

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

CTC
Biblioteca Universitária
UFSC

DETERMINAÇÃO DE UM ÍNDICE DE
USINABILIDADE

por

Áureo Campos Ferreira

Tese submetida como requisito parcial
para obtenção do grau de

MESTRE EM CIÊNCIAS

DE

ENGENHARIA MECÂNICA

BIBLIOTECA CENTRAL

Prof. Dr. Woon Kwan Luk

Orientador

Florianópolis, SC., Abril de 1971

Empréstimo Proibido

043(627.9)
F 414



0.248.330-9

UFSC-BU

À minha esposa e filhos

A meus pais

Agradecimento

Queremos agradecer a todos quantos, direta ou indiretamente, colaboraram na realização deste trabalho, e em especial, às indústrias que forneceram graciosamente os materiais a serem usinados (Companhia Siderúrgica Mannesmann, ALCAN Alumínio do Brasil S/A, Alumínio Indústria S/A - AISA). Aos funcionários do Laboratório de Máquinas Operatrizes e outros do Centro Tecnológico que estiveram presentes em todas as ocasiões em que foram solicitados, empenhando-se para dar o melhor de seus esforços. Ao Departamento de Mecânica, especialmente ao Prof. Caspar Erich Stemmer, pelo apoio e incentivo, e ao Prof. Woon Kwan Luk, pela orientação segura.

Sumário

Para que se possa ter uma idéia dos fundamentos teóricos nos quais o presente trabalho se embasou, são feitas inicialmente algumas considerações sobre o que já se conhece dentro do campo da usinagem, diretamente ligadas ao assunto área de contato entre ferramenta e cavaco, bem como raio de curvatura do mesmo.

Tôdas as experiências foram planejadas e executadas com o objetivo de se tentar, através de ensaios simples, como medida de curvatura de cavaco e área de contato ferramenta-cavaco, estabelecer uma maneira de correlacionar êstes elementos com o índice de usinabilidade dos materiais.

Í N D I C E

	Páginas
INTRODUÇÃO	
CAPÍTULO 1 - Informações iniciais	
1.1 - Nomenclatura.....	01
1.2 - Equipamento utilizado.....	03
1.3 - Materiais.....	04
1.4 - Tipos de corte.....	04
CAPÍTULO 2 - Estatística e Aferição	
2.1 - Determinação do Tamanho das amostras.....	06
2.2 - Aferição do dinamômetro.....	07
CAPÍTULO 3 - Alguns comentários sôbre o que será medido	
3.1 - Área de contato entre ferramenta e o cavaco.....	08
3.2 - Relação de corte.....	16
3.3 - Curvatura do cavaco.....	16
3.4 - Acabamento superficial.....	18
3.5 - Pressão Específica de corte.....	18
CAPÍTULO 4 - Experiências e medidas	
4.1 - Experiências.....	21
4.2 - Medidas.....	22
4.2.1 - Área de contato ferramenta -cavaco.....	22
4.2.2 - Relação de corte	24
4.2.3 - Curvatura do cavaco.....	25
4.2.4 - Rugosidade superficial.....	26
4.3 - Estimativa dos êrros.....	27
CAPÍTULO 5 - Índice de Usinabilidade	
5.1 - Apresentação e interpretação dos resultados.....	28
Conclusões.....	34
Bibliografia.....	36
Apêndice.....	38

RELAÇÃO DAS TABELAS

- Tabela 1 - Resultados experimentais da variação do comprimento do contato ferramenta-cavaco com o tempo de atuação da ferramenta.
- Tabela 2 - Valores da relação área de aderência sobre área de escorregamento.
- Tabela 3 - Variação aparente da tensão cisalhante do material motivado talvez pela força de gume.
- Tabela 4 - Variação do diâmetro de curvatura de cavaco com material.
- Tabela 5 - Variação da rugosidade superficial com avanço (alumínio - corte oblíquo).
- Tabela 6 - Variação da rugosidade superficial com o uso do lubrificante.
- Tabela 7 - Variação da rugosidade superficial com o material.
- Tabela 8 - Variação da rugosidade superficial com a velocidade de corte.
- Tabela 9 - Variação da pressão específica de corte com o material.
- Tabela 10 - Variação do diâmetro de curvatura do cavaco com o uso de lubrificante.
- Tabela 11 - Resultados dos ensaios - corte ortogonal.
- Tabela 12 - Resultados dos ensaios - corte oblíquo.
- Tabela 13 - Resultados dos ensaios - corte com ferramenta múltipla.

- RELAÇÃO DAS FIGURAS -

- Figura 1 - Corte ortogonal.
- Figura 2 - Corte oblíquo.
- Figura 3 - Corte Múltiplo.
- Figura 4 - Corte ortogonal utilizando um tubo como material da peça.
- Figura 5 - Aferição da força principal de corte (P_c).
- Figura 6 - Aferição da força passiva (P_p).
- Figura 7 - Conjunto da montagem realizada para aferir o dinamômetro.
- Figura 8 - Aferição do dinamômetro. Força principal de corte (P_c).
- Figura 9 - Aferição do dinamômetro. Força de avanço (P_a).
- Figura 10 - Aferição do dinamômetro. Força passiva.
- Figura 11 - Distribuição de tensões na superfície de saída da ferramenta.
- Figura 12 - Diagrama de forças na usinagem.
- Figura 13 - Esquema simplificado da zona de formação do cavaco mostrando segundo Zorev as linhas de tensão tangencial constantes abrindo-se em forma de leque.
- Figura 14 - Determinação do plano de cisalhamento de um material através da envoltória e do círculo de Mohr.
- Figura 15 - Tensões num elemento de cavaco, junto do gume de corte.
- Figura 16 - Ferramenta afiada e iluminada de maneira inadequada com marca de contato praticamente imperceptível.
- Figura 17 - Ferramenta afiada e iluminada de maneira adequada aparecendo a marca nitidamente.
- Figura 18 - Medida da área de contato ferramenta-cavaco.

- Figura 19 - Dispositivo simples para medida do comprimento de contato.
- Figura 20 - Variação do comprimento de contato ferramenta-cavaco com o tempo de usinagem.
- Figura 21 - Medição dos comprimentos de cavaco no projetor de perfil com auxílio de um curvímetro.
- Figura 22 - Medição da curvatura do cavaco num projetor de perfil com auxílio de curvas de diâmetro conhecido.
- Figura 23 - Perfil efetivo de uma peça mostrando os elementos necessários ao cálculo de R_a (ou C.L.A.).
- Figura 24 - Conjunto mostrando os elementos fundamentais do rugosímetro.
- Figura 25 - Marca de contato entre ferramenta e cavaco obtida na usinagem de alumínio .
- Figura 26 - Correspondência linear entre área de contato ferramenta-cavaco (AT) e força principal de corte (P_c). AÇO ABNT 1010.
- Figura 28 - Correspondência linear entre área de contato ferramenta-cavaco (AT) e força principal de corte (P_c). AÇO ABNT 1020.
- Figura 29 - Correspondência linear entre área de contato ferramenta-cavaco (AT) e força principal de corte (P_c). AÇO ABNT 1035.
- Figura 30 - Correspondência linear entre área de contato ferramenta-cavaco (AT) e força principal de corte (P_c). AÇO ABNT 1045.
- Figura 31 - Correspondência linear entre área de contato ferramenta-cavaco (AT) e força principal de corte (P_c). Conjunto dos materiais ensaiados.

INTRODUÇÃO

Um material tem boas características de usinagem quando permite que se remova grande quantidade de cavaco com o emprêgo relativo de pouca potência (baixo valor da pressão específica de corte), obtendo-se um bom acabamento superficial na peça e conservando a vida da ferramenta dentro de limites satisfatórios. Assim, os fatores básicos normalmente medidos para se avaliar o índice de usinabilidade de um material são: a) Desgaste da ferramenta; b) Pressão específica de corte; c) Acabamento superficial da peça; d) Comportamento do cavaco.

Além disso, um dos métodos para determinar o índice de usinabilidade é o da medida da marca de desgaste na ferramenta, exigindo ensaios prolongados, além de se gastar grande quantidade de material, a par de destruir o gume.

Dessa forma, um dos principais problemas que aparecem quando da avaliação do Índice de Usinabilidade de um material é a necessidade de equipamentos especiais, de elevado custo, que a maioria das indústrias não dispõe. Entre estes encontramos rugosímetro, microscópio para ferramentas, dinamômetro para medida de forças na usinagem e outros.

Daí a importância de se estabelecer uma maneira de obter o índice de usinagem dos materiais através de ensaios simples, rápidos sem grande consumo de material, confiável e empregando equipamento facilmente encontrado na indústria.

CAPÍTULO 1 - INFORMAÇÕES INICIAIS

1.1 - Nomenclatura

1.1.1 - Ferramenta:

- γ : ângulo de saída normal
- γ : ângulo de saída máximo
- α_n : ângulo de incidência normal
- λ : ângulo de inclinação
- χ : ângulo de posição principal
- ϵ : ângulo de quina
- χ_s : ângulo de posição secundário
- β : ângulo de cunha

1.1.2 - Peça:

- D_{ex} : diâmetro externo (mm)
- D_{in} : diâmetro interno (mm)
- D_m : diâmetro médio (mm)
- b : largura da peça (espessura da parede do tubo) (mm).

1.1.3 - Condições de corte:

- v : velocidade de corte (m/min)
- p : profundidade de corte (mm)
- a : avanço (mm/rot)
- h : espessura de corte (mm)
- n : número de rotações da peça (rot/min).

1.1.4 - Outros:

- V_c : velocidade de saída do cavaco.
- V_z : velocidade de cisalhamento.
- L_{ad} : comprimento de contato ferramenta cavaco na zona de aderência (mm).
- L_{es} : comprimento de contato ferramenta cavaco na zona de escorregamento (mm).
- L_t : comprimento total de contato ferramenta cavaco ($L_{ad} + L_{es}$) (mm)
- A_s : área de cisalhamento.

