

Dr. Fernando Amos Siriani, formado em Engenharia de Materiais e Doutor em Engenharia pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, possui extensa experiência nas funções de Diretor Técnico do Laboratório de Engenharia de Materiais e de Especialista de Tratamento de Minérios da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, na Escola de Engenharia Mackay, em São Paulo, e na Escola de Engenharia e na Escola de Minas de São Paulo.

I - INTRODUÇÃO

CARACTERÍSTICAS GERAIS DE DESGASTES DE MANDÍBULAS EM BRITADORES

Dr. Fernando Amos Siriani
FAÇO / EPUSP

Coordenador:
Sr. Manoel Benites Gasquez

II - ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Para a execução dos ensaios de laboratório foram utilizados os seguintes equipamentos:

II.1 - Determinação de Desgaste

As perdas de massa foram determinadas por meio dos seguintes procedimentos:

- perda por trituração
- perda por abrasão
- perda por impacto
- perda elétrica
- perda por corrosão

Dr. Fernando Amos Siriani, engenheiro de minas e metalurgia (1960) e Doutor em Engenharia pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, ocupa atualmente as funções de Diretor Industrial da Fábrica de Aço Paulista S/A e é professor de "Tratamento de Minérios" na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, na Escola de Engenharia Mackenzie de São Paulo e na Escola de Engenharia Mauá de São Paulo.

I – INTRODUÇÃO

Dentre os vários componentes do custo direto industrial de britagem, o consumo metálico dos revestimentos ocupa um lugar bastante privilegiado.

Conjuntamente com a potência consumida, representam os itens mais caros do custo da operação de britagem. Enquanto que os custos provenientes da potência consumida podem ser analisados e previstos com razoável aproximação, o mesmo não ocorre com os provenientes do desgaste metálico.

A necessidade de consumo de uma determinada rocha ou minério leva, entretanto, a uma preocupação apriorística com relação ao custo que possa representar essa parcela, ficando sempre uma grande dúvida nas mãos das empresas mineradoras, indústrias de pedras britadas, pavimentadoras e empreiteiros, que geralmente necessitam participar de concorrências com cotações previamente fixadas, porém totalmente inseguros quanto à participação desta parcela no custo total estimado.

Este trabalho apresenta e discute uma série de dados sobre desgaste de mandíbulas de britadores de um e de dois eixos (Blake), quer obtidos em laboratório especialmente criado para esta finalidade, quer levantados em 83 pedreiras em operação na ocasião da pesquisa.

Sua finalidade é criar condições de se poder julgar a priori, o provável desgaste esperado nas mandíbulas dos britadores, operando com determinados tipos de rocha.

II – ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Foram executadas duas séries de ensaios de laboratório:

II.1 – *Determinação da perda por atrito nos britadores*

As perdas de energia, que ocorrem num britador, têm as seguintes origens:

- perda por transmissão de correias
- perda por atrito nos rolamentos
- perda por atrito no conjunto mola-tirante
- perda elétrica do motor
- perda por atrito no conjunto abanadeira-calhas
- perda por atrito nas buchas, nos britadores de 2 eixos.

O rendimento mecânico da máquina foi obtido, realizando-se testes que consistiram na aplicação de esforços num britador FAÇO 2015, causados pela pressão de uma mola calibrada de tamanho e diâmetro do fio bastante maiores que a habitualmente utilizada na máquina, medindo-se o consumo de energia correspondente.

Os valores médios de uma série de 20 ensaios, estudados estatisticamente, forneceram uma reta representada pela equação:

$$y = 0,63 + 0,0000653 x$$

onde: x = esforço na mola (kgf)

y = energia consumida (kWh)

II.2 – Determinação da energia consumida e desgaste na mandíbula fixa na britagem de várias rochas

Foram realizados mais de uma centena de ensaios, em laboratório especialmente criado para esta finalidade, na unidade industrial da Fábrica de Aço Paulista S/A., em Sorocaba (SP).

Os ensaios consistiram na verificação do desgaste das mandíbulas em função do correspondente consumo de energia.

Ensaio complementares de abrasão Los Angeles, resistência à compressão de agregados, "strain gage" e análise das texturas e estruturas mineralógicas em exames microscópicos e adição de água, também foram realizados.

O estudo estatístico dos pares x_i representativos do desgaste da mandíbula fixa (g/t) e y_i , representativos da energia consumida na operação de britagem propriamente dita (kWh/t), demonstrou a existência de uma correlação, expressa pela equação de uma reta passando pela origem.

III – DETERMINAÇÃO DO DESGASTE DE MANDÍBULAS NO CAMPO

Uma ampla pesquisa, realizada em 83 pedreiras, permitiu o levantamento de dados sobre o desgaste de mandíbulas no campo, bem como o rendimento útil das mesmas e a relação entre o consumo de mandíbulas fixas e móveis.

