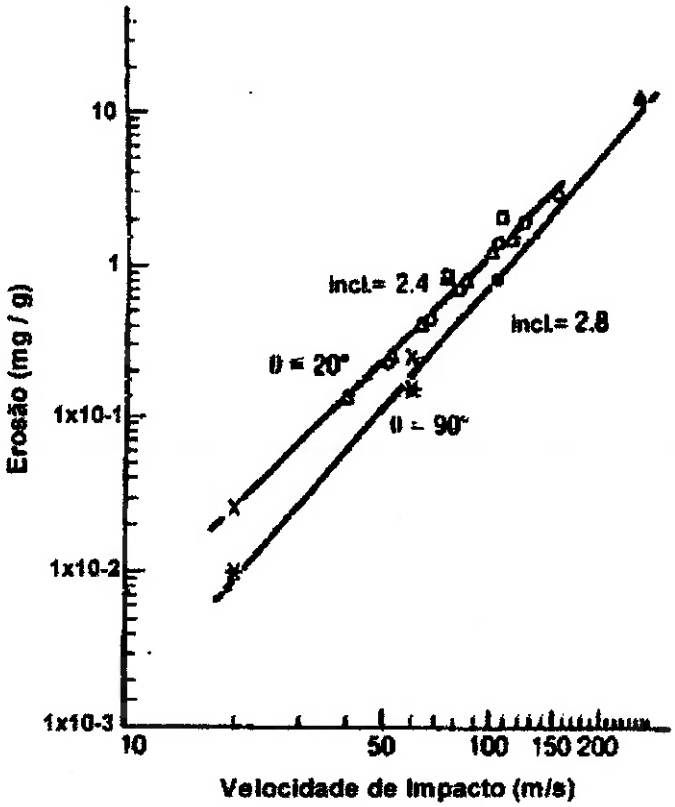

Figura 3 – Variação da taxa de erosão em função da velocidade de impacto (HUTCHINGS,1992)

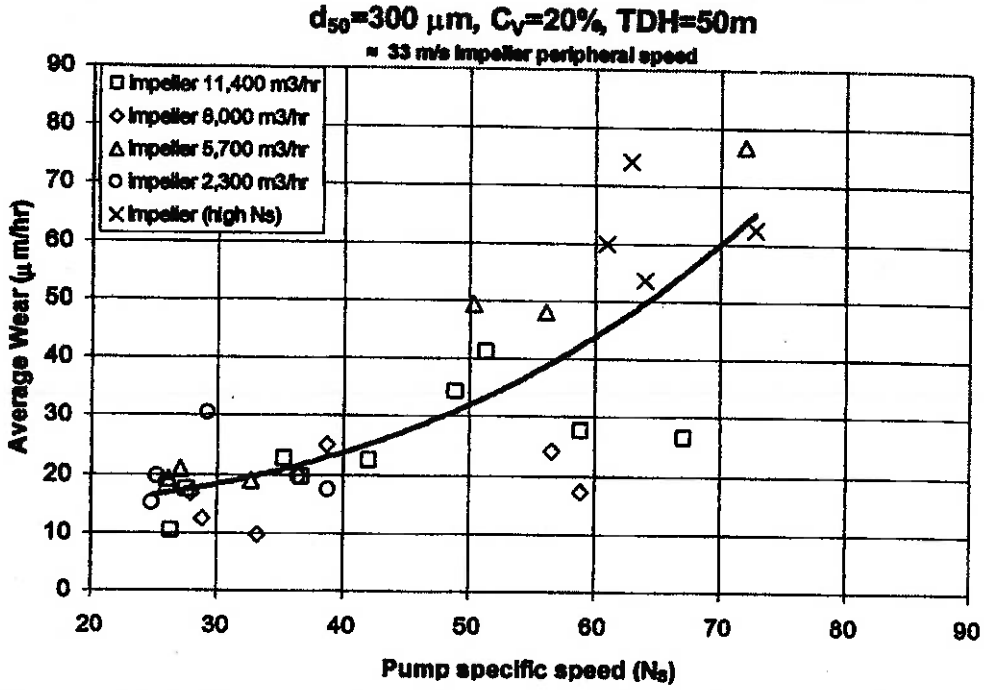

Figura 4 – Variação da taxa de erosão em função da velocidade (WILSON, 2006)

Hutchings, 1992, verificou a variação da taxa de erosão em função da velocidade de impacto das partículas para cobre puro, conforme a figura 3.

Wilson (2006) mostra na figura 4 que mesmo em bombas de diferentes tamanhos é possível correlacionar a velocidade com a taxa de abrasão de partículas.

2.3.2 Efeito do ângulo de impacto

O efeito do ângulo de impacto está diretamente ligada ao mecanismo de remoção de material da superfície. Segundo Toro (2001), em sistemas em que prevalece a deformação plástica e o corte, as maiores taxas de desgaste são atingidas para ângulos de impacto baixos, entre 10 e 30°; já em condições de fratura frágil, as maiores perdas são obtidas para incidência normal das partículas.

Hutchings (1992) mostra muito bem estas relações através da figura 5, no qual materiais dúcteis possuem baixa resistência á erosão com ângulos de impacto relativamente baixos.

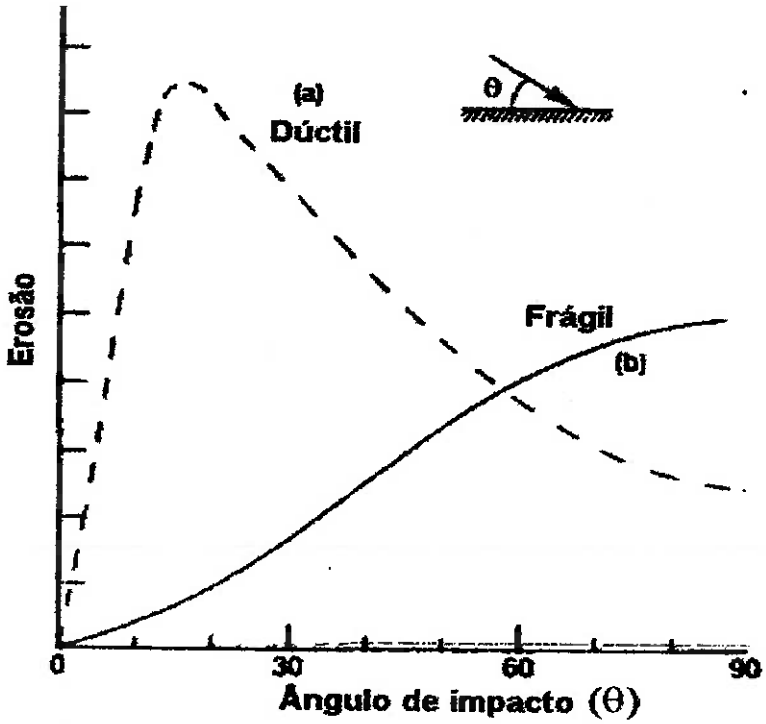

Figura 5 – Comportamento de materiais dúcteis e frágeis no desgaste erosivo (HUTCHINGS, 1992)

