

# Estudo do desgaste abrasivo em britadores de mandíbulas

Cristina Meilin Yeh

## *Agradecimentos*

*Aos meus pais pelo amor e apoio sempre*

*Ao João pelo carinho*

*Ao André, pela orientação, aconselhamento e apoio*

*Ao Amilton, pelo prêmio Pedrita e pelo apoio*

*Ao Giuseppe pelas aulas e por me ajudar a carregar as pedras  
do trabalho*

*Ao Gordo pelo carinho e amor*

*Este trabalho foi apresentado como trabalho de formatura no  
Departamento de Engenharia Metalúrgica da Escola Politécnica  
da USP sob orientação do Prof. Dr. André Paulo Tschipstchin.*

## TAO TE KING

*Texto de Lao Tsu*

"Aquele que conhece os outros é sábio.  
Aquele que conhece a si mesmo é iluminado.  
Aquele que vence os outros é forte.  
Aquele que vence a si mesmo é poderoso.  
Aquele que conhece a alegria é rico.  
Aquele que conserva o seu caminho tem vontade."

"Seja humilde, e permanecerás íntegro.  
Curva-te, e permanecerás ereto.  
Esvazia-te, e permanecerás repleto.  
Gasta-te, e permanecerás novo."

"O sábio não se exibe, e por isso brilha.  
Ele não se faz notar, e por isso é notado.  
Ele não se elogia, e por isso tem mérito.  
E, porque não está competindo, ninguém no mundo  
pode competir com ele."

<b><u>RESUMO DO TRABALHO .....</u></b>	<b>5</b>
<b><u>TRIBOLOGIAR É PRECISO .....</u></b>	<b>6</b>
<b>O DESGASTE ABRASIVO .....</b>	<b>8</b>
MECANISMOS DE DESGASTE ABRASIVO.....	11
Microcorte .....	11
Microssulcamento.....	11
“Wedge” .....	12
Microtrincas .....	12
Microfadiga .....	12
AS PROPRIEDADES DO ABRASIVO .....	14
A dureza da partícula .....	14
A forma da partícula .....	16
O tamanho da partícula .....	17
MECANISMOS DO DESGASTE ABRASIVO .....	18
Desgaste abrasivo por deformação plástica .....	19
Desgaste abrasivo por fratura frágil .....	23
OS MATERIAIS E O DESGASTE ABRASIVO .....	24
<b><u>O BRITADOR DE MANDÍBULAS.....</u></b>	<b>28</b>
INTRODUÇÃO.....	28
OS ENSAIOS DE DESGASTES .....	29
ENSAIO DE BRITADOR DE MANDÍBULAS.....	31
<b><u>MATERIAIS E MÉTODOS .....</u></b>	<b>33</b>
CORPOS DE PROVA .....	33
COMPOSIÇÃO E TRATAMENTO TÉRMICO.....	33
USINAGEM E DESENHO DAS AMOSTRAS.....	34
O ABRASIVO .....	34
O TESTE DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO.....	36

O EQUIPAMENTO .....	36
OS PARÂMETROS DE BRITAGEM .....	39
METODOLOGIA DE CADA ENSAIO .....	40
OS ENSAIOS .....	41
 <b><u>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</u></b>	 <b>42</b>
 MICROESTRUTURA DO AÇO .....	 42
TRATAMENTO TÉRMICO A 950 <sup>0</sup> C .....	43
TRATAMENTO TÉRMICO A 1050 <sup>0</sup> C .....	44
DUREZA DO MATERIAL .....	45
A CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA .....	46
OS ENSAIOS E AS TAXAS DE DESGASTE .....	47
 <b><u>CONCLUSÕES.....</u></b>	 <b>62</b>
 <b><u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</u></b>	 <b>63</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustração de um tribossistema de acordo com a norma DIN 50320 <sup>[2]</sup> .....	7
Figura 2 - Tipos de desgaste abrasivo <sup>[5]</sup> .....	11
Figura 3 - Ilustração da perda volumétrica provocada por um abrasivo <sup>[3]</sup> .....	12
Figura 4 - Micromecanismos de desgaste abrasivo.....	13
Figura 5 - Comparativo entre abrasivo com relação Ha/Hs diferentes <sup>[4]</sup> ....	15
Figura 6 - Escala Mohs <sup>[4]</sup> .....	16
Figura 7 - Gráfico da influência do tamanho de partícula em três tribossistemas diferentes <sup>[4]</sup> .....	18
Figura 8 - Esquema do modelo de desgaste por deformação plástica .....	19
Figura 9 - Gráfico de Dureza Vickers X Resistência à abrasão de diversos materiais <sup>[4]</sup> .....	20
Figura 10 - Ilustração de resistência ao desgaste, dureza e mecanismos de desgaste abrasivo.....	21
Figura 11 - Esquema de distribuição de mecanismo de desgaste , tensão de cisalhamento e tensão de escoamento de um aço SAE3045 <sup>[4]</sup> ....	22
Figura 12 - Ilustração do ângulo de ataque e valor crítico para microcorte <sup>[4]</sup> .....	23
Figura 13 - Resistência à abrasão de vários materiais num ensaio de pino <sup>[4]</sup> .....	25
Figura 14 - Gráfico esquemático de microestrutura, resistência à abrasão e dureza de aços <sup>[4]</sup> .....	26
Figura 15 - Desenho do corpo de prova usado <sup>[6]</sup> .....	34
Figura 16 - Granito utilizado nos ensaios.....	35
Figura 17 - Britador de Mandíbulas Faço de um eixo <sup>[12]</sup> .....	36
Figura 18 - Esquema ilustrativo com as partes reguladoras de abertura do britador <sup>[12]</sup> .....	37
Figura 19 - Esquema ilustrativo da cominuição do abrasivo no britador <sup>[12]</sup> 37	37
Figura 20 - Variáveis do britador <sup>[13]</sup> .....	38
Figura 21 - Esquema de alimentação do britador <sup>[7]</sup> .....	38

Figura 22 - Desenho do porta-amostra <sup>[6]</sup> .....	40
Figura 23 - Curva TTT para o aço AISI 1335.....	43
Figura 24 - Microestrutura do aço tratado a 950 C , Ataque Nital 5% , 1000X .....	43
Figura 25 - Microestrutura do tratamento térmico a 950C , Ataque Nital , 50X.....	44
Figura 26 – Microestrutura do aço tratado a 1050C, Ataque Nital 5%, 200X .....	44
Figura 27 - Superfície da mandíbula móvel , Aumento 25X .....	46
Figura 28 - Superfície da mandíbula fixa , Aumento 25X .....	46
Figura 29 - Esquema ilustrativo dos mecanismos de desgastes das mandíbulas <sup>[7]</sup> .....	47
Figura 30 - Gráfico da taxa de desgaste do Ensaio Teste 1 .....	49
Figura 31 - Gráfico da taxa de desgaste do Ensaio Teste 2.....	51
Figura 32 - Gráfico de taxa de desgaste do Ensaio 1 .....	53
Figura 33 - Gráfico de taxa de desgaste do Ensaio 2 .....	55
Figura 34 - Gráfico da taxa de desgaste do Ensaio 3 .....	57
Figura 35 - Gráfico de taxa de desgaste do Ensaio 4 .....	59

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Ensaios recomendados para desgastes abrasivos conforme a classificação de tensões .....	30
Tabela 2 - Comparativo dos ensaios da norma e por Blickenderfer .....	31
Tabela 3 - Composição Química do Aço.....	33
Tabela 4 - Composição do granito.....	35
Tabela 5- Esquema dos ensaios empregados .....	41
Tabela 6 - Dureza.....	45

## Resumo do trabalho

O trabalho em questão se propõe no estudo do desgaste abrasivo em britador de mandíbula de 1 eixo que corresponde a 95% das aplicações de cominuição de britagem.

O desgaste abrasivo foi enfocado a partir do desgaste do conjunto de mandíbulas. Foram coletados dados da norma, autores para estabelecer as melhores condições padrões de ensaio em laboratório. Para tanto, foram calibradas as condições de ensaios através de dois pares de mandíbulas de testes para confirmar as condições e parâmetros de britagem.

Ademais, foram testadas algumas combinações de mandíbulas de diferentes propriedades mecânicas e os resultados analisados. O material testado foi um aço tipo SAE 3240. Foram realizados dois tratamentos térmicos em temperaturas diferentes.

## **Tribologiar é preciso**

O verbo tribologiar constitui um neologismo técnico que significa usar a tribologia. Tribos vêm do grego e quer dizer superfície. Logo , tribologiar é estudar as superfícies.

A necessidade da tribologia decorre do seu conteúdo interdisciplinar que busca os conhecimentos do físico, do químico, do engenheiro mecânico, do engenheiro metalurgista e do engenheiro de materiais.

O tripé da tribologia constitui o desgaste, a fricção e a lubrificação.

Cientificamente, este trinômio da tribologia é definido das seguintes formas:

" Perda progressiva de substâncias pela superfície de trabalho de um corpo resultante de um movimento relativo na superfície. "

(OECD – Research Group on Wear of Engineering Materials)

"Perda progressiva de material da superfície de um corpo sólido, devido à ação mecânica, do contato em movimento relativo contra um contra-corpo sólido, líquido ou gasoso."

(DIN50320)<sup>[2]</sup>

O desgaste é um fenômeno de superfície onde atuam um corpo sólido, um contra-corpo, o um meio interfacial. Este conjunto constitui o sistema tribológico ou tribossistema.

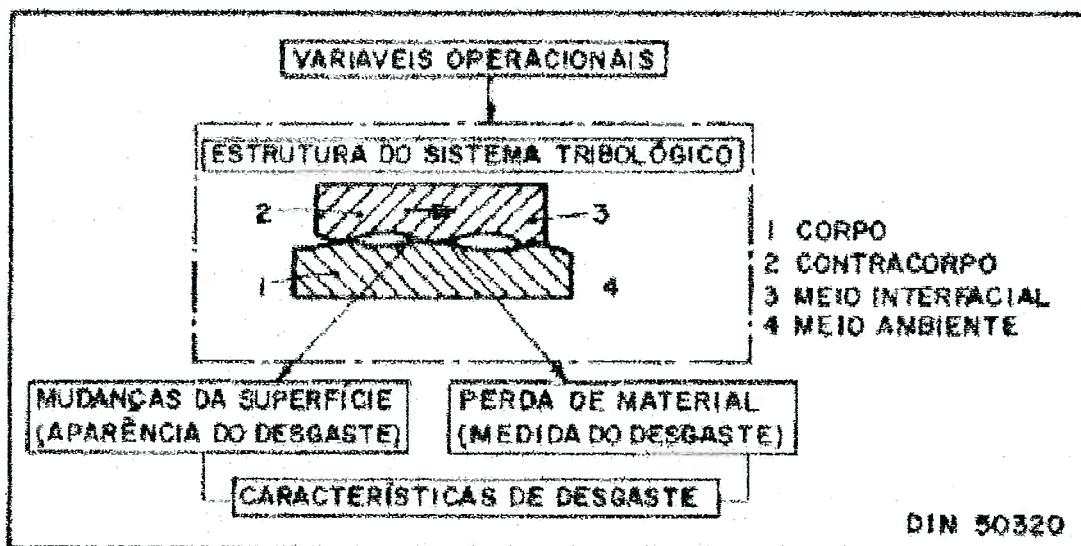


Figura 1 - Ilustração de um tribossistema de acordo com a norma DIN 50320<sup>[2]</sup>

As classificações de desgaste levam em consideração o estado físico dos elementos do tribossistema, o movimento relativo entre corpo e contra-corpo (deslizamento, rolamento, oscilação, impacto, erosão), o ângulo de ataque do contra-corpo e o meio interfacial (seco ou lubrificado).

Dependendo da estrutura do tribossistema, interações físicas e/ou químicas que ocorrem entre os elementos, contribui-se para um tipo particular de perda de material da superfície do corpo sólido.

O desgaste pode ser classificado de acordo com o mecanismo atuante [2], [5]:

#### Abrasão

Deslocamento sob tensão de partículas sólidas ou gotas líquidas arrastadas por correntes de fluidos contra a superfície

### Erosão

Choque de partículas sólidas ou gotas líquidas arrastadas por correntes de fluidos contra a superfície

### Cavitação

Implosão de bolhas gasosas em correntes de fluidos na superfície sólida devido a variações súbitas de pressão

### Corrosão

Reações químicas superficiais no material, além de mecânicas de desgaste

### Fadiga Superficial

Tensões cíclicas durante o contato mútuo de superfícies

### Adesão

Resultado da fricção entre duas superfícies metálicas ásperas que deslizam entre si.

## O Desgaste Abrasivo

Neste trabalho, o desgaste abrasivo será enfatizado por ser o mecanismo predominante

O desgaste abrasivo resulta da interação de uma superfície com partículas mais duras que ela. Sem dúvida, é o mecanismo mais importante nas indústrias de mineração, cimento, cerâmicas e também nas operações de cominuição, peneiramento, transporte....

Um abrasivo riscá o corpo sólido quando for mais duro que ele. A quantidade de material arrancado depende da angularidade do abrasivo, do seu ângulo de ataque e da força aplicada.<sup>[4], [5]</sup>

Em termos gerais, o desgaste pode ser definido como a perda de volume por comprimento de sulco. Ele é diretamente proporcional à carga aplicada e inversamente proporcional à dureza do corpo sólido.

