

DESGASTE DE MANDÍBULAS DE
AÇO MANGANÊS EM BRITADORES

FERNANDO AMOS SIRIANI

I - FINALIDADE DO TRABALHO

Este trabalho teve como finalidade analisar o desgaste das mandíbulas de aço manganês, em britadores.

Foram realizados ensaios em laboratório e em 83 pedreiras, em operação na ocasião da pesquisa, cobrindo os seguintes tipos de rochas: granitos, gnaisses, granodioritos, basaltos, diabásios, quartzitos e calcários.

II - CARACTERÍSTICAS DAS MANDÍBULAS

As mandíbulas dos britadores são, geralmente, fabricadas em aço manganês Hadfield, especificação A-128 da ASTM, com a seguinte composição:

C = 1,05 a 1,35

Mn = 11,5 a 14,0

Cr = 1,5 a 2,5

Estes aços apresentam alta resistência mecânica, alta ductilidade, além da excelente resistência ao desgaste (1) (2), sendo extensivamente usados nos serviços em que haja combinação de resistência à abrasão e elevados impactos.

Uma mandíbula destes aços, resfriada lentamente em um molde, terá uma estrutura frágil, devido às altas concentrações de carbonetos.

Isto é corrigido através de um tratamento térmico de solubilização (3), que consiste em aquecer a mandíbula em altas temperaturas suficientes para assegurar total dissolução dos carbonetos, deixá-la nesta temperatura algum tempo para solubilizar os carbonetos e depois resfriá-la bruscamente em água.

O processo de resfriamento deve ser drástico (4) e isto torna-se necessário, dado que os carbonetos se precipitam muito rapidamente e qualquer atraso na queda de temperatura não fornece mais a estrutura desejada. Após este tratamento, a estrutura é austenítica, com du-
./...

reza 18 a 20 RC, bastante dúctil.

É neste estado que as mandíbulas são utilizadas. Quando entram no britador, estão com a sua superfície relativamente mole. É o próprio trabalho de britagem que melhorará a sua resistência ao desgaste, pois a propriedade mais significativa do aço manganês austenítico é o seu aumento de dureza por deformação a frio.

A dureza inicial de 18 a 20 RC alcança, depois do encruamento, valores de 50 a 55 RC.

O endurecimento resultante é admitido como sendo causado pela formação de martensita (5).

Outros autores (4) acreditam num mecanismo mais complexo e que não seria devido a um simples encruamento da austenita. Estes admitem que os carbonetos, finamente dispersos nos grãos de austenita, precipitam-se nos planos de escorregamento dos cristais, sob a ação das forças de impacto, criando uma camada de alta dureza na superfície, aliada à uma alta ductilidade e tenacidade no interior da peça.

À medida que esta camada superficial é gasta por abrasão, nova camada se oferece aos impactos e endurece de maneira a sempre renovar a capacidade de resistência ao desgaste.

III - GENERALIDADES SOBRE OS BRITADORES DE MANDÍBULAS

A britagem é, normalmente, o primeiro passo no beneficiamento de minérios ou na produção de agregados.

Geralmente é constituída de mais de um estágio, visando a obtenção de determinadas granulometrias. Trata-se de uma operação mecânica, na qual uma força suficiente é aplicada sobre partículas sólidas de maneira a produzir a sua fragmentação.

Os britadores de mandíbulas são máquinas de ação periódica (6), cuja invenção se deve ao americano Ely Whitney Blake, em 1858.

Atualmente, estão amplamente difundidos através de algumas variações estruturais de projeto e, principalmente, representados por:

- Britador de 2 eixos - também chamado "de duplo efeito" ou tipo Blake.

- Britador de 1 eixo - também chamado "de simples efeitto".

Os cortes das figuras 1 e 2 mostram os dois tipos, com as respectivas indicações das suas partes principais.

No britador tipo Blake, o queixo é suspenso num eixo concêntrico, apoiado sobre buchas de bronze, tendo um movimento oscilante para a frente e para trás (7). O esforço de britagem é promovido pela movimentação de um dos volantes do eixo excêntrico do pêndulo apoiado sobre rolamentos e transmitido através das duas abanadeiras.