2.3.3 Efeito da dureza e forma das partículas

Partículas de maior dureza Mohs, de modo geral, têm maior potencial abrasivo em materiais. Por outro lado, é fato que abrasivos com durezas diferentes, mas ao mesmo tempo muito superiores à dureza da superfície, não são responsáveis por taxas de desgaste significativamente diferentes (TORO, 2001). A figura 6, de Misra-Finnie (1981) mostra este fenômeno.

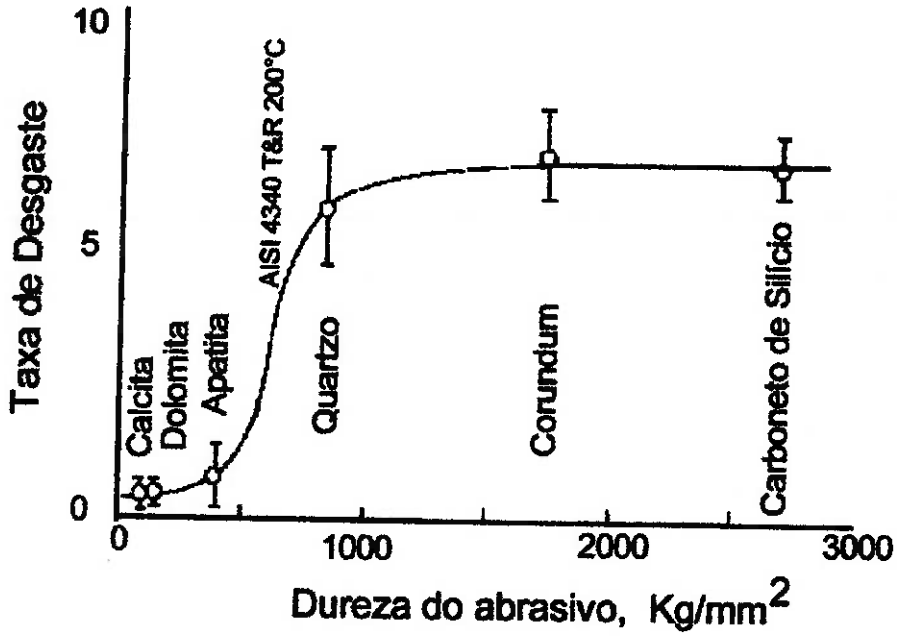

Figura 6 – Efeito da dureza das partículas abrasivas na taxa de desgaste erosivo (MISRA-FINNIE, 1981).

A forma das partículas abrasivas também são de influencia significativa no desgaste abrasivo. Segundo Chaves (1996), partículas de forma angulosa implicam em desgaste até duas vezes maior, ou melhor, a vida útil de um equipamento é duas vezes menor do que trabalhando com partículas arredondadas.

2.3.4 Efeito do tamanho das partículas

Em diversos estudos, verifica-se que tamanhos maiores de partículas de abrasivos implicam em aumento na taxa de desgaste. Segundo Hutchings (1992) este efeito torna-se menos intenso quando o tamanho supera um certo "valor limite", que varia conforme as propriedades do abrasivo e do material desgastado (figura 7).

Wilson (2006) mostra a variação do coeficiente de desgaste em função do tamanho de partículas em diversos materiais, conforme a figura 8.

Weir (2006) explica ainda, que partículas de tamanhos muito pequenos não possuem energia suficiente para provocar danos significativos à fase dura de carbonetos. Estes, porém, possuem importância significativa na remoção de porções da fase de matriz mole, deixando os carbonetos expostos e propensos ao impacto com partículas de tamanhos maiores.

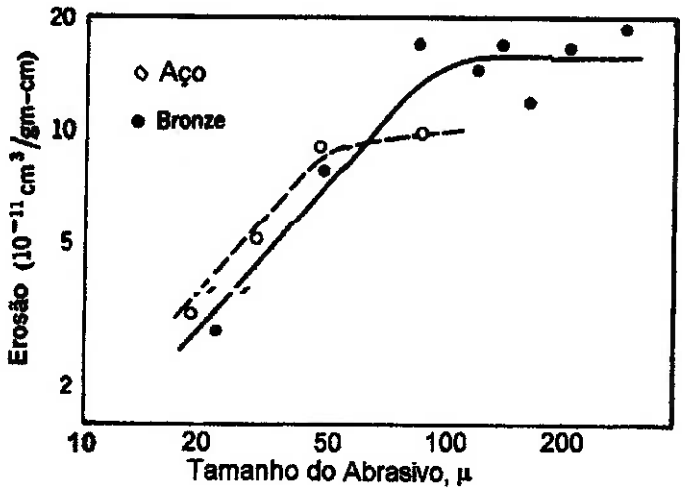

Figura 7 – Efeito da dureza das partículas abrasivas na taxa de desgaste erosivo (HUTCHINGS, 1992).

2.3.5 Efeito da Microestrutura

Dentre as propriedades das ligas metálicas que influenciam na resistência ao desgaste abrasivo de materiais, não podemos de citar as propriedades da microestrutura.

Como se é sabido, as ligas de ferro branco, em geral, são materiais multi-fase, ou seja, são compostos por uma fase dura de carbonetos, e uma fase de matriz mole.

Segundo Weir (2006), estes tipos de liga são mais sensíveis à abrasão nas regiões intergranulares ás fases mais duras compostas por carbonetos ("carbides").

Ainda, segundo o mesmo autor, os efeitos do desgaste abrasivo em ligas de ferro de alto cromo serão mínimos:

- Maximizando a fração volumétricas dos carbonetos duros M7C3;

- Produção de uma fina dispersão dos carbonetos, resultando em um pequeno espaço interpartículas, que é uma efetiva proteção á matriz ferrosa;

- Endurecimento da matriz ferrosa por meio de tratamento térmico.