Numa primeira aproximação, as principais propriedades do material resistente ao desgaste abrasivo são a dureza para impedir a penetração do abrasivo e a tenacidade para resistir ao impacto do abrasivo.

Existem diversas maneiras de classificar o desgaste abrasivo. A primeira que será citada leva em conta o número de corpos envolvidos:

Abrasão a dois corpos (um abrasivo e o material)

Ocorre quando o abrasivo se move livremente sobre a superfície do corpo sólido.

Abrasão a três corpos (abrasivo e dois materiais)

Ocorre quando existem abrasivos livres, interpostos entre duas superfícies em movimento relativo entre si, além de sofrer rotação durante o deslizamento sobre a superfície que está sendo desgastada.

A principal diferença entre a abrasão a dois corpos e a três corpos é o grau de liberdade das partículas do abrasivo. No sistema de três corpos existe rolamento que implica mais desgaste pois ocorre mais

deformação plástica. Enquanto, no sistema de dois corpos, o mecanismo de microcorte é predominante.

Outra classificação leva em consideração às solicitações localizadas impostas pelo abrasivo.<sup>[4]. [5]</sup>

#### Abrasão a Baixas Tensões

Quando as partículas abrasivas sofrem tensões abaixo da necessária para a sua fragmentação. Portanto, as partículas não são cisalhadas.

#### Abrasão a Altas Tensões

Quando as partículas abrasivas são fragmentadas durante o contato com a superfície. Isto promove maior penetração do abrasivo na superfície e maior deformação plástica.

#### Abrasão por Goivadura

Envolvem abrasivos com dimensões grosseiras sob condições de alto impacto e altas tensões. O abrasivo é fragmentado e provoca indentações na superfície de contato.

A seguir a figura mostra diversos tipos de desgaste abrasivo:

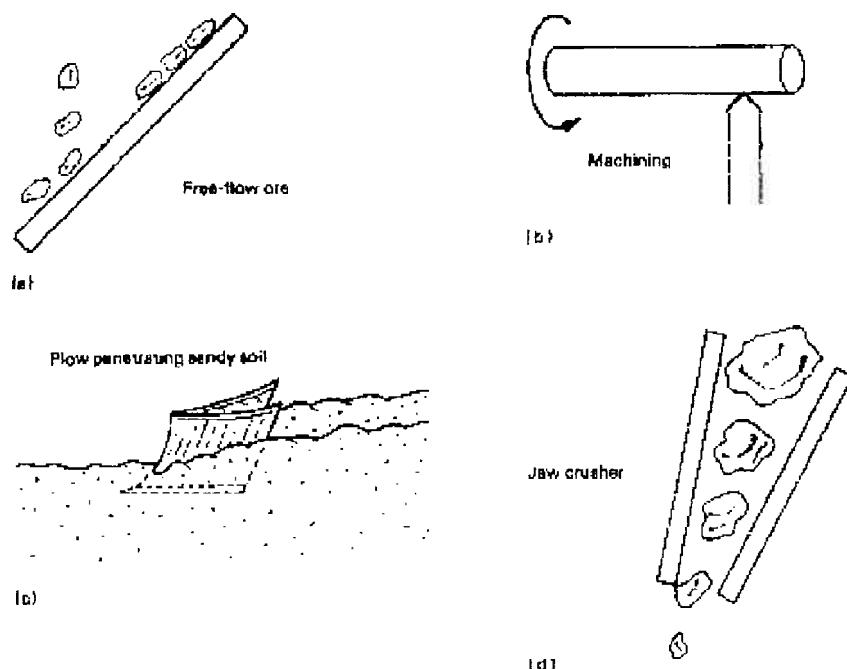


Figura 2 - Tipos de desgaste abrasivo<sup>(5)</sup>

## Mecanismos de desgaste abrasivo

Por fim, existem cinco mecanismos de desgaste abrasivo:

### Microcorte

Ocorre quando a partícula é suficientemente dura para atuar como ferramenta de corte , retirando "cavacos" da superfície.

### Microssulcamento

O abrasivo deixa "marcas" nas superfícies de contato , porém não há retirada de material.

### “Wedge”

O abrasivo faz mais indentações do que retira o material. Ocorre, na verdade um mecanismo misto de microcorte e microssulcamento onde o sulcamento é predominante.

### Microtrincas

Ocorre quando o esforço aplicado pela partícula é alto, o material descola da superfície pela propagação da trinca, provocando lascamento. (spalling)

### Microfadiga

O abrasivo provoca tensões cíclicas localizadas que acaba provocando deformação plástica ou trincamento do material.

Segundo Zum Gahr<sup>[3]</sup>, quando uma partícula penetra na superfície e percorre uma certa distância, ela pode provocar uma perda volumétrica de material e/ou, um certo volume de deformação. Isto pode ser esquematizado como mostra a figura abaixo:

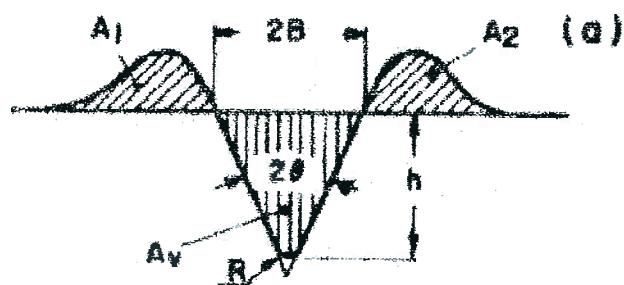


Figura 3 - Ilustração da perda volumétrica provocada por um abrasivo<sup>[3]</sup>

onde  $A_v$  é a área da seção do sulco.

$A_1 + A_2$  é a área deformada.

A relação entre o volume perdido e o volume do sulco é dada por:

$$f_{ab} = [ A_v - (A_1 + A_2) ] / A_v^3$$

O desgaste por comprimento do sulco é dado por:

$$W_s = f_{ab} \cdot A_v^3$$

A figura abaixo ilustra os mecanismos possíveis:

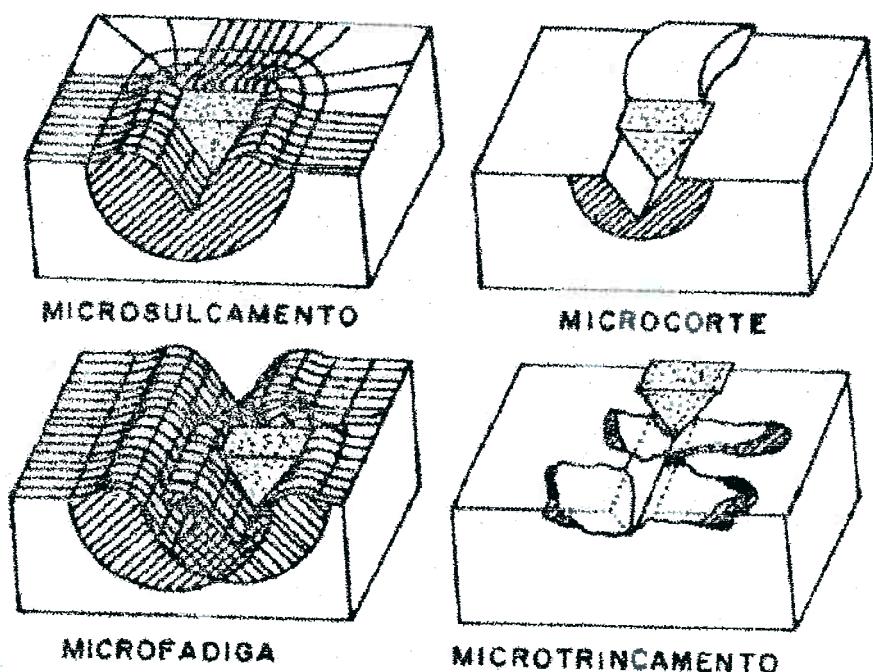


Figura 4 - Micromecanismos de desgaste abrasivo

De acordo com as equações acima, pode-se induzir as seguintes relações:

Microcorte:  $f_{ab} \geq 1$

Microssulcamento:  $f_{ab} \geq 0$

Microtrincamento:  $f_{ab} > 1$

Microfadiga:

Até o momento estes cinco processos contemplam as possibilidades de desgaste abrasivo. Ou seja qualquer fenômeno abrasivo pode ser constituído predominantemente por estes fenômenos isolados ou conjugados.

## As propriedades do abrasivo

### A dureza da partícula

A dureza das partículas do abrasivo influencia nas taxas de desgaste. Partículas com dureza menor na superfície provocam menos desgaste que as mais duras. Por outro lado, quando a diferença de dureza entre a superfície e o abrasivo é muito alta, seu valor absoluto não influencia tanto no desgaste. A taxa de desgaste começa a ser mais significativa quando a relação da dureza do abrasivo ( $H_a$ ) e da dureza da superfície ( $H_s$ ) é menor que 1.<sup>[4]</sup>

Este comportamento pode ser compreendido durante a análise do mecanismo de contato entre a partícula e a superfície. Se a superfície do material escoa plasticamente quando o limite de escoamento é

ultrapassado, ocorrerá deformação plástica expressiva na superfície do material. A pressão de contato é a indentação da dureza da superfície. A ordem de grandeza da dureza de indentação da superfície é de três vezes a tensão uniaxial de escoamento. A indentação só irá ocorrer enquanto a superfície puder sustentar a pressão sem deformar.

Para a partícula esférica, o máximo da pressão de contato é atingido quando ela é 0,8 vez a dureza de indentação da superfície. Daí vem a relação  $H_a/H_s > 1,25$  para ocorrência de sulcamento da superfície.

Esta noção de grandeza entre duas superfícies para uma riscar a outra já foi percebida pelo mineralogista Mohs em 1824. Mohs designou números inteiros para uma escala de minerais em que o maior sempre poderia riscar os menores. A sua escala obedece esta relação, exceto o diamante.

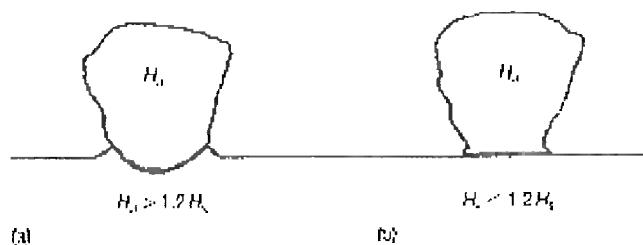


Figura 5 - Comparativo entre abrasivo com relação  $H_a/H_s$  diferentes<sup>[4]</sup>

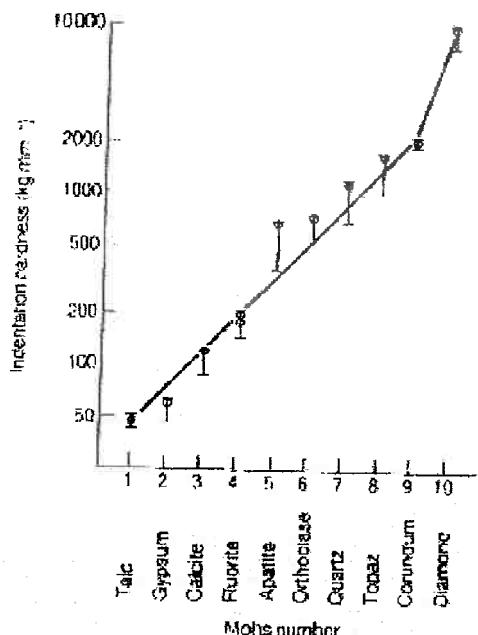


Figura 6 - Escala Mohs<sup>(4)</sup>

Assim, é possível concluir que quando a relação de dureza do abrasivo e da superfície for superior a 1,25, as taxas de desgaste serão significativamente maiores.

### A forma da partícula

Outro atributo importante da partícula é a sua forma, particularmente a sua angularidade. Geralmente, partículas angulares provocam taxas de desgaste mais elevadas que partículas redondas.

A angularidade das partículas é um fator importantíssimo, pois diferenças no formato da partícula implicam diferenças de desgaste na magnitude de 10 ou mais.

Um dos métodos mais aplicados para descrever o formato das partículas é o fator de forma. É a relação entre a projeção de área do abrasivo (P) e o perímetro da circunferência de mesma área (A).

$$F=4\pi A/P^2$$

Quando a relação for igual a 1, a projeção é um círculo. E quanto menor for a relação F, quer dizer que mais desviada do círculo estará a projeção. Esta medida é bastante limitada, pois só denota uma pequena idéia sobre a esfericidade das partículas.

Certamente, um método de correlação do abrasivo com a esfera seria muito bem vindo e constitui um próximo desafio para o futuro.

## O tamanho da partícula

Os tamanhos das partículas em estudos de desgaste variam desde  $5\mu$  até dezenas de polegadas. [4], [5]

Um padrão bastante interessante de comportamento indica que partículas de diversos tamanhos são igualmente eficientes para remover material e as taxas de desgaste nestas ordens de grandeza são constantes.

No gráfico abaixo, mostra que as taxas de desgaste caem drasticamente quando as partículas têm tamanho inferior a  $100\mu\text{m}$ .

