

DESENVOLVIMENTO, CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO DE ESCLERÔMETRO  
PENDULAR (1).

Sinésio Domingues Franco (2)

José Daniel Biasoli de Mello (3).

RESUMO

Apresenta-se o desenvolvimento, projeto e avaliação de um esclerômetro pendular. Este dispositivo é utilizado para simular o processo abrasivo, através da técnica de riscamento simples. Um penetrador duro, fixado na extremidade do pêndulo, é utilizado para produzir riscos na amostra. Esta técnica mede a resistência à abrasão pela energia dissipada na formação do risco. Alguns resultados preliminares evidenciam a funcionalidade e potencialidade do equipamento.

- 
- (1) Contribuição técnica a ser apresentada no 1º Seminário Sobre Materiais Resistentes ao Desgaste. São Paulo, Setembro 1989.
  - (2) Membro da ABM, Engº Mecânico, Laboratório de Engenharia de Materiais (LEM), Departamento de Ciências Físicas (DECIF), Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Uberlândia, MG.
  - (3) Membro da ABM, Eng. Mecânico, M. Sc., Dr. Metalurgia, LEM - DECIF, UFU. Uberlândia, MG.

## 1 - INTRODUÇÃO.

No processo de desgaste abrasivo, o material solicitado interage diretamente com o complexo abrasivo. O complexo abrasivo pode ser constituído tanto de asperidades duras, como de partículas abrasivas associadas ao produto interfacial. O contato entre o agente abrasivo e a superfície antagonista é determinado pelo conjunto de parâmetros físico-químicos e mecânicos atuantes no tribosistema. A análise deste fenômeno complexo, em particular os efeitos destes parâmetros sobre uma partícula/asperidade isolada, pode ser feita através da técnica esclerométrica.

Na técnica esclerométrica, o agente abrasivo é simulado por penetradores duros, de geometria simples e, apesar das idealizações associadas, permite uma melhor compreensão do fenômeno abrasivo em seus aspectos mais fundamentais<sup>(1)</sup>. Estes aspectos são: efeito da geometria do contato<sup>(2,3)</sup>, morfologia da deformação plástica<sup>(4)</sup>, estabelecimento de critérios da transição dútil-frágil<sup>(5)</sup>, interação lubrificante/partícula abrasiva<sup>(6)</sup>, etc..

Dentre os diversos métodos esclerométricos existentes, destacam-se os seguintes tipos: retilíneo, rotativo e pendular.

O primeiro tipo caracteriza-se, fundamentalmente, pelo movimento retilíneo da amostra. Em geral, este movimento se dá a baixas velocidades e permite, através do dispositivo porta-penetrador, a variação dos ângulos laterais e de ataque da partícula. Esta metodologia, devido às suas características descritas em artigo recente<sup>(7)</sup>, é particularmente adaptada à determinação e monitoração dos esforços atuantes nas partículas abrasivas.

O segundo tipo consiste na fixação do penetrador em um disco. O disco, sob rotação, produzirá sucessivos riscos na superfície da amostra. Este tipo de esclerômetro é, normalmente, utilizado em estudos de usinagem por abrasão<sup>(8)</sup>.

Finalmente, o terceiro tipo, objeto de análise no presente artigo, utiliza-se de um penetrador fixado à extremidade de um pêndulo, que percute sobre o material em estudo. Esta técnica é particularmente adaptada às situações dinâmicas, onde a remoção de matéria se dá com elevadas deformações sob altas taxas de deformação<sup>(9)</sup>.

A figura 1 esquematiza o princípio de funcionamento de um esclerômetro pendular. Nesta técnica, um penetrador duro é fixado na

extremidade de um pêndulo rígido. Com a liberação do pêndulo, o penetrador irá gerar na amostra, fixa na parte inferior da trajetória, um risco de comprimento  $2L$  e cuja geometria depende da geometria do penetrador utilizado. A energia dissipada para produzir o risco é determinada pela variação da energia potencial do pêndulo, de maneira análoga à utilizada nos ensaios clássicos de resistência ao impacto. Assim, na figura 1 tem-se:

$$E = M.g.H \quad (1)$$

Define-se a energia específica de riscamento como sendo a relação entre a energia de riscamento e a perda de massa produzida ( $m$ ):

$$e = \frac{E}{m} \quad (2)$$

A energia específica de riscamento ( $e$ ) é um parâmetro representativo da resistência à abrasão dos materiais<sup>(8,9)</sup>, apresentando uma boa correlação com ensaios globais<sup>(10)</sup>, inclusive no que concerne à estrutura da camada sub-superficial<sup>(10)</sup>.