2.4 TIPOS DE DESGASTE

Como foi descrito anteriormente a abrasividade é influenciada por diversas variáveis que variam desde as propriedades dos abrasivos, das características dos materiais sujeitos à abrasão, e as condições de interação entre os mesmos.

Assim, segundo Santos, os tipos de desgaste atuantes em uma bomba centrífuga pode ser expresso pelos pontos abaixo descritos:

Ponto 1 – Abrasão por erosão à baixa velocidade e baixo impacto;

Ponto 2 – Abrasão por erosão à baixa velocidade; desgaste por sulcamento (gouging) ocorrerá devido ao impacto da massa fluida. O desgaste nessa região será maior que aquele no lado interno do rotor próximo à sucção;

Ponto 3 – Abrasão por erosão com leve a médio impacto causa severo desgaste. É usual observar-se dobramento nas palhetas, quando se usam materiais dúcteis na fabricação do rotor;

Ponto 4 e 5 – Erosão à alta velocidade e sulcamento devido ao alto impacto;

Ponto 6 – Erosão nas paredes laterais. O pior desgaste ocorre nas vizinhanças do diâmetro máximo do rotor, devido aos vértices. O lado de sucção é sujeito a maior desgaste por causa da recirculação da mistura.

Ponto 7 – Abrasão por moagem ou riscamento sob altas pressões entre as duas superfícies. O anel do lado sucção sofre maior desgaste devido à recirculação da lama;

Ponto 8 – Abrasão por sulcamento devido ao alto impacto das partículas. Se a "lingüeta" for de material muito duro (e, portanto, frágil), ela irá fraturar; se for de material dúctil, irá sofrer dobramento e amassamento. Há também erosão devido à alta velocidade da mistura;

Ponto 9 – Erosão devida à alta velocidade. A região crítica é a "garganta", pois é nela que ocorre a maior velocidade da mistura abrasiva.

Ponto 10 – Abrasão por moagem, onde as partículas abrasivas penetram entre as gaxetas moles e riscam a luva.

E ainda sugere que a vida útil da bomba pode ser prolongada, e os custos de manutenção reduzidos através de um projeto consciencioso, ou seja, é preciso considerar:

- Construir a bomba com materiais de boa resistência à abrasão;
- Prever maiores tolerâncias para desgaste em todas as peças sujeitas à excessiva abrasão;
- Adotar um projeto hidráulico que minimize os efeitos causadores de desgaste;
- Adotar um projeto mecânico compatível com os materiais de construção e que permita um fácil acesso às partes gastas para sua reposição.

2.5 TESTES EXPERIMENTAIS DE AVALIAÇÃO DA ABRASIVIDADE

Para prever o efeito da abrasividade em equipamentos é essencial a realização de ensaios experimentais. Assim, ao longo dos anos, inúmeros estudos foram realizados com a finalidade de quantificar e caracterizar o desgaste.

Entre eles pode-se citar Finnie (1960), Tuzson et al. (1984), Miller (1987), Roço et al. (1987), Pagalthivarthi & Helmly (1990), Sundararajan (1991), Hutchings (1992), Tian et al. (2005) e Li (2005).

Pode-se citar como os mais relevantes para bombeamento os testes de abrasão de Miller e o teste de abrasão em máquina centrífuga de desgaste por escorregamento (Coriolis Machine).

2.5.1 ASTM G75 – Standard Test Method for Determination of Slurry Abrasivity (Miller Number) and Slurry Abrasion Response of Materials (SAR Number)

Este método de ensaio consiste de um procedimento que pode ser usado para se obter informações da abrasividade relativa de qualquer polpa (número de Miller), ou a resistência de diferentes materiais para a abrasividade de diferentes polpas (número de SAR).

O equipamento utilizado para este ensaio, denominado "Miller Number Machine", baseia-se de uma câmara onde é colocada a polpa, a 50% de concentração volumétrica de sólidos, e um suporte plástico que fixa o corpo de provas alvo de desgaste. Este suporte move-se em movimento harmônico horizontal, acionado por um dispositivo que gira a 45 rpm (figura 9). Este método é realizado por 6 horas com incrementos de 2 horas, dependendo da taxa de desgaste obtida.

Através deste ensaio, Wilson (2006), exibe coeficientes utilizados para correção de abrasividade de polpas conforme o número de Miller encontrado experimentalmente (figura 10).

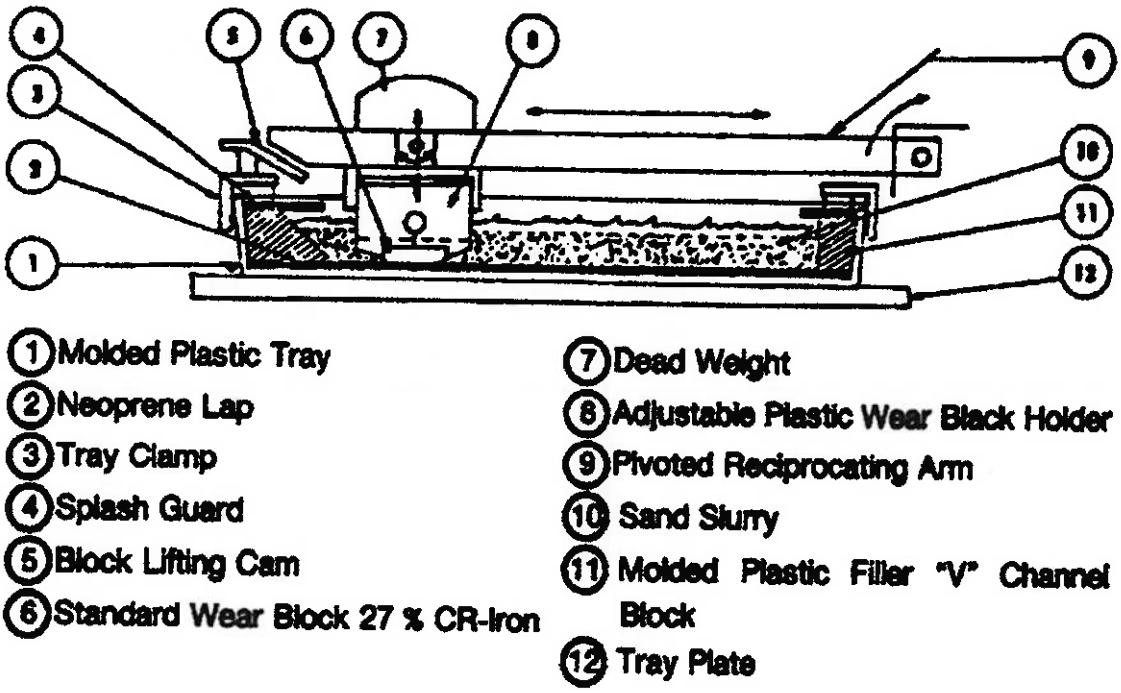

Figura 9 – Miller Number Machine

Mineral	Miller Number	Abrasivity
Limestone	34	0.60
Raw Coal	56	0.75
Phosphate	90	0.90
Sand	112	1.00
Tailings	219	1.33
Copper Ore	287	1.50

Figura 10 – Coeficientes de correção de abrasividade de polpas (WILSON, 2006).