- A_{ad} : área da zona de atrito de aderência entre cavaco e ferramenta (mm^2).
 A_{es} : área da zona de atrito de escorregamento (mm^2).
 A_t : área total de contato entre ferramenta e cavaco ($A_{ad} + A_{es}$) (mm^2).
 L : comprimento do cavaco (mm).
 P_C : força de corte (kgf)
 P_a : força de avanço (kgf)
 P_P : força passiva (força de profundidade) (kgf)
 P_z : força de cisalhamento atuando no plano de cisalhamento (kgf)
 P_{nz} : força normal ao plano de cisalhamento (kgf)
 P_t : força de atrito atuando na superfície de saída (kgf)
 P_n : força normal à superfície de saída (kgf).
 P_u : força de usinagem resultante (kgf).
 h' : espessura do cavaco (mm).
 R_C : fator de recalque.
 r_C : razão de corte ($=1/R_C$).
 ϕ_n : ângulo de cisalhamento normal (graus).
 μ : coeficiente de atrito.
 ρ : ângulo de atrito (graus)
 τ_z : tensão média de cisalhamento do material no plano de cisalhamento (kgf/mm^2).
 σ_z : tensão média de compressão do material no plano de cisalhamento (kgf/mm^2).
 τ_s : tensão de cisalhamento na superfície de saída (kgf/mm^2).
 P_m : pressão máxima na superfície de saída (kgf/mm^2)
 K_s : pressão específica de corte (kgf/mm^2).
 T : tempo de corte (seg).

- CC : diâmetro de curvatura do cavaco (mm).
- R_a : rugosidade superficial da peça (CLA μm).
- W : pêso utilizado na aferição do dinamômetro (kgf).
- s : área da seção de corte (mm^2)

1.2 - Equipamento Utilizado

- 1.2.1 - Tórno "IMOR", modelo MVN, com rotações da árvore variável desde zero até 2.000 rot/min, com características especiais de rigidez recomendadas para trabalhos de pesquisa. Motor com 10 HP. Altura entre pontas de 340 mm e barramento de 1.500 mm de comprimento.
- 1.2.2 - Dinamômetro "FISCHER", eletroindutivo de procedência alemã, com possibilidade de medir as três componentes de usinagem e capacidade máxima de 1.000 kgf.
- 1.2.3 - Projetor de perfil marca "JENA", de procedência alemã, com fonte de luz passante e refletida, e sistema de lentes substituíveis, que possibilita a ampliação de 10, 20 e 50 vezes. Sua mesa tem possibilidade de leitura de 1' para ângulos e 0.01 mm para comprimentos.
- 1.2.4 - Rugosímetro "PERTH-O-METER", tipo WlBe, de procedência alemã, com capacidade de ampliação de 400 a 100.000 vezes e possibilidade de fornecer o valor de CLA (Center Line Average), R_t (rugosidade máxima), R_s (Root Mean Square) e R_p (rugosidade média).
- 1.2.5 - Máquina universal para afiação de ferramentas.
- 1.2.6 - Curvímetro.
- 1.2.7 - Cronômetro.
- 1.2.8 - Serra manual.

1.3 - Materiais

1.3.1 - Material para ferramentas:

Para tôdas as experiências foi utilizado o mesmo tipo de aço rápido "cobalt supercut", com 10% de cobalto com dimensões de 5/8" x 5/8" x 3 1/2" (16 x 16 x 90 mm).

1.3.2 - Material das peças:

Foram utilizados quatro tipos de aço trefilado (ABNT 1010 - 1020 - 1035 - 1045) na forma de tubos com diâmetro externo de 111 mm e espessura de parede de 14 mm, que para todos os testes foi reduzida a 5 mm, retirando-se o material externa e internamente para eliminar a camada encruada (devido a trefilação).

Para completar as informações referentes aos materiais foram feitas medidas de dureza obtendo-se os seguintes resultados:

Material	Dureza (Rb)
1010	71,0
1020	77,0
1035	80,6
1045	87,6

Além dos aços foi utilizado um tipo de alumínio, B51S - T6, com um diâmetro externo de 142 mm e uma parede de 10 mm, também para os testes, reduzida para 5 mm.

1.4 - Tipos de corte.

Para que fique bem claro quando se falar em corte ortogonal, corte oblíquo e corte múltiplo, êstes três tipos serão agora definidos:

1.4.1 - Corte ortogonal:

É aquêle no qual existe apenas um gume de corte atuando e êste se localiza perpendicularmente à direção principal

de corte e paralelamente à superfície usinada da peça (figura 1).

1.4.2 - Corte oblíquo: -

É aquêlé no qual existe apenas um gume de corte atuando e êste se encontra inclinado. (segundo um ângulo de inclinação) em relação a uma perpendicular à direção principal de corte e paralelo a superfície usinada da peça (figura 2).

1.4.3 - Corte múltiplo:

É aquêlé no qual dois ou mais gumes de corte atuam simultâneamente sôbre a peça. No caso do presente trabalho será utilizada, além das ferramentas de corte ortogonal, e oblíquo, a ferramenta siples de corte com dois gumes atuando simultâneamente, sendo uma das mais empregadas, na prática, para o torneamento. (figura 3).

Para o presente trabalho foi utilizado na obtenção dos cortes ortogonal e oblíquo o material em forma de tubo fazendo a ferramenta atuar conforme mostra a figura 4.

CAPÍTULO 2 - ESTATÍSTICA E AFERIÇÃO

2.1 - Determinação do tamanho das amostras

Para que os resultados experimentais tenham um grau de confiança aceitável não basta que, para cada ponto, se tire um valor de fôrça, por exemplo, pois dois testes com identidade de condições não dão exatamente o mesmo resultado, havendo então a chamada flutuação estatística (01). Dessa forma, é necessário determinar o número de vêzes (tamanho da amostra) que cada teste deve ser repetido, para que os êrros se mantenham dentro de limites estipulados. A expressão que permite calcular o tamanho de amostra é:

$$n = \left(\frac{Z}{\bar{X} d'} \right)^2 \sigma'^2 \quad (01)$$

onde:

n : tamanho da amostra

Z : coeficiente extraído da curva normal, igual a 1.96 para 95% de probabilidade dos resultados estarem certos (êrro inferior ou, no máximo, igual ao estipulado).

\bar{X} : média de uma população composta por um número relativamente grande de elementos.

d' : êrro percentual máximo admissível (tomando $\pm 0.05 = \pm 5\%$) na grandeza que está sendo medida.

σ' : desvio padrão da população, cuja média é \bar{X} dado por:

$$\sigma' = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (\bar{X} - X_i)^2}{N} \right)^{0,5} \quad (02)$$

onde:

X_i : valor de um elemento genérico da população.

N : número de elemento da população (50).

No presente caso foi admitida uma população de 50 elementos como sendo razoável. Procurando trabalhar em condições médias de trabalho foram levantados 50 valores de comprimento de cavaco, de curvatura de cavaco, de fôrça de corte, de áreas (aderência e escorregamento) de contato entre

cavaco e ferramenta e de rugosidade.

Em vista do grande volume de cálculos, na obtenção do desvio padrão, foi feito um programa FORTRAN, transcrito em anexo (02) para obter o tamanho de amostra em cada caso, Os resultados foram os seguintes:

Comprimento do cavaco (L): 4 valores
 Área de aderência (A_{ad}): 4 valores
 Área de escorregamento (A_{es}): 8 valores
 Curvatura do cavaco (CC): 6 valores
 Fôrça de corte (P_c): 10 valores
 Rugosidade (R_a): 7 valores.

2.2 - Aferição do dinamômetro

Antes de começar qualquer experiência foi necessário calibrar o dinamômetro. Para tanto foi projetado e construído um sistema de alavancas que ampliam as fôrças 10 (fôrças de avanço e passiva) e 12 (fôrça principal de corte) vezes

Podem ser vistos nas figuras 5 e 6 esquemas de montagens para aferição da fôrça principal de corte (P_c) e da fôrça passiva (P_p). Para aferir a fôrça de avanço (P_a) usa-se a mesma disposição da figura 6, porém, com a ferramenta, posicionada a 90° em relação a esta.

Na figura 7 pode ser visto um conjunto da montagem para aferição do dinamômetro.

Para verificar o êrro cometido nas construções das alavancas, colocou-se diretamente sôbre o dinamômetro os pêsos aferidos pelo Departamento de Pêsos e Medidas do Governo Federal, Delegacia de Florianópolis, Os valores obtidos foram comparados, até 60 kgf, com aquêles ampliados pelas alavancas e chegou-se aos seguintes valores máximos de êrro:

Fôrça de corte: 3%

Fôrça de avanço e passiva: 2%

Êstes valores foram obtidos para pequenos valores de carga, pois para os maiores o êrro desceu a menos de 1%.

As curvas de calibragem (figuras 8, 9 e 10) foram obtidas pelo método dos mínimos quadrados, através de um programa FORTRAN, transcrito em anexo (02), e especialmente elaborado para o caso.

CAPÍTULO 3 - ALGUNS COMENTÁRIOS SÔBRE O QUE SERÁ MEDIDO

3.1 - Área de contato entre ferramenta e cavaco.

3.1.1 - Distribuição de tensões na face de saída.

A distribuição de esforços sôbre a superfície de saída da ferramenta, segundo Boothroy (03), se dá conforme o gráfico apresentado na figura 11, onde podem ser distinguidas duas zonas perfeitamente definidas.

1º) Zona de contato por aderência onde as pressões normais são muito elevadas e o coeficiente de atrito varia, não tendo significado físico. A tensão cisalhante é constante pois não há movimento relativo entre a ferramenta e o cavaco, já que uma fina camada de material da peça se deposita (devido às asperezas da ferramenta e altas pressões) sôbre a superfície de saída e o que ocorre é o cisalhamento entre esta camada e o material do cavaco.

2º) Zona onde há um contato deslizante entre o cavaco e a ferramenta, um coeficiente de atrito constante e uma área real de contato entre ferramenta e cavaco menor do que a área aparente, sendo os esforços menores.

Uma análise da distribuição das tensões na superfície de saída da ferramenta, mostrada na figura 11, foi apresentada por Zorev (14), que sugeriu para a mesma a seguinte expressão:

$$\sigma_s = q x^y \quad (03)$$

onde:

σ_s = pressão normal sôbre a superfície de saída
 x = distância do ponto considerado (genérico),
 sôbre a superfície de saída, partindo do
 ponto onde o cavaco deixa de entrar em contato com a ferramenta.

q, y = constantes.

A máxima pressão normal (p_m) ocorre quando $x = L_t$ e então:

$$p_m = q (L_t)^y \quad (04)$$

ou $q = p_m \cdot L_t^{-y} \quad (05)$

$$\sigma_s = P_m L_t^{-Y} \cdot x^Y \quad (06)$$

$$\sigma_s = P_m \left(\frac{x}{L_t} \right)^Y \quad (07)$$

Na região de escorregamento, entre os pontos $x=0$ e $x = L_{es}$, o coeficiente de fricção μ é constante e a distribuição de tensão cisalhante é dada por:

$$\tau_s = \sigma_s \mu = P_m \left(\frac{x}{L_t} \right)^Y \cdot \mu \quad (08)$$

Na zona de aderência, a tensão cisalhante (τ_s) se torna máxima e constante.

