

OTIMIZAÇÃO DE VIDA ÚTIL DE SILO ATRAVÉS DE APLICAÇÃO DE REVESTIMENTO CERÂMICO ABRESIST*

Luis Fernando Saraiva de Abreu Chagas¹

Resumo

O aumento de vida útil em equipamentos na mineração é um desafio atual da indústria, pois a cada ano um maior volume de materiais são transportados. Essa análise envolve conhecimentos interdisciplinares como metalurgia, seleção de materiais, tribologia, resistência dos materiais, etc. O presente estudo concentra-se na caracterização do tribossistema de um silo de minério de ferro com o objetivo de diminuição de custo de manutenção e aumento da disponibilidade. Identificando o minério transportado, o tipo de alimentação do equipamento e as opções de materiais a serem aplicadas, selecionou-se o material cerâmico Abresist. Comparou-se sua durabilidade com o revestimento metálico de baixa liga HSLA de dureza 400 HB. Após operação e inspeções, identificou-se que o revestimento cerâmico possui durabilidade 4 vezes maior, podendo em um período de 4 anos promover uma economia maior do que de 5,4 milhões de reais. Selecionados e instalados adequadamente, revestimentos cerâmicos podem suportar impactos e promover durabilidade muito superior às soluções metálicas convencionalmente aplicadas.

Palavras-chave: Tribologia; Cerâmica; Manutenção; Tenacidade ao impacto.

OPTIMIZATION OF SILO LIFETIME THROUGH APPLICATION OF CERAMIC COATING ABRESIST

Abstract

The increase of life-time of equipment in mining is a current challenge of industry, as increasingly large volume of materials are transported every year. This analysis involves interdisciplinary knowledge as metallurgy, materials selection, tribology, resistance of materials, etc. The present study made the characterization of tribosystem of a silo with iron ore with the purpose of reducing maintenance costs and increase availability.

Understanding the ore transported, the equipment and the wear protection materials, Abresist have been chosen. It was compared with low alloy steel HSLA 400 HB hardness. After operation and inspections, it was concluded that the ceramic coating has 4 times greater durability, and can, in a period of 4 years, promote an economy greater than 5.4 million reais. Selected and installed properly, ceramic tiles can withstand impact and promoted durability far superior to conventionally applied metal solutions.

Keywords: Tribology; Ceramic; Maintenance; Impact tenacity.

¹ Engenheiro Mecânico pela Universidade Federal de Minas Gerais, Mestre em Engenharia Metalúrgica e Materiais pela Universidade Federal de Minas Gerais, Gerente de Engenharia na Kalenborn do Brasil, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Um dos desafios mais presentes na mineração atualmente é a diminuição dos gastos de manutenção. A Tabela 1 registra alguns dados da extração de minério de ferro no Brasil, desde 2012. Verifica-se que desde 2013 a produção nacional tem aumentando – com exceção do ano de 2015-2016, quando ocorreu o acidente na barragem da Samarco, ocasionando a diminuição da produção em 2016 - e o preço do minério por toneladas, em reais, diminuindo, sendo observado uma possível retomada a partir de 2016, mas ainda distante dos valores outrora negociados. Com o maior volume de materiais processados e a diminuição do preço de venda, a redução dos custos se torna um imperativo na indústria.

Tabela 1: Dados estimados da extração de minério de ferro (1;2;3;4;5;6)

Ano	Produção (milhões de toneladas)	Preço do minério (US\$/ton)	Dólar	Preço do minério (R\$/ton)
2017	424	65,0	3,20	208,00
2016	400	57,6	3,49	201,02
2015	437,6	56,5	3,28	185,32
2014	421,1	95,2	2,29	218,00
2013	398,4	135,2	2,14	289,32
2012	414,8	129,3	1,99	257,30

Um dos grandes desafios para redução dos custos de manutenção é o aumento da vida útil dos equipamentos. Para aumentar a durabilidade, um dos principais aspectos a serem otimizados é a resistência ao desgaste.

Importante destacar que além da diminuição dos custos de manutenção e otimização da disponibilidade dos equipamentos, melhores práticas tribológicas possibilitam uma maior proteção ao meio ambiente e também segurança para os colaboradores (7).

No presente trabalho abordará o desgaste abrasivo para silos. A abrasão é o desgaste gerado por materiais duros forçados contra e movendo-se ao longo de uma superfície sólida (8).