## 2 - DESENVOLVIMENTO E CONSTRUÇÃO DO ESCLERÔMETRO.

Muito embora os pêndulos de impacto tenham sido utilizados, desde as primeiras décadas deste século, para se avaliar a usinabilidade de metais<sup>(11)</sup>, apenas a partir do princípio dos anos 80 aparecem referências de sua utilização no estudo do desgaste abrasivo<sup>(6,9 e 10)</sup>. Assim, alguns poucos instrumentos são relatados na literatura. Em sua maioria, os mesmos se constituem de modificações de instrumentos comerciais do tipo Charpy. Como consequência, estes dispositivos apresentam uma alta energia associada (300J), além de baixa funcionalidade e grandes dificuldades de operação.

Procurou-se então, desenvolver e construir um esclerômetro que, além de grande funcionalidade, apresentasse pequena energia de percussão, de forma a ser mais representativo das situações reais. Dentre as suas principais características destacam-se:

- . possibilidade de avaliar as energias específicas associadas à microriscos;
- . possibilidade de variar-se os ângulos de disparo e a massa do pêndulo, permitindo várias escalas de energia;
- . variação contínua, precisa e simples da profundidade do

risco;

- . possibilidade de mais de um ensaio por amostra através de deslocamento lateral da mesma;
- . variação do ângulo lateral;
- . possibilidade de execução de interrupções instantâneas do processo, com vistas ao estudo dos mecanismos da perda de matéria.

A figura 2 mostra uma vista geral do protótipo construído.

O mesmo constitui-se de uma base e uma coluna fabricadas em aço 1020, soldados com a utilização de solda por arco elétrico. Este conjunto reúne o pêndulo propriamente dito, através de mancais de rolamento, bem como as escalas e o sistema porta-amostra.

A figura 3 mostra um detalhe do conjunto porta-amostra. A espessura da amostra pode variar de 5 a 15 mm. Dois parafusos garantem a translação da amostra, assegurando a realização de vários ensaios por face do corpo de prova. Este conjunto acopla-se à base do esclerômetro através de guias prismáticas, que asseguram o posicionamento grosseiro da amostra em relação ao penetrador. Por outro lado, a cabeça recartilhada, também mostrada na figura 3, garante o posicionamento preciso da amostra ( $\pm 1$  micron). Uma rotação deste mecanismo provoca o deslocamento de 0,5mm em um elemento tipo cunha, de aproximadamente  $2^\circ$  de inclinação, garantindo assim um deslocamento na vertical de  $(23,85 \pm 0,89)$  micra (intervalo de confiança relativo 1,28%). Com base nestes dados, foi acoplado um anel divisor que permite variações de  $\pm 1$  micron de profundidade. Destaca-se ainda o dispositivo em forma de T que garante, em conjunto com o porta-penetrador, a interrupção instantânea do risco.

O pêndulo propriamente dito, consiste de um braço cilíndrico, do dispositivo porta-amostra em uma extremidade e do conjunto de mancais na outra extremidade. O braço foi construído de um tubo de aço, diâmetro externo 21,4 mm, diâmetro interno 16,5 mm e comprimento 400 mm. O dispositivo porta-penetrador, por sua vez, foi projetado de forma a levar o centro de percussão (do pêndulo), o mais próximo possível da ponta do elemento riscante<sup>(12)</sup>.

Visando uma maior versatilidade do equipamento, o mesmo foi construído em duas versões, uma versão simples, cuja massa é de 0,877 Kg e outra dispondo de uma massa adicional em forma de "U", figura 4, cuja massa é de 2,860 Kg. A figura 4 mostra além do anel de fixação da massa adicional, detalhes do anel de ajuste do ângu-

lo lateral e da fixação do penetrador.

A determinação da energia associada ao risco é feita através de um sistema simples, utilizando-se dois ponteiros, sendo um de arraste e outro de indicação, figura 5. As escalas mostradas correspondem às quatro faixas de utilização do pêndulo, cada uma delas associada a uma massa e um ângulo de disparo do pêndulo. Estas foram confeccionadas por procedimentos clássicos da dinâmica<sup>(12)</sup>. A tabela 1 mostra os valores de fundo de escala para a energia, bem como as velocidades de percussão para cada versão.