Considerando um elemento de área ($b \cdot dx$) na superfície de saída, sobre o qual age a pressão normal τ_s , pode-se dizer que a força normal sobre este elemento de área será:

$$dP_n = \sigma_s \cdot b \cdot dx \quad (09)$$

$$\text{OU} \quad P_n = \int_0^{L_t} \sigma_s \cdot b \cdot dx \quad (10)$$

mas segundo a expressão (07);

$$P_n = \int_0^{L_t} P_m \left(\frac{x}{L_t} \right)^Y b \cdot dx \quad (11)$$

$$= \frac{P_m b}{(L_t)^Y} \left[\frac{x^{(Y+1)}}{Y+1} \right]_0^{L_t}$$

$$= \frac{P_m b}{L_t^Y} \frac{L_t^{(Y+1)}}{Y+1} = \frac{P_m L_t b}{Y+1}$$

$$P_n = \frac{P_m L_t b}{Y+1} \quad (12)$$

A força de atrito na superfície de saída será dada por:

$$P_t = P_{t1} + P_{t2} \quad (13)$$

onde

P_{t1} = força de atrito na zona de aderência

P_{t2} = força de atrito na zona de escorregamento.

mas

$$P_{t1} = b \tau_s L_{ad} \quad (14)$$

$$P_{t2} = \mu P_n \quad (15)$$

$$\begin{aligned} &= \mu \int_0^{L_{es}} P_m \left[\frac{x}{L_t} \right]^y b \cdot dx \\ &= \frac{\mu P_m b}{L_t^y} \cdot \frac{(L_t - L_{ad})^{y+1}}{y+1} \\ &= \frac{\mu P_m b (L_t - L_{ad})^{y+1}}{L_t^y (y+1)} \end{aligned}$$

então:

$$P_t = b \tau_s L_{ad} + \frac{\mu P_m b (L_t - L_{ad})^{y+1}}{L_t^y (y+1)} \quad (16)$$

ou

$$P_t = b \tau_s L_{ad} + \frac{\mu P_m b (L_t - L_{ad})^y}{L_t^y} \cdot \frac{(L_t - L_{ad})}{(y+1)} \quad (17)$$

Para simplificar esta expressão basta calcular pela (8) o valor de τ_s para $x = L_t - L_{ad}$, ou seja:

$$\tau_s = \frac{\mu P_m (L_t - L_{ad})^y}{L_t^y} \quad (18)$$

e substituí-la na (17), obtendo-se:

$$P_t = b \tau_s L_{ad} + \frac{b \tau_s (L_t - L_{ad})}{y+1} \quad (19)$$

o coeficiente de atrito médio na superfície de saída pode ser calculado então pela (18) e (19)

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{P_t}{P_n} = \frac{b \tau_s L_{ad} (y+1) + b \tau_s (L_t - L_{ad})}{P_m L_t b} \cdot \frac{(y+1)}{P_m L_t b} \\ &= \frac{\tau_s}{P_m} \frac{L_{ad} (y+1)}{L_t} + \frac{\tau_s}{P_m} \frac{(L_t - L_{ad})}{L_t} \end{aligned}$$

$$\mu = \frac{\tau_s}{P_m} \frac{L_{ad}y + L_{ad} + L_t - L_{ad}}{L_t}$$

$$\mu = \frac{\tau_s}{P_m} \left(1 + y \frac{L_{ad}}{L_t}\right) \quad (20)$$

A pressão normal média que age sobre a superfície de saída será dada por:

$$\sigma'_s = \frac{P_n}{b L_t} \quad (21)$$

substituindo na (21) a (12) vem:

$$\sigma'_s = \frac{P_m L_t b}{(y + 1)b L_t}$$

$$= \frac{P_m}{(y + 1)} \quad (22)$$

então:

$$P_m = \sigma'_s (y + 1) \quad (23)$$

Substituindo na (20) vem:

$$\mu = \frac{\tau}{\sigma'_s (y + 1)} \left(1 + y \frac{L_{ad}}{L_t}\right)$$

$$\mu = \frac{\tau}{\sigma'_s} \left[\frac{1 + y \cdot L_{ad}/L_t}{y + 1} \right] \quad (24)$$

Como existe diferença de comportamento com relação ao valor do coeficiente de atrito nas duas zonas, o valor calculado, usando dados experimentais, segundo Armarengo e Brown (04), será uma média dos valores nas duas zonas. Dessa forma qualquer mudança das condições que acarrete mudança no valor de L_{ad} e L_{es} alterará o valor do coeficiente de atrito. Assim, com o aumento do ângulo de saída haverá uma diminuição da pressão normal sobre a ferramenta e, conseqüentemente uma redução no valor de L_{ad}/L_{es} .

Para completar este estudo serão relatadas aqui mais algumas considerações de Zorev e os estudos de Hucks:

Estudos de Zorev: Fêz êle um estudo completo do estado de tensões que vigem na zona de formação do cavaco, chegando aos seguintes resultados: (15)

Devido a ação da força P_u (fig. 13) gera-se um estado de tensão crescente no material, a frente da ferramenta, que por deformação plástica, transforma a camada de espessura h a ser removida do material, em um cavaco de espessura h' que se desloca paralelamente à superfície de saída da ferramenta. O estado de tensão crescente é caracterizado pelo fato de que as linhas de tensão tangencial constante são retas que se abrem em forma de leque, partindo do gume da ferramenta. Na zona de deformação plástica, nas linhas de escoamento, a condição de plastificação $\tau_s = \tau_z$ é satisfeita, levando-se em conta o encruamento do material. Os limites inicial e final (OL e OM) da zona plástica são determinados por condições de contorno. O grau de encruamento sofrido pelo material ao ser plastificado varia de 2 a 4 significando portanto que sua resistência aumenta duas a quatro vezes. Consequentemente o contorno inicial da zona plástica deve ser duas a quatro vezes maior do que o contorno final OM para que sejam mantidas as condições de equilíbrio. A superfície LM é o contorno de ligação entre a peça e o cavaco.

Com a suposição de que as tensões tangenciais são constantes ao longo das linhas deslizantes e baseando-se nas condições de equilíbrio, sem levar em conta o momento da força P_u em relação ao centro do plano de cisalhamento pode-se escrever:

$$\tau_{zb} \frac{x}{\text{sen } \phi} = P_u \cos (\phi + \rho - \gamma) \quad (25)$$

onde:

τ = Tensão cisalhante vigente num plano inclinado de ϕ em relação ao eixo Z.

b = Largura da superfície de trabalho.

x = Abscissa do ponto de intersecção do plano de cisalhamento com o contorno LM.

P_u = Resultante das forças na zona de formação do cavaco.

ρ = Ângulo de atrito

γ = Ângulo de saída da ferramenta.

Então:

$$\tau_z = \frac{P_u \cos (\phi + \rho - \gamma)}{b \cdot x} \cdot \text{sen } \phi \quad (26)$$

Para calcular a tensão no ponto M basta substituir suas coordenadas na expressão, então:

$$\tau_{z1} = \frac{P_u \cos (\phi_1 + \rho - \gamma) \text{ sen } \phi_1}{b \cdot x_1} \quad (27)$$

Verificações experimentais constataram que a fórmula acima dava valores 20% maiores do que os constatados na prática, atribuindo-se tal fato a não validade de suposição, feita de que se trata de um estado plano de tensões e deformações.

Para que a expressão acima dê dados mais reais será feita a seguinte correção:

$$\phi^* = \phi - e\phi_1 \quad (28)$$

onde:

ϕ_1 = ângulo de cisalhamento correspondente ao ponto M
 e = coeficiente constante que depende do estado de tensões e deformações que vigem na zona plástica

então:

$$\tau_z = \frac{P_u \cos (\phi^* + \rho - \gamma) \text{ sen } \phi^*}{b \cdot x} \quad (29)$$

O valor de ϕ^* no ponto M será:

$$\phi^* = \phi_1 - e\phi_1 = \phi_1 (1 - e) = c \cdot \phi_1$$

Então:

$$\tau_{z1} = \frac{P_u \cos (c \cdot \phi_1 + \rho - \gamma) \text{ sen } c \cdot \phi_1}{b \cdot x} \quad (30)$$

Para comprovar a grande aproximação a que se chegou aplicando esta expressão, Zorev fez uma série de experiências que constataram que o erro obtido neste caso é de aproximadamente 1% apenas.

Para se obter os elementos desta expressão o procedimento é o seguinte:

1º) Determina-se em primeiro lugar o valor de P_n e P_t e P_u com o auxílio de um dinamômetro, obtendo-se consequentemente $\mu = P_t/P_n$ e $\rho = \text{arc tg } \mu$.

2º) Calcula-se ϕ_1 segundo

$$\text{tg } \phi_1 = \frac{\cos \gamma + 0.05 R_c}{0.9 R_c - \text{sen } \gamma} \quad (31)$$

onde $R_c = h'/h$.

3º) Calcula-se x_1 pela

$$x_1 = \frac{h}{0.9 - 0.05 \text{cotg } \phi_1} \quad (32)$$

Estas expressões foram obtidas analiticamente e sua dedução encontra-se no livro "Metal Cutting Mechanics - N.N. Zorrev". (15)

Teoria de Hucks (06): Baseando-se no estado duplo de tensões e na teoria da envoltória de Mohr (que diz que o círculo representativo do estado de tensões (círculo de Mohr) deve situar-se no interior de uma curva, a qual é envoltória dos círculos obtidos experimentalmente, relativos a estados limites) Hucks procura determinar, para o corte ortogonal, o ângulo de cisalhamento ϕ e as forças de corte e de avanço.

Para que fique bem claro será bom fazer algumas considerações acerca da envoltória de Mohr. Experimentalmente se verifica que a cada valor da tensão normal (σ) corresponde um valor da tensão de cisalhamento (τ), que dá origem à ruptura ou escoamento, no ponto em que este par de tensões se aplica. Assim, para cada material dútil se traçou, em um sistema de coordenadas (σ, τ), uma curva $\tau = f(\sigma)$, representativa das condições limites de escoamento, e para cada material frágil se traçou no mesmo sistema de coordenadas, uma curva $\tau = f(\sigma)$, representativas das condições limites de ruptura. Essas curvas são denominadas envoltórias de Mohr, e são simétricas em relação ao eixo das abscissas (curva E da figura 14).