Um dos fatores mais importantes na análise do desgaste abrasivo é a relação de dureza do abrasivo / dureza da superfície. Trata-se de um dos fatores que pode ocasionar o desgaste severo ou moderado, como demonstrado na Figura 01:

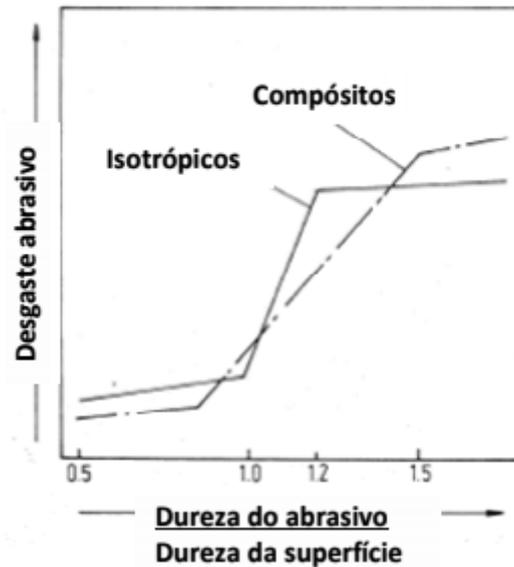


Figura 01: Desgaste em função da relação de durezas (9)

A diferença de durezas modifica o modo de desgaste, conforme destacado na Figura 02. De modo geral, quando a dureza do abrasivo é maior do que 1,2 vezes a dureza da superfície, o mesmo consegue penetrar e danificar severamente o material de revestimento. Quando ocorre o oposto, ou seja, a dureza da superfície é 1,2 vezes maior do que a do abrasivo, é o próprio abrasivo que se danifica, mantendo a integridade superficial do revestimento por mais tempo.

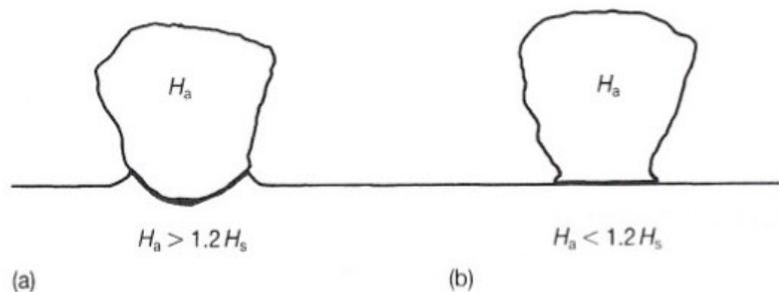


Figura 02: Relação de durezas modifica modo de desgaste (9)

Para uma análise mais aprofundada dos mecanismos de desgaste, além da dureza, é importante entender o tribossistema, ou seja, o sistema fechado que possui entradas e saídas, destacando-se::

- Variáveis operacionais;
- Estrutura do sistema
- Saídas úteis
- Perdas (10)

Essa análise é importante porque a resistência ao desgaste não é uma característica intrínseca do material, como dureza, composição química, mas sim uma consequência do tribossistema no qual está inserido (11). Por isso torna-se importante a caracterização do tribossistema.

O presente estudo foi feito em um silo de estocagem de minério de ferro, anterior ao processo de moagem de bolas. Na Figura 03 está registrado a saída do minério do silo em direção à correia transportadora.



Figura 03: Saída para a correia transportadora do minério estocado no silo

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Materiais e métodos

Como caracterização do tribossistema, destacam-se os seguintes aspectos:

- Minério transportado;
- Revestimentos utilizados;
- Tipo de alimentação no equipamento.

2.1.1 Minério processado

Estudou-se as características do minério processado conforme documentado na Figura 04, destacando-se como características os dados apresentados na Tabela 02:



Figura 04: Amostras coletadas em campo para caracterização do minério

Tabela 2: Caracterização de minério coletado em campo

Item	Unidade	Valor
Granulometria	mm	< 92
% de sílica	%	60
Peso específico	g/cm ³	2,8 a 3,6

Trata-se de um minério com alto teor de sílica, sendo esse um fator crítico para o desgaste.

2.1.2 Revestimentos utilizados

Originalmente, o equipamento foi revestido com aço de baixa liga HSLA (high-strength-low-alloy). Para o aumento da vida útil, identificou-se como principal mecanismo de desgaste a abrasão e trabalhou-se com o conceito de diferenciação das durezas. No minério de ferro, o componente de maior dureza é a sílica (SiO₂), portanto quanto maior o seu teor, maior o desgaste gerado. Não sendo possível a modificação da dureza do material processado, trabalhou-se na superfície de recebimento do desgaste, ou seja, o costado do silo. Estimando a dureza da sílica em 750 HV (9), compara-se na Tabela 03 as características dos revestimentos aplicados.