O britador de 1 eixo tem o seu queixo montado diretamente num eixo excêntrico, apoiado sobre rolamentos, e em cujas extremidades se encaixam os volantes, a um dos quais se imprime a movimentação. O movimento gerado compõe-se de dois outros:

- a-) um oscilante para frente e para trás.
- b-) um movimento simultâneo longitudinal, paralelo à superfície das mandíbulas, devido à excentricidade do eixo (6) (8).

Tem uma única abanadeira.

A figura 3 mostra a cinemática desses britadores (9) (6).

Nos britadores tipo Blake, a descarga do material britado é feita somente por gravidade, enquanto que nos de 1 eixo essa descarga é proporcionada pela ação da gravidade somada ao impulso mecânico promovido pelo movimento longitudinal do queixo. O deslizamento do material britado sobre as mandíbulas é responsável pela maior parcela do desgaste abrasivo. Como decorrência do movimento longitudinal de descarga, o desgaste das mandíbulas dos britadores de 1 eixo é sempre maior que nos britadores tipo Blake.

Quanto ao porte, pode-se classificar os britadores de acordo com a sua produção:

- . PEQUENOS - Produção até 40 m³/h
- . MÉDIOS - Produção entre 40 e 100 m³/h
- . GRANDES - Produção maior que 100 m³/h

Salientamos ainda que os britadores tipo Blake, devido às suas características estruturais de projeto, somente são fabricados em tamanhos médios e grandes.

IV - MECANISMO DE DESGASTE NAS MANDÍBULAS

Observando-se o trabalho de britagem de uma mandíbula, vemos que ocorre todo tipo de desgaste sobre ela, mas que há predominância de alguns, os quais são responsáveis pela remoção do material.

A ação de ranhura sob altas pressões é nítida. O material grosso tem oportunidade de rolar e arranhar, antes de ser quebrado.

As pressões envolvidas são sempre altas.

Este caso, nos britadores de 1 eixo, é bastante nítido, pois o movimento elíptico do queixo força num movimento descendente do material através da zona de britagem.

Já nos britadores tipo Blake, o queixo trabalha num movimento pendular e há, principalmente, a ação de compressão. Neste caso, as pressões de quebra agem predominantemente no desgaste.

Como exposto, as pressões altas predominam em todo trabalho do britador e de forma máicroscópica.

As mandíbulas, quando em operação, endurecem somente na face de trabalho, enquanto o restante da peça permanece dúctil e resistente à ruptura. Neste caso, a mandíbula consegue, pelo seu próprio trabalho de britagem, a resistência ao desgaste, exatamente na zona mais necessária.

O desgaste é desigual ao longo da superfície, sendo que a parte inferior sempre se desgasta mais rapidamente que a parte superior, qualquer que seja o tipo do britador. Naturalmente, ocorrerá desgaste também na face encruada, porém este é bastante lento. À medida que a mandíbula se desgasta, processa-se, concomitantemente, novo endurecimento superficial.

O desgaste abrasivo das mandíbulas pode ser atribuído a:

1.) Tipo de Máquina

O desgaste é função das características estruturais da máquina. Como já exposto, torna-se fácil entender que um britador de 1 eixo apresenta maior desgaste que o tipo Blake.

Outros fatores que podem influir no desgaste são a velocidade de rotação, excentricidade e forma do queixo.

2.) Características de Material, Forma e Curvatura das Mandíbulas

A composição química e o tratamento térmico do aço manganês constituem os principais fatores de durabilidade das mandíbulas, seguidos da forma dos dentes e da curvatura das mesmas.

3.) Características da Operação

a) Tamanho alimentado - Tem influência, principalmente nos britadores primários, que recebem o "run-of-mine" com tamanhos que não são regulares e, geralmente, dotados de arestas vivas de grandes dimensões.

b) Tamanho do produto - Sua influência no desgaste é decorrente da maior ou menor abertura da máquina. Menor abertura corresponde a maior desgaste.

c) Grau de redução - Este é definido pela relação: $R_r = \frac{A}{P}$

onde - A = granulometria da alimentação, definida pela malha quadrada de peneira, na qual passa 80% da alimentação.

P = granulometria do produto, definida pela malha quadrada de peneira, na qual passa 80% do produto.

Quanto maior o grau de redução, maior quantidade de energia será envolvida na operação e um maior desgaste será ocorrente.