No corte ortogonal se verifica um estado duplo de tensões que pode ser representado graficamente pelo círculo de Mohr. Sempre que o círculo de Mohr tangenciar a curva $\tau = f(\sigma)$ em um ponto T, tal ponto representará o par de tensões (σ, τ) que

darão o início ao escoamento do material dútil ou à ruptura do material frágil. No caso do escoamento tem-se ainda a indicação do plano onde êle se verifica ou seja, o plano de cisalhamento. O escoamento se dá em dois planos simultâneos pois o círculo de Mohr tangencia a envoltória nos pontos T e T'.

Analisando um elemento de área ds (figura 15) da seção longitudinal do cavaco, bem junto ao gume, pode-se ver que sobre êste elemento de área a superfície de saída exerce uma força que origina as tensões σ_s de compressão e τ_s de cisalhamento. Segundo Hucks, a relação entre τ_s e σ_s é o coeficiente de atrito μ entre cavaco e ferramenta. Não há tensão normal agindo sobre os lados do elemento ds porque a superfície de saída praticamente não oferece resistência à saída do cavaco. Dessa forma, considerando que o círculo de Mohr, representativo do estado duplo de tensões reinantes no ponto P, sobre o gume, durante a formação do cavaco, deve tangenciar a envoltória de Mohr, relativa ao escoamento, do material dútil usinado, torna-se possível traçar o citado círculo e por meio dêle determinar, segundo Hucks:

- a) as tensões σ_s e τ_s .
- b) as tensões principais σ_1 e σ_2 .
- c) o ângulo ω que a superfície de saída da ferramenta faz com a direção principal σ_1 .
- d) os pontos T e T', representativos das tensões σ_z e τ_z agentes nos planos de escoamento.
- e) as próprias tensões normal σ_z e de cisalhamento τ_z agentes sobre o plano de escoamento.
- f) o ângulo ψ que os planos de escoamento formam com a direção principal σ_2 .

Assim as direções principais τ_1 e τ_2 ficam perfeitamente definidas e, podem ser traçadas na raiz do cavaco (fig. 15) bem como os planos de escoamento 1 e 2 que formam o ângulo $\pm \psi$ com a direção τ_2 . Então, pela figura 15 vem:

$$\phi + (\pi/2 - \psi) + (\omega - \gamma) = \pi/2 \quad (33)$$

ou

$$\phi = \psi + \gamma - \omega \quad (34)$$

mas, pela figura 14

$$\operatorname{tg} 2 \omega = \frac{\tau_s - 2 \tau_s}{\tau_s/2 \tau_s} = 2 \mu \quad (35)$$

$$2 \omega = \operatorname{arc} \operatorname{tg} 2 \mu \quad (36)$$

$$\omega = \frac{1}{2} = \operatorname{arc} \operatorname{tg} 2 \mu$$

-Então:

$$\phi = \psi + \gamma - \frac{1}{2} \operatorname{arc} \operatorname{tg} 2 \mu \quad (37)$$

Como se vê o ângulo de cisalhamento depende do material, usinado, através da envoltória de Mohr, da qual é função o ângulo ψ , do ângulo de saída γ e do coeficiente de atrito μ obtido pela expressão:

$$\mu = P_t/P_n \quad (38)$$

Com uma boa aproximação a envoltória de Mohr, relativa ao escoamento de vários aços dútios, é uma reta paralela ao eixo das abscissas (τ), de modo que $\psi \cong 42$ a 45° . Então:

$$\phi \cong 45^\circ = \gamma - \frac{1}{2} \operatorname{arc} \operatorname{tg} 2 \mu \quad (39)$$

3.2 - Relação de Corte (r_c)

Este nome é uma tradução literal da anotação americana "cutting ratio" e equivale ao inverso do fator de recalque que é mais usado na Europa.

Seu valor (18) equivale à relação entre a espessura do cavaco antes de sair da peça (h) e sua espessura depois de sair da peça (h').

$$r_c = h/h' \quad (40)$$

É importante o conhecimento do valor r_c porque permitirá o cálculo do ângulo de cisalhamento (04) através da expressão facilmente deduzível, da figura 12.

$$\operatorname{tg} \phi_n = \frac{r_c \cos \gamma_n}{1 - r_c \operatorname{sen} \gamma_n} \quad (41)$$

Tal ângulo, como será visto posteriormente, será necessário para os cálculos de área de cisalhamento, força de cisalhamento, tensão de cisalhamento e outros.

3.3 - Curvatura do cavaco

Segundo Cook (07), no passado pensava-se que o curvamento do cavaco era uma consequência de outras coisas como por exemplo, cratera na superfície de saída e gume postigo. Em seu paper "The Mechanism of Chip Curl and its Impor-

tanse in Metal Cutting" (07), diz que a importância da curvatura do cavaco está principalmente ligada às seguintes áreas: mecanismo de cisalhamento, formação de cavaco descontínuo formação de gume postiço, desgaste da ferramenta, temperatura do corte e acabamento superficial.

As observações que puderam ser feitas neste trabalho de Cook levaram aos seguintes resultados (08):

1º) O raio de curvatura inicial depende do material da peça, espessura de corte, ângulo de saída e velocidade.

2º) O raio de curvatura inicial decresce com adiminuição do coeficiente de fricção entre o cavaco e a ferramenta com o aumento do ângulo de saída, com o decréscimo da profundidade de corte.

3º) Se a velocidade de corte fôr suficientemente grande para fazer com que a temperatura atinja a temperatura de recristalização do material o cavaco não curva. Assim a curvatura do cavaco deve estar estreitamente ligada com o encruamento do material.

Ponkshe (09), em seu paper "A New Explanation of the Phenomenon of chip Curling During Machining", diz que no caso da usinagem de materiais que fornecem cavaco contínuo o quebra-cavaco assume uma importância bastante grande. Um adequado posicionamento e dimensionamento do quebra-cavaco, bem como para um melhor projeto das ferramentas serão grandemente auxiliados pelo perfeito conhecimento de como o cavaco curva.

Depois de uma completa análise da deformação do cavaco em sua zona de formação, baseado no estudo das linhas de escorregamento do material, Ponkshe chegou às seguintes conclusões:

1º) O cavaco não nasce curvo na zona de cisalhamento, nem seu contato com a ferramenta é fricção pura.

2º) Em altas velocidades de corte, bem como durante o corte com ângulos de saída muito grandes, verifica-se um leve aumento na relação entre o comprimento de contato da zona de aderência (L_{ad}) entre cavaco e ferramenta e o comprimento total (L_t) (figura 11) que é associado com o decréscimo da resistência ao cisalhamento (variável devido ao encruamento do

material) no ponto final (B) da zona de aderência.

Ponkshe provou matematicamente que este fato provoca o surgimento de um cavaco reto.

3º) Durante operações de acabamento, quando a profundidade de corte é pequena, obtêm-se um cavaco curvado devido a um decréscimo na relação L_{ad}/L_t .

4º) Na usinagem com lubrificante ou refrigerante, obtêm-se, usualmente, um cavaco bastante enrolado devido a um considerável decréscimo na relação L_{ad}/L_t .

3.4 - Acabamento Superficial

Como foi citado anteriormente, um dos elementos fundamentais na avaliação da usinabilidade dos materiais é o acabamento superficial, pois, em condições idênticas de usinagem, dois materiais diferentes apresentam diferentes graus de rugosidade superficial.

Há uma série de fatores (avanço, raio de curvatura e ângulos de ferramenta, velocidade, lubrificação, vibrações, etc.) que influenciam o acabamento superficial de uma peça. Falando em termos de corte ortogonal, pode-se dizer que a variável mais importante neste caso é a velocidade de corte pois, com baixas velocidades e trabalhando a seco forma-se um "gume postiço" que periodicamente, se desprendendo da ferramenta e grudando-se parte no cavaco e parte na superfície usinada da peça, causa um péssimo acabamento superficial.

3.5 - Pressão específica de corte

3.5.1 - INTRODUÇÃO

Por definição, pressão específica de corte (k_g) é a relação entre a força principal de corte (P_c) e a área da seção de corte (s).

$$k_g = \frac{P_c}{s} \quad (45)$$

Ferraresi (06) faz uma apresentação completa de todos os elementos que influenciam a variação da pressão específica de corte, da qual pode-se destacar o seguinte:

a) O aumento da percentagem de carbono do material da peça acarreta um aumento na pressão específica de corte.

b) O aumento da seção de corte provoca uma diminuição na pressão específica de corte.

d) Entre a tensão de cisalhamento na ruptura do material τ_r , o fator de recalque R_C e a pressão específica de corte k_s existe a relação aproximada:

$$k_s \approx k \cdot \tau_r \cdot R_C \quad (46)$$

onde k é uma constante.

e) É pequena a influência da variação da velocidade de corte sobre a pressão específica de corte.

3.5.2 - Cálculo de k_s

Vários pesquisadores propuseram fórmulas analiticamente, relacionando pressão específica de corte com as diversas grandezas que a influenciam. Baseando-se nas observações feitas anteriormente pode-se verificar que, para um par ferramenta-peça, já que a velocidade tem pouca influência sobre a pressão específica de corte, esta varia apenas em função da área de corte.

Assim, Kienzle (06) em 1951 apresentou uma fórmula que permite calcular k_s em função da espessura de corte h .

$$k_s = \frac{k_{s1}}{h^z} \quad (42)$$

onde: k_{s1} = constante específica do metal para uma seção de corte de 1 mm de espessura por 1 mm de largura.

z = expoente constante.

$$\text{Então: } \log k_s = \log k_{s1} - z \log h \quad (43)$$

Dessa forma a representação gráfica desta equação em coordenadas logarítmicas nos dará uma reta da forma.

$$Y = C + m x \quad (44)$$

O cálculo da força principal de corte poderá ser feita pela expressão:

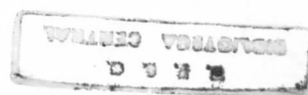
$$P_c = k_s h \cdot b = k_{s1} h^{1-z} b \quad (47)$$

Esta equação confirma os ensaios experimentais, nos quais verificou-se que, para uma espessura de corte h constante, e para a relação $p/a > 4$ tem-se P_c diretamente proporcional a b .

Kienzle verificou ainda que a pressão específica de corte é praticamente independente do ângulo de posição principal (desde que mantido entre os limites de 30 a 75°) para uma relação p/a mantida superior a 4.

Kienzle sugere ainda que a cada aumento ou diminuição de 1° no ângulo de saída da ferramenta corresponda uma diminuição ou aumento de 1 a 2% na pressão específica de corte.

Os valores de k_{s1} e z deverão ser obtidos experimentalmente.