Tabela 3: Características dos revestimentos aplicados

Característica	Unidade	Aço baixa liga HSLA	Abresist
Composição química	N/A	C < 0,3% Si < 0,7% Mn < 1,6% P < 0,03% S < 0,015% Cr < 1,4% Ni < 1,5% Mo < 0,6% B < 0,004%	SiO ₂ – 46% Al ₂ O ₃ – 14% FeO ₃ + FeO – 14% CaO – 10% MgO – 10%
Dureza	HV (Vickers)	~423 (400 HB)	830
Dureza sílica / dureza recobrimento	-	1,77	0,9
Espessura	mm	12,5	25+5*
Densidade	g/cm ³	7,8	2,8
Nota	-	Revestimento original do equipamento.	Produto substituto.

* Placa possui 25 mm de revestimento mais 5 mm de ranhuras para aumentar a aderência na argamassa. Portanto, para análise de desgaste, considera-se 25 mm.

É possível identificar que o Abresist possui a relação entre durezas menor do que 1,2 correspondendo ao desgaste representado na letra b da Figura 02, enquanto que o aço baixa liga HSLA possui fator maior do que 1,2, correspondendo ao desgaste representado na letra a da mesma Figura.

Não houve necessidade de analisar se a estrutura do equipamento suportaria o aumento de peso da adição do revestimento Abresist. Isso porque ele possui peso específico de 2800 kg/m³ e a argamassa de assentamento 2200 kg/m³. Em sua aplicação, o silo perde cerca de 100 mm de diâmetro, diminuindo o seu volume útil. Como o peso do minério é maior do que o do revestimento, não há aumento de peso na estrutura quando a mesma se encontra cheia (situação crítica, para a qual é projetada).

2.1.3 Tipo de alimentação no equipamento

Uma preocupação para a definição do material é sua resistência ao impacto. No momento do enchimento do silo, ocorre o impacto direto do minério na parede do equipamento, podendo causar a quebra da cerâmica.

O silo é alimentado por uma correia transportadora, e na parte superior há uma defletora que guia a queda do material. Nesse caso, para análise da energia de impacto, utiliza-se o conceito de energia potencial gravitacional apresentado na Equação 1:

$$E_p = mgh \quad (1)$$

Onde:

E_p = Energia Potencial (J)

m = massa (kg)

g = aceleração (m/s²)

h = altura de queda (m)

A velocidade da correia não irá influenciar no tribossistema nesse caso. Em geral, silos operam com pelo menos 50% de carga, ocorrendo a queda de material sobre o próprio material armazenado. Nesse caso, a análise deve se concentrar na identificação da quebra do revestimento cerâmico ao realizar o enchimento do equipamento.

Para a análise de impacto há várias considerações que devem ser feitas, como:

- Britabilidade do material que gera o impacto: a energia de impacto se transforma em calor, som, desgaste, danos no material que está sendo impactado e do material que está causando impacto. Quanto maior a quantidade de energia o material que o contra-corpo absorve, menor é a energia transmitida para o material que está recebendo o impacto (corpo). Esse é o princípio utilizado atualmente na indústria automobilística, chamado de deformação programada (12), visando proteger o motorista.
- Ângulo de impacto: para materiais frágeis, o pior ângulo de impacto é 90° (9), pois toda a energia é transferida para o impacto. Ângulos diferentes geram uma parcela de abrasão e outra de impacto.
- Material que está recebendo o impacto: A resistência ao impacto aumenta com o aumento da espessura, e a diminuição da área superficial. Trata-se de um fator importante, e de uma forma de aumentar a resistência, considerando-se um mesmo material.
- Tipo de ligação revestimento – substrato: Dependendo da rigidez da ligação revestimento-substrato, há uma resistência ao impacto do revestimento. Por exemplo: ao utilizar borracha, o elastômero absorve parte do impacto, aumentando a resistência ao desgaste. Já, utilizando-se argamassa, por ser

um revestimento com maior rigidez, a absorção do impacto é menor, diminuindo a resistência do revestimento.

- Geometria: Uma geometria agulhada irá causar um estrago maior comparada com uma geometria plana. Isso porque no primeiro caso a energia de impacto irá se concentrar em apenas um ponto, enquanto no segundo será distribuída na superfície.