Tabela 1 - Energia e velocidades de percussão das diversas versões.

Versão	m = 2,860 Kg		m = 0,877 Kg	
	154°	90°	154°	90°
Energia (J)	19,0	10,0	4,24	2,23
Velocidade de Percussão (m/s)	4,1	3,0	4,9	3,5

Adicionalmente, o protótipo dispõe de um dispositivo para interrupção instantânea do risco, descrito em detalhe em outra publicação<sup>(13)</sup>.

### 3 - CALIBRAÇÃO DO PROTÓTIPO.

Visando calibrar-se o equipamento produzido, utilizando-se a norma ASTM E 23-66<sup>(14)</sup>, que estabelece os procedimentos de calibração para ensaios de impacto Charpy e Izod. Desta forma, foram calculadas as energias do pêndulo nas diversas configurações, bem como as respectivas perdas por atrito nos mancais, resistência do ar e mecanismo de indicação<sup>(13)</sup>.

A tabela 2 apresenta estes resultados, bem como os erros relativos produzidos. Observa-se que os erros de escala são inferiores a 0,45%. Estes valores, muito embora sejam superiores ao máximo estabelecido pela norma<sup>(14)</sup> (no máximo 0,2%), são considerados satisfatórios, tendo em vista as particularidades do esclerômetro em relação aos métodos clássicos de ensaio de resistência ao impacto.

No que diz respeito às perdas por atrito, a norma<sup>(14)</sup> estabelece que as mesmas não devem ser superiores a 1% da energia total do pêndulo. Desta forma, apenas as versões dispendo de massa adicional obedecem o estabelecido. Para as versões mais leves, os resultados apresentados são significativamente superiores. Contudo, estas perdas são lineares em função da altura de disparo, relativa ao centro de massa, como ilustra a figura 6. As perdas podem ser facilmente corrigidas pela adequação da altura de disparo ou pela subtração dos valores pré-estabelecidos para as perdas.

#### 4 - AVALIAÇÃO DO EQUIPAMENTO - RESULTADOS PRELIMINARES.

Ensaio preliminares, utilizando um penetrador de diamante do tipo Vickers, mostraram que a perda de massa induzida era inferior ao décimo de miligrama. Isto inviabilizou a utilização deste penetrador, em função da resolução da balança disponível ( $10^{-4}$  g).

Assim, foram construídos penetradores piramidais de base quadrada e extremidade truncada. Estes penetradores possuem um ângulo entre as faces opostas de  $87^{\circ}$  e foram contruídos em metal duro, à base de carboneto de tungstênio ( WC ).

Durante a execução dos ensaios, pode-se constatar o aparecimento de partículas metálicas firmemente aderidas às faces do penetrador, assim como avarias das arestas da pirâmide, conforme ilustra a figura 7. Visando minimizar estes efeitos, foram realizados, antes de cada teste, polimentos nas faces com o uso de pasta de diamante de granulometria 3 micra, através de dispositivo específico<sup>(13)</sup>. As dimensões e integridade das faces foram acompanhadas por microscopia ótica, aumento de 100X, sendo as faces truncadas mantidas em  $( 0,58 \pm 0,01 )$  mm.

Aparenta-se a seguir alguns resultados preliminares relativos a ensaios realizados em alumínio comercialmente puro ( $H_v = 21,2 \pm 1,6$ ) e aço ABNT 1020 ( $H_v = 122 \pm 1,3$ ).

A determinação da energia específica apresentou dificuldade adicional, uma vez que a mesma depende da perda de massa. A perda de massa é um parâmetro fortemente influenciado pelo mecanismo de formação do cavaco e da metodologia utilizada na sua determinação. Assim, a perda de massa foi acompanhada através de três procedimentos distintos:

- (a) pesagem da amostra, antes e após o ensaio;

- (b) pesagem do(s) cavaco(s) produzido(s) e  
 (c) pesagem da amostra antes do ensaio e após teste complementado com limpeza ultrasonora em acetona ( 40 KHz, 1 minuto).