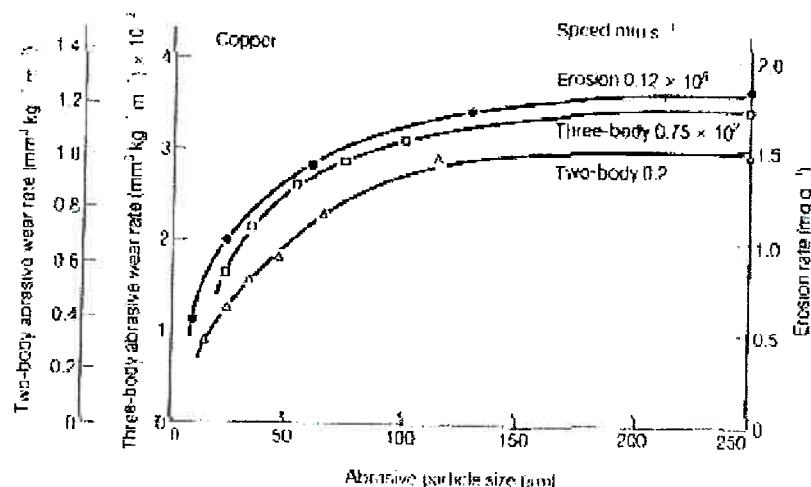


Figura 7 - Gráfico da influência do tamanho de partícula em três tribossistemas diferentes<sup>[4]</sup>

Este comportamento pode ser decodificado analisando o efeito do tamanho da partícula na resistência do material. Provavelmente, o escoamento de um pequeno volume de material seja mais difícil que num volume grande, pois as discordâncias encontram mais dificuldade para a sua movimentação.

Independente do mecanismo predominante, é importante lembrar que ao remover partículas contaminantes do meio é mais aconselhável eliminar primeiro as partículas grandes e depois as pequenas.

## Mecanismos do Desgaste Abrasivo

Comumente, o desgaste abrasivo se dá por deformação plástica ou por fratura frágil. Usualmente, os dois mecanismos ocorrem simultaneamente mesmo quando o material em questão é considerado frágil ou dútil. Agora, os mecanismos de desgaste abrasivo serão separados por tipo de fratura.

## Desgaste abrasivo por deformação plástica

O modelo idealizado para a deformação plástica tem o cone de semi-ângulo  $\alpha$  como ideal para o abrasivo riscando uma superfície plana de um metal dúctil com uma pressão  $P$ . Como mostra a figura abaixo:

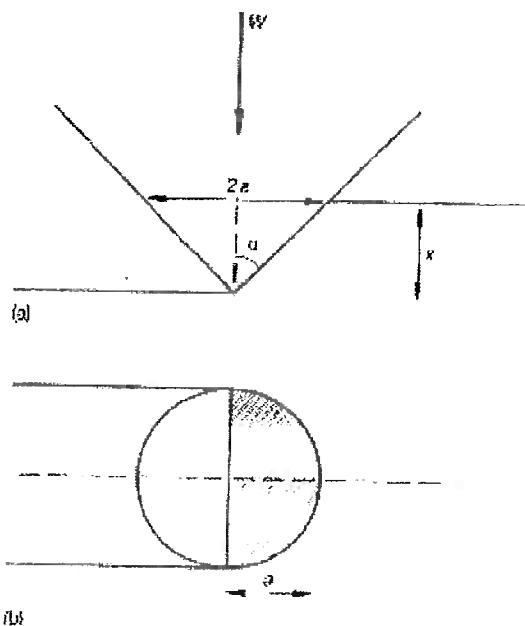


Figura 8 - Esquema do modelo de desgaste por deformação plástica

(a) vista frontal (b) vista superior<sup>[4]</sup>

Através de transações matemáticas, tem-se a seguinte equação para a quantidade de volume removido por unidade de comprimento:

$$Q = K W / H^{[4]}$$

Onde

$Q$  = quantidade de volume removido por unidade de comprimento

$K$  = constante que depende da fração de material removido

$W$  = carga aplicada no metal

$H$  = dureza do material

Esta equação simples nos sugere algumas simples conclusões.

- A quantidade de material removido é diretamente proporcional à fração de material removido.
- A taxa de desgaste varia inversamente proporcionalmente à dureza do material.

De fato, esta relação entre dureza e resistência ao desgaste é linear somente para materiais puros e recocidos. Para materiais polifásicos, há um desvio da linearidade. Materiais de mesma composição química e dureza, mas com microestruturas diferentes, apresentam valores de desgaste diferentes. O gráfico abaixo ilustra bem este fato:

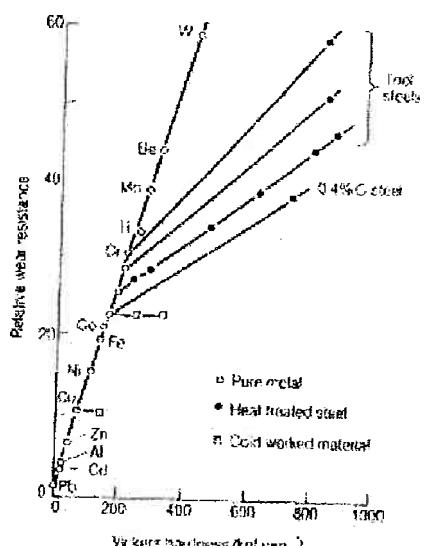
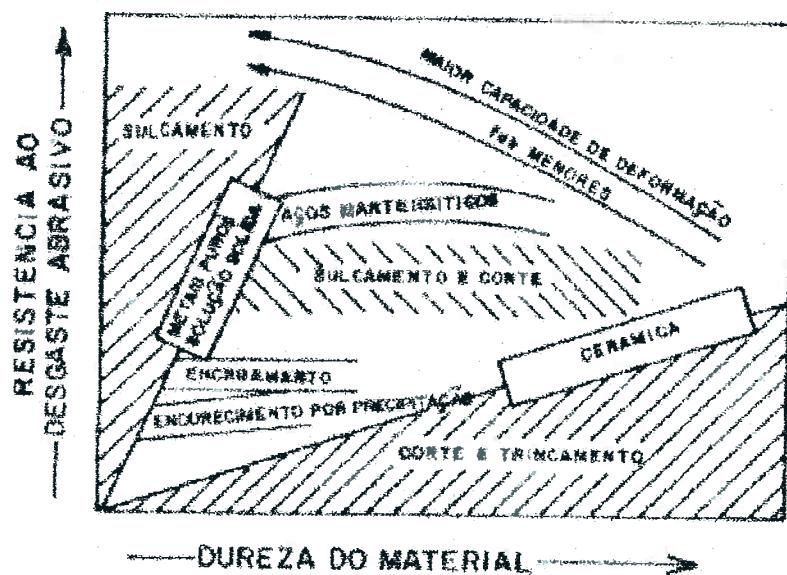


Figura 9 - Gráfico de Dureza Vickers X Resistência à abrasão de diversos materiais<sup>[4]</sup>



**Figura 10 - Ilustração de resistência ao desgaste, dureza e mecanismos de desgaste abrasivo**

O fato das ligas polifásicos não terem este comportamento reside no fato de termos ignorado o encruamento por deformação plástica que pode ocorrer. A abrasão introduz no material muitas regiões de concentração de tensões que podem ser aliviadas por deformação ou não. Como ocorre este encruamento superficial do material, os valores de dureza e de limite de escoamento a serem superados são maiores do que no material bruto. [4], [5], [3]

Sendo assim, a melhor correlação de dureza e taxa de desgaste seria considerar a dureza do abrasivo e a dureza do cavaco. Desta forma, a correlação se aproxima de uma reta quando é ponderada a fração fab.

Um importante dado é que os elementos de liga só irão aumentar a resistência ao desgaste quando os mesmos proporcionarem aumentarem a resistência mecânica em condições de altas tensões.

Para se chegar na equação acima, foi assumido como hipóteses que as partículas de abrasivo têm a mesma geometria e removem material da mesma forma. Todavia, este comportamento não ocorre. Existem ocasiões que o abrasivo encontra mais oportunidades de cortar o material enquanto em outras ele está mais propenso ao sulcamento... Ou ainda os dois mecanismos coexistem simbioticamente, mas existe o domínio de um dos mecanismos.

Segundo Hutchings [4], o fator controlador dos modus operandi dos micromecanismos de desgaste por deformação plástica é o ângulo de ataque da partícula. Esta correlação pode ser mais bem compreendida através da relação entre a tensão de cisalhamento na interface e a tensão de escoamento na deformação plástica no material deformado. Lubrificação perfeita implica  $f=0$  e adesão perfeita em  $f=1$ . Para valores de  $f$  inferiores a 0,5, apenas dois micromecanismos podem ocorrer corte e sulcamento.

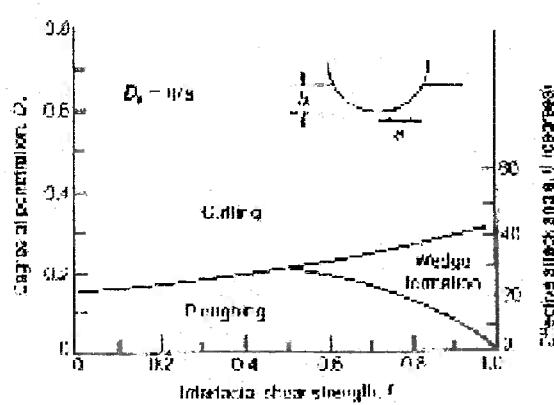


Figura 11 - Esquema de distribuição de mecanismo de desgaste, tensão de cisalhamento e tensão de escoamento de um aço SAE3045<sup>[4]</sup>

Os micromecanismos de sulcamento não levam a perda de material, pois o que ocorre na verdade é um desposicionamento do material na superfície atacada. Já os mecanismos de microcorte e "wedge" têm perda de material. A transição do comportamento de sulcamento para

corte ocorre num ângulo de ataque crítico  $\theta_c$ . Na grande maioria dos metais, este ângulo crítico situa-se no intervalo entre  $30^\circ$  e  $90^\circ$ . Usualmente, vale a seguinte regra: altos valores da relação de módulo de Young por dureza (E/H), resultam em ângulos críticos maiores.

Idealmente, o ângulo crítico depende apenas de  $f$ , mas em casos reais, esta variável depende das propriedades de encruamento e elásticas.

O gráfico abaixo mostra a distribuição de ângulos de um abrasivo bastante comum a sílica.

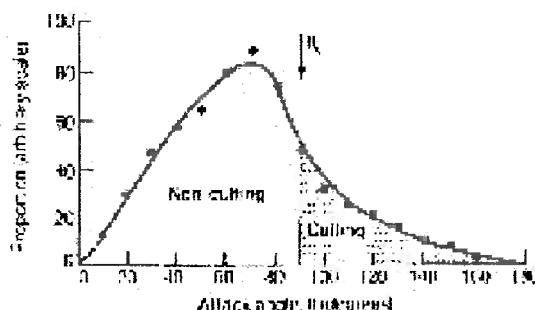


Figura 12 - Ilustração do ângulo de ataque e valor crítico para microcorte<sup>[4]</sup>

### Desgaste abrasivo por fratura frágil

Quando um material frágil sofre indentação de um abrasivo, as tensões de contato continuam elásticas e o cone hertziano se forma.

No ponto de contato inicial, altas tensões ocorrem e a ponta da trinca existe uma singularidade neste. Estas tensões extremas são aliviadas na forma de deformação plástica à frente da trinca ou ocorre um alívio ao redor da ponta da trinca.

A fratura pode acontecer quando ocorrer instabilidade da trinca ou da zona plástica à frente da trinca.

Existem muitos modelos propostos que debatem sobre o desgaste envolvendo fratura, baseados em pressupostos sobre a geometria e a origem da trinca. Destacando-se que falta um modelo geral de comportamento.

Mas estes diversos modelos têm algumas características em comum. A avassaladora maioria indica que os mecanismos por fratura frágil possuem taxas de desgaste superiores aos mecanismos por deformação plástica. Eles também sugerem que a taxa de desgaste aumenta rapidamente com a carga aplicada. Outrossim, fazem uma sutil correlação entre a taxa de desgaste e a ductilidade do material. Neste caso, a ductilidade é mais importante que a dureza.

Geralmente, em baixas tensões e com partículas pequenas, o mecanismo por fratura é suprimido e prevalece o mecanismo por deformação plástica. Enquanto com altas cargas, a fratura frágil ocorre levando a uma taxa de desgaste mais acentuada.

## Os materiais e o desgaste abrasivo

As principais características de um material resistente ao desgaste são:

- Capacidade de deformação
- Capacidade de encruamento
- Resistência à fratura

O gráfico abaixo mostra o comportamento de desgaste de alguns materiais

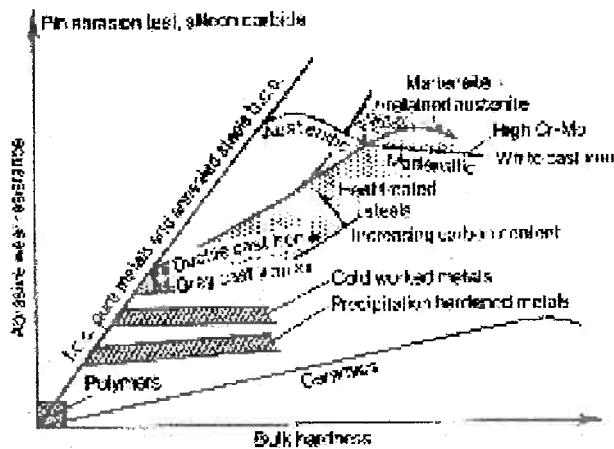


Figura 13 - Resistência à abrasão de vários materiais num ensaio de pino<sup>[4]</sup>

Novamente, observa-se que somente a propriedade dureza é um atributo muito limitado para classificar a resistência à abrasão de um material. A relação E/H com valores baixos, denota favorecimento do mecanismo de microcorte e assim menor resistência à abrasão.