2.5.2 Teste de Abrasividade por máquina centrífuga de desgaste por escorregamento (Coriolis Machine)

Este método, incialmente proposto por Tuzson et al. (1984) foi adaptado pela GIW Industries (figura 12) e segundo Wilson (2006) é um dos métodos mais precisos para determinação de abrasividade relativa de materiais em aplicações com polpa de minério, pois é capaz de analisar parâmetros não considerados pelo ensaio de abrasão de Miller.

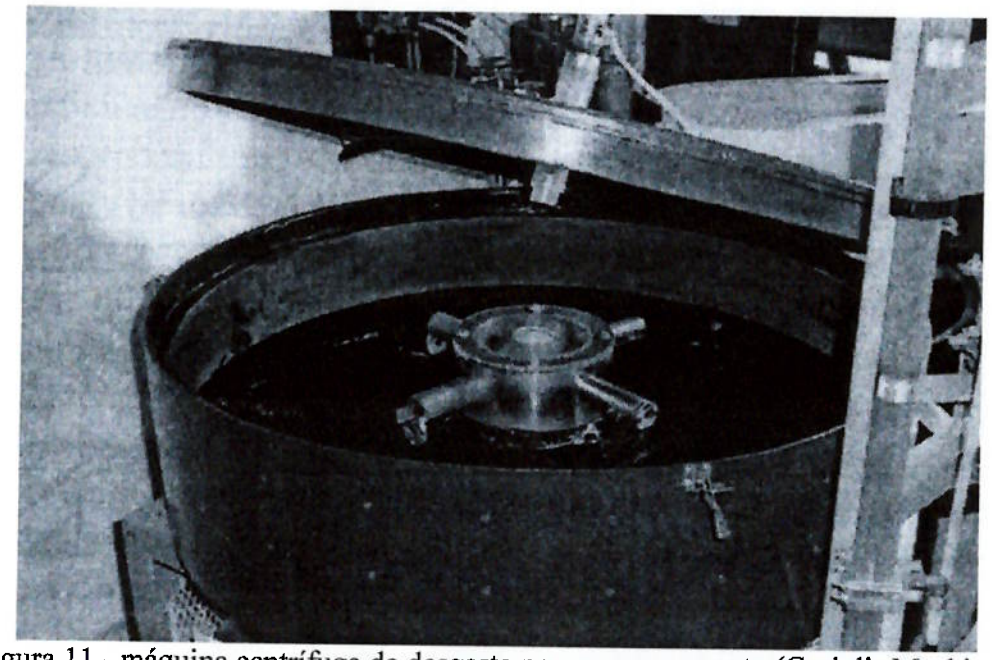

Figura 11 - máquina centrífuga de desgaste por escorregamento (Coriolis Machine).

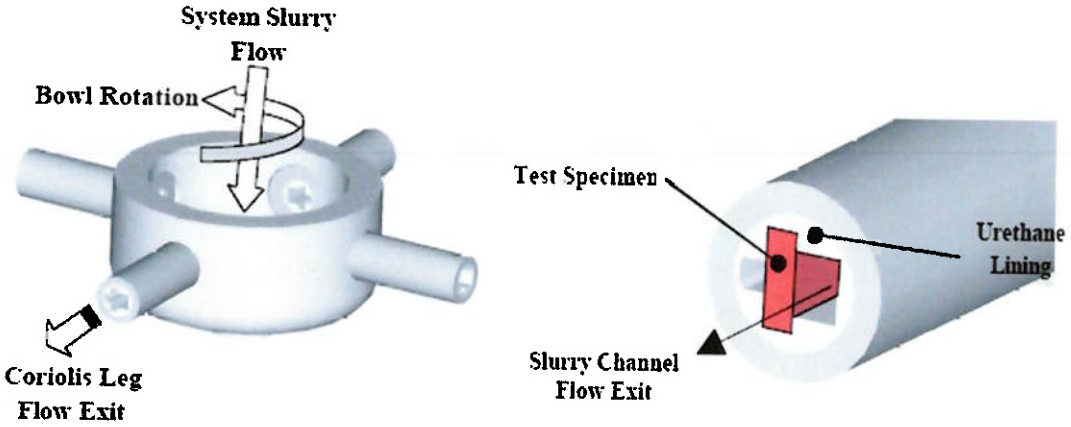

Figura 12 - máquina centrífuga de desgaste por escorregamento (Coriolis Machine).

Este equipamento consiste de uma câmara circular giratória composto por quatro canais de escoamento de polpa. Dentro destes canais são fixados os corpos de prova nos quais a polpa é forçada contra os mesmos.

Ainda segundo Wilson (2006), este método de ensaio possui a vantagem de não necessitar dividir os resultados amostrados em componentes de impacto e escorregamento. Outra vantagem deste método é que o mecanismo de desgaste e as condições de operação estão duplicadas, removendo o "fator de especulação" dos resultados dos ensaios.

Como produto deste tipo de ensaio, encontra-se o Coeficiente de Energia Específica (Esp), descrito como a energia necessária para remoção de material por erosão, e o Coeficiente de Desgaste (Wc). Tian (2005) descreve muito bem essas variáveis utilizando as mesmas para comparar a abrasividade de polpas de diferentes minerais e a resistência à abrasão de diferentes ligas metálicas.

2.6 DISPONIBILIDADE DE MATERIAIS RESISTENTES AO DESGASTE

A fim de minimizar os custos de manutenção devido ao desgaste de equipamentos, a indústria tem concentrado esforços no desenvolvimento de novos materiais. Materiais mais resistentes ao desgaste têm impacto significativo na indústria mineral.