Também se estudou comparativamente o comportamento do desgaste nas mandíbulas de 1 eixo e do tipo Blake, quando operando com gnaisses.

Foram pesquisadas, principalmente, as seguintes rochas: calcário, basaltos, diabásios, gnaisses, granodioritos, granitos e quartzitos.

IV – CONCLUSÕES

As principais conclusões do trabalho são:

- 1) O desgaste é desigual ao longo da superfície das mandíbulas, sendo que a parte inferior sempre se desgasta mais rapidamente que a superior.
- 2) As mandíbulas de face reta apresentam, normalmente, um desgaste mais acentuado na zona de descarga.
- 3) O desgaste das mandíbulas pode ser atribuído ao:
 - a) tipo de máquina
 - b) características do material, forma e curvatura das mandíbulas
 - c) características da operação
 - d) desgaste da rocha
- 4) O desgaste das mandíbulas nos britadores de 1 eixo é sempre maior que no de 2 eixos, quando operando com a mesma rocha.
- 5) As características de operação que podem influenciar o desgaste são:
 - a) tamanho alimentado
 - b) tamanho do produto
 - c) grau de redução
 - d) quantidade de finos alimentada
 - e) grau de enchimento da máquina
 - f) adição de água e umidade
 - g) forma da alimentação
- 6) Os fatores de natureza mineralógica que podem influenciar o desgaste das mandíbulas são:
 - a) presença de minerais duros
 - b) textura
 - c) alteração por intemperismo
- 7) Como as mandíbulas quando encruadas têm dureza equivalente a 5 na escala Mohs, podemos admitir que os minerais de dureza superior àquela podem riscar ou mesmo penetrar na sua superfície, propiciando os mecanismos posteriores de arrancamento das partículas metálicas.
- 8) O estudo das energias envolvidas no processo de britagem mostra que:

$$E_B = (E_L - E_V) \cdot \eta_e \cdot \eta_t$$
 onde: η_e = rendimento elétrico do motor
 η_t = rendimento mecânico da transmissão por correia
 E_L = consumo de energia lido no medidor, na britagem de uma determinada quantidade de material
 E_V = consumo de energia lido no medidor, com a máquina em vazio.
- 9) Os testes executados mostram que as perdas por atrito interno dos britadores sob carga, em britagem, permanecem praticamente constantes, estando representadas na sua quase totalidade pela perda de energia em vazio.
- 10) Estudando-se, em laboratório, a correlação entre a energia consumida na bri-

tagem (kWh/t) e o desgaste das mandíbulas fixas (g/t) para diversas rochas, foram encontrados coeficientes de correlação suficientes para justificar, com elevados níveis de probabilidade, a existência de correlação entre ambas as variáveis.

11) Os ensaios executados, em laboratório, para várias rochas, correlacionando a energia consumida na britagem (kWh/t) com o respectivo desgaste da mandíbula fixa (g/t) mostraram uma interdependência que pode ser expressa por uma reta que passa pela origem.

12) As equações das retas para os ensaios de laboratório são as seguintes:

Amostra nº 24 – GRANITO $y = 0,0137 x$

Amostra nº 40 – GRANITO $y = 0,0211 x$

Amostra nº 50 – GRANITO $y = 0,0159 x$

Amostra nº 59 – DIABÁSIO $y = 0,0690 x$

Amostra nº 70 – GNAISSE $y = 0,0266 x$

onde: x_i = desgaste em g/t

y_i = energia consumida na britagem em kWh/t

13) O desgaste das mandíbulas aumenta quando se diminui a abertura de saída do britador.

14) As mandíbulas se desgastam muito mais rapidamente no início da operação, devido à ausência de encruamento, que vai sendo gerado no próprio processo de britagem.

15) De forma análoga, as mandíbulas, quando invertidas, apresentam maior desgaste no início de sua operação.

16) A quantidade de testes realizados foi insuficiente para uma definitiva conclusão sobre a influência da adição de água. Entretanto, aparentemente, o desgaste diminui com essa adição, quando em quantidade suficiente para não aglomerar os finos.

16) A umidade ou uma quantidade insuficiente de água podem aglomerar os finos, aumentando o desgaste pela formação de um pó abrasivo, quando existirem minerais duros na rocha.

18) O rendimento útil médio de uma mandíbula é 37,1%, com um desvio padrão de 5,3 para as observações efetuadas, o que garante que, em 95% dos casos, esse rendimento se situe entre 26,5% e 47,7%, no caso de uma só inversão.

19) Na prática de duas inversões das mandíbulas, pode-se ganhar 2% a 5% do rendimento útil com relação a uma só inversão, devendo ser julgado se a paralisação da máquina pode representar um custo superior àquele aumento do rendimento.