Como já vimos, exceto os metais puros e recozidos, não têm correlação linear com dureza e relação E/H e resistência à abrasão. Isto ocorre pois a abrasão é bastante dependente da microestrutura do material.

Nos casos de materiais trabalhados a frio, esta transformação mecânica gera em poucas mudanças no seu comportamento frente à abrasão, pois o processo de desgaste impõe condições mais severas de deformação. Já o aumento do teor de carbono, aumenta a resistência à abrasão. Assim, diferentes microestruturas têm comportamento diferente mesmo que tenha mesma composição. Por exemplo, aços austeníticos apresentam mais resistência à abrasão do que aços perlíticos. Aços martensíticos têm resistência menor. (todos de mesma dureza) Estas conclusões podem ser compreendidas tomando-se como informações a ductilidade e as taxas de encruamento. Aços martensíticos possuem baixa ductilidade e esta característica leva a perda maior de pequenos "

cavacos". Os aços bainíticos e perlíticos têm comportamento intermediário. É claro que esta conclusão foi tirada a partir de uma dada dureza e estas conclusões podem ser perfeitamente refutadas em outras condições (dureza).

No gráfico abaixo, temos um comparativo das microestruturas abordadas.

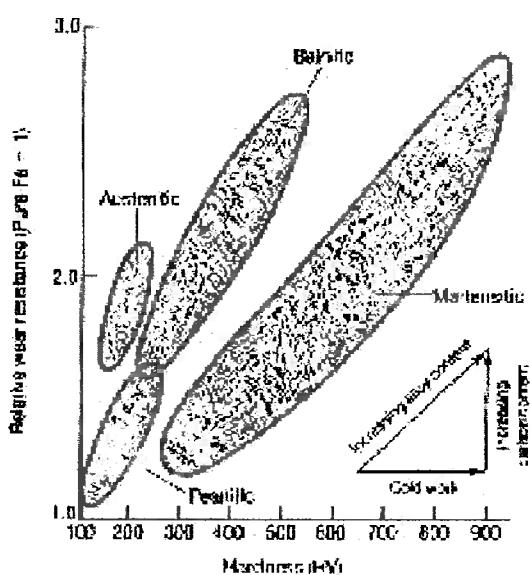


Figura 14 - Gráfico esquemático de microestrutura, resistência à abrasão e dureza de aços<sup>[4]</sup>

Não obstante, existem propriedades mecânicas que têm características divergentes. Ao aumentar a resistência de um material, a ductilidade estará comprometida e vice e versa...

Ademais, os aços nem qualquer material polifásico metálico dificilmente conseguem atingir a dureza dos abrasivos mais comuns mesmo quando encruados. É bastante, comum, o hábito de adicionar fases de reforço com o objetivo de melhorar a resistência ao desgaste. As fases podem ter características similares como estruturas ferríticas-

martensíticas, ou distintas, como no caso de carbonetos em matriz metálica.

A resistência ao desgaste destes sistemas depende das características de cada fase e do tamanho do sulco produzido. Para fases bem distintas, no caso de carbonetos, a partícula dura de reforço só passa a interferir na remoção de material quando o seu tamanho médio é da mesma ordem de grandeza da penetração do abrasivo. Por outro lado, se o livre caminho médio entre as partículas for menor do que o seu tamanho, passa a prevalecer o trincamento e arrancamento da fase dura. Assim, se as partículas de segunda fase tiverem tamanho inferior ao abrasivo, o abrasivo praticamente se comporta como se o material fosse homogêneo.

A escolha do material requer a análise de todos estes fatores e quiçá as interações entre estas variáveis para que o material se adeque bem como componente mecânico.

## O Britador de Mandíbulas

### Introdução

Os dois itens grandes itens de custos de britagem são a energia e as peças de desgaste. É portanto importante saber calcular o consumo das peças e poder prever o momento da sua troca, já que esta troca geralmente está condicionada em parada de produção.<sup>[1,2]</sup>

O método de cálculo da vida útil foi desenvolvido no final da década de 70 pelo Prof. Siriani, a seguir encontra-se o método resumido e considerações importantes sobre o seu trabalho. Por questões de enquadramento será dada ênfase maior no que diz respeito as peças de desgaste:

- A energia consumida é dada pela fórmula de Bond.
- Através do cálculo da energia consumida, há uma tabela de desgaste de mandíbula fixa para valores de energia e minérios de categorias diferentes.
- Assim com o desgaste da mandíbula fixa é calculada o desgaste da mandíbula móvel através da seguinte relação:

$$\text{Desgaste da mandíbula fixa} = \text{Desgaste da mandíbula móvel} \times 1,72$$

- O aproveitamento das peças de desgaste varia com o equipamento, distribuição granulométrica do material alimentado e com a peça. O aproveitamento da peça corresponde à porcentagem do peso da peça que será consumida até a peça ser trocada.

Britadores trabalhando com abertura de descarga muito fechadas causam um desgaste acentuado da extremidade inferior das mandíbulas. Em conseqüência, as peças de desgaste precisam ser trocadas com freqüência maior e muitas vezes o desgaste é localizado.

Por esta razão, recomenda-se escolher sempre um britador que tenha flexibilidade para abrir ou fechar a abertura desejada. Além disso, muitas mandíbulas têm o projeto que permite virá-las a cada primeira troca, dobrando desta forma a sua vida.

A vida da peça é dada pela seguinte equação

$$\text{Vida da peça} = (\text{peso} \times \text{aproveitamento} \times \text{produção}) / \text{desgaste}$$

O presente trabalho se propõe a estudar diferentes materiais e combinações diferentes que possam minimizar o custo de troca e também o próprio custo de desgaste de mandíbulas que é bastante significativo na operação de britagem

## Os Ensaios de Desgastes

Segundo Pintaúde [6], os ensaios de desgaste mais utilizados são o ensaio da roda de borracha e o ensaio pino sobre disco. Obviamente, todos estes ensaios estão normalizados pela ASTM.

Contudo, apesar destes ensaios serem amplamente utilizados eles apenas apresentam uma boa correspondência com a maioria dos tribossistemas encontrados.

No trabalho de Borik [11], os ensaios devem corresponder às necessidades dos diferentes tribossistemas e situações práticas.

Utilizando a classificação da abrasão por nível de tensões, são sugeridos os ensaios mais apropriados:

Classificação de tensões	Ensaio recomendado
Goivadura	Britador de mandíbulas
Altas tensões	Moinho de bolas
Baixas tensões	Roda de borracha

**Tabela 1 - Ensaios recomendados para desgastes abrasivos conforme a classificação de tensões**

Existe também um outro trabalho de Spero [14] que adota outros critérios para definir os grupos de ensaios mais apropriados:

1. Susceptibilidade ao desgaste B
2. Coeficiente de desgaste K
3. Tipo de contato

Assim, as principais categorias de ensaios são agrupadas:

Grupo 1 –  $K < 100^{-6}$  e  $B < 0,5 \text{mm}^3 \cdot \text{K} \cdot \text{J}^{-1}$

Grupo 2 –  $100^{-6} < K < 1000^{-6}$  e  $0,5 \text{mm}^3 \cdot \text{K} \cdot \text{J}^{-1} < B < 1 \text{mm}^3 \cdot \text{K} \cdot \text{J}^{-1}$

Grupo 3 –  $K > 1000^{-6}$  e  $B > 1 \text{mm}^3 \cdot \text{K} \cdot \text{J}^{-1}$

O ensaio de britador de mandíbulas, assim como o moinho de bolas e o ensaio de roda de borracha se enquadram na última categoria.

## Ensaio de Britador de Mandíbulas

O ensaio de britador de mandíbulas é um ensaio normalizado pela ASTM (G81-83) cujos parâmetros foram propostos por Borik e Sponseller<sup>[11]</sup>.

Recentemente, Blickensderfer<sup>[9]</sup>, Sare<sup>[10]</sup> e outros propuseram algumas mudanças nas normas do ensaio. Blickensderfer<sup>[9]</sup> propôs mudanças nos parâmetros do ensaio enquanto que Sare e colaboradores propuseram mudanças no conceito de mandíbula de referência.

A tabela abaixo denota estas diferenças nos parâmetros dos ensaios:

Parâmetro	ASTM G81-83 <sup>[8]</sup>	Blickensderfer <sup>[9]</sup>
<b>Abrasivo</b>		
Alimentação (mm)	40-50	18
Relação de Redução	-	-
Quantidade (kg)	908	90
<b>Condições</b>		
Abertura (mm)	$3,2 \pm 0,8$	3,2
Carga (N)	NF	12500
Duração (min)	NF	50-70
Velocidade (ciclos/min)	NF	260
<b>Peças(dimensões)</b>		
Fixa	137 X 191 X 22	135 X 75 X 25
Móvel	132 X 216 X 18	

**Tabela 2 - Comparativo dos ensaios da norma e por Blickenderfer**

Como anteriormente citado, a norma propõe que seja utilizado um material de referência para o ensaio, para tanto o material deve

apresentar o parâmetro RAR - resistência à abrasão relativa – entre 0,97 e 1,03. Este adimensional é definido pela seguinte equação:

$$\text{RAR} = \frac{(M_m / M_{mr}) + (M_f / M_{fm})}{2} \quad [8]$$

onde,

RAR - resistência à abrasão relativa

$M_m$  – perda de massa da mandíbula móvel

$M_{mr}$  - perda de massa da mandíbula móvel de referência

$M_f$  – perda de massa da mandíbula fixa

$M_{fm}$  – perda de massa da mandíbula fixa de referência

Dentro dos parâmetros delimitados pelo RAR, os materiais que se enquadram são os aços baixa liga e aços manganês – estes últimos materiais comuns como mandíbulas de britadores.

No trabalho de Sare, Arnold, Hall, existem evidências fortes de que o desempenho dos materiais que foram testados independem do material de referência. Neste presente trabalho, este conceito será amplamente discutido.

## Materiais e Métodos

### Corpos de prova

### Composição e Tratamento Térmico

Foram utilizados como corpos de prova de mandíbulas fundida em molde de areia cuja composição química segue abaixo:

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Fe
0,351	0,192	0,336	0,014	0,017	1,36	0,210	0,038	0,105	97,38

Tabela 3 - Composição Química do Aço

Este composição se assemelha aos antigos aços ligados conforme a SAE J778a, na descrição o aço tem características de um SAE 3240.

Os corpos de prova foram recozidos durante 7 horas em atmosfera protetora a 720°C.

As peças fundidas foram submetidas a usinagem para comportar o tamanho dos corpos de provas

Um lote destas amostras foi austenitizado a 1050°C e 950°C por 4 horas em atmosfera protetora e logo em seguida foram temperados em corrente de ar frio com severidade alta.

## Usinagem e desenho das amostras

Logo após o tratamento de recozimento, as amostras foram usinadas com as seguintes dimensões 31,1mm X 41,4mm segundo o desenho abaixo:

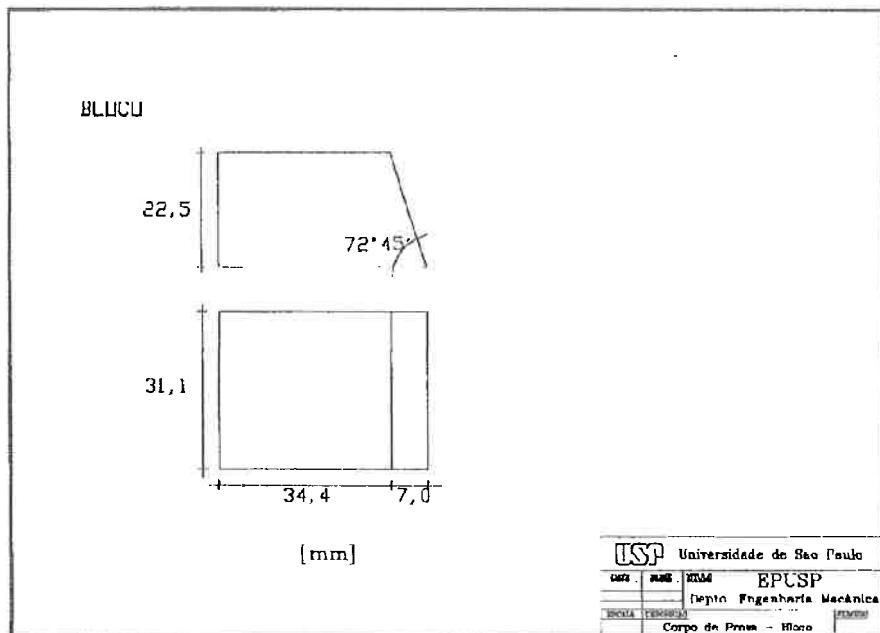


Figura 15 - Desenho do corpo de prova usinado<sup>[6]</sup>

## O abrasivo

O abrasivo utilizado no experimento foi granito. Este material foi gentilmente oferecido pela Embu SA.<sup>a</sup>

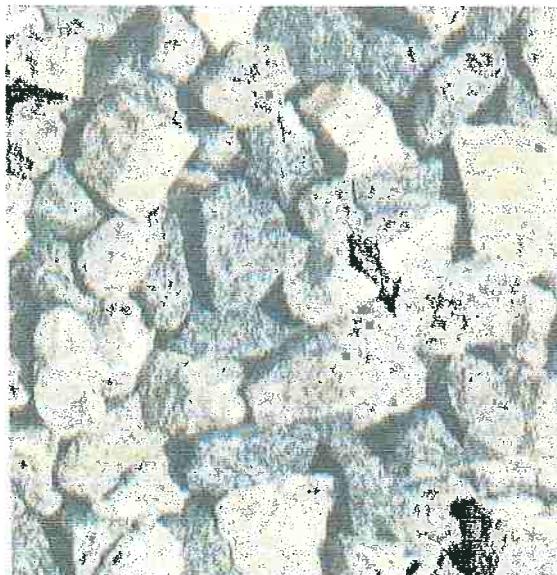


Figura 16 - Granito utilizado nos ensaios

Segue abaixo a sua constituição mineralógica

Constituinte	Quartzo	Feldspato	Plagioclásio	Micas	Outros
<b>Fração volumétrica (%)</b>	17,9	23,1	24,4	17,7	6,9
<b>Microdureza Vickers (HV)</b>	2012	1206-1218		64	

Tabela 4 - Composição do granito

A granulometria do abrasivo é do tipo " Brita 1" que tecnicamente se enquadra como passante em  $\frac{3}{4}$ " .