Segundo Santos, para determinar o tipo de material a ser utilizado nas partes de desgastes das bombas de polpas deve se levar em consideração os seguintes fatores:

- tamanho, dureza e formato dos sólidos em suspensão;
- corrosividade do material;
- temperatura do fluido;
- velocidade periférica;
- consumo de energia da bomba.

Após conhecidos os mecanismos de desgaste por abrasão, e os fatores, descrevemos os principais materiais utilizados na fabricação de partes sujeitas ao desgaste abrasivo e corrosivo, assim como suas principais características, a fim de otimizar seleção dos mais apropriados.

- Ferros de Cromo-Níquel

Os ferros de cromo-níquel, conhecidos comercialmente como NI-HARD são amplamente utilizados em peças de bombas de polpa e fornecem uma boa relação econômica entre o seu custo e sua vida útil. São utilizados em condições em que houver contato direto com o efeito abrasivo. Possui dureza na faixa de 550 a 700 Brinell.

- Ferros de Alto Cromo

Os Ferros de alto cromo possuem dureza equivalente às ligas de Ferro de cromo-níquel, porém possuem melhor resistência à corrosão a um custo relativamente mais elevado.

Proporciona bom serviço com polpas corrosivas encontradas na indústria de alumínio e bombeamento de polpas marítimas, resultando em equipamentos com vida útil até 50% vezes maior neste tipo de aplicação.

- Outras ligas utilizadas

Alternativamente às ligas tradicionalmente utilizadas pela indústria de bombas de polpa, também são utilizadas ligas de ferros cromo-molibdênio e cromo-molibdênio-manganês, que possuem maior resistência à abrasão quando comparadas com as ligas de alto cromo, entretanto ainda não foram bem difundidas na indústria de bombas de polpas sendo recomendadas para condições extremas de abrasão por deslizamento. A concentração em volume de carbonetos de cromo nestas ligas podem chegar a 50%, e possuem dureza que variam entre 620-740 Brinell, não apresentam resistência à corrosão e baixa tenacidade.

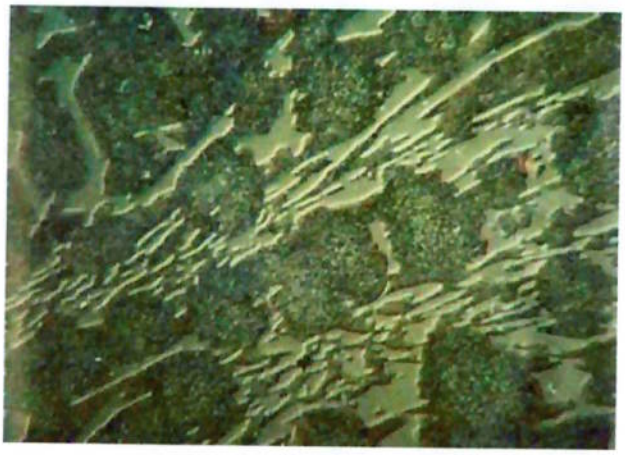

Figura 13 – Microestrutura básica de uma liga de Ferro de alto cromo - 400X.

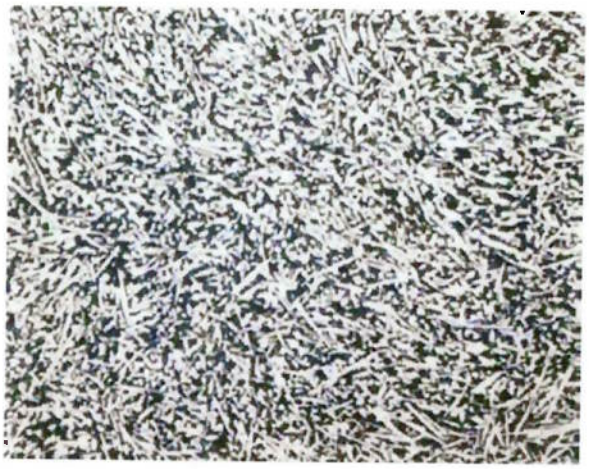

Figura 14 – Microestrutura básica de uma liga de Ferro de cromo-níquel - 400X.

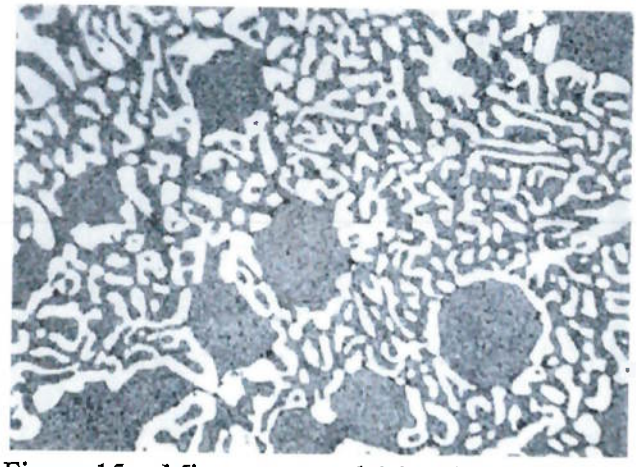

Figura 15 – Microestrutura básica de uma liga de Ferro de alto cromo - 400X.

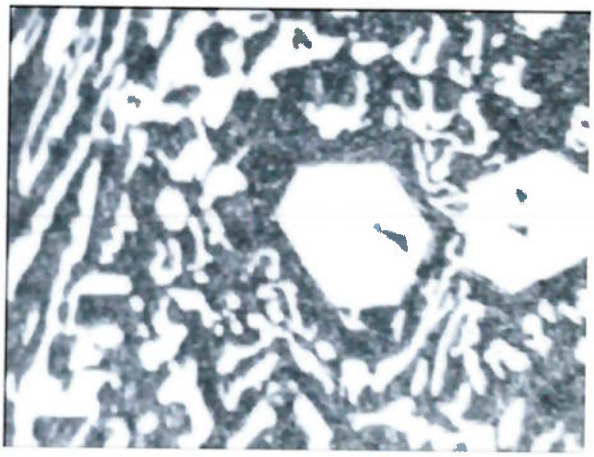

Figura 16 – Microestrutura básica de uma liga de Ferro de cromo-molibdênio-manganês - 400X.

- Borracha natural

De custo relativamente mais baixo que as ligas metálicas, possui alta resistência à abrasão devido a sua capacidade de deformar-se elasticamente. Seu uso, no entanto, deixa de ser economicamente viável no bombeamento de partículas de grandes tamanhos ou de formato pontiagudo que danificam a borracha com facilidade. Uma desvantagem é o limite de velocidade periférica de 25 metros/segundo, pois velocidades elevadas podem danificar a borracha.