CAPÍTULO 4 - EXPERIÊNCIAS E MEDIDAS

4.1 - Experiências

Para maior economia de tempo e material, procurou-se medir o maior número possível de elementos em cada operação de usinagem. Assim, os corpos de prova em forma de tubo foram preparados previamente num tórno qualquer, deixando-se uma sobremedida de usinagem externa e internamente para que, após a montagem da peça na placa do tórno de ensaio, fôssem dados passes de acabamento e houvesse garantia de centragem para maior estabilidade das fôrças.

Os elementos medidos durante cada usinagem foram os seguintes:

1º) Fôrças de corte.

2º) Área da marca de contato entre ferramenta e cavaco.

Além disso, simultâneamente, era retirado um cavaco correspondente a uma revolução completa da peça. Isto se conseguiu, fazendo, com uma serra manual, um rasgo na parede do tubo. Após se conseguir uma quantidade suficiente de cavacos, passava-se à etapa de retirada de amostras para medir curvatura do cavaco. Eram executados então vários rasgos longitudinais no tubo, obtendo-se, assim, cavacos com curvatura natural, isto é, sem interferência, pois os rasgos eram distanciados de tal maneira que os cavacos caíam antes de tocar em qualquer coisa. As amostras, após retiradas, eram cuidadosamente guardadas em envelopes identificados com as condições de corte, ou número do ponto que estava sendo levantado.

Após terminados todos os testes para um material, eram feitas as medidas de comprimento e curvatura de cavaco, conforme será mostrado adiante.

Para que houvesse garantia de que as condições eram realmente idênticas, na obtenção de corpos de prova para medir rugosidade, deixou-se este teste para o final, fazendo-o para os diversos materiais.

Em qualquer dos testes citados acima, após cada usinagem, a ferramenta era retirada do dinamômetro, para que a marca de contato pudesse ser medida, e, antes de remontá-la

era feita uma reafiação manual, com pedra de assentar o fio de corte, na superfície de incidência, removendo-se, logo após, toda marca da superfície de saída.

Com finalidade de abranger uma boa gama de condições foram utilizados os três tipos fundamentais de ferramentas (ortogonal, oblíqua e múltipla) e as mais variadas condições, inclusive utilizando quatro tipos diferentes de óleos de corte que foram os seguintes:

- 1º) Óleo solúvel misturado com água na proporção de 30:1
- 2º) Óleo solúvel puro.
- 3º) Óleo comum de máquina com adição de enxôfre.
- 4º) Tetra cloreto de carbono (CCl₄).

4.2 - Medidas

4.2.1 - Área de contato ferramenta-cavaco

O cavaco, ao ser removido da peça, escorrega sobre a superfície de saída deixando depositado sobre ela uma certa quantidade de material sob forma de uma marca brilhante. Tal marca só aparece na região onde houve realmente contato entre cavaco e ferramenta.

Quando as primeiras experiências foram feitas, não foi tão fácil identificar com clareza tal área de contato. Depois de analisar com cuidado o problema, verificou-se que uma boa imagem da marca era obtida iluminando-se adequadamente, segundo uma direção perpendicular às raias deixadas pela afiação e inclinada em relação a superfície de saída. Outro fator que facilita a visualizar-se com maior nitidez a marca é afiar a superfície de saída de tal maneira que o movimento de saída do cavaco se dê numa direção aproximadamente perpendicular às raias deixadas pelo rebôlo.

Nas figuras 16 e 17 podem ser vistas duas ferramentas. A primeira, onde o problema de visibilidade da marca é sério e a outra bastante nítida, pois foram tomadas as precauções acima.

No alumínio, raras foram as vezes em que se pode distinguir a zona de aderência.

Como pode ser visto na figura 17 o final da área de contato ferramenta-cavaco não é uma linha reta, mas se apresenta bastante irregular. Dessa forma, para medir tal área com precisão, seria necessário um instrumento especial (planímetro). Cientificamente isto não é problema, no entanto, pensando em termos de aplicação do processo na indústria, a solução não tão precisa, porém mais viável será adotar uma linha média como final da marca, de tal maneira que haja uma compensação de áreas (figura 18).

A medida do comprimento também pode ser feita com auxílio de uma projetor de perfis ou no microscópio utilizado para a medida de dureza, instrumentos estes bastantes encontrados nas indústrias, principalmente o último. De qualquer forma, caso a indústria não possua nenhum desses aparelhos, poderá construir um dispositivo, não tão preciso, porém bastante simples conforme mostra a figura 19. Nêle a ferramenta é colocada entre duas guias tendo que ser encostado no palpador de um micrômetro de relógio com possibilidade de leitura mínima de 0,01 mm e referido a um fino fio de aço prêso transversalmente sôbre as guias encimando a ferramenta, cuja extremidade posterior encosta em um parafuso com cabeça recartilhada e passo de 1 mm que irá movê-la até que o fio de referência atinja o ponto final da marca no micrômetro de relógio. Para aumentar a precisão do processo pode se checar o ponto em que as áreas se compensam com auxílio de uma lupa de 5 aumentos.

No caso do corte ortogonal não há necessidade de se medir a largura (c) da marca pois fica praticamente igual à largura de peça (espessura da parede do tubo, no caso $b = 5$ mm).

Baseado neste princípio outros dispositivos poderão ser projetados para medir áreas de contato no caso do corte oblíquo e múltiplo.

As medidas realizadas neste trabalho foram feitas tôdas no projetor de perfis citado na relação dos equipamentos. No projetor, bem como no microscópio há a vantagem de se poder ampliar a ferramenta fazendo com que o êrro da medida seja bastante reduzido.

Outro problema que se apresenta quando da medida da marca de contato é a sua variação com o tempo de atuação da ferramenta. Depois de uma série de experiências, em que a variável era o tempo, conseguiu-se traçar um gráfico (figura 20) de comprimento da marca de contato contra o tempo, verificando-se que, para o caso das condições abaixo, o tempo mínimo de atuação da ferramenta deve ser de 10 segundos.

Condições:

$$\gamma_n = 30^\circ$$

$$\alpha_n = 8^\circ$$

$$h = 0.145 \text{ mm}$$

$$n = 135 \text{ rpm}$$

Material: Aço ABNT 1010

$$Dex = 100 \text{ mm}$$

$$b = 3 \text{ mm}$$

Os resultados experimentais podem ser encontrados na tabela 1 do apêndice.

Na realidade tem que se transformar estes 10 segundos em comprimento linear de atuação da ferramenta (número total de rotações, durante estes 10 segundos vezes o comprimento da circunferência da peça) já que este varia com a velocidade de corte.

Nota-se que deixando a ferramenta, neste caso, atuar mais de dez segundos o valor de L_t permanece inalterado.

4.2.2 - Relação de corte

Para medir a relação de corte existem vários métodos. Os principais são:

4.2.2.1 - Medir diretamente a espessura do cavaco com auxílio de um micrômetro com pontas finas ou esféricas, calculando facilmente a relação de corte pela expressão (25).

4.2.2.2 - Calcular a velocidade de saída do cavaco, medindo um comprimento de cavaco num tempo determinado e obtendo a relação de corte pela expressão:

$$V_c = V \times r_c \quad (48)$$

4.2.2.3 - Medindo um comprimento qualquer de cavaco, pesando-o logo após. A relação de corte será dada por:

$$r_c = \frac{a \cdot p \cdot \rho \cdot L'}{m} \quad (49)$$

onde:

- a = avanço (mm/rot)
- p = profundidade de corte (mm)
- ρ = peso específico do material (g/mm^3)
- L' = comprimento do cavaco (mm)
- m = peso do cavaco (gramas).

No presente trabalho foi adotado o segundo método já que o primeiro é menos preciso e o último é bastante mais trabalhoso, segundo experiências já realizadas num trabalho anterior. (18)

Na realidade não foi adotado o segundo método literalmente mas uma variante do mesmo, havendo apenas necessidade de medir o comprimento do cavaco correspondente à uma circunferência completa do tubo ou da peça, de uma maneira geral. A relação de corte obtém-se pela expressão:

$$r_c = \frac{L}{D_m} \quad (50)$$

Onde:

- L = comprimento do cavaco correspondente a uma circunferência completa da peça.
- D_m = diâmetro médio que no caso do tubo é dado por $D_{ex} - b$ e no caso de uma barra é dado por $D_{ex} - p$.

Para medir os comprimentos de cavaco utilizam-se o projetor de perfis, com ampliação de dez vezes, e um curvímetro. (figura 21)

4.2.3 - Curvatura do cavaco

Também aqui foi utilizado o projetor de perfis, normalmente com 20 ou 50 aumentos. De início a curvatura era medida com auxílio de um fio muito pouco extensível e nos raios de curvatura menores com um compasso, comparando-se, o comprimento do fio ou abertura do compasso, com uma escala graduada levando em consideração a ampliação do projetor.

Aperfeiçoando mais o processo, foram desenhadas sobre uma folha de papel vegetal uma série de curvas de raio de curvatura conhecida.

Comparando no projetor de perfil os cavacos, com as curvas do papel (fig. 22) obtinha-se facilmente o valor do diâmetro (CC) de curvatura do cavaco que é o elemento, que aparece nas tabelas de resultados mais adiante.

Quando o cavaco saía com uma força cônica media-se os diâmetros e era tirada uma média.

No caso de corte oblíquo e múltiplo o cavaco não saia enrolado segundo uma espiral plana mas segundo uma hélice.

Neste caso deve-se posicionar o cavaco de tal maneira que o eixo de simetria da hélice fique perpendicular à mesa do projetor. Para maior facilidade deste posicionamento utilizou-se uma porção de massa (tipo massa de vidroceiro, que porém não resseca ao ser deixada ao ar livre) sobre a qual o cavaco era pressionado.

4.2.4 - Rugosidade superficial

De acordo com a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), NB - 93, a avaliação da rugosidade de uma peça é feita pelo desvio médio aritmético, R_a , (mesmo que C.-L.A. "center line average") definido como sendo a média dos valores absolutos das ordenadas do perfil efetivo com relação a linha média, num comprimento de amostragem, e é dado pela expressão (figura 23)

$$R_a = \frac{1}{n} \int_0^l |y| \cdot dx \quad (51)$$

ou aproximadamente:

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (52)$$

O aparelho utilizado para esta medida possui três componentes fundamentais (figura 24): uma mesa sobre a qual é colocada a peça a medir, e que serve de base para o cabeçote de medição; um componente eletrônico para realizar a integração que aparece na expressão (51) e um terceiro que serve de registrador.

Antes de começar a fazer medidas deve-se aferi-lo com um padrão fornecido pelo fabricante.