Primeiramente, foi feito quarteamento do material pelo método de pilhas e em seguida foi feita o peneiramento do mesmo na malha  $\frac{1}{2}$ " . Portanto, o abrasivo ficou finalmente passante  $\frac{1}{2}$ "

## O Teste de Resistência à Abrasão

### O Equipamento

O ensaio de britagem foi realizado num britador de mandíbulas de laboratório de um eixo Faço.

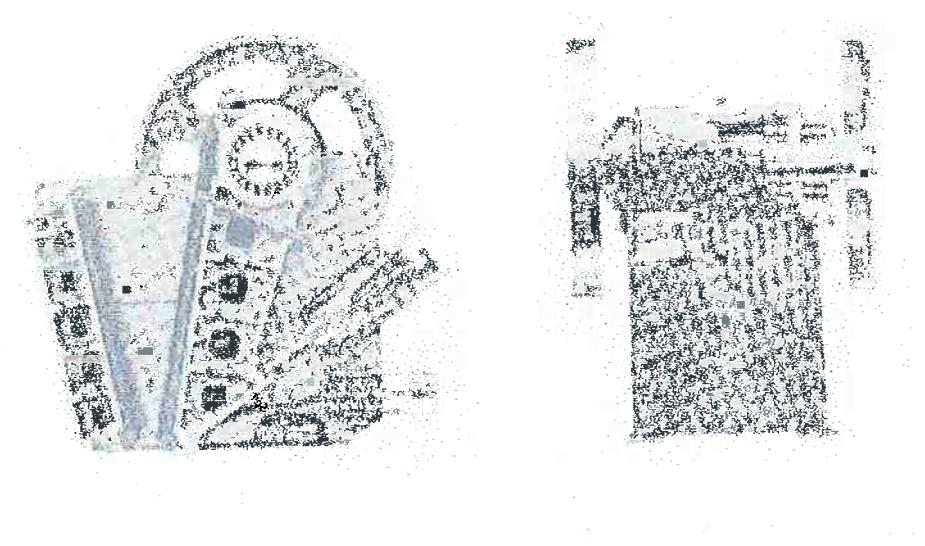


Figura 17 - Britador de Mandíbulas Faço de um eixo<sup>[12]</sup>

A figura seguinte apresenta um esquema construtivo de um britador de mandíbulas de um eixo. Ele é composto basicamente de uma mandíbula fixa, e uma móvel ligada ao excêntrico, o qual fornece o movimento de aproximação e afastamento entre elas.<sup>[13], [12]</sup>

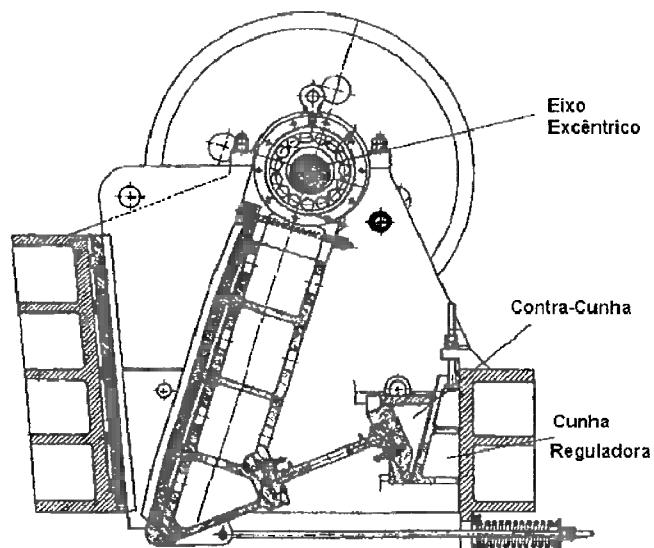


Figura 18 - Esquema ilustrativo com as partes reguladoras de abertura do britador<sup>[12]</sup>

Nele, o fragmento de rocha ou minério a ser britado é alimentado no espaço entre as duas mandíbulas e durante o movimento de aproximação, é esmagado. Os fragmentos resultantes escoam para baixo, durante o movimento de afastamento da mandíbula móvel. Esta por sua vez, se movimenta em torno de um eixo excêntrico

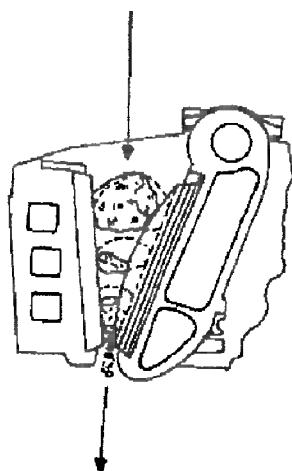


Figura 19 - Esquema ilustrativo da cominuição do abrasivo no britador<sup>[12]</sup>

Devido a este movimento são definidos dois parâmetros de operação do equipamento da abertura de saída: APA – abertura de saída, posição aberta e APF – abertura de saída – posição fechada.

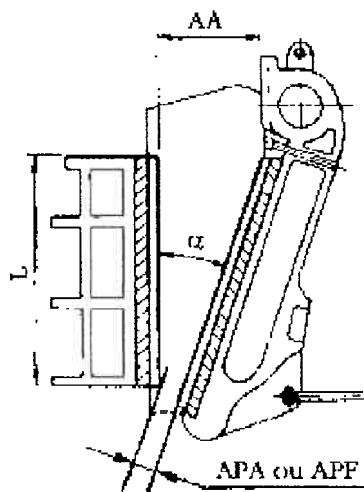


Figura 20 - Variáveis do britador<sup>[73]</sup>

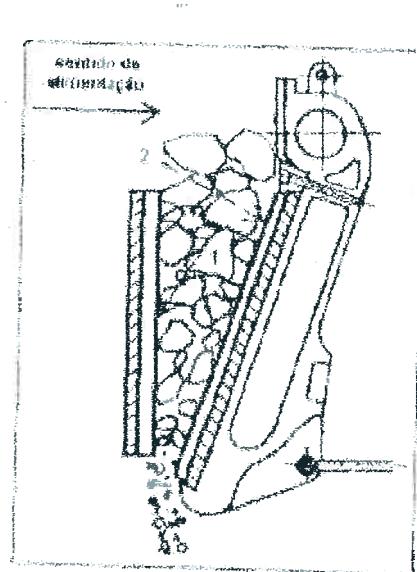


Figura 21 - Esquema de alimentação do britador<sup>[71]</sup>

Além do britador foram utilizadas duas balanças. A carga de abrasivo foi medida numa balança FILIZOLA (capacidade máxima 50kg) e foram feitas medidas de 15 kg .

Já a perda de massa das mandíbulas após os ensaios foi determinada na balança eletrônica OHYO, capacidade máxima 3100g com precisão de 0,01g.

## Os parâmetros de britagem

Todos os parâmetros de britagem que influenciam diretamente no desgaste foram fixados para que pudéssemos observar a influência do material no comportamento do desgaste.

Quantidade de abrasivo – 5 kg

Abertura – posição fechada – 3 mm

Alimentação do abrasivo – britador afogado

Abrasivo : granito passante em malha  $\frac{1}{2}$  "

Além disso, todas as variáveis como velocidade e cargas foram mantidas em todos os ensaios.

O ensaio está sujeito a variações conforme o modo de alimentação do britador, velocidade de alimentação ou seja variáveis dependentes do operador. Para minimizar este erro processual, a norma sugere que se avalie o desgaste em apenas uma porção da mandíbula. A porção mediana da mandíbula foi a parte escolhida para o estudo. Para tanto é preciso fazer uma mandíbula de base(porta-amostras) para suporte das pequenas amostras. As dimensões da amostra e da mandíbula são dadas na figura a seguir:

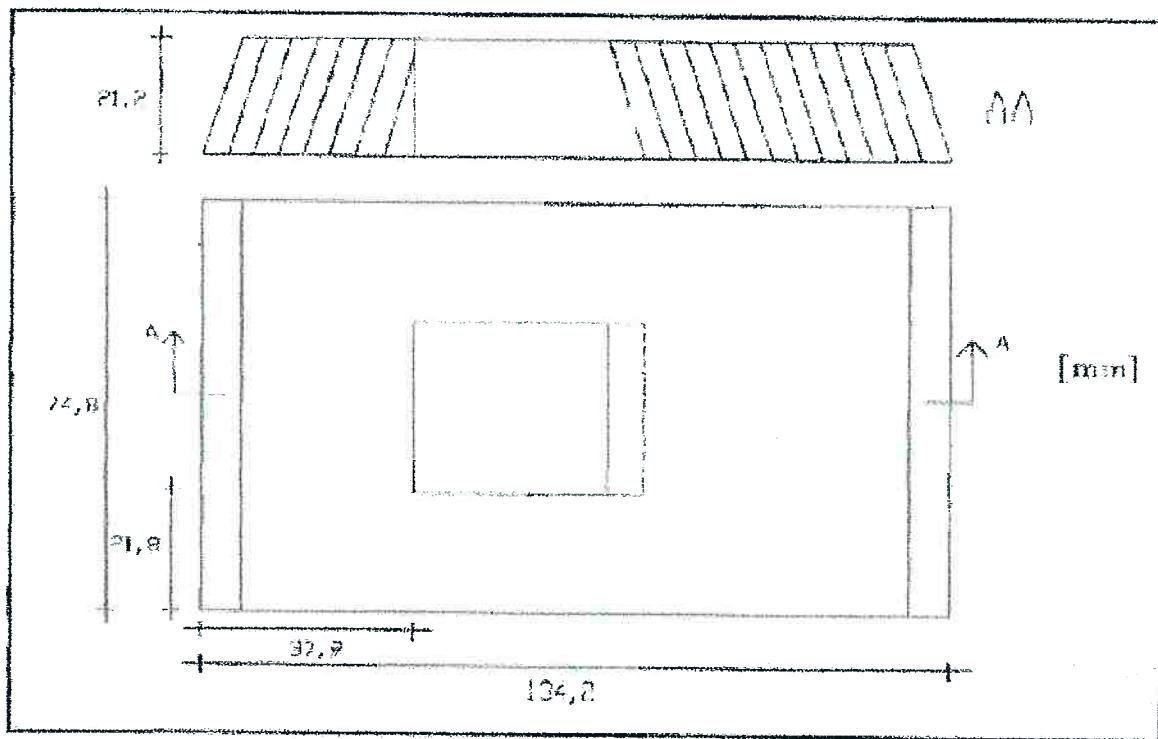


Figura 22 - Desenho do porta-amostra<sup>61</sup>

## Metodologia de cada ensaio

Cada ensaio de britagem era constituído das seguintes etapas:

1. Limpeza da superfície com lixa grana 100
2. Limpeza das mandíbulas em ultra-som em solução de álcool etílico por 5 minutos
3. Medidas de massas de cada mandíbula
4. Ajuste do equipamento, posicionamento das mandíbulas e ajustes dos parâmetros de britagem
5. Medida de massa do abrasivo ( 5 kg – batelada)
6. Carregamento e alimentação manual do equipamento
7. Retirada das mandíbulas

8. Limpeza das mandíbulas em ultra-som em solução de álcool etílico por 5 minutos
9. Secagem em ar quente
10. Medida da massa de cada mandíbula

Cada ensaio consistia em 12 bateladas de 5 kg.

Segundo Pintaúde<sup>[7]</sup>, com bateladas de 5kg , a partir da quinta batelada já se consegue estabilidade no mecanismo de abrasão (running-in).

## Os ensaios

Todos os ensaios foram feitos nas condições sugeridas por Blickensderfer<sup>[9]</sup> e pela norma ASTM G81-83<sup>[8]</sup>.

Os resultados foram colhidos após acumular uma massa de 60kg . De acordo com Pintaúde<sup>[7]</sup>,<sup>[6]</sup>, o período de running-in se extingue a partir da massa acumulada de 30kg.

Este trecho se torna bastante útil pois ainda não há variação de geometria da mandíbula, portanto não há modificações de geometria e condições do ensaio.

Para evidenciar o comportamento descrito acima, foram feitos dois ensaios com mandíbulas testes.

Para cada tratamento térmico, havia quatro corpos de prova.