A figura 8 ilustra, comparativamente, os resultados encontrados para riscos de 120 micra de profundidade máxima. Observa-se que, em ambos os casos, a massa do cavaco é praticamente igual à diferença de massa encontrada sem a limpeza ultrasonora. Para o aço, pode-se explicar a ligeira diferença pela presença de fragmentos fortemente aderidos ao penetrador, como ilustrado pela figura 7. Resultado semelhante foi encontrado por SODERBERG <sup>(9)</sup>, para o Alumínio e suas ligas.

Com a introdução da limpeza ultrasonora, nota-se uma significativa elevação da diferença de volume das amostras, em particular para o caso do alumínio. Esta diferença pode ser atribuída à remoção, pela ação do ultrassom, de micro-cavacos laterais parcialmente aderidos à borda do risco, como evidenciado pela observação ao microscópio ótico, figura 9. Apesar da pequena profundidade de campo, pode-se notar a presença destes micro-cavacos, indicados pelas setas. Evidentemente, a formação destes micro-cavacos semi-ligados à amostra e a movimentação de material, consomem parte da energia. Entretanto, não ocorre a produção de qualquer perda de massa. Isto, portanto, falseia os resultados encontrados. Da mesma forma, a atuação do ultrassom introduz uma parcela de energia para o arrancamento destes cavacos, alterando também os resultados. Como o fenômeno é fortemente tributário dos mecanismos atuantes (sulcamento, micro-corte, lascamento), a comparação de materiais distintos é bastante delicada. Assim, no presente artigo, adota-se como perda de massa, a média entre os valores da massa do cavaco e a variação da massa da amostra, após limpeza ultrasonora.

A figura 10 apresenta a influência da variação volumétrica na energia específica de riscamento, para o caso do aço ABNT 1020 e do Alumínio, utilizando-se a metodologia adotada. Observa-se que a relação é linear, sugerindo uma relação de potência do tipo:

$$e = K.V^q \quad (3)$$

onde K e q são coeficientes característicos dos materiais. A tabe-

la 3 mostra estes coeficientes e o coeficiente de correlação (r) apresentados.

Tabela 3 - Parâmetros característicos.

	K	q	r
Aço ABNT 1020	6,931	-0,227	0,961
Alumínio	3,359	-0,143	0,950
Soderberg <sup>(9)</sup>	3,920	-0,120	-

Nota-se uma boa correlação destes resultados com o modelo proposto pela equação 3 e, apesar da pequena faixa de variação de massa analisada (0,4 - 4,0 mg), os mesmos estão em bom acordo com os resultados reportados por VINGSBO e co-autores<sup>(9,10)</sup>, que analisaram uma faixa bem mais ampla (0,1 - 200 mg).

A tabela 3 apresenta ainda os resultados de SODERBERG e co-autores<sup>(9)</sup>, relativos a uma liga de alumínio recozida por 2 horas a 415°C. A concordância é muito boa, sobretudo se considerarmos as faixas de análise e as diferenças de composição química e história térmica dos dois materiais.

Ressalta-se ainda o fato de que a energia específica de riscamento aumenta rapidamente com a redução do tamanho do risco. Este comportamento é bastante complexo e tributário de dois fatores principais: efeito de escala<sup>(15)</sup> e mecanismos de formação do cavaço<sup>(10)</sup>.

Finalmente, a figura 11 ilustra as potencialidades adicionais do equipamento desenvolvido. A figura 11a ilustra a utilização do mecanismo de interrupção instantânea. Observa-se que o cavaco em formação apresenta-se homogeneamente cisalhado, com a formação de pequenas trincas na superfície. Observa-se ainda o alinhamento da micro-estrutura com as linhas de deslizamento. A figura 11b, por sua vez, apresenta a seção longitudinal paralela ao fundo do risco de uma amostra de cobre. Observa-se nitidamente a região afetada pela deformação, caracterizada pela orientação da micro-estrutura. Esta técnica complementar presta-se perfeitamente ao estudo da camada deturpada e, em particular, do fluxo plástico, das transformações de fase induzidas por deformação, etc..