Com o objetivo de ser conservador nos números calculados, utilizou-se como contraponto para calcular resistência máxima ao impacto do Abresist uma cerâmica de alta alumina com 92% de pureza, impactando em um ângulo de 90°.

2.2 Resultados

2.2.1 Análise de impacto Abresist

Identificou-se que a resistência ao impacto máxima do Abresist, dimensões 200x200x25+5 mm, assentado sobre argamassa, é de 31J. Na Figura 05 é possível identificar a quebra que ocorre no revestimento, quando a energia de impacto é maior.



Figura 05: Erosão na placa de Abresist após impacto de 31J a 90°.

Importante destacar que o teste foi feito para apenas 1 ciclo de impacto. Em condições tribológicas diferentes, como revestimento de chutes, há necessidade de fazer as considerações e correções adequadas, considerando ciclos de impacto.

Em análise de campo, identificou-se que a pedra de maior peso a causar o impacto é de 195 g, a uma altura de 17 metros. A energia de impacto é de 32,5 J, porém como se trata de um ângulo de 14° e não de 90°, não houve quebra do revestimento.

2.2.2 Desgaste

O revestimento original, em aço HSLA teve durabilidade de cerca de 10.000.000 de toneladas de minério processados, e o revestimento Abresist cerca de 40.000.000. Como a cerâmica é o dobro da espessura do revestimento em aço, é possível afirmar que, igualando a espessuras, o revestimento cerâmico tem durabilidade 2

vezes maior. Na Figura 06 é possível observar a comparação entre uma placa de Abresist nova e outra desgastada, sob o regime de abrasão.



Figura 06: Diferenças de espessura de uma placa nova e outra desgastada por abrasão.

Na Figura 07 identifica-se a cerâmica na região de transição do silo, que possui maior taxa de desgaste, em fim de vida útil. É possível observar sua superfície bem lisa, característica típica do revestimento Abresist ao sofrer desgaste abrasivo, tornando-se um revestimento anti-aderente.

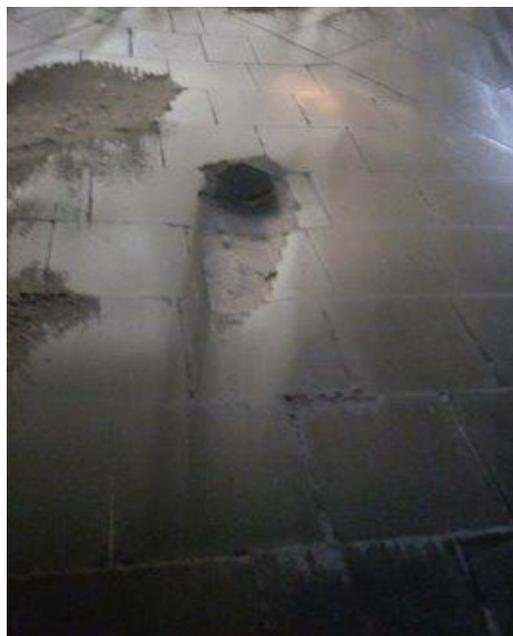


Figura 07: Abresist desgastado em região de transição

2.3 Discussão

Foi identificado que 25 mm do revestimento cerâmico Abresist resiste 4x mais ao desgaste abrasivo do que 12 mm de aço HLSA de dureza 400 HB nas condições

tribológicas do silo de minério de ferro. Estimando que é transportado pelo silo anualmente 20.000.000 de toneladas de minério de ferro, apresenta-se na Figura 08a comparação decustos de manutenção(material+instalação, excluindo custos como andaime, lucro cessante, etc).