- Borrachas sintéticas

De menor resistência á abrasão que as borrachas naturais, são utilizadas quando o equipamento estiver bombeando hidrocarbonetos ou produtos químicos agressivos à borracha natural, ou quando a temperatura de operação exceder 70°C.

O poliuretano, em aplicações onde se prevalece a abrasão do tipo deslizante apresenta desempenho maior que o da borracha, sendo amplamente aplicado em revestimentos laterais em bombas de polpa onde as altas velocidades desenvolvidas pelo rotor impeçam o uso da borracha. Pode-se, ainda, citar como exemplos de borrachas sintéticas utilizadas o neopreme, butila, nutrila, e o hypalon.

2.7 PREVISÃO DO DESGASTE ABRASIVO EM EQUIPAMENTOS

A previsão do desgaste abrasivo em equipamentos possui natureza bastante complexa e dificilmente poder-se-ia realizar estimativa preliminar sobre o mesmo, devido a complexidade que os mecanismos, descritos anteriormente, atuam sobre os equipamentos.

Segundo Wilson (2006), inúmeros trabalhos começaram a ser desenvolvidos com o aumento da disponibilidade de computadores de alta velocidade e grande capacidade de armazenamento. Isso ocorre porque o desgaste por abrasão atua de forma localizada, dependendo de valores de velocidades pontuais e concentração de sólidos. Assim, a simulação numérica desses fenômenos é realizada por um conjunto de equações diferenciais e respectivas condições de contorno sobre o fluxo de fluído.

Ainda segundo este mesmo autor, após desenvolvido um algoritmo de análise numérica, este possui a vantagem permitir uma análise fazendo considerações sobre propriedades dos materiais e condições de contorno.

2.8 SIMULAÇÃO DE PREVISÃO DE DESGASTE

Para a complementação deste trabalho, foi utilizado o "software" de seleção e aplicação de bombas centrífugas de polpa da GIW Industries Inc. para uma melhor análise da importância da abrasão em sistemas de bombeamento.

Este "software" simula o impacto da abrasão a partir dos diversas variáveis que influenciam o desgaste de equipamentos e ampla experiência prática neste ramo de equipamentos. Através destes dois casos simulados, verifica-se o quanto uma boa escolha de arranjo de equipamentos pode influenciar no desempenho de um sistema.

É importante ressaltar que a seleção do equipamento utilizado na simulação dos dois casos é meramente ilustrativa, ou seja, equipamentos mais adequados a cada um dos casos poderiam ser realizadas visando uma otimização do sistema de bombeamento.

Assim, para a realização destas simulações, fixou-se os parâmetros operacionais dos equipamentos para que se fosse possível verificar diferenças quanto ao desgaste e vida útil de equipamentos frente a duas situações, CASO 1 e CASO 2, descritas abaixo.

2.8.1 DESCRIÇÃO DO SOFTWARE

O software utilizado para a realização das simulações de avaliação do desgaste abrasivo em bombas centrífugas de polpa, denominado SLYSEL, foi desenvolvido pela GIW Industries Inc., com sede localizada em Grovetown, GA, USA.

Este software é uma ferramenta de auxílio na seleção de Bombas Centrífugas de Polpa e aborda todos os aspectos relevantes para uma boa seleção de equipamentos. Dentre os aspectos técnicos utilizados para uma boa seleção de equipamentos, este software faz considerações sobre:

- características da polpa bombeada;
- perdas de carga em tubulações;
- desgaste por abrasão;
- vida útil de mancais;
- informações técnicas de equipamentos;
- custos operacionais.

A avaliação da abrasividade e vida útil do bombeador é realizada pelo software levando em consideração dados empíricos utilizando-se polpa de grãos de sílica e, para avaliação da abrasividade de outros tipos de polpa são realizados extrapolando-se estes resultados a partir de um fator de correção baseado no número de Miller.

Segundo recomendação do próprio fabricante, os resultados obtidos sobre o efeito da abrasividade devem ser utilizados somente para efeito comparativo das taxas de abrasividade,

pois é muito difícil estimar as variações do sistema. Assim, este "software" deve ser utilizado como uma ferramenta para a seleção da melhor alternativa para determinada aplicação.

Através de algumas simulações realizadas neste mesmo "software" notou-se que este software não faz considerações sobre a abrasividade a partir de dados como o pH, concentração de cloretos e formato das partículas, apesar de possuir campos para preenchimento dos mesmos. Notou-se, porém, que o mesmo faz considerações com relação à temperatura, concentração de sólidos, tamanho das partículas e rotação de operação.

Uma versão livre deste software pode ser baixada no sítio eletrônico http://www.giwengr.com/GIWSLYSELLiteusers.htm.

2.8.2 CASO 1: EQUIPAMENTO OPERANDO EM ALTA ROTAÇÃO

Neste caso, selecionou-se propositadamente um equipamento operando em condições extremas, ou seja, com alta rotação de operação.

Para a seleção deste equipamento, considerou-se uma vazão de 800 m^3/h, altura manométrica de 60 metros, concentração de sólidos em massa de 40%, d50 de 150 micrometros, número de Miller de 112 (grãos de sílica), densidade relativa dos sólidos de 2,65 e temperatura do fluido de 25°C.

Como pode ser observado no resumo do relatório gerado pelo software utilizado, a carcaça de uma bomba LCC-M200-610.5K, operando a 1012 rpm de rotação, apresenta vida útil aproximada de aproximadamente 11369 horas de operação, enquanto que o bucal de sucção teve vida útil estimada de 1770 horas.

2.8.3 CASO 2: SUBSTITUIÇÃO POR DOIS EQUIPAMENTOS OPERANDO EM SÉRIE

Neste caso, considerou-se a utilização de dois equipamentos operando em série. Assim tem-se que a soma das aturas manométricas por estes dois equipamentos deve ser igual a altura manométrica considerada no CASO 1. Para a simulação de vida útil neste segundo caso, todas as outras condições operacionais foram mantidas iguais ao CASO 1.

Assim, para a seleção deste equipamento, considerou-se uma vazão de 800 m^3/h, altura manométrica de 30 metros, concentração de sólidos em massa de 40%, d50 de 150 micrometros, número de Miller de 112 (grãos de sílica), densidade relativa dos sólidos de 2,65 e temperatura do fluido de 25°C.