## 5 - CONCLUSÕES.

O presente artigo apresenta as diversas etapas do desenvolvimento, construção e avaliação de um esclerômetro pendular. A aferição do protótipo, bem como os resultados preliminares apresentados, permitem concluir que:

- (1) a profundidade do risco pode ser controlada de forma simples, contínua e precisa ( $\pm 1$  micron);
- (2) a existência de quatro faixas de operação, tornam o equipamento extremamente versátil, com valores de energia potencial inferiores em até 130 vezes, em comparação com os pêndulos convencionais;
- (3) a calibração do equipamento mostrou que o mesmo apresenta características técnicas satisfatórias, mesmo quando comparado com a norma ASTM E 23-66;
- (4) os resultados relativos ao aço ABNT 1020 e ao Alumínio, mostraram que a influência da variação da massa na energia específica de riscamento, segue uma lei do tipo potência, podendo classificar os materiais quanto ao comportamento em abrasão. Para o Alumínio, em particular, os resultados apresentados são quantitativamente equivalentes aos apresentados pela literatura<sup>(9)</sup> e
- (5) finalmente, a associação de técnicas adicionais, como interrupção instantânea do corte e cortes metalográficos, constituem-se em ferramentas importantes no estudo do processo abrasivo.

## 6 - AGRADECIMENTOS.

Os autores agradecem ao CNPq e à FAPEMIG o apoio financeiro recebido.

## 7 - BIBLIOGRAFIA.

- (1) - DE MELLO, J.D.B. et al.. Anais do International Colloquium on Wear Resistant Materials. Saint-Étienne, p. 22-1 a 21-11, 1983.
- (2) - KATO, K. et al.. Journal of Tribology. Vol. 108, p. 346 a 351, 1986.

- (3) - MAAN, N. and VAN GROENOV, A.B.. Wear. Vol. 42, p. 365 a 390, 1977.
- (4) - AHMAN, L. and OBERG, A.. Anais da International Conference of Wear of Materials. USA, p. 112-120, 1983.
- (5) - MATHIA, T.G. e LAMY, B.. Anais da International Conference on Wear of Materials. Canadá, p. 485-490, 1985.
- (6) - LAMY, B.. Mécanique-Matériaux-Électricité. Vol. 365-366, p. 201-205, 1980.
- (7) - NOGUEIRA, R.E.F.Q. e DE MELLO, J.D.B.. Anais da ABM. Belo Horizonte, Outubro de 1988, p.281-300.
- (8) - BRYGGMAN, V.; HOGMARK, S. and VINGSBO, O.. Anais do IV International Abrasion Colloquium. Grenoble, p. 5-1 a 5-14, 1979.
- (9) - SODERBERG, S.; BRYGGMAN, U. and CANALES, A.. Anais da International Conference on Wear of Materials. Canadá, p. 645 - 653, 1985.
- (10) - BRYGGMAN, V.; HOGMARK, S. and VINGSBO, O.. Anais da International Conference on Wear of Materials. Canadá, p. 324 a 331, 1985.
- (11) - FERRARESI, D.. Fundamentos da Usinagem dos Metais. São Paulo, Edgard Blucher, 1977.
- (12) - MERIAM, J.L.. Dinâmica. Rio de Janeiro, L.T.C., 1976.
- (13) - FRANCO, S.D.. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 1989.
- (14) - Norma ASTM E 23-66.
- (15) - BACKER, W.R. et al.. Trans. ASME. Vol. 74, p. 61-72, 1952.

Tabela 2 - Calibração do protótipo.

Versão	m = 2,860 Kg		m = 0,877 Kg	
	154°	90°	154°	90°
$E_{lida}$ (J)	19,0	10,0	4,24	2,23
$E_e$ (ASTM)	18,93	9,96	4,23	2,22
$E_e/E_{lida}$ (%)	0,37	0,40	0,23	0,45
Perdas (J)	0,2	0,10	0,134	0,056
Erro (%)	1,0	1,0	3,1	2,5

ABSTRACT

This paper presents the main features of a pendulous sclerometer which can be used for modeling the abrasive wear by means of a single pass grooving technique. The hammer of the pendulum is equipped with a radially protruding cemented carbide tip which is used to produce grooves in a specimen. The pendulum technique measures abrasion resistance as energy consumption while gouging material from specimen surface. Some preliminary results are added to show the potentialities of the equipment.