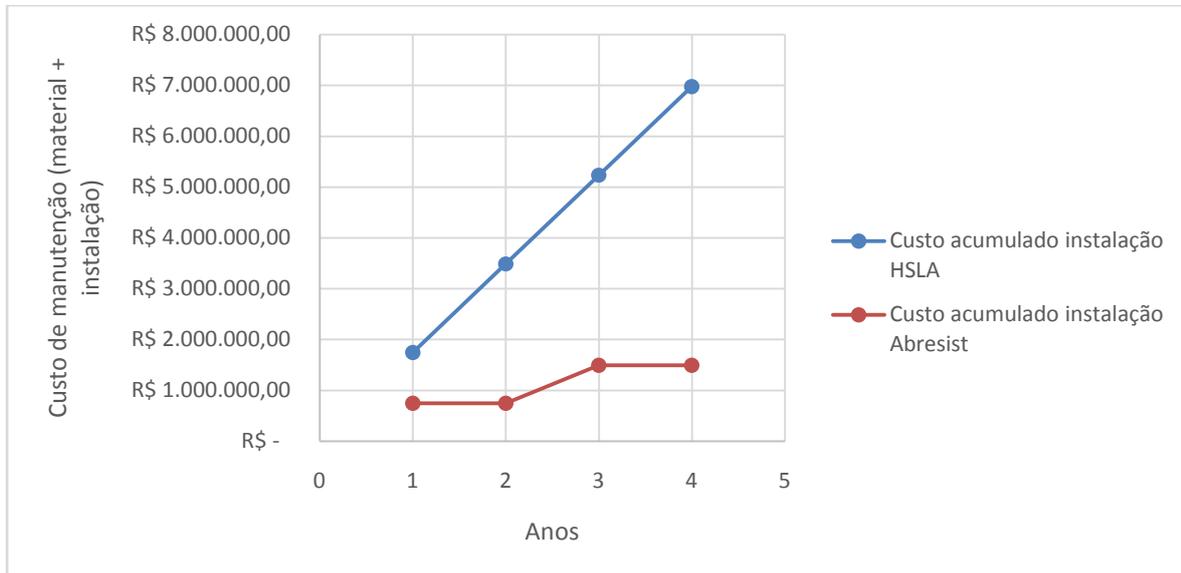


Figura 08: Comparação de custos de manutenção em 4 anos – Abresist x aço HSLA

Mais de 5,4 milhões de reais podem ser economizados ao entender corretamente o tribossistema e selecionar adequadamente o revestimento antidesgaste.

Considerando o tempo necessário para instalação de 120 horas para ambos materiais, a Tabela 04 apresenta a disponibilidade do equipamento.

Tabela 4: Disponibilidade do silo em um período de 4 anos

Material	Disponibilidade
Abresist	97%
Aço HSLA 400 HB	89%

Em um período de alta produção, alcançar valores próximos de 100% de disponibilidade é o desejável para a indústria.

3 CONCLUSÃO

Há um grande paradigma na indústria de mineração com a utilização da cerâmica principalmente por sua fragilidade e alto custo.

Estes receios ocorrem principalmente por causa do desconhecimento da performance e resistência mecânica das cerâmicas avançadas para esse tipo de aplicação, comparados com o alto nível de conhecimento de estruturas de aço que existem hoje no mercado.

Com o presente trabalho fica comprovado que conhecendo o material que está sendo trabalhado, caracterizando o tribossistema e desenvolvendo características

específicas para o equipamento a ser protegido é possível aplicar um material de alta dureza, com resistência suficiente ao impacto e mais barato do que soluções metálicas que correntemente são utilizadas.

REFERÊNCIAS

- 1 Monitor Econômico: Relatório FIEMG. Minas Gerais, fevereiro 2018
- 2 Monitor Econômico: Relatório FIEMG. Minas Gerais, fevereiro 2017
- 3 Monitor Econômico: Relatório FIEMG. Minas Gerais, fevereiro 2016
- 4 Monitor Econômico: Relatório FIEMG. Minas Gerais, fevereiro 2015
- 5 Monitor Econômico: Relatório FIEMG. Minas Gerais, fevereiro 2014
- 6 Monitor Econômico: Relatório FIEMG. Minas Gerais, fevereiro 2013
- 7 CHAGAS, L. F. S. A. Concepção e processamento de material compósito para otimização de performance tribológica: abrasão e erosão. Belo Horizonte, 2017.
- 8 ASTM, Estados Unidos da América, G-40. Standard terminology relating to wear and erosion. West Conshohocken, 2002, 8 páginas
- 9 HUTCHINGS, I. M. Tribology: Friction and wear of engineering materials. Cambridge: Butterworth-Heinemann, 1992.
- 10 SINATORA, A. Tribologia: um resgate histórico e o estado da arte. 2005. 12 p. Erudição para provimento de cargo de Professor Titular do Departamento de Engenharia Mecânica – USP, São Paulo.
- 11 GHAR, K. H. Z. Microstructure and wear of materials. Tribology series, Elsevier, Amsterdam – Oxford – New York – Tokyo, 1987.
- 12 MARQUES, F. O; MEIRELLES, L. A. Tendências da reciclagem de materiais na indústria automobilística. CETEM, 2007.