4.3. - Estimativa dos erros

Para que se possa ter uma idéia do máximo erro que pode afetar os resultados finais basta somar os diversos erros constantes nas medidas parciais quais sejam:

Nos pesos aferidos: desprezável

No comprimento dos braços de alavanda do dispositivo utilizado na aferição: $\pm 3\%$

Na medida das forças no dinamômetro: $\pm 5\%$

Na medida da área de contato ferramenta cavaco: $\pm 5\%$

Dessa forma o máximo erro provável que poderá ocorrer será da ordem de $\pm 13\%$.

CAPÍTULO 5 - ÍNDICE DE USINABILIDADE

Como já foi relatado na introdução (página VII) e segundo Ferraresi (06) a usinabilidade pode ser definida como uma grandeza tecnológica, que expressa por meio de um valor numérico comparativo (índice ou porcentagem) um conjunto de propriedades de usinagem de metal, em relação a outro tomado como padrão. Entende-se como propriedade de usinagem de um metal aquelas que expressam seu efeito sobre grandezas numéricas inerentes ao processo de usinagem dos metais, tais como a vida da ferramenta, a força de usinagem, o acabamento superficial da peça, a temperatura de corte, a produtividade, as características do cavaco.

A usinabilidade não é portanto uma grandeza específica de um dado material, tal como a resistência à tração, o alongamento, o módulo de elasticidade etc.

5.1 - Apresentação e interpretação dos resultados.

5.1.1 - Relação entre as áreas de aderência e de escorregamento.

Analisando a tabela 2 podem ser feitas as seguintes observações:

1º) No caso de alumínio não foi possível encherger o limite entre as duas áreas (aderência e escorregamento) (figura 25).

2º) Existe uma constância de valores, para cada material da relação entre a área de contato por aderência (Aad) e a área de conta por escorregamento (Aes). Assim para os diversos aços temos em média os seguintes valores de Aad/Aes

1010 - 0.69

1020 - 0.87

1035 - 0.63

1045 - 0.82

Os materiais que apresentaram resultados mais constantes são o 1010 e o 1035. Do 1020 não foi possível encherger o final da marca da área de aderência, a não ser no caso da ferramenta múltipla.

5.1.2 - Análise da tensão cisalhante.

Procurando abranger as condições mais variadas possíveis fez-se mais de um elemento variar de ponto para ponto tornando-se difícil a comparação. No entanto analisando as tabelas de resultados em anexo pode ser observado.

19) O valor da tensão cisalhante para o caso do corte ortogonal em alumínio permanece praticamente constante e em torno de 24 kgf/mm^2 , salvo uma ou outra discrepância como o ponto 7 em que ela atinge 32.77 kgf/mm^2 .

O mesmo não acontece com os aços pois os dois pontos com corte ortogonal dão resultados da tensão cisalhante diferentes.

Talvez uma explicação para isto possa ser feita através da variação da pressão específica de corte com os diversos elementos já analisados anteriormente. Reforçando esta hipótese pode-se ver através da tabela 3, que aos maiores valores de tensão correspondem os maiores valores de pressão específica de corte.

20) Os valores da tensão cisalhante, no caso do corte oblíquo, só tiveram valores aproximadamente iguais para os aços 1010 (64.53 e 65.63 kgf/mm^2) e 1045 (67.32 e 66.5 kgf/mm^2).

É interessante observar que, apesar das discrepâncias no corte oblíquo para os aços 1010 e 1045 seus valores médios ficaram bastante próximos dos valores obtidos no corte ortogonal. Nos outros dois aços, e no alumínio, o mesmo não aconteceu. (tabela 12).

5.1.3 - Análise da curvatura do cavaco.

Analisando a tabela nº 11 verifica-se que para o corte ortogonal do alumínio.

19) Variando apenas a profundidade de corte a curvatura, varia no mesmo sentido.

20) Variando apenas o ângulo de saída, de início ($\gamma = 5^\circ$) os valores de curvatura são intermediários, passando por um mínimo para $\gamma = 15^\circ$ e crescendo ao infinito no caso da ferramenta de 30° . Este último resultado está de acordo com a ex-

plicação dada por Ponkske (09) e já citada anteriormente (página).

39) Com relação a área de contato total, de uma maneira geral, ela cresce no mesmo sentido do raio de curvatura do cavaco, fazendo excessão apenas a ferramenta com $\gamma = 30^\circ$ que fornece um cavaco reto na maioria das vèzes.

49) Comparando agora os materiais entre si pode-se observar, analisando a tabela 4, que, mantendo as mesmas condições e variando apenas o material, o cavaco curva com um diâmetro cada vez menor na seguinte sequência de materiais: Al, 1010, 1020, 1035 e 1045.

Analisou-se apenas o caso da ferramenta múltipla porque nos outros casos não foram feitas experiências em condições idênticas.

59) No caso do corte ortogonal, para todos os materiais, usinados constatou-se uma correlação entre a curvatura do cavaco e a pressão específica de corte, ou seja, quando a pressão específica aumenta há de maneira geral uma diminuição no raio de curvatura do cavaco.

No caso dos cortes oblíquo e com ferramenta múltipla tal correspondência continua, porém, não tão acentuada. Talvez pelo fato de que o cavaco não curva apenas segundo um plano, em forma espiral quando do corte oblíquo ou múltiplo, mas em hélice, havendo uma distorção no verdadeiro valor da curvatura que provavelmente depende do ângulo de inclinação. Para comprovar isso poderiam ser feitos ensaios em condições idênticas variando apenas o ângulo de inclinação.

69) No que se refere a influência da utilização de óleo lubrificante sôbre a curvatura verifica-se que, para o caso do alumínio (pontos 11, 12, 13, e 14, tabela 11) houve, para condições idênticas, aumenta de 200 a 300% no raio de curvatura quando da utilização dos óleos, havendo paralelamente, diminuição da força de corte e da pressão específica de corte.

No caso dos aços não foram feitas experiências em condições idênticas, variando apenas o lubrificante, daí ser difícil uma análise mais profunda.

5.1.4 - Análise da rugosidade superficial e pressão específica de corte.

Boothroyd (03) analisou o acabamento superficial, dividindo-o em dois grupos.

1º) Aquela que resulta da geometria da ferramenta e do avanço.

2º) A rugosidade "natural" resultante das irregularidades na operação de corte.

Analisar-se-á aqui apenas a rugosidade natural pois é a que está ligada com o índice de usinabilidade do material.

Para que se pudesse ter uma idéia de como o material se comporta, do ponto de vista do acabamento, quando são variados certos elementos, foi feito um levantamento completo, no caso do alumínio com corte ortogonal e oblíquo, e os resultados foram os seguintes:

1º) A dispersão dos valores em certos casos é bastante grande e é necessário aumentar o tamanho da amostra.

2º) No caso de corte ortogonal variando a profundidade de corte, mantidas todas as outras condições constantes a rugosidade variou nos dois sentidos enquanto o avanço crescia. Os melhores valores de profundidade foram os seguintes:

$$\gamma = 5^\circ; h = 0.351 \text{ mm}; R_a = 0.38 \text{ m}$$

$$\gamma = 15^\circ; h = 0.513 \text{ mm}; R_a = 0.62 \text{ m}$$

$$\gamma = 30^\circ; h = 0.351 \text{ mm}; R_a = 0.21 \text{ m}$$

No caso de corte oblíquo a rugosidade varia exatamente no mesmo sentido do avanço como pode ser constatado na tabela 5.

3º) Há uma melhoria bastante sensível do acabamento no caso de uso de terracloreto de carbono. Tal melhoria está em torno de 500% tanto no corte ortogonal como no corte oblíquo do alumínio, conforme pode ser visto pelos resultados da tabela 6.

Nota-se que a velocidade foi escolhida bastante baixa (6m/min).

4º) O correlacionamento com a curvatura do cavaco não obedeceu nenhuma ordem a não ser no caso de corte oblíquo em

que aproximadamente a rugosidade decresceu com o decréscimo do raio de curvatura.(tabela 12).

De qualquer forma, em média pode-se observar que as melhores condições do ponto de vista de acabamento, no caso de alumínio foram para ângulo de saída de 30° e curvatura do cavaco infinita (cavaco reto).(tabela 11 pontos 8 e 9).

59) Para comparar os diversos materiais entre si foi feito um teste que não consta na tabela geral e cujas condições, mantidas constantes para cada material, foram as seguintes:

$$\gamma_n = 20^{\circ}$$

$$\alpha_n = 8^{\circ}$$

Corte ortogonal

$$h = 0.145 \text{ mm}$$

$$v = 56 \text{ m/min}$$

$$b = 5 \text{ mm}$$

Corte a seco

Os resultados desta experiência constam da tabela 7, podendo-se verificar que a rugosidade cresce quando os materiais são ordenados na seguinte sequência: Al, 1010, 1020, 1035 e 1045.

Os aspectos geométricos das superfícies dos diversos materiais podem ser vistos nos gráficos que acompanham a tabela 7, traçados pelo rugosímetro.

É evidente que tais gráficos não podem representar de uma maneira absoluta o aspecto geral da superfície já que são apenas uma amostra correspondente a 5 mm da superfície, mas podem dar uma idéia aproximada do acabamento e principalmente pode-se ter uma idéia, em termos relativos, da diferença de rugosidade entre os diversos materiais.

69) Com o aumento da velocidade houve uma sensível melhora no acabamento superficial (Alumínio - ortogonal) conforme pode ser visto na tabela 8.

Este comportamento se prende ao fato de que em baixas velocidades há formação do "gume postiço" que provoca um mau acabamento na peça.

Para se comparar os diversos materiais utilizados, do ponto de vista da pressão específica de corte faz-se uma ex

periência em condições idênticas obtendo-se os resultados apresentados na tabela 9. Como se pode ver a pressão específica cresce com os materiais colocados na seguinte ordem: Al, 1010, 1020, 1035, 1045.

5.1.5 Análise da área total de contato ferramenta cavaco

Após medir a área da marca de contato total da ferramenta cavaco, verificou-se que

19) A variação da área de contato é diretamente proporcional à força de corte segundo uma correlação linear, para todos os materiais ensaiados, sejam quais forem as condições de usinagem (figura 26 a 30).

20) A inclinação da reta depende do material e cresce ordenando os materiais na seguinte sequência: Al, 1010, 1020, 1035, 1045 (figura 31).