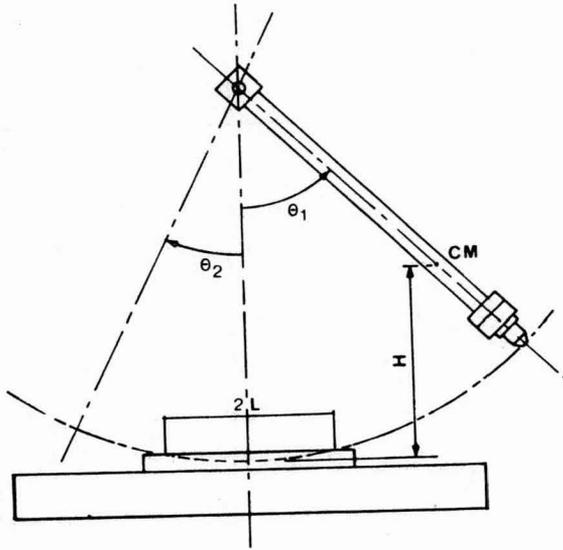


Figura 1 - Representação esquemática de um esclerômetro pendular.

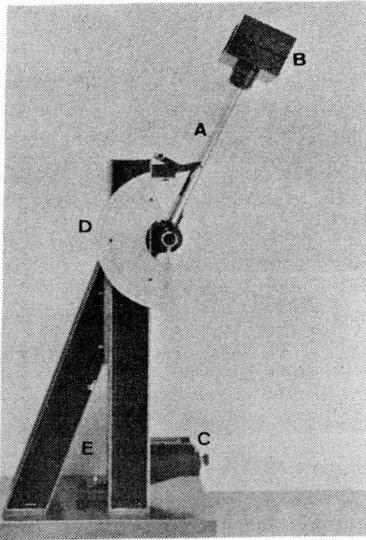


Figura 2 - Vista geral do protótipo  
 A - Pendulo, B - Porta -  
 penetrador, C - Conjunto  
 porta-amostra, D - Escala,  
 E - Corpo e base.

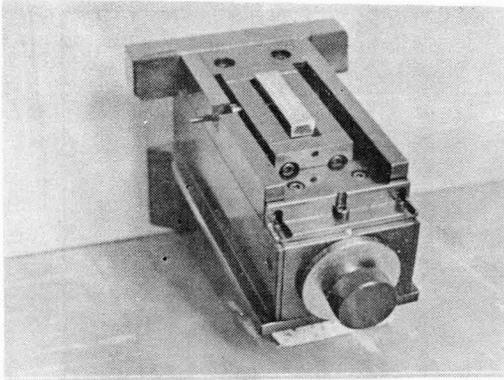


Figura 3 - Conjunto porta - amostra.

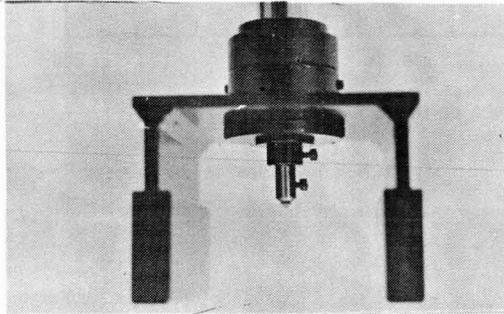


Figura 4 - Detalhe do dispositivo porta - penetrador.

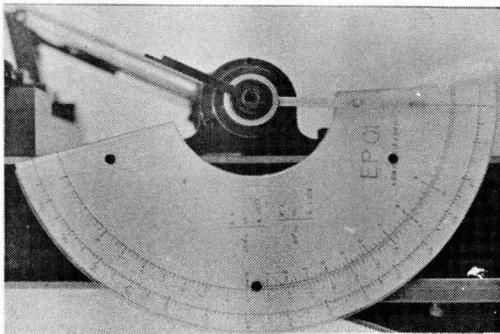


Figura 5 - Escalas de energia.