Houve o cruzamento dos corpos de prova, como segue abaixo:

	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4
Mandíbula Móvel (MM)	Tratamento 950°C	Tratamento 1050°C	Tratamento 950°C	Tratamento 1050°C
Mandíbula Fixa (MF)	Tratamento 950°C	Tratamento 1050°C	Tratamento 1050°C	Tratamento 950°C

**Tabela 5- Esquema dos ensaios empregados**

## Resultados e Discussão

### Microestrutura do aço

A seguir, temos a curva TTT de um aço AISI 1335 com 0,35% de carbono e 1,85% de manganês.

Através desta curva, podemos compreender de forma melhor como ocorreram as transformações deste aço ao longo dos dois tratamentos térmicos distintos.

É claro que esta curva deve ser olhado sob algumas alterações já que a liga estudada possui mais elementos de liga que são forte estabilizadores da ferrita.

Além disso, a presença de muitos elementos de liga neste aço provoca o deslocamento da cotovelo da curva para a direita, ocasionando o retardamento nas transformações, ou seja, consiste na maior facilidade de obter por esfriamento a estrutura martesíntica.

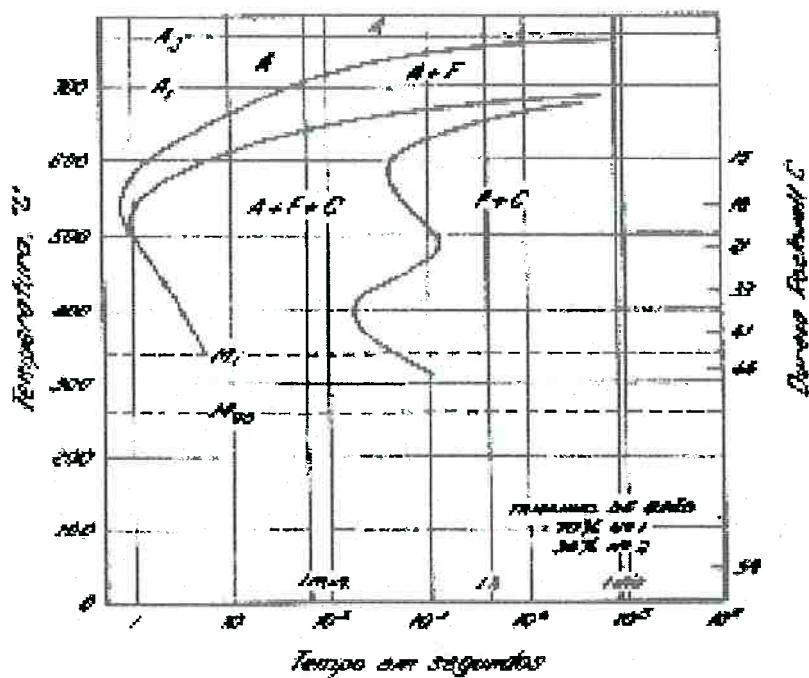


Figura 23 - Curva TTT para o aço AISI 1335

### Tratamento Térmico a 950°C



Figura 24 - Microestrutura do aço tratado a 950°C, Ataque Nital 5%, 1000X



Figura 25 - Microestrutura do tratamento térmico a 950°C, Ataque Nital, 50X

A microestrutura resultante deste tratamento é martensítica bainítica com traços de ferrita próximo ao contorno de grão. O tratamento prolongado de austenitização ocasionou o crescimento de grão e como o resfriamento foi brusco ocasionou a formação de alguma martesita na microestrutura.

### Tratamento Térmico a 1050°C

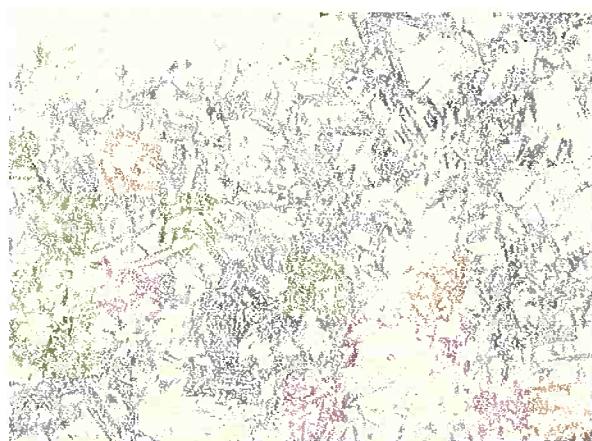


Figura 26 – Microestrutura do aço tratado a 1050°C, Ataque Nital 5%, 200X

Já no tratamento a 1050, por ter sido um tratamento realizado numa temperatura superior, houve tempo de transformação do aço em ferrita e carboneto em forma de bainita.

## Dureza do Material

Foram realizados testes de dureza Brinell com tais condições, esfera de 2,5 mm, pré-carga de 10Kg e uma Carga de 187,5 Kg.

As indentações foram aleatórias numa superfície plana e lixada. Além disto foram realizadas dez (10) testes e os valores são abaixo

Os valores da Dureza Brinell nas amostras a 950°C e a 1050°C

1050°C	950°C
225	425
245	408
255,5	392
255,5	425
261	408
255,5	425
255,5	408
250	365
245	425
255,5	425
Média = 250,35	Média = 410,6
Desvio	Desvio
Padrão = 10,252	Padrão = 19,671

Tabela 6 - Dureza

## A caracterização dos corpos de prova

A caracterização da superfície desgastada das mandíbulas foi feita através de estereoscopia óptica.

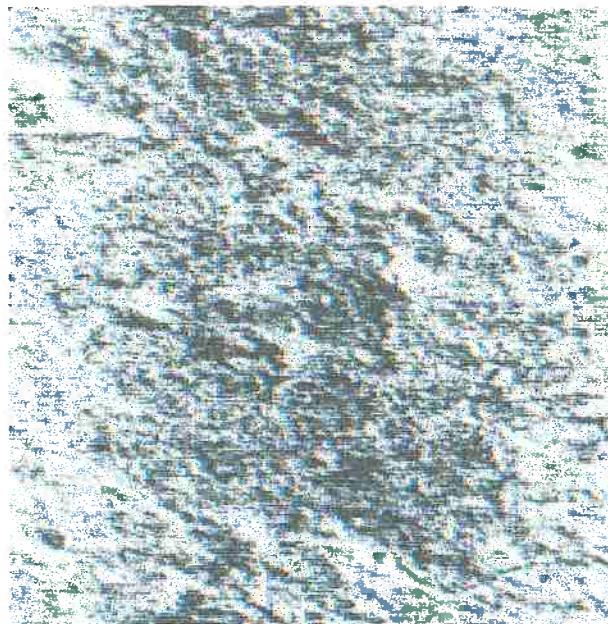


Figura 27 - Superfície da mandíbula móvel , Aumento 25X

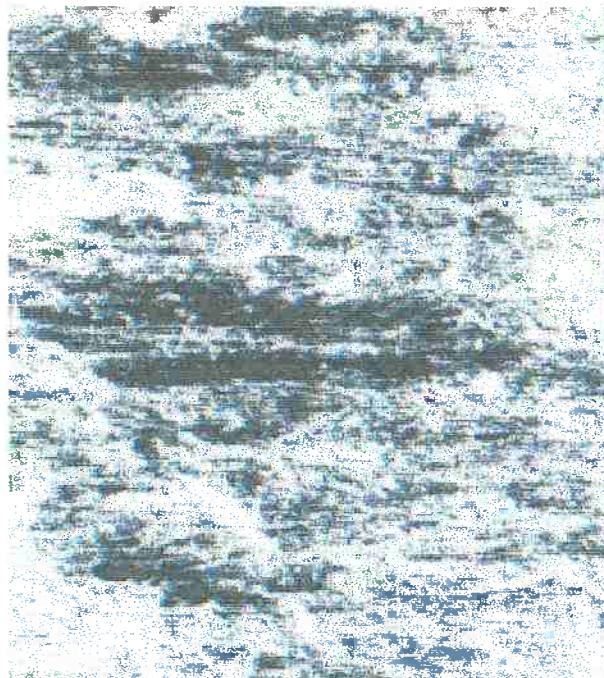


Figura 28 - Superfície da mandíbula fixa , Aumento 25X

Observa-se que o mecanismo de desgaste abrasivo na mandíbula fixa é microcorte. Há arrancamento de material das mandíbulas pelo abrasivo.

Já a mandíbula móvel apresentou mecanismo de desgaste mais tênue que a mandíbula fixa. Esta observação não possibilitou identificar o mecanismo predominante de desgaste.

A figura abaixo ilustra o fenômeno ocorrido

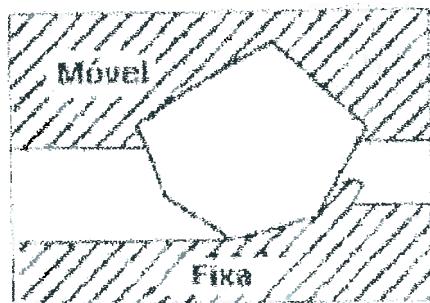


Figura 29 - Esquema ilustrativo dos mecanismos de desgastes das mandíbulas<sup>[7]</sup>

## Os ensaios e as taxas de desgaste

Para a análise dos ensaios foram feitas as seguintes medidas

- Perda de massa (em g)
- Taxa de desgaste (em kg/g)
- Relação das taxas de desgaste da MF pela MM

Abaixo segue os dados abaixo para cada ensaio

## Ensaio Teste 1 – Mandíbula Teste 1

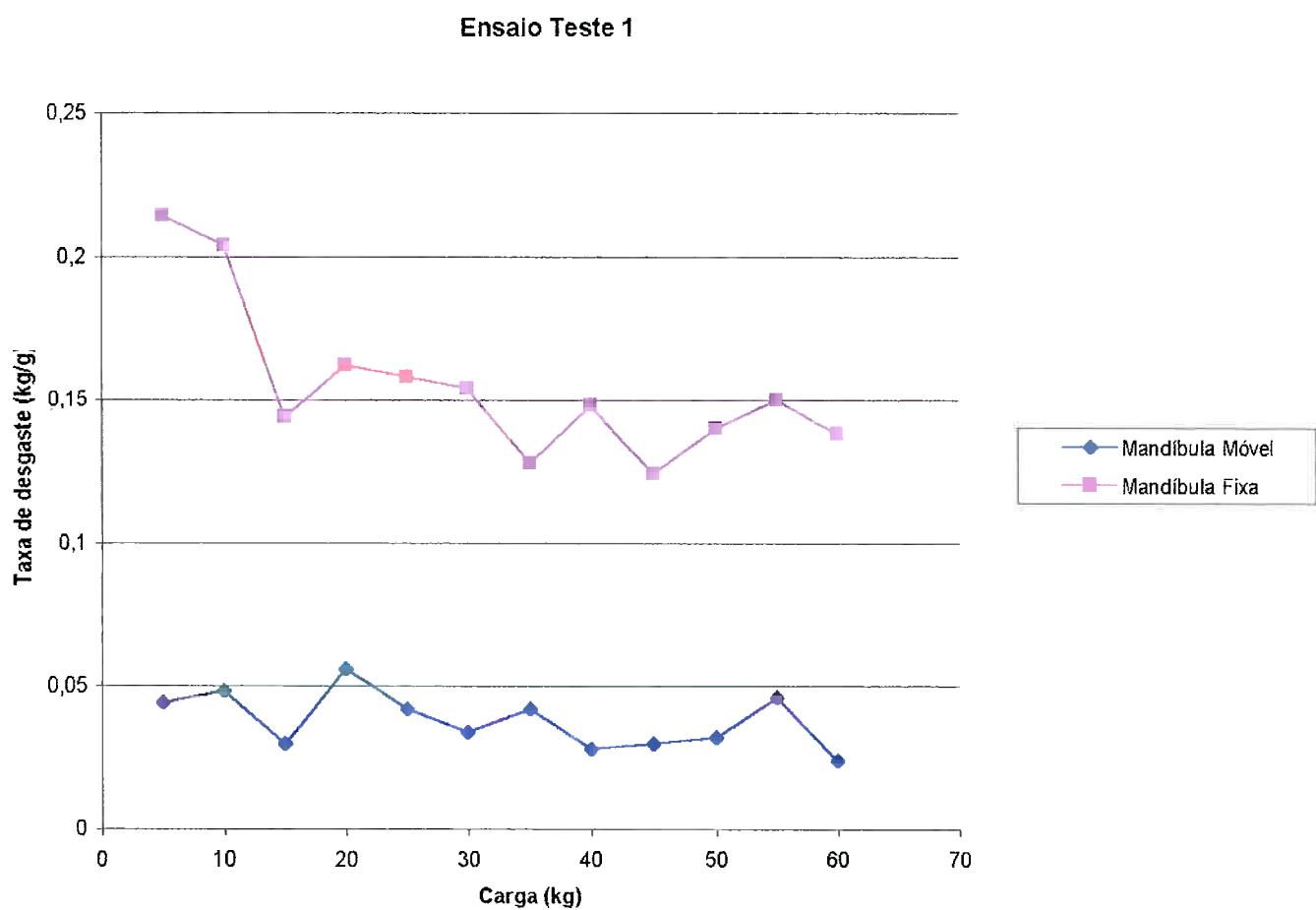
## Mandíbula Móvel

Batelada (kg)	Perda de massa (g)	Taxa de desgaste (g/kg)
5	0,22	0,044
10	0,24	0,048
15	0,15	0,030
20	0,28	0,056
25	0,21	0,042
30	0,17	0,034
35	0,21	0,042
40	0,14	0,028
45	0,15	0,030
50	0,16	0,032
55	0,23	0,046
60	0,12	0,024