39) Teóricamente tais retas deveriam partir do ponto zero porém não o fazem provavelmente por causa da existência das forças de gume que não contribuem para aumentar a área da marca porém contribuem para aumentar a força de corte. O valor destas forças de gume, que aparecem pelo fato da ferramenta não ser perfeitamente afiada, mas sempre existir um raio de arredondamento do gume, pode ser determinado medindo a força de corte para diferentes profundidades de corte e, por extrapolação, determinar graficamente o valor da força residual (força do gume) para uma profundidade de corte igual a zero.

40) Quando a utilização de óleo lubrificante ou refrigerante, normalmente a área de contato diminui. A explicação disso talvez possa ser dada pelo fato de que nestes casos pelo menos para o aço o raio de curvatura do cavaco diminui havendo então um menor comprimento de contato ferramenta-cavaco. Fazendo uma experiência em condições idênticas, primeiro a seco, depois com CCl_4 obteve-se os resultados que aparecem na tabela 10.

1º) Existe uma correlação linear entre a área de contato total ferramenta-cavaco (AT) e a força principal de corte (P_c), independentemente das condições de corte.

2º) A relação A_{ad}/A_{es} se mantém aproximadamente constante para um mesmo material.

3º) O ângulo de inclinação das retas que correlacionam força de corte com área de contato total entre ferramenta e cavaco pode ser adotado como um índice de usinabilidade dos materiais porque:

a) Cresce no sentido inverso da qualidade do acabamento superficial.

b) Cresce no mesmo sentido da pressão específica de corte.

c) Pode-se fazer uma estimativa relativa de vida da ferramenta, pois, quanto maior a inclinação, menor será a área de contato entre peça e ferramenta, para uma mesma força e, conseqüentemente, as pressões sobre a superfície de saída irão aumentar além de se concentrarem mais próximas do gume, provocando um maior aquecimento nesta região e, conseqüentemente, maior desgaste.

4º) De posse de um "mapa de usinagem" há possibilidade de se determinar a força de corte (fundamental no cálculo da potência) apenas medindo a área de contato ferramenta-cavaco dispensando totalmente o uso de dinamômetro.

5º) Observando apenas a intensidade com que o cavaco curva, ao ser extraído da peça segundo condições diferentes, pode-se determinar as condições ótimas, do ponto de vista do rendimento do processo de usinagem (k_s), do acabamento superficial e da vida da ferramenta, já que, de uma maneira geral a pressão específica de corte cresce quando o raio de curvatura do cavaco diminui e o acabamento superficial melhora sensivelmente quando os cavacos saem retos (ver pontos 7, 8, 9 e 10 do alumínio com raio de curvatura infinito). Baseado nisto, a curvatura do cavaco também pode ser usada como um índice de usinagem do material sabendo-se então que em condições idênticas de corte, os materiais que apresentarem cavacos menos curvados têm melhor índice de usinabilidade.

69) No caso de ser necessário determinar as melhores condições de corte para um material, pode-se manter constante a área de corte (s) e variar todos os outros elementos (ângulos da ferramenta, velocidade de corte, profundidade, avanço, lubrificação, etc.) e em cada situação medir a área de contato ferramenta-cavaco. Pelo que foi concluído anteriormente, pode-se dizer que a melhor condição será aquela em que tivermos a menor área de contato ferramenta-cavaco, pois a esta corresponderá a menor força e, como a área de corte é constante, a menor pressão específica de corte.

79) As principais vantagens do processo que utiliza a medida da área de contato ferramenta-cavaco, como um meio de estabelecer o índice de usinabilidade dos materiais, são:

a) Dispensa do uso do dinamômetro

b) No estabelecimento das condições ideais de usinagem para um material não há necessidade de fazer cálculo algum, apenas medir a área de contato ferramenta-cavaco (69 conclusão).

c) O tempo e material gastos em um ensaio desta natureza são muito menores do que num teste de vida de ferramenta.

d) Este tipo de ensaio não inutiliza o gume da ferramenta, como é o caso dos ensaios baseados na vida da ferramenta.

e) O correlacionamento marca de contato ferramenta-cavaco independe das condições de corte, ou seja, os pontos sempre se dispõem segundo uma reta.

89) As limitações do processo são as seguintes:

a) Caso não se disponha de um microscópio ou projetor de perfil, a medida deverá ser feita com uma lupa, usando o dispositivo da figura 19, obtendo-se resultados menos precisos.

b) Para certos materiais, como o alumínio, por exemplo é difícil às vezes se distinguir a linha divisória entre as duas zonas (aderência e escorregamento) da área de contato ferramenta-cavaco.

BIBLIOGRAFIA

- 01) Bowker, Albert R. "Engineering Statistics" - Prentice Hall and Englewood Cliffs, New Jersey - 1959.
- 02) Shan S. Kuo "Numerical Methods and Computers" Addison-Wesley, Publishing Company, Inc. - 1965.
- 03) G. Boothroyd "Fundamentals of Metal Machining", p. 20, p. 35, Edward Arnold Ltd., London, 1965.
- 04) E. J. A. Armarego and R. H. Brown "The Machining of Metals", ps. 40, 65, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey - 1969.
- 05) Kronenberg "Grundzüge der Zerspannungslehre", p. 27 - Springer Verlag - 1954.
- 06) Dino Ferraresi "Fundamentos da Usinagem dos Metais", p. 111, Edgard Blücher Ltda., São Paulo, SP, Brasil - 1970
- 07) N. E. Cook "The Mechanism of Chip Curl and Its Importance in Metal Cutting", Journal of Engineering for Industry, p. 374 trans. ASME, November - 1963.
- 08) Nathan E. Cook "Manufacturing Analysis", p. 56 a 59, Addison Wesley Publishing Company Inc., USA - 1966.
- 09) G. R. Ponkske "A New Explanation of the Phenomenon of Chip Curling During Machining", Journal of Engineering for Industry, Trans. ASME, Maio 1967.
- 10) R. H. Brown, H. S. Tao "Machinability Testing for the Production Workshop", Factory and Plant, Dezembro 1965
- 11) M. K. Das S.A. Tobias "Statistical Basis of the Universal Machinability Chart", publicação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Birmingham, Inglaterra.
- 12) Amitabha Bhattacharyya "On the Friction Process in Metal Cutting", Calcutta, India.
- 13) T. C. Hsu "A Study of the Normal and Shear Stresses on a Cutting Tool", Journal of Engineering for Industry, página 51 a 64, Fevereiro de 1966.
- 14) Zorev, N. N., "Interrelation between shear processes occurring along tool face and on shear plane in Metal Cutting", International Research in Production Engineering p. 42 - Pittsburg 1963.

- 15) Zorev N. N. "Metal Cutting Mechanics", p. 15 a 19, (Tradução do original russo). Oxford. Pergamon Press. 1966.
- 16) S.A. Tobias e F. Koenigsberger, "Machine Tool Design and Research", Pergamon Press, Manchester, 1965.
- 17) Milton C. Shaw, "Metal Cutting Principles", The M.I.T. Press, Massachusetts, USA., 1968.
- 18) A. C. Ferreira, "Determinação Experimental do Fator de Recalque" Publicação do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1971.

APÊNDICE

PROGRAMAS FORTRAN

TABELAS

FIGURAS

```

*LIST SOURCE PROGRAM
*IOCS(CARD,1132PRINTER,TYPEWRITER)
C
C      PROGRAMA PARA CALCULAR TAMANHO DE AMOSTRA
C
      DIMENSION X(100),TIT(20)
10  READ(2,1010)N
      IF(N)30,30,20
20  WRITE(1,2000)
      READ(2,3000)(TIT(I),I=1,20)
      WRITE(1,3010)(TIT(I),I=1,20)
      XI=0
      YI=0
      READ(2,1020)(X(I),I=1,N)
      WRITE(1,2010)(X(I),I=1,N)
      DO 100 I=1,N
        XI=XI+X(I)
100  YI=YI+X(I)**2
        ZI=XI**2
C      CALCULO DA MEDIA
        XM=XI/FLOAT(N)
C      CALCULO DO DESVIO PADRAO
        XD=SQRT((YI-FLOAT(N)*XM**2)/FLOAT(N))
C      CALCULO DO TAMANHO DA AMOSTRA
        XN=((1.96*XD)/(0.05*XM))**2
C      WRITE(1,2020)XM,XD,XN
C      FORMATOS
1010  FORMAT(I2)
1020  FORMAT(10F4,2)
2000  FORMAT(11X,'CALCULO DO TAMANHO DA AMOSTRA'///
211X,'NIVEL DE SIGNIFICANCIA - 95 PORCENTO'//,11X,
212X,'ERRO BILATERAL - 5 PORCENTO'///,26X,'DADOS'///)
2010  FORMAT(10X,5F8,3)
2020  FORMAT(///,28X,'MEDIA'///,25X,F9.4///,25X,
2021X,'DESVIO PADRAO'///,25X,F9.4///,25X,
2022X,'TAMANHO DA AMOSTRA'///,25X,F9.4)
3000  FORMAT(20A4)
3010  FORMAT(11X,10A4,/,11X,10A4,/)
      PAUSE
      GO TO 10
20  CALL EXIT
      END

```

CALCULO DO TAMANHO DA AMOSTRA

NIVEL DE SIGNIFICANCIA - 95 PORCENTO
ERRO BILATERAL - 5 PORCENTO

DADOS

DIAMETRO DE CURVATURA DO CAVACO

9.050	7.900	8.550	9.400	9.700
8.700	8.050	8.050	8.550	8.050
8.000	8.250	8.750	8.100	8.450
8.500	8.350	8.350	8.100	8.050
8.650	7.850	8.550	8.050	7.500
8.450	8.950	8.700	8.450	8.700
8.600	8.050	8.300	8.400	8.950
8.000	8.100	8.400	8.450	8.750
8.900	8.150	9.050	8.750	8.600
	8.750	8.900	8.600	8.300

MEDIA

8.5639

DESVIO PADRAO

0.5124

TAMANHO DA AMOSTRA

5.5030



CALCULO DO TAMANHO DA AMOSTRA

NIVEL DE SIGNIFICANCIA - 95 PORCENTO
 ERRO BILATERAL - 5 PORCENTO

DADOS

RUGOSIDADE

1.650	1.700	1.700	1.630	1.700
1.520	1.550	1.700	1.650	1.550
1.500	1.500	1.350	1.450	1.550
1.570	1.700	1.500	1.700	1.650
1.500	1.400	1.550	1.700	1.500
1.700	1.500	1.600	1.600	1.450
1.620	1.700	1.400	1.400	1.580
1.700	1.550	1.620	1.650	1.400
1.500	1.400	1.400	1.700	1.400
1.650	1.600	1.550	1.620	1.700