20) A relação de consumo entre mandíbulas fixas e móveis para britadores e re-britadores de mandíbulas de 1 eixo é igual a 1,72 (valor médio de 108 pesquissados).

O desvio padrão é 0,40, o que garante que, em 68,3% dos casos, essa relação se situe entre 1,32 e 2,12.

- 21) A relação de consumo entre mandíbulas fixas e móveis para britadores de 2 eixos é igual a 1,45 (média de 12 dados).
O desvio padrão é 0,40, o que garante que, em 68,3% dos casos, essa relação se situe entre 1,05 e 1,85.
- 22) As equações das retas que correlacionam os consumos de energia (y_i — em kWh/t) e os desgastes das mandíbulas fixas (x_i — em g/t) são os seguintes:

Quartzitos	$y = 0,0058 x$
Granitos	$y = 0,0102 x$
Granodioritos	$y = 0,0111 x$
Gnaisses	$y = 0,0178 x$
Diabásios	$y = 0,0465 x$
Basaltos	$y = 0,0743 x$
- 23) Não existe nenhuma correlação entre o índice de abrasão Los Angeles e o desgaste das mandíbulas.
- 24) O desgaste nas mandíbulas do britador tipo Blake é cerca de 30% do que ocorre nos de 1 eixo, quando consumindo a mesma energia e operando com gnaisses.
- 25) Os resultados obtidos permitem que se estabeleça a seguinte sequência de abrasividade crescente:
calcários, basaltos, diabásios, gnaisses, granodioritos, granitos e quartzitos.
- 26) Os dados levantados em campo permitem uma previsão do consumo de mandíbulas, baseados nos dados de operação, sem necessidade de nenhum trabalho de laboratório. Utiliza-se apenas a 3ª teoria da cominuição de BOND para a determinação da energia consumida na britagem e, entrando-se a seguir nos gráficos ou tabelas construídos a partir dos dados de campo, pode-se obter a previsão do consumo.

DEBATES

(?) – Eu gostaria de saber do Senhor porque motivo esse trabalho não foi estendido sobre a parte de minério.

Dr. Fernando Amos Siriani – Por absoluta falta de tempo. É nossa intenção continuar o trabalho. Nós já estamos começando a trazer para a fábrica alguns minérios de ferro e nossa intenção agora é trabalhar nesses campos. Provavelmente nós teremos muitas surpresas, não vai ser fácil comparar o trabalho feito com rochas com os resultados obtidos com minérios, devido à sua heterogeneidade.

Guilherme Gazzolla – Cia Vale do Rio Doce – Eu queria saber se essa ampla pesquisa a que o senhor procedeu, se isso forneceu também algum subsídio para modificação do projeto da mandíbula visando então dar uma maior duração colocando-se, digamos mais aço na parte onde ela sofreria maiores desgastes, mudança de forma, etc.

Dr. Fernando Amos Siriani – O trabalho não foi feito com essa intenção. É evidente, que a partir dos dados que nós temos agora em mãos, nós poderemos pensar em tipos diferentes de composição química para as mandíbulas ou mesmo de forma. Uma das coisas que influencia muito o desgaste da mandíbula é a sua forma. Neste trabalho, por exemplo, foram estudados dois tipos principais de mandíbulas: mandíbulas de face reta e mandíbulas tipo “non-choking”. Nas mandíbulas tipo reto, o desgaste é muito mais acentuado do que nas mandíbulas “non-choking”. Depois que notamos isso no início do nosso trabalho, passamos a observar só mandíbulas tipo “non-choking” para não ficarmos com dados misturados que permitissem qualquer confusão.

Notem que apesar de termos feito um trabalho típico de engenharia, também há nele um elevado sentido científico. Tratamos pois de diminuir o número de variáveis que pudessem invalidar o processo de análise dos dados obtidos. Poderíamos também haver estudado, por exemplo, a influência da adição de vanádio, molibdênio ou mesmo de níquel na confecção da mandíbula. As variáveis seriam muitas e então o trabalho poderia ficar prejudicado. Eu gostaria também de lembrar que a mandíbula ficaria mais cara e nem sempre o usuário está disposto a pagar mais. Relembro, entretanto, que o nosso trabalho não foi encaminhado nessa direção. Foi feito com a intenção de podermos avaliar de alguma maneira o desgaste nas mandíbulas sem precisarmos fazer ensaios de laboratório ou mesmo sofrendo na vida prática vendo uma mandíbula ser corroída às vezes em apenas algumas horas. De qualquer maneira, o trabalho permite agora que se faça comparações. Então, eu gostaria de lhes dizer que, no momento, em nossa fábrica de Sorocaba, nós estamos com

uma série de mandíbulas com tipos de ligas, composição de tratamentos térmicos diferentes sendo analisados em relação a uma das pedreiras que foi pesquisada no trabalho. Estes dados dessa pedreira foram adotados como valores significativos por uma razão muito simples: trata-se de um gnaiss com altíssimo teor de feldspato, consumindo muito depressa as mandíbulas devido à sua elevada abrasividade.