A energia consumida deve ser calculada pela Lei de BOND (10)

(11) (12) (13) (14):

$$W = \frac{10 W.I.}{\sqrt{P}} - \frac{10 W.I.}{\sqrt{A}} \quad (\text{energia consumida em kWh/t})$$

O índice energético específico é o W.I. (work index), característica da tenacidade da rocha ou minério, que pode ser definido em laboratório.

d) Quantidade de finos alimentada - este é um fator duvidoso quanto à sua influência porque, embora essas partículas não sofram ação de britagem direta das mandíbulas, existindo apenas interfragmentação com outros blocos, entretanto o esmerilhamento provocado na sua passagem pela câmara de britagem pode ser bastante elevado, principalmente quando se trata de partículas de minerais com dureza maior que 6 na escala Mohs.

- e) Grau de enchimento da máquina - O grau de enchimento de um britador é definido pela relação existente entre a quantidade de material existente na câmara de britagem e a sua capacidade volumétrica.

Um grau de enchimento baixo é característico de um mau aproveitamento da máquina, com perda da capacidade de produção.

Os desgastes abrasivos variam com o grau de enchimento.

4.) Características das Rochas

São seguintes os fatores de natureza mineralógica que podem influenciar o desgaste das mandíbulas:

- a) Presença de minerais duros - Entre os minerais duros encontrados nas rochas estudadas, podemos citar:
- Feldspatos - dureza 6,0 a 6,5 Mohs
 - Hematita - dureza 6,5 Mohs
 - Granada - dureza 6,5 a 7,5 Mohs
 - Quartzo - dureza 7,0 Mohs
 - Turmalina - dureza 7,0 Mohs
 - Zircão - dureza 7,5 Mohs
- b) Textura - Pode-se atribuir a algumas texturas não muito frequentes uma relativa importância no desgaste.

Como exemplo, podemos citar a mirmequita, que é uma textura de reação representada por quartzo intercrescido em plagioclásio.

- c) Alteração por intemperismo - A alteração por intemperismo das rochas leva ao enfraquecimento da estrutura, possibilitando um enfraquecimento mais fácil, com menor emprego de energia e, por conseguinte, acarretando menor desgaste.

5.) Defeitos das Mandíbulas

Uma mandíbula, embora corretamente projetada quanto à sua forma, curvatura e dimensões, está sujeita a apresentar alguns defeitos, quando em operação. Daí a importância muito grande nos cuidados de sua confecção.

Um rígido controle de qualidade propor-se-á às seguintes tarefas:

- a) Enquadramento nas especificações químicas.

- b) Verificação da existência de porosidades.
- c) Verificação de defeitos de fundição, tais como: chupagem, trincas, emendas, desencontro, rebarbas, etc.
- d) Verificação da qualidade do tratamento térmico: metalografias devem ser executadas em amostras fundidas e tratadas térmicamente com as mandíbulas.
- e) Controle de planicidade: o encosto da mandíbula deve ser perfeitamente plano.
- f) Controle dimensional; largura, comprimento, espessura e posicionamento correto dos dentes devem estar de acordo com o projeto, a fim de tornarem as peças intercambiáveis nas máquinas.

V - DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

O trabalho foi desenvolvido com os dados de operação e de consumo de mandíbulas das pedreiras, cuidadosamente levantados e registrados, com a cautela exigida para que tivéssemos a segurança de que correspondiam a valores médios e significativos.

Foram escolhidas, ocasionalmente, pedreiras que utilizavam, na ocasião, mandíbulas de um mesmo fabricante e que se encaixavam dentro de uma faixa de composição química bastante estreita e assim definida:

C	=	1,20	a	1,30%
Mn	=	12,0	a	14,0 %
Si	=	0,40	a	1,0 %
Cr	=	1,30	a	2,0 %
S	=	menor que 0,05%		
P	=	menor que 0,05%		

Com vistas a um aprofundamento do estudo do problema, foram realizados mais de uma centena de testes de desgaste de mandíbulas, em laboratório especialmente montado para este trabalho.