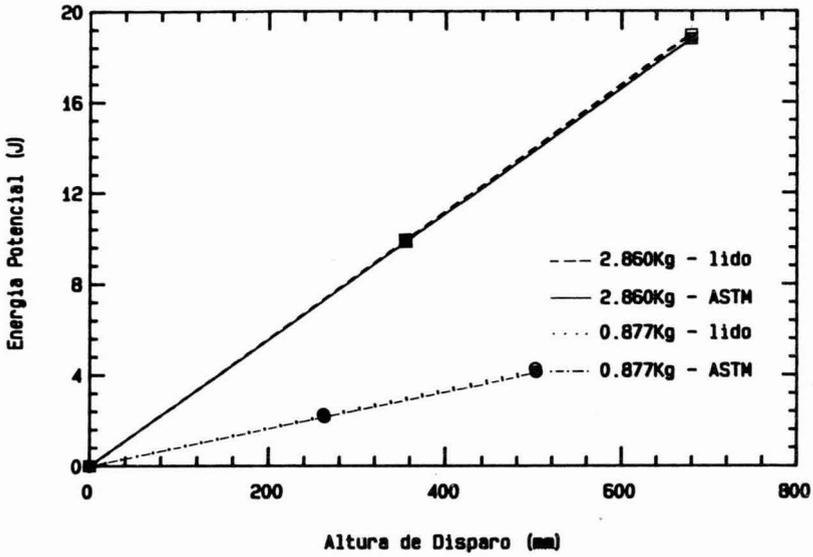


Figura 6 - Evolução das perdas por atrito com a altura de disparo.

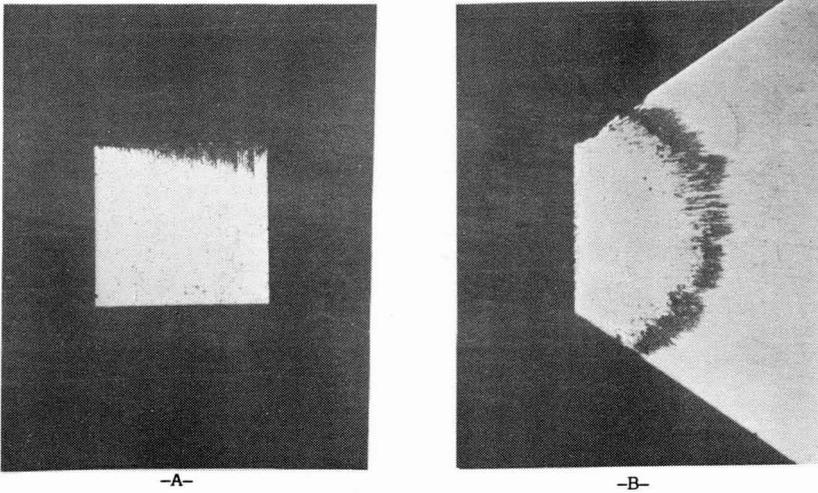


Figura 7 - Aspecto do penetrador após ensaio.  
 -A- Adesão na face troncada,  
 -B- Adesão e avaria da face de ataque.

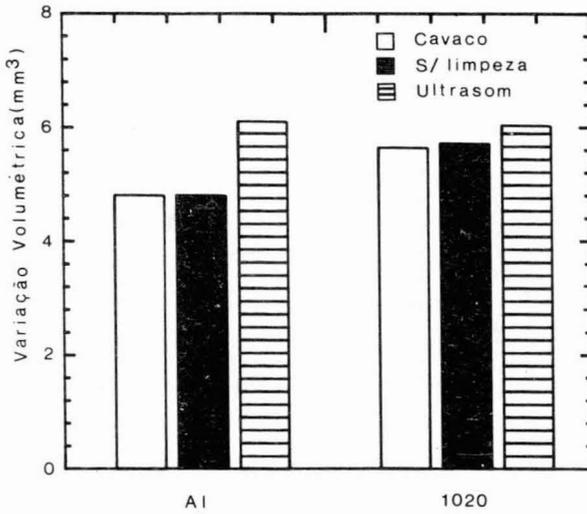
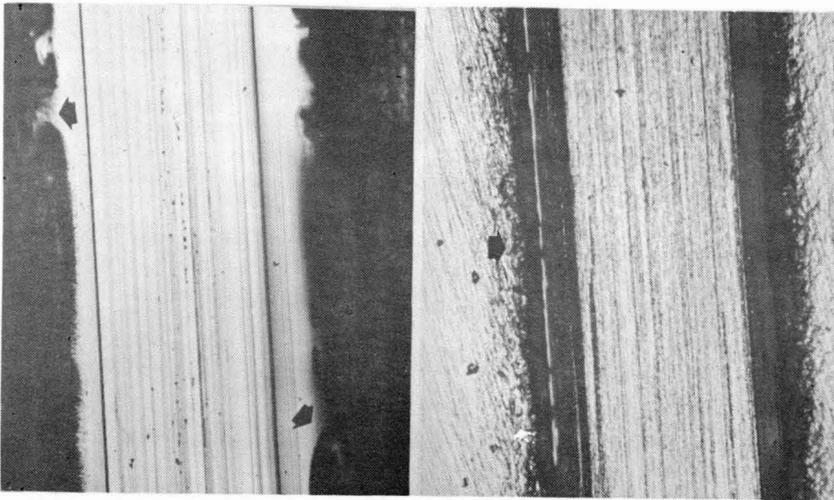