G. Gazzolla (CVRD) – Queria só complementar que talvez as pequenas pedreiras se preocupem mais com o preço em si da mandíbula, mas provavelmente as grandes pedreiras e as minerações que têm sistemas de custos bem organizados, elas se preocupariam mais com o custo por tonelada e talvez o Senhor pudesse realmente entrar numa linha dessas de tentar melhorar o projeto. Não só o projeto, como a composição das mandíbulas. Acho que isso seria bem recebido pelos compradores.

Dr. Fernando Amos Siriani – Acho muito oportuna e bastante bem lembrada essa posição das minerações. Lembro que desde o começo eu disse que não era o caso das minerações, porque normalmente nelas há controles bastante rígidos, bastante severos da influência desse custo de desgaste por tonelada.

Cleber Dutra (Geociências) – Eu queria saber do senhor se o encruamento provocado tem validade para prolongar a vida da mandíbula, porque as fábricas de eletrodos costumam aconselhar fazer um depósito superficial com o fim de provocar esse encruamento. Isso tem validade?

Dr. Fernando Amos Siriani – O que o Senhor acha que eu fiz quando estive na assistência técnica numa pedreira onde a mandíbula era totalmente desgastada em 12 horas? Exatamente isso: utilizei alguns eletrodos especiais, pois o Sr. sabe que é muito difícil soldar o aço manganês exatamente porque deteriora a sua estrutura. Infelizmente, os resultados não foram satisfatórios, nem animadores, tentativa também frustrada em algumas outras pedreiras. A partir de então, eu tomo como norma minha pessoal não recomendar em hipótese alguma colocar eletrodos sobre a mandíbula. Não somente sobre a mandíbula mas sobre qualquer peça de aço manganês. A alteração estrutural introduzida no aço-manganês pela elevação da temperatura quando da adição do eletrodo, muito embora aumente a dureza na região da camada depositada, é responsável pelo aparecimento de trincas que podem comprometer irremediavelmente a mandíbula e, por vezes, conduzir a problemas mais sérios na máquina pela quebra das mesmas.

Eng^{do} Osni de Mello – Politécnica da USP – Gostaria de saber se o desgaste é função das dimensões do britador, ou melhor, da sua capacidade.

Dr. Fernando Amos Siriani – Teoricamente, não deve ser. Porém o projeto da máquina influi. Eu mencionava o caso do britador de dois eixos, em que muito embora a relação de desgaste de mandíbulas fixas para móveis devesse ser igual a 1, não é assim na prática. Entretanto, eu gostaria de lembrar que existem alguns tipos de britadores que têm forma apropriada, tal que o queixo exerce só compressões na brita-

gem, mesmo que ele seja de um só eixo. Os desgastes ocorrentes nas suas mandíbulas serão portanto menores. Enquanto o projeto da máquina pode influir no desgaste, o mesmo não ocorre quanto à sua capacidade.

Eng^{do} Osni de Mello (EPUSP) – Certo, eu queria saber quanto ao porte mesmo.

Dr. Fernando Amos Siriani – Quanto ao porte eu posso lhe dizer que é de se esperar que num britador pequeno de laboratório que guarde determinadas proporções em relação a uma máquina grande de pedreira, se: 1º) a forma das mandíbulas for semelhante; 2º) as mandíbulas tiverem a mesma composição química; 3º) observados controles de qualidade semelhantes; provavelmente o desgaste em gramas por tonelada deverá ser igual. Desculpe: se a rocha for a mesma, no mesmo local. Aparecem mais problemas de maior complexidade. Não se pode dar uma resposta simples assim não. Vou complementar mais um pouco. Provavelmente, existem outros fatores ainda que podem influenciar, por exemplo, o curso do queixo, a inclinação da abanadeira, ângulos de mordência diferentes. O tamanho da máquina não influenciaria se fossem guardadas e respeitadas as condições semelhantes entre a máquina pequena e a máquina grande. Se ela tiver algumas dessas condições diferentes, então o assunto é outro, provavelmente o desgaste poderá ser diferente. É um assunto a ser investigado.

Sr. Coordenador – Encerramos agradecendo o professor Fernando Siriani por essa contribuição ao estudo do desgaste de mandíbulas. Esperamos que ele continue essa pesquisa para minérios que é interessante para nós e evidentemente eu tenho certeza, o Grêmio terá prazer em novamente trazê-lo aqui para conferenciar sobre esse trabalho.