Este laboratório foi constituído do seguinte equipamento:

- . 01 britador de mandíbulas FAÇO 2015 motor de 7,5 HP
- . 01 transportador de correia para alimentação do britador - 24"x 12m motor de 6,0 HP
- . 01 transportador de correia para evacuação da brita - 16"x 7m - motor de 2,0 HP
- . 01 silo metálico de alimentação - 0,75 m³
- . 01 quadro elétrico para comando da instalação, dotado de chaves de

partida e registrador de consumo de energia.

. Equipamentos auxiliares - cronômetro; balança com precisão de 3 g; caixa de carga e recolhimento da brita; voltímetro e amperímetro.

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

Os materiais utilizados para os testes consistiram de pedra nº 4, britada em 4 aberturas diferentes: 1/4" - 3/8" - 1/2" e 1".

Em cada abertura, mediu-se: tempo de britagem, quantidade britada, consumo de energia, desgaste das mandíbulas e curvas granulométricas da alimentação e do produto.

Quanto às pedreiras levantadas, foram recolhidos fragmentos de pedra amarroada, representativos da massa rochosa, servindo para a confecção de lâminas delgadas e exames microscópicos.

Nas lâminas delgadas foram feitos exames microscópicos, onde se analisou: composição mineralógica, granulação, textura, eventuais estruturas e estado de alteração.

Os exames microscópicos permitiram descrever estruturas (orientação de minerais, fraturamento, estratificação, deformações); texturas (granular, porfirítica, afanítica, xistosa, gnáissica) e cores (que eventualmente podem indicar o estado de alteração da rocha).

Os tipos de rochas pesquisadas foram as seguintes:

Granito	- 18 pedreiras
Gnaisse	- 17 pedreiras
Basalto	- 18 pedreiras
Diabásio	- 8 pedreiras
Granodiorito	- 6 pedreiras
Quartzito	- 3 pedreiras
Anfibólito	- 1 pedreira
Xisto	- 1 pedreira
Pegmatito	- 1 pedreira
Sienito	- 1 pedreira
Calcáreo	- 9 pedreiras

No laboratório, num mesmo nível de energia, os desgastes crescem na

seguinte ordem: diabásio, gnaisse, granito.

Para um mesmo nível de desgaste, a energia consumida na britagem cresce na seguinte ordem: granito, gnaisse, diabásio.

Estas observações de laboratório sugeriram o encaminhamento da análise a ser feita com os dados obtidos no campo, nos quais procuramos enfocar a correlação desgaste versus energia consumida.

1.) Rendimento Útil das Mandíbulas

O rendimento útil das mandíbulas foi pesquisado em várias pedreiras (anexo 4). O rendimento médio foi de 37,1% e o desvio padrão é 5,3 % que garante uma probabilidade de, em 95,5% dos casos, esse rendimento se situar entre 26,5% e 47,7%, correspondendo à uma perda por sucata entre 52,3% e 73,5%.

A prática de duas inversões nas mandíbulas melhora o seu aproveitamento, principalmente pelo fato de que, nas primeiras horas de uso, o desgaste é muito acentuado devido ao encruamento incipiente, sendo mais acentuado na parte inferior.

Assim, ao se fazer a primeira inversão, a parte encruada vai se situando na parte superior de recepção dos blocos, encruando mais rapidamente, outra vez, a parte inferior. Aumenta-se o rendimento útil de 2 a 5%.

2.) Valores de W.I. ("work index") Médios

Os valores de W.I. médios, corrigidos para fornecer a energia de britagem em kWh/t são:

Basalto	= 22,5
Diabásio	= 22,5
Gnaisse	= 22,2
Granodiorito	= 23,0
Granito	= 16,7
Quartzito	= 13,4

Os dados que serviram aos cálculos para estabelecimento de um padrão de controle do desgaste foram:

- Tipo do britador
- Abertura (posição fechada) (mm)
- Tamanho alimentado (mm)
- Desgaste da mandíbula fixa (g/t)

- Relação de consumo de mandíbula fixa sobre mandíbula móvel.
- Energia consumida calculada (kwh/t)

VI - ANÁLISE DOS DADOS OBTIDOS

A abrasividade crescente ocorre na seguinte ordem: calcáreo, basalto, diabásio, gnaiss, granodiorito, granito, quartzito.

Os calcáreos demonstraram desgaste insignificante, o que nos levou a deixá-los fora dos cálculos.