## Mandíbula Fixa

Batelada (kg)	Perda de massa (g)	Taxa de desgaste (g/kg)
5	1,07	0,214
10	1,02	0,204
15	0,72	0,144
20	0,81	0,162
25	0,79	0,158
30	0,77	0,154

35	0,64	0,128
40	0,74	0,148
45	0,62	0,124
50	0,70	0,140
55	0,75	0,150
60	0,69	0,138



**Figura 30 - Gráfico da taxa de desgaste do Ensaio Teste 1**

## Ensaio Teste 2 – Mandíbula Teste 2

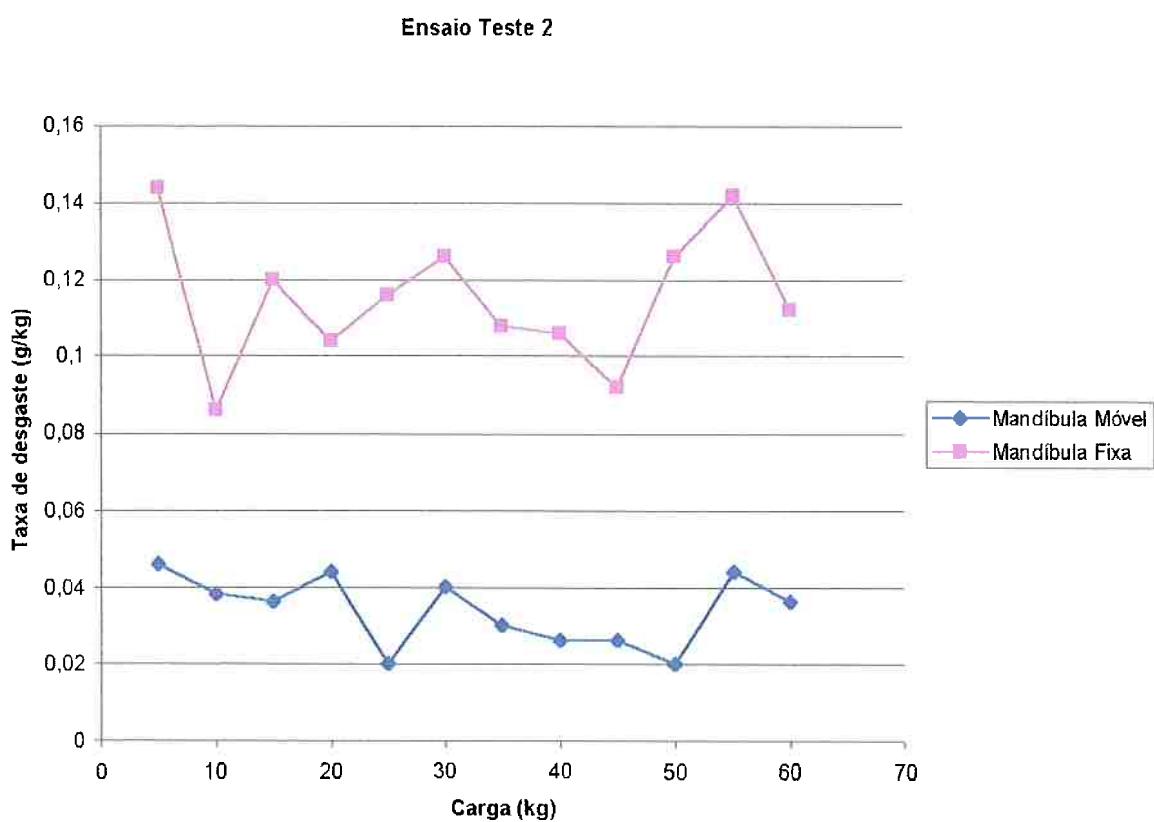
## Mandíbula Móvel

Batelada (kg)	Perda de massa (g)	Taxa de desgaste (g/kg)
5	0,23	0,046
10	0,19	0,038
15	0,18	0,036
20	0,22	0,044
25	0,10	0,020
30	0,20	0,040
35	0,15	0,030
40	0,13	0,026
45	0,13	0,026
50	0,10	0,020
55	0,22	0,044
60	0,18	0,036

## Mandíbula Fixa

Batelada (kg)	Perda de massa (g)	Taxa de desgaste (g/kg)
5	0,72	0,144
10	0,43	0,086
15	0,60	0,120
20	0,52	0,104
25	0,58	0,116
30	0,63	0,126

35	0,54	0,108
40	0,53	0,106
45	0,46	0,092
50	0,63	0,126
55	0,71	0,142
60	0,56	0,112



**Figura 31 - Gráfico da taxa de desgaste do Ensaio Teste 2**

Foram feitos dois ensaios de testes para calibrar o equipamento e testar as condições e parâmetros do ensaio.

## Ensaio 1 – MM 950 e MF 950

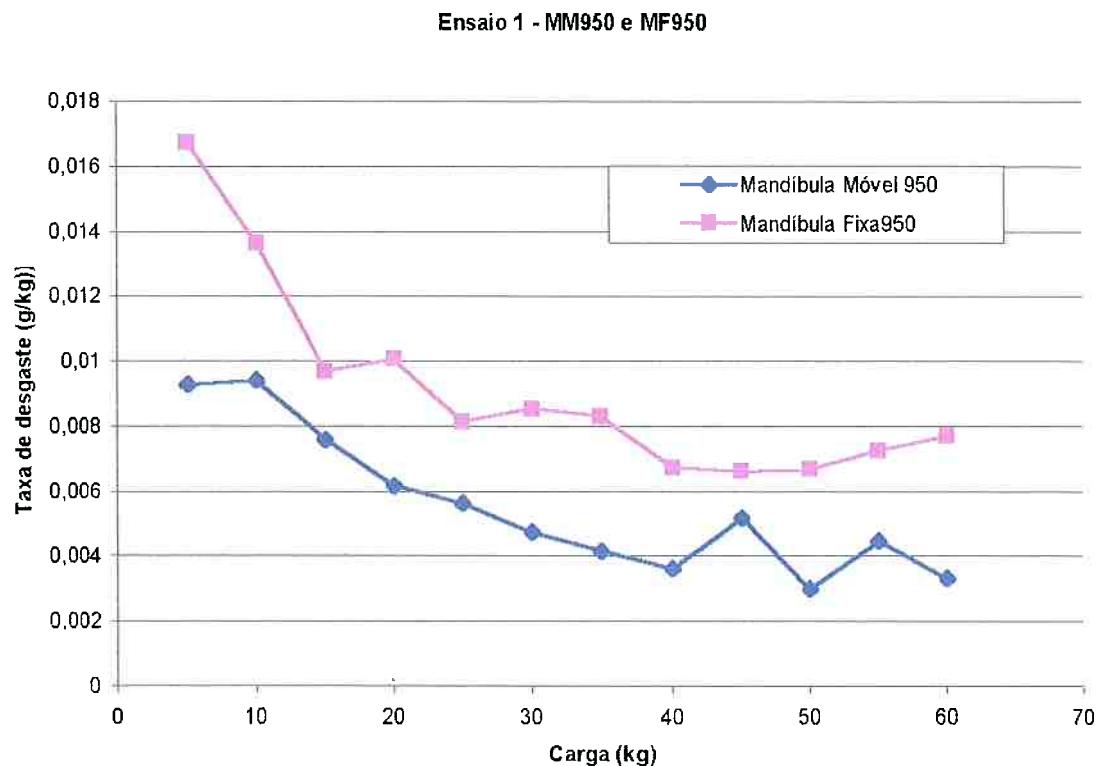
## Mandíbula Móvel

Batelada (kg)	Perda de massa (g)	Taxa de desgaste (g/kg)
5	0,0464	0,00928
10	0,0471	0,00942
15	0,0380	0,00760
20	0,0309	0,00618
25	0,0282	0,00564
30	0,0237	0,00474
35	0,0208	0,00416
40	0,0181	0,00362
45	0,0259	0,00518
50	0,0150	0,00300
55	0,0224	0,00448
60	0,0166	0,00332

## Mandíbula Fixa

Batelada (kg)	Perda de massa (g)	Taxa de desgaste (g/kg)
5	0,0837	0,01674
10	0,0683	0,01366
15	0,0485	0,00970
20	0,0504	0,01008
25	0,0408	0,00816
30	0,0427	0,00854
35	0,0416	0,00832
40	0,0337	0,00674

45	0,0331	0,00662
50	0,0334	0,00668
55	0,0363	0,00726
60	0,0385	0,00770



**Figura 32 - Gráfico de taxa de desgaste do Ensaio 1**

## Ensaio 2 – MM 1050 e MF 1050

## Mandíbula Móvel

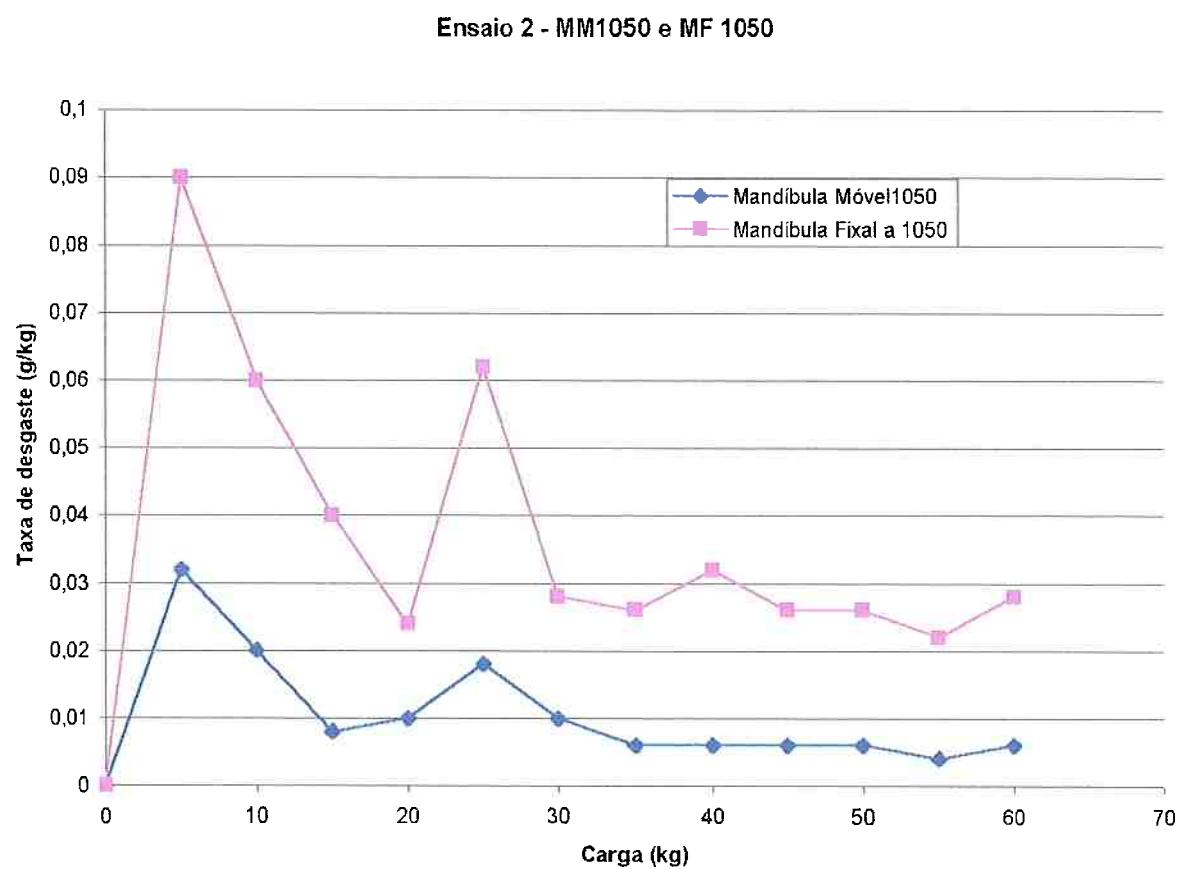
Batelada (kg)	Perda de massa (g)	Taxa de desgaste (g/kg)
5	0,16	0,032
10	0,10	0,020
15	0,04	0,008
20	0,05	0,010
25	0,09	0,018
30	0,05	0,010
35	0,03	0,006
40	0,03	0,006
45	0,03	0,006
50	0,03	0,006
55	0,02	0,004
60	0,03	0,006

## Mandíbula Fixa

Batelada (kg)	Perda de massa (g)	Taxa de desgaste (g/kg)
5	0,45	0,090
10	0,30	0,060
15	0,20	0,040
20	0,12	0,024
25	0,31	0,062
30	0,14	0,028
35	0,13	0,026

40	0,16	0,032
45	0,13	0,026
50	0,13	0,026
55	0,11	0,022
60	0,14	0,028

A seguir o gráfico



**Figura 33 - Gráfico de taxa de desgaste do Ensaio 2**

## Ensaio 3 – MM950 e MF1050

## Mandíbula Móvel

Batelada (kg)	Perda de massa (g)	Taxa de desgaste (g/kg)
5	0,1107	0,02214
10	0,0365	0,00730
15	0,0302	0,00604
20	0,0240	0,00480
25	0,0202	0,00404
30	0,0137	0,00274
35	0,0151	0,00302
40	0,0351	0,00702
45	0,0109	0,00218
50	0,0093	0,00186
55	0,0087	0,00174
60	0,0109	0,00218