Figura 8 - Variação da perda de massa com a metodologia de determinação.



-A-  
Figura 9 - Aspectos típico dos riscos produzidos  
-A- A1; -B- 1020; 53 X.

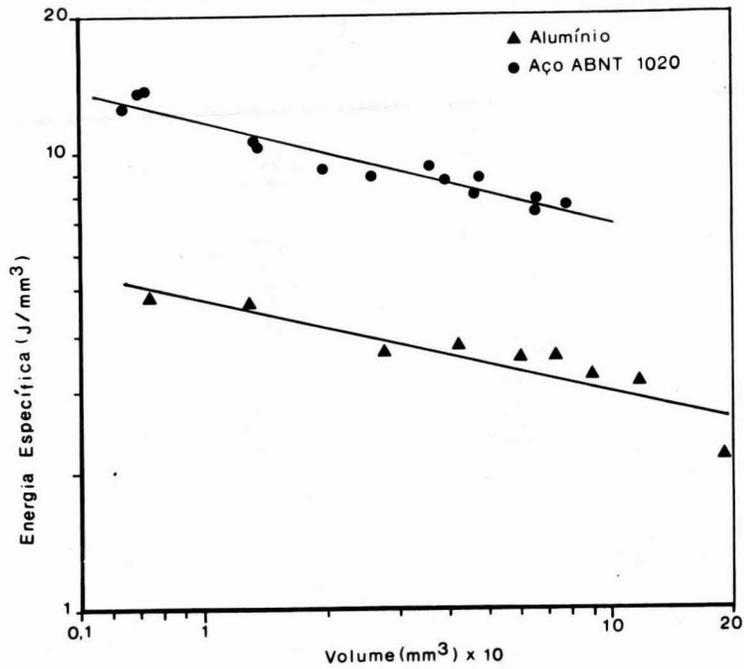
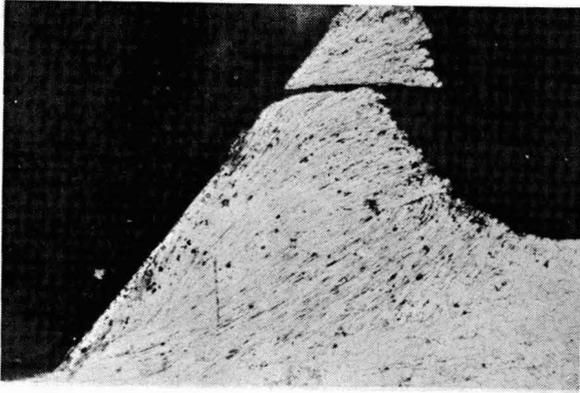
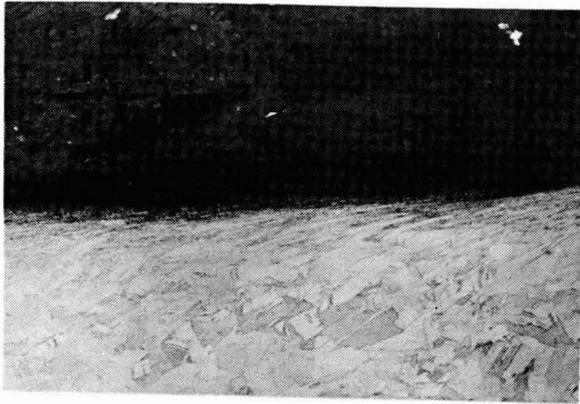


Figura 10 - Influência da variação volumétrica na energia específica de discamento.



-A-



-B-

Figura 11 - Ilustração da potencialidade do equipamento.  
A - Interrupção instantânea do corte, aço 1020,84 X.  
B - Camada deformada, cobre, 165 X.