Assim, verificou-se que a vida útil prevista para a carcaça do mesmo equipamento do CASO 1, operando a 757 rpm de rotação, apresenta vida útil de 26098 horas de operação, enquanto o bucal de sucção teve vida útil estimada em 5377 horas.

3 CONCLUSÕES

Através da simulação realizada nos CASO 1 e CASO 2, pode-se verificar a importância da análise de fatores que influenciam o desgaste abrasivo de equipamentos.

O equipamento sobre as condições de operação do CASO 1 apresentou estimativa de vida útil da carcaça quase que duas vezes e meia menor que o arranjo de equipamentos do CASO 2.

Mesmo que não sejam observadas vantagens significativas do ponto de vista econômico, a redução do desgaste de equipamentos implica em redução de custos muitas vezes não consideradas em projetos, como a redução de paradas para manutenção e redução de itens em almoxarifado.

Através da análise do "software" utilizado, nota-se que apesar de ampla experiência na atuação no ramo de bombas de polpa, o fabricante não pode garantir dados precisos na estimativa de vida útil destes equipamentos.

4 REFERÊNCIAS

ASTM International **G75-01 - Standard Test Method for Determination of Slurry Abrasivity (Miller Number) and Slurry Abrasion response of Materials (Sar Number)**, ASTM International, 2001.

CHAVES, A.P.; PERES, A.E.C. **Teoria e prática do tratamento de minérios**, Volume 3, Terceira Ed, São Paulo: Signus / Brasil Mineral, 2006.

CHAVES, A.P.; PERES, A.E.C. **Teoria e prática do tratamento de minérios**, Volume 1, Primeira Ed, São Paulo: Signus / Brasil Mineral, 1996.

CLARK, H.M.; TUZSON, J.; WONG, K.K. **Measurements of specific energies for erosive wear using a Coriolis erosion tester**. Science Direct, Wear 241, p.1-9, 2000.

Fabrica de Aço Paulista; **Manual de britagem**, 5ª.Ed, São Paulo, 1994.

KJOS, D.M. **Materiales ferrosos de desgaste y su disenho, Simpósium sobre molienda**, 3, Anais, ARMCO, Santiago, 1980.

FINNIE, J. **Erosion of surfaces by solid particles**, WEAR, Vol. 3, No. 3-4, 1960.

HORNE, C.A. **A guide to good slurry pumping practice**, Canadian Mining Journall, Nov/Dez 1976.

HUTCHINGS, I.M. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. Edward Arnold, Cambridge, 1992.

LI, J. **Prediction of particle rotation in s centrifugal accelerator erosion tester and the effect on erosion rate**, WEAR 258, 406-502, 2005.

MADSEN, B.W. **A study of parameters using a new constant-wear-rate slurry test.** Proceedings of The Int. Conf. On Wear Of Materials, 1983. Pp. 345-354.

MADSEN, B.W. **Measurement of wear and corrosion rates using a novel slurry wear test.** Proceedings of CORROSION / 86, NACE, Houston, 1986. Pp. 21-28.

MADSEN, B.W. **Measurement of erosion-corrosion synergism with a slurry wear test apparatus**, WEAR, 123, 1988. Pp. 127-142.

Metso Minerals; **Manual de britagem / Metso Minerals**, Sorocaba: Metso Minerals, 2005.

MILLER, J.E. **The SAR number for slurry abrasion resistance. ASTM STP 496, Slurry Erosion – Uses, Applications and Test Methods**, Ed. Miller and Schmidt, Pp. 156-166, 1987.

MISRA, A.; FINNIE, I. **Correlations between two-body and three-body abrasion and erosion of metals.** WEAR, 68, 1981. Pp. 33-39.

MUKHOPADHYAY, A.K.; GUPTA, P. **Metals and materials in mineral processing Plant equipment, bulk solids handling**, vol 23, No. 4 – 2003.

PAGALTHIVARTHI, K.V. & HELMLY, F.W. **Application of materials wear testing to solids transport via centrifugal slurry pumps.** Wear Testing of Advanced Materials, ASTM STP 1167, Eds. Divakar Y Blau, Am. Soc. For Testing and Materials, Philadelphia, PA, 1990.

ROCO, M.C., NAIR, P. & ADDIE, G.R. **Test Approach for dense slurry erosion. ASTM STP946, Slurry Erosion – Uses, Application and Test Methods.** Ed. Miller and Schmidt, Pp. 185-210, 1987.

SANDARARAJAN, G. **Comprehensive model for the solid particle erosion of ductile materials.** WEAR 149, 111-127, 1991.

SANTOS, J.R.M. **Curso de bombas hidráulicas e tubulações industriais**, Fábrica de Aço Paulista.

SILVA, M.A. **Manual de Treinamento**, KSB Bombas Hidráulicas S/A, 5ªEdição, 2003.

TIAN, H.H.; ADDIE, G.R.; PAGALTHIVARTHI, K.V. **Determination of wear coefficients for erosive wear prediction through Coriolis wear testing.** Science Direct, Wear 259, p.160-170, 2005.

TIAN, H.H.; ADDIE, G.R. **Experimental study on erosive wear of some metallic materials using Coriolis wear testing approach.** Science Direct, Wear 258, p.258-269, 2005.

TORO BETANCUR, A.O. **Microestrutura e propriedades de superfície de aços inoxidáveis martensíticos de alto teor de nitrogênio**, São Paulo, 2001.

TUZSON, J.J., Lee, J. & SCHEIBE-POWELL, K.A. **Slurry erosion tests with centrifugal erosion tester. Liquid-Solid Flows and Erosion Wear in Industrial Equipment.** ASME, FED-VOL. 13, Ed. Roco, Pp. 84-87, 1984.

XIE, Y.; CLARK, H.M.; HAWTHORNE, H.M. **Modelling slurry particle dynamics in the Coriolis erosion tester.** Science Direct, Wear 225-229, p. 405-416, 1999.

WANG, Q.L.; XU, P.E. **Wear of Alloy Steels in Silica Sand Slurry.** Proceedings of The Int. Conf. on Wear of Materials, 1985, Pp. 671-676.

WEIR MINERALS; **White iron microestruture and wear,** Bulletin Number 18. Disponível em <http://www.weirminerals.com>. Acesso em: 10 de nov. 2006.

WILSON, K.C.; ADDIE, G.R.; SELGREN, A.; CLIFF, R. **Slurry transport using centrifugal pumps**, 3rd Ed., Springer, New York, 2006.