A relação de energia consumida versus desgaste é mostrada, no anexo 5.

A relação de desgaste entre as mandíbulas fixas e móveis ficou assim definida:

a-) Britadores primários de 1 eixo e rebitadores de mandíbulas -

$$\frac{\text{Consumo de mandíbulas fixas}}{\text{Consumo de mandíbulas móveis}} = 1,72$$

b-) Britadores Blake

$$\frac{\text{Consumo de mandíbulas fixas}}{\text{Consumo de mandíbulas móveis}} = 1,45$$

Devido à impraticabilidade da medição do consumo de energia no campo, deve-se usar a energia consumida calculada segundo BOND e, em seguida, calcular o desgaste na tabela - anexo 5 (para britadores e rebitadores de 1 eixo).

Os dados levantados mostraram que o desgaste das mandíbulas do britador tipo Blake é cerca de 30% do ocorrente nos de 1 eixo, quando consumindo a mesma energia, o que permite o uso da mesma tabela, multiplicando-se o desgaste por 0,3.

VII - CONCLUSÕES

O trabalho desenvolvido caracterizou, de forma operacional e bastante técnica, a possibilidade de ser previsto o desgaste das mandíbulas de aço manganês dos britadores primários de 1 eixo, rebitadores de mandíbulas e britadores tipo Blake, permitindo, a priori,

levantar-se a quantidade de peças a serem mantidas no estoque, a sua participação no custo do produto britado e um cronograma de manutenção das máquinas.

Os dados levantados em laboratório e nas pedreiras está à disposição dos interessados.

* FERNANDO AMOS SIRIANI -

Engenheiro de Minas e Metalurgista; Doutor em Engenharia na Escola Politécnica da USP; Secretário Geral da ABIFA - Associação Brasileira de Fundição e SIFESP - Sindicato das Industrias de Fundição do Estado de São Paulo; Professor de "Tratamento de Minérios" da Escola de Engenharia Mauá; Professor de "Beneficiamento de Minérios" da Faculdade de Engenharia da F.A.A.P.; Professor Assistente Doutor da disciplina "Britagem e Classificação" da Escola Politécnica da USP.

B I B L I O G R A F I A

1. Norman, Doane e Solomon - "Austenitic Manganese Steels" - American Foundrymen's Society Transactions - vol. 68, 1960.
2. Maratray, Norman - "Contribution to the study of the abrasion resistance of manganese austenitic steels" - Separata da Révue de Metallurgie, vol. 58, junho 1961.
- 3. American Society for Metals - "Metals Handbook" - 8ª edição - vol. 1.
4. Renato Carneiro - "Alguns aspectos sobre os aços Hadfield" - Trabalho apresentado no curso de pós-graduação "Interdependência entre propriedades e Constituição dos metais" - EPUSP-abril 1966.
5. Vicente Chiaverini - "Aços Carbonos e Aços Ligas" - Associação Brasileira de Metais, 1965.
6. Nicolas P. Waganoff - "Trituración, molienda y separación de minerales" - Libreria y Editorial Alsina, Buenos Ayres, 1956.
7. N. Junkovsky - "Conveying, Crushing, Washing and Screening Machinery" - MIR Publishers, Moscou, 1966.
8. Allis Chalmers - "Crushing practice and theory" - boletim nº 07R3073.
9. H. Motek - "Praxis der Hartzerkleinerung" - Teil 3-Aufbereitungs Technik - nº 5 - maio 1972.
10. Fred C. Bond - "Laboratory equipment and tests help predict metal consumption in crushing and grinding units" - Engineering and Mining Journal - junho 1964.
11. Fred C. Bond - "Mathematics of crushing and grinding" - artigo incluso na publicação "Recent Developments in Mineral Dressing" - The Institution of Mining and Metallurgy - Londres 1953.

12. Fred C. Bond - "Confirmation of the Third Theory" - AIME transactions - vol. 217, 1960.
13. Fred C. Bond - "Crushing and Grinding Calculations" - Separata publicada pela Allis Chalmers Manufacturing Company de artigo publicado na British Chemical Engineering - janeiro 1961.
14. Fred C. Bond - "The laws of Rock Breakage" - Symposium on Size Reduction - Verlag Chemie GMBH - Düsseldorf, 1962.
15. Siriani, Fernando Amos - "Características Gerais de Desgaste de Mandíbulas em Britadores" - Tese de doutoramento - Escola Politécnica da USP - 1972.