## Mandíbula Fixa

Batelada (kg)	Perda de massa (g)	Taxa de desgaste (g/kg)
5	0,3084	0,06168
10	0,2712	0,05424
15	0,2263	0,04526
20	0,2450	0,04900
25	0,3292	0,06584
30	0,1992	0,03984
35	0,2368	0,04736

40	0,1958	0,03916
45	0,1837	0,03674
50	0,1917	0,03834
55	0,2140	0,04280
60	0,1893	0,03786

A seguir o gráfico:

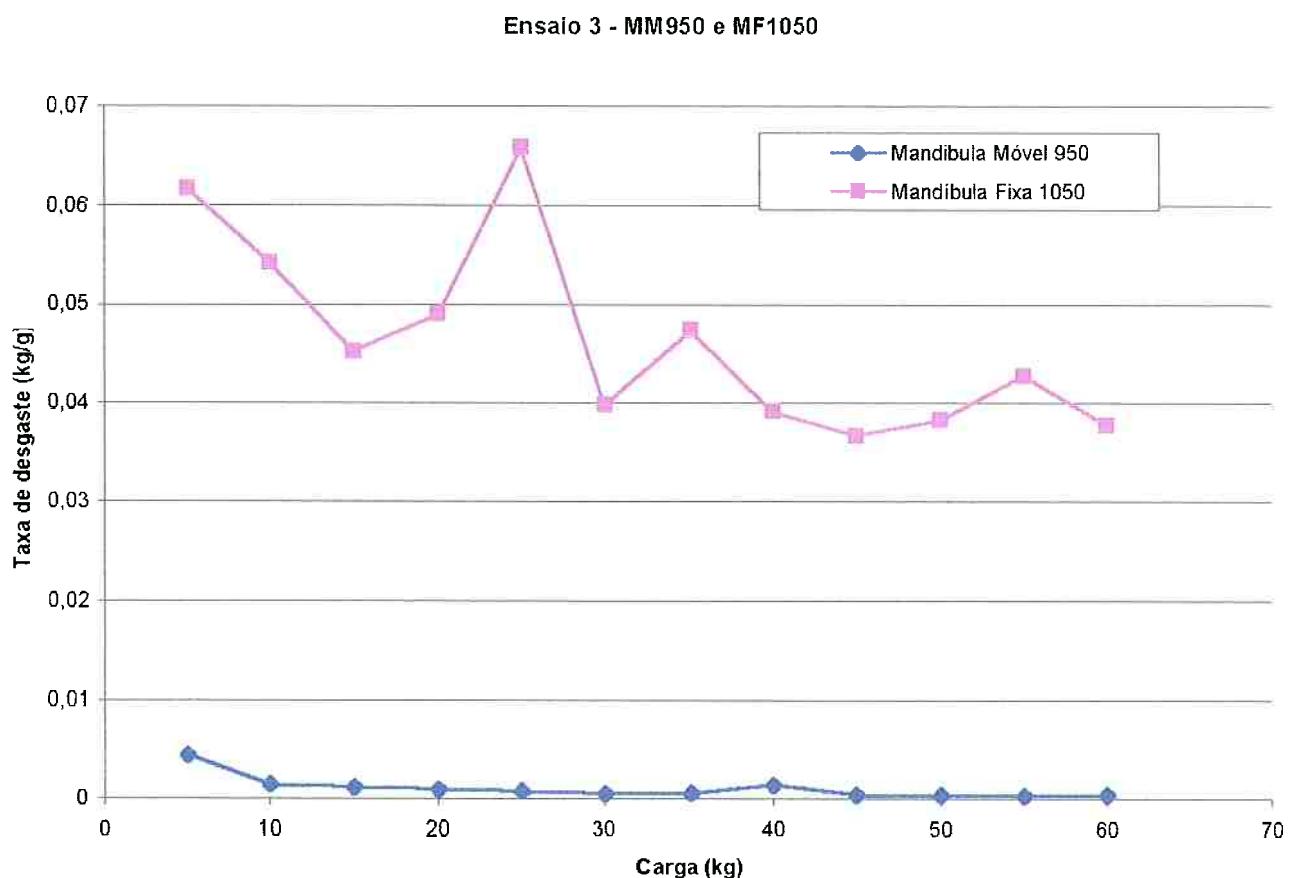


Figura 34 - Gráfico da taxa de desgaste do Ensaio 3

## Ensaio 4 – MM1050 e MF950

## Mandíbula Móvel

Batelada (kg)	Perda de massa (g)	Taxa de desgaste (g/kg)
5	0,2342	0,04684
10	0,0939	0,01878
15	0,0875	0,01750
20	0,0696	0,01392
25	0,0727	0,01454
30	0,1141	0,02282
35	0,0484	0,00968
40	0,0631	0,01262
45	0,0696	0,01392
50	0,0597	0,01194
55	0,0000	0,0000
60	0,0543	0,01086

## Mandíbula Fixa

Batelada (kg)	Perda de massa (g)	Taxa de desgaste (g/kg)
5	0,3027	0,06054
10	0,2066	0,04132
15	0,1930	0,03860
20	0,1597	0,03194
25	0,1797	0,03514
30	0,1297	0,02594
35	0,1300	0,02600
40	0,1287	0,02574

45	0,2071	0,04142
50	0,0961	0,01922
55	0,1443	0,02886
60	0,1367	0,02734

Ensaio 4 - MM1050 e MF 950

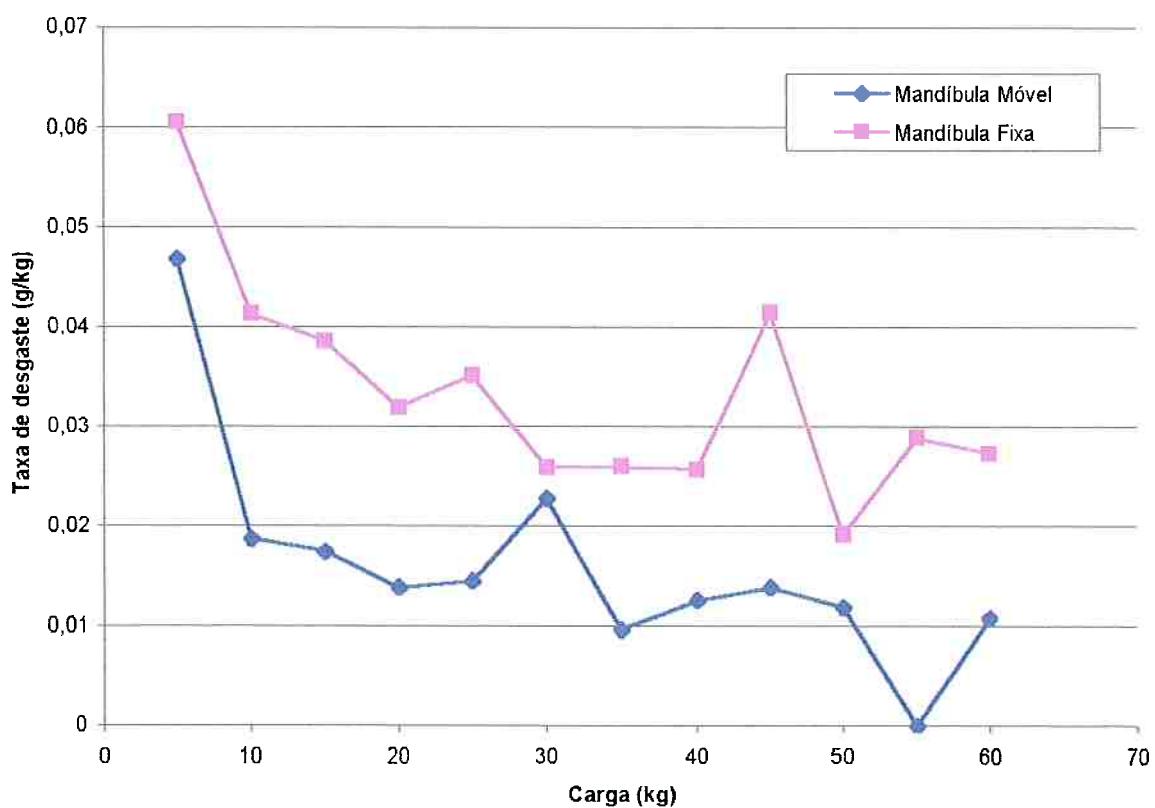


Figura 35 - Gráfico de taxa de desgaste do Ensaio 4

É possível observar que os ensaios acima montam cenários diferentes de desgaste abrasivo.

É interessante notar que a relação de desgaste entre mandíbulas fixa e móvel é diretamente afetada pela combinação de mandíbulas utilizada.

Segundo Chaves<sup>[1,2]</sup>, a relação média de taxa de desgaste entre mandíbula fixa e móvel é 1,72. Este parâmetro é adotado no cálculo de desgaste de mandíbulas e este número é parte integrante importante do custo operacional da britagem.

Os ensaios desenvolvidos em ambiente de teste e real mostram que o emprego de materiais de referência nem sempre ocasiona a relação fixa de desgaste fixa / móvel de 1,72 .

A tabela abaixo mostra dados comparativos entre os ensaios realizados:

Ensaios	Taxa média de desgaste da MM	Taxa média de desgaste da MF	Relação de desgaste MF/MM
Ensaio Teste 1	0,0381	0,1552	4,08
Ensaio Teste 2	0,0342	0,1153	3,40
Ensaio 1	0,00552	0,00918	1,65
Ensaio 2	0,0113	0,0387	3,52
Ensaio 3	0,00542	0,0465	8,58
Ensaio 4	0,0161	0,033	2,07

Nesta tabela consta a média total de perda de massa de todos os ensaios.

Mesmo quando o material de referência tem igual microestrutura e propriedades mecânicas, esta relação varia diretamente com as propriedades mecânicas do produto (dureza, dutilidade...)

Um dado interessante foi do ensaio 3 em que a relação MF/MM foi 8,58. A mandíbula fixa absorveu praticamente toda a perda de material neste experimento, enquanto que a mandíbula móvel ficou com uma

taxa de desgaste baixo (valor semelhante ao Ensaio 1 que apresentou menor taxa de desgaste). Através deste ensaio, pode-se concluir que o desgaste da mandíbula móvel é condicionado pelo desgaste da mandíbula fixa. Como neste caso, o material da mandíbula móvel era muito mole, ele praticamente absorveu todo o desgaste.

O ensaio com melhor desempenho de desgaste foi o ensaio 1, onde foi empregado nas duas mandíbulas de materiais mais duros.

Os demais ensaios apresentam taxa de desgaste acima de uma ordem de grandeza do ensaio 1 e também apresentam relação MF/MM maiores.

A relação MF/MM é extremamente importante para condicionar a troca das mandíbulas. É desejável que este valor seja o menor possível, pois as trocas de mandíbulas levam a parada total do britagem. Esta parada para troca é muitas vezes planejada com muita antecedência, pois incorre em custos indiretos de não-produção numa mineração.

## Conclusões

1 – As taxas de desgaste das mandíbulas fixas são maiores que as taxas de desgaste das mandíbulas móveis

2 – O mecanismo de desgaste nas mandíbulas fixas é microcorte enquanto nas mandíbulas móveis o mecanismo não está claro

3 – As relações das taxas de desgaste da mandíbula fixa e mandíbula móvel varia de acordo com a combinação empregada. Parece que a mandíbula fixa domina esta relação

4 – A carga sugerida pelas diversas literaturas confirmou a carga onde existe estabilidade das taxas de desgaste.

## Referências Bibliográficas

- [1] Albertin, E, Efeito da porcentagem de carbonetos e da microestrutura da matriz metálica sobre a resistência ao desgaste de ferros fundidos branco de alto cromo - ensaios em moinhos de bolas, Tese de doutorado, São Paulo, 1993.
- [2] DIN 50320 Verschleiss - Begriffe, Analyse von Vercheiss Vorgegen Gliederung des Verschleissgebietes, Beuth Verlag, Berlin, 1979
- [3] Zum Gahr, K.H., Microstructure and wear of materials, Elsevier, chapters 4, 5, 1987
- [4] Hutchings, I.M., Tribology - Friction and Wear of Engineering Materials, chapter 6, London, 1992.
- [5] Ludema, K.C., Introduction to Wear, Metals Handbook, vol. 18
- [6] Pintaúde, G., Estudo do regime transiente em britadores de mandíbulas
- [7] Pintaúde, G; Tanaka, D.K.; Sinátora, A., Surface Work Hardening of 2Cr-1,5Si-0,5Mo Cast Steel in Jaw Crusher Abrasion Test- Curitiba, 1998, CBCIMAT
- [8] ASTM G81-83 (89) Standard, Practice for Jaw Crusher Gouging Abrasion Test, IN: Annual Book of Standards, v.03.02, ASTM 1992, pp.332-337.
- [9] Blickensderfer, R. Design criteria and correlations factors for field wear testing, Wear, 122, 1988
- [10] Sare, I.R., Hall, W.B. , The determination of gouging abrasion resistance by jaw crusher tests, In: Conf. On Lubrification and Wear in Engineering 1980, Canberra, 1988. National Conf. Publication 80/12
- [11] Borik, F. Using test to define the influence of metallurgical variables on abrasion, Metals Engineering Quarterly, 12, 1972
- [12] Chaves, A.P., Peres, A.E.C., Teoria e Prática de tratamento de minérios , Signus, 1999.
- [13] Manual de Britagem Faço