ANEXOS

4.1 ANEXO A - Resumo dos dados de entrada do Caso 1

SIMULAÇÃO 1 E 2

CASO1

LCC-M200-610.5K A 125MM OIL CBA STUFFING BOX KE
-------- SELECTED PUMP with ALL VALUES SCALED to NEW SPEED & TURNDOWN ---------
S 8 x10 LCC 24 C H 6- / / 3ME 125MM 5013X-01 E 27 -05 B 12B-95
********** PLEASE NOTE ALL DIAMETERS ARE IN MILLIMETERS **********

RPM	1012.2	T/D RATIO (THEO)	1.000	PERIPHERAL VEL	32.3 m/s
EFF. (SLURRY)	77.3	FULL IMP DIA	609.60	THROAT VEL	9.0 m/s
EFF. (WATER)	79.5	THEORET IMP DIA	609.60	BRANCH VEL	6.9 m/s
NPSH RQD (m)	3.1	ACTUAL IMP DIA	609.60	SUCTION VEL	4.4 m/s
Conc. by WT (%)	40.0	SOLIDS EFFECT HEAD	2.74%	SOLIDS EFFECT EFF	2.75%
Conc. by Vol(%)	20.1	Max OPER PRES(BAR)	8.3	SPHERE PASSAGE	101.6 mm
Pump Ns (SI)	24.2	Suction Ns (SI)	176.3	ROTATION	RH

	Flow(m^3/hr)	Head(m)	Eff.	kW w/SGM	NPSHR(m)
	0.0	67.8	0.0	78.8	1.6
	227.1	67.6	46.6	119.1	2.0
MinQuote	465.5	65.5	67.5	163.4	2.4
	477.0	65.4	68.1	165.6	2.4
	704.1	61.9	75.9	207.7	2.7
@Duty	800.0	60.0	77.3	224.5	3.1
@BEP	931.1	57.1	78.0	246.5	4.2
	953.9	56.6	78.0	250.2	4.4
120%Duty	960.0	56.4	78.0	251.2	4.5
MaxQuote	1181.3	50.6	75.5	286.4	8.4

*Water performance guarantees for this pump may be specified in accordance with Hydraulic Institute HI 1.6-1994 Class B between flows 466 to 1181 (m^3/hr)
If NPSHR guarantee levels are required, consult GIW Engineering

* Note: Pump Solids Effect is based on a Settling Slurry

Flow :	800. m^3/hr	Fluid S.G.	0.998	Pump Service Class :	3
Head :	60.0 m	Slurry S.G.	1.330	Abrasivity Correction :	1.0
Throughput:	425.3 mtons/hr	Solids S.G.	2.650	D50 (microns) :	150.
Large particles (>2300 microns):		Well-Rounded		D85 (microns) :	345.
% fines <74 microns:	0.0	Miller (G75)	112.	Largest Solid(microns):	2000.
Fluid pH :	6.7	Temp (C)	25.0	Viscosity(N-s/m^2)	.0008931
Chlorides :	0. (ppm)				

System NPSH available is (m) 7.2

ESTIMATED Diameter (microns)	Wear Rate* (microns/hour)	Wear Life (hours)	Thickness Basis for wearout of Part (mm)	Effective Particle
Liner	13.132	1770.	23.247	248.
Casing	2.943	11369.	33.459	248.

4.2 ANEXO B - Resumo dos dados de entrada do Caso 2

SIMULAÇÃO 1 E 2

CASO2

LCC-M200-610.5K A 125MM OIL CBA STUFFING BOX KE
-------- SELECTED PUMP with ALL VALUES SCALED to NEW SPEED & TURNDOWN ---------
S 8 x10 LCC 24 C H 6- / / 3ME 125MM 5013X-01 E 27 -05 B 12B-95
********** PLEASE NOTE ALL DIAMETERS ARE IN MILLIMETERS **********

RPM	756.8	T/D RATIO (THEO)	1.000	PERIPHERAL VEL	24.2 m/s
EFF. (SLURRY)	76.2	FULL IMP DIA	609.60	THROAT VEL	9.0 m/s
EFF. (WATER)	78.3	THEORET IMP DIA	609.60	BRANCH VEL	6.9 m/s
NPSH RQD (m)	3.4	ACTUAL IMP DIA	609.60	SUCTION VEL	4.4 m/s
Conc. by WT (%)	40.0	SOLIDS EFFECT HEAD	2.74%	SOLIDS EFFECT EFF	2.75%
Conc. by Vol(%)	20.1	Max OPER PRES(BAR)	8.3	SPHERE PASSAGE	101.6 mm
Pump Ns (SI)	24.2	Suction Ns (SI)	176.3	ROTATION	RH

	Flow(m^3/hr)	Head(m)	Eff.	kW w/SGM	NPSHR(m)
	0.0	37.9	0.0	33.4	0.9
	193.1	37.7	49.7	52.9	1.2
MinQuote	348.1	36.6	66.5	69.3	1.3
	383.8	36.3	68.9	73.1	1.3
	576.9	33.9	75.9	93.1	1.6
@BEP	696.1	31.9	76.9	104.5	2.3
	767.7	30.6	76.6	111.1	3.0
@Duty	800.0	30.0	76.2	114.0	3.4
MaxQuote	883.3	28.3	74.4	121.5	4.7
120%Duty	960.0	26.6	72.0	128.4	6.3

*Water performance guarantees for this pump may be specified in accordance with Hydraulic Institute HI 1.6-1994 Class B between flows 348 to 883 (m^3/hr)
If NPSHR guarantee levels are required, consult GIW Engineering

* Note: Pump Solids Effect is based on a Settling Slurry

Flow :	800. m^3/hr	Fluid S.G.	0.998	Pump Service Class :	3
Head :	30.0 m	Slurry S.G.	1.330	Abrasivity Correction :	1.0
Throughput:	425.3 mtons/hr	Solids S.G.	2.650	D50 (microns) :	150.
Large particles (>2300 microns):	Well-Rounded			D85 (microns) :	345.
% fines <74 microns:	0.0	Miller (G75)	112.	Largest Solid(microns):	2000.
Fluid pH :	6.7	Temp (C)	25.0	Viscosity(N-s/m^2)	.0008931
Chlorides :	0. (ppm)				
System NPSH available is (m)	7.2				

ESTIMATED Diameter (microns)	Wear Rate* (microns/hour)	Wear Life (hours)	Thickness Basis for wearout of Part (mm)	Effective Particle
Liner	4.324	5377.	23.247	248.
Casing	1.282	26098.	33.459	248.