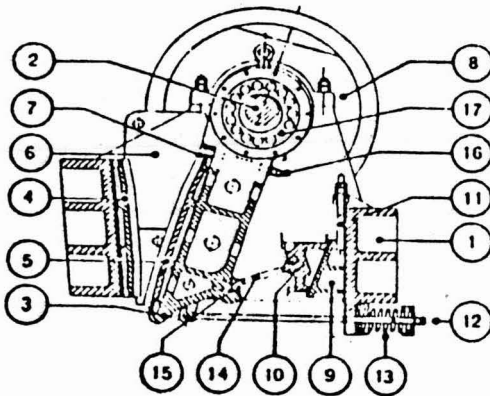


FIG. 1 - CORTE DO ERITADOR DE MANDIBULAS DE 1 EIXO

- | | |
|-------------------------------------|-------------------------|
| 1 - Carcaça | 10- Contra-cunha |
| 2 - Eixo | 11- Parafuso regulador |
| 3 - Queixo | 12- Tirante |
| 4 - Mandíbula fixa | 13- Mola |
| 5 - Mandíbula móvel | 14- Abanadeira |
| 6 - Cunha lateral | 15- Calha |
| 7 - Cunha para fixação da mandíbula | 16- Parafuso de fixação |
| 8 - Volante | 17- Rolamento |
| 9 - Cunha reguladora | |

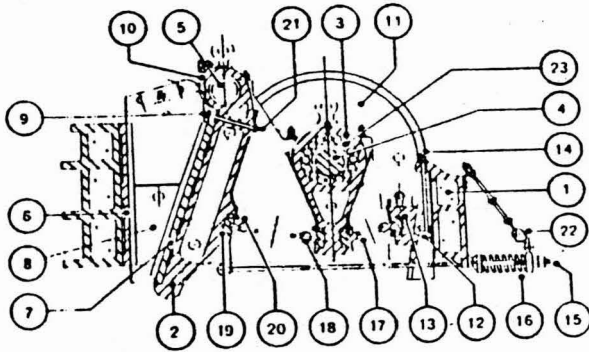


FIG. 2 - CORTE NO BRITADOR DE MANDIBULAS DE 2 EIXOS (BLAKE)

- | | |
|-------------------------------------|-------------------------------|
| 1 - Carcaça | 13- Contra-cunha |
| 2 - Queixo | 14- Parafuso regulador |
| 3 - Pêndulo | 15- Tirante |
| 4 - Eixo do pêndulo | 16- Mola |
| 5 - Eixo do queixo | 17- Abanadeira menor |
| 6 - Mandíbula fixa | 18- Abanadeira maior |
| 7 - Mandíbula móvel | 19- Calha |
| 8 - Cunha lateral | 20- Cunha de fixação da calha |
| 9 - Cunha para fixação da mandíbula | 21- Parafuso de fixação |
| 10- Chapa de proteção | 22- Mola do suporte |
| 11- Volante | 23- Rolamento |
| 12- Cunha reguladora | |

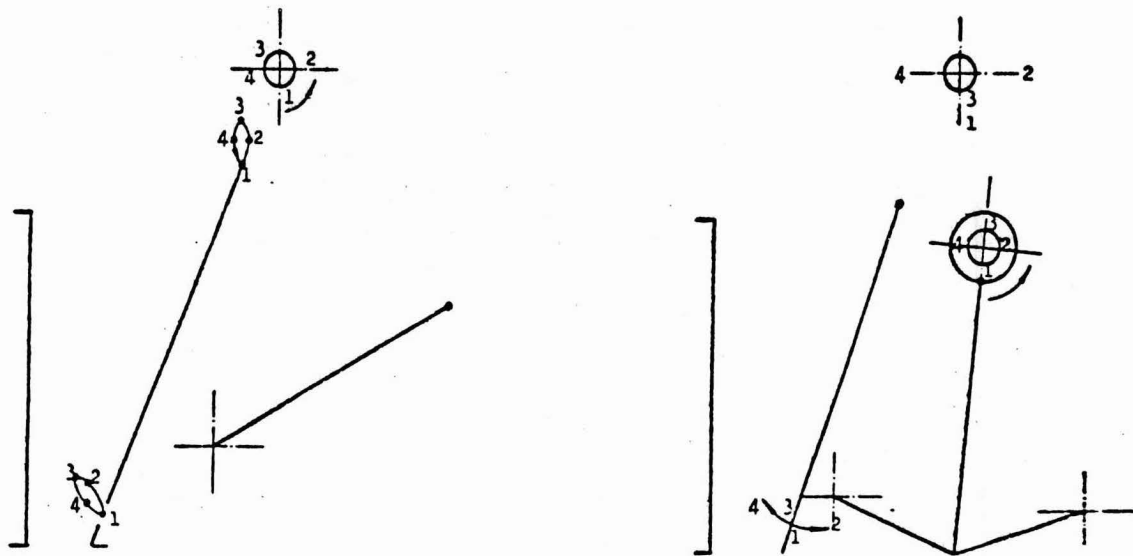
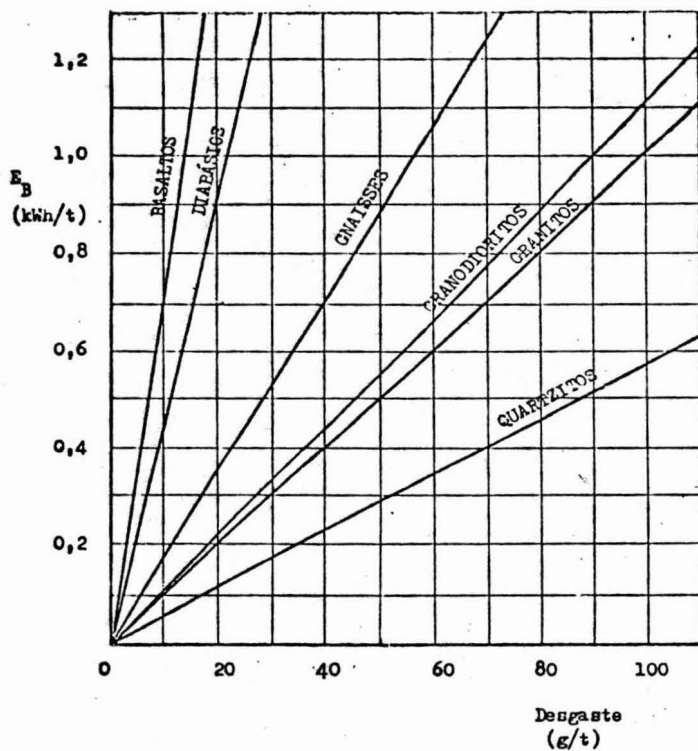


FIG. 3 - CINEMATICA DOS ERITADORES DE 1 EIXO E TIPO BLAKE

As posições 1 a 4 representam uma rotação completa do volante.

PEDREIRA	MÁQUINA	MANDÍBULA	PÊSO INICIAL (kg)	PÊSO FINAL (kg)	RENDIMENTO ÚTIL (%)
27	FAÇO 9060	MÓVEL	955	595	37,7
29	FAÇO 10060	MÓVEL	1035	605	41,6
41	FAÇO 12090A	MÓVEL (bi- partida)	800	472	41,0
69	FAÇO 10060	FIXA	1115	709	36,5
69	FAÇO 10060	FIXA	1145	703	38,7
69	FAÇO 12040	FIXA	534	417	22,0
69	FAÇO 8013	FIXA	104	71	31,8
69	FAÇO 8013	MÓVEL	138	82	40,6
70	FAÇO 8013	FIXA	108	65	37,1
70	FAÇO 8013	FIXA	105	61	42,0
70	FAÇO 8013	MÓVEL	118	75	36,5
79	FAÇO 9060	MÓVEL	955	575	39,8

Anexo 4 - RENDIMENTO ÚTIL DAS MANDÍBULAS.



Anexo 5 - DESGASTE DE MANDÍBULAS FIXAS EM FUNÇÃO DA ENERGIA CONSUMIDA CALCULADA, EM BRITADORES E REBRITADORES DE 1 EIXO, PARA VÁRIOS TIPOS DE ROCHAS.