MEDIA

1.5695

DESVIO PADRAO

0.1059

TAMANHO DA AMOSTRA

7.0009

CALCULO DO TAMANHO DA AMOSTRA

NIVEL DE SIGNIFICANCIA - 95 PORCENTO
ERRO BILATERAL - 5 PORCENTO

DADOS

FORCA PRINCIPAL DE CORTE - PC

23.000	21.000	21.000	23.000	22.000
21.000	22.000	22.000	22.000	23.000
21.000	23.000	20.000	21.000	24.000
18.000	19.000	19.000	21.000	20.000
20.000	22.000	19.000	20.000	18.000
22.000	22.000	21.000	19.000	20.000
22.000	21.000	22.000	21.000	23.000
21.000	20.000	20.000	21.000	21.000
18.000	25.000	20.000	17.000	21.000
21.000	20.000	22.000	21.000	24.000

MEDIA

21.0000

DESVIO PADRAO

1.6248

TAMANHO DA AMOSTRA

9.1989

CALCULO DO TAMANHO DA AMOSTRA

NIVEL DE SIGNIFICANCIA - 95 PORCENTO
ERRO BILATERAL - 5 PORCENTO

DADOS

COMPRIMENTO DE CONTATO FERRAMENTA CAVACO
(ZONA DE ADERENCIA)

0.920	0.840	0.870	0.930	0.930
0.950	0.920	0.910	0.890	0.890
0.900	0.890	0.950	0.900	0.900
0.900	0.930	0.930	0.700	0.930
0.910	0.930	0.880	0.890	0.870
0.900	0.800	0.910	0.950	0.890
0.910	0.900	0.920	0.980	0.930
0.900	0.930	0.920	1.000	0.910
0.930	0.920	0.880	0.900	0.900
0.920	0.890	0.900	0.920	0.920

MEDIA

0.9057

DESVIO PADRAO

0.0426

TAMANHO DA AMOSTRA

3.4059

CALCULO DO TAMANHO DA AMOSTRA

NIVEL DE SIGNIFICANCIA - 95 PORCENTO
ERRO BILATERAL - 5 PORCENTO

DADOS

COMPRIMENTO DO CAVACO

129.000	123.000	129.000	125.000	120.000
127.000	129.000	129.000	111.000	115.000
130.000	128.000	131.000	124.000	115.000
127.000	119.000	114.000	120.000	116.000
117.000	121.000	126.000	120.000	117.000
118.000	124.000	115.000	126.000	126.000
110.000	125.000	130.000	111.000	129.000
121.000	118.000	131.000	120.000	125.000
122.000	115.000	120.000	120.000	126.000
122.000	128.000	132.000	125.000	118.000

MEDIA

122.3800

DESVIO PADRAO

5.7860

TAMANHO DA AMOSTRA

3.4348

CALCULO DO TAMANHO DA AMOSTRA

NIVEL DE SIGNIFICANCIA - 95 PORCENTO
ERRO BILATERAL - 5 PORCENTO

DADOS

COMPRIMENTO DE CONTATO FERRAMENTA CAVACO
(ZONA DE ESCORREGAMENTO)

2.000	1.950	1.970	2.050	2.200
2.200	2.210	2.220	2.220	2.180
2.200	2.150	2.190	2.180	2.200
1.180	2.220	2.190	2.220	2.250
2.220	2.170	2.170	2.170	2.210
2.130	2.190	2.170	2.200	2.160
2.180	2.200	2.180	2.210	2.220
2.220	2.220	2.180	2.210	2.230
2.200	2.220	2.220	2.230	2.230
2.240	2.200	2.220	2.210	2.200

MEDIA

2.1637

DESVIO PADRAO

0.1536

TAMANHO DA AMOSTRA

7.7459

```

*LIST SOURCE PROGRAM
*IOCS(CARD,1132 PRINTER,DISK,TYPEWRITER)
*EXTENDED PRECISION
*ONE WORD INTEGERS
C
C      PROGRAMA - METODO DOS MINIMOS QUADRADOS
DIMENSION X(40),Y(40),C(10),TIT(30),B(300)
A(XX)=C6*XX**5+C5*XX**4+C4*XX**3+C3*XX**2+C2*XX+C1
10 READ(2,2010)N
   IF(N)260,200,100
100 READ(2,2040)M
   READ(2,4000)(TIT(I),I=1,26)
   READ(2,2020)(X(I),I=1,N)
   READ(2,2030)(Y(I),I=1,N)
   CALL APOL(Y,X,M,N,C)
   WRITE(1,3000)
   WRITE(1,4010)(TIT(I),I=1,20)
   WRITE(1,3015)
   WRITE(1,3020)(X(I),Y(I),I=1,N)
   MC=M+1
   WRITE(1,3030)(C(I),I=1,MC)
   WRITE(3,21)
21  FORMAT('1 PARA CALCULAR VALORES DO POLINOMIO'
1  '1 LEVANTAR A CHAVE - 2')
   PAUSE
   CALL DATSW(2,L)
   GO TO (18,10),L
18  C1=C(1)
   C2=C(2)
   C3=C(3)
   C4=C(4)
   C5=C(5)
   C6=C(6)
   GO TO(1,2,3,4,5),M
1  C3=0.
2  C4=0.
3  C5=0.
4  C6=0.
5  WRITE(1,555)(TIT(I),I=21,26)
   XX=1.
   DO 50 II=1,200
   B(II)=A(XX)
   WRITE(1,3020)XX,B(II)
50  XX=XX+0.5
   PAUSE
   GO TO 10
555 FORMAT(///14X,3A4,5X,3A4,///)
2010 FORMAT(12)
2020 FORMAT(10F6.4)
2030 FORMAT(10F6.2)
2040 FORMAT(11)
3000 FORMAT(//,10X,'METODO DOS MINIMOS QUADRADOS',////)
3015 FORMAT(///,21X,'DADOS',///,10X,'VALORES DE X',
24X,'VALORES DE Y',///)
3020 FORMAT(13X,F7.3,10X,F7.3)
3030 FORMAT(///// ,20X,'COEFICIENTES',///,6(19X,E14.7,//))

4000 FORMAT(20A4)
4010 FORMAT(10X,10A4/)
200 CALL EXIT
   END

```

METODO DOS MINIMOS QUADRADOS

AFERICAO DO DINAMOMETRO
FORCA PRINCIPAL DE CORTE - PC

DADOS

VALORES DE X	VALORES DE Y
1.000	12.000
3.170	24.000
5.170	36.000
8.170	48.000
11.330	60.000
14.330	72.000
17.330	84.000
20.330	96.000
23.000	108.000
25.170	120.000
28.170	132.000
31.000	144.000
33.170	156.000
35.170	168.000
38.170	180.000
41.000	192.000
43.170	204.000
45.170	216.000
48.170	228.000
51.000	240.000
53.170	252.000
55.170	264.000
58.170	276.000
61.000	288.000
63.170	300.000
65.170	
68.170	
71.000	
73.170	
75.000	
78.000	

COEFICIENTES

0.1532399E 02
0.3743513E 01
-0.1556373E-02

METODO DOS MINIMOS QUADRADOS

AFERICAÇÃO DO DINAMOMETRO
FORÇA DE AVANÇO - PA

DADOS

VALORES DE X VALORES DE Y

1.330	10.000
3.000	20.000
5.000	30.000
8.170	40.000
11.830	50.000
15.670	60.000
19.500	70.000
23.830	80.000
28.000	90.000
32.330	100.000
37.000	110.000
41.000	120.000
45.500	130.000
49.830	140.000
55.330	150.000
59.000	160.000
64.000	170.000
68.330	180.000
73.170	190.000
77.830	200.000
83.500	210.000
88.000	220.000
92.170	230.000
96.830	240.000

COEFICIENTES

0.1487314E 02
0.2761057E 01
-0.4835226E-02

METODO DOS MINIMOS QUADRADOS

AFERICAO DO DINAMOMETRO
FORCA PASSIVA - PP

DADOS

VALORES DE X VALORES DE Y

4.000	10.000
9.330	20.000
13.000	30.000
18.000	40.000
23.000	50.000
28.000	60.000
33.000	70.000
38.170	80.000
43.370	90.000
48.530	100.000
53.730	110.000
58.830	120.000
63.930	130.000
69.030	140.000
74.130	150.000
79.230	160.000
84.330	170.000
89.430	180.000
94.530	190.000

COEFICIENTES

0.1553118E 01
0.2118870E 01
-0.1450321E-02

METODO DOS MINIMOS QUADRADOS

AREA DE CONTATO FERRAMENTA-PECA VERSUS
FORCA DE CORTE (AT X PC) - ALUMINIO

DADOS

VALORES DE X VALORES DE Y

5.000	63.700
8.500	117.300
11.950	162.500
15.700	201.100
10.580	143.200
16.340	197.200
1.520	40.000
3.580	73.000
7.950	112.000
11.830	155.600
8.300	145.000
7.840	146.900
9.180	133.200
6.650	152.400
6.950	126.200
3.750	53.700
7.650	102.000
9.320	124.500
6.220	100.800
4.440	57.300
13.250	183.500
3.290	54.000
1.990	47.700
8.610	109.400
5.490	72.800
1.400	25.800
4.000	57.300
3.090	35.000
2.400	24.800

COEFICIENTES

0.1681427E 02
0.1223720E 02

METODO DOS MINIMOS QUADRADOS

AREA DE CONTATO FERRAMENTA-PECA VERSUS
FORÇA DE CORTE(AT X PC)- ACO ABNT 1010

DADOS

VALORES DE X VALORES DE Y

10.350	140.100
11.740	186.600
6.280	111.700
6.430	78.300
14.140	214.600
15.280	273.400
7.150	164.600
17.140	250.300

COEFICIENTES

0.1622969E 02
0.1457194E 02

METODO DOS MINIMOS QUADRADOS

AREA DE CONTATO FERRAMENTA-PECA VERSUS
FORCA DE CONTATO(AT X PC)- ACO ABNT 1020

DADOS

VALORES DE X VALORES DE Y

1.860	78.500
9.030	160.700
5.270	124.100
11.060	214.600
2.460	87.100
7.620	175.500
3.860	91.600
10.020	230.000

COEFICIENTES

0.4243176E 02
0.1607358E 02

METODO DOS MINIMOS QUADRADOS

AREA DE CONTATO FERRAMENTA-PECA VERSUS
FORCA DE CORTE(AT X PC)- ACO ABNT 1035

DADOS

VALORES DE X VALORES DE Y

6.380	115.200
5.200	164.200
3.030	76.600
5.700	82.300
9.000	155.600
10.660	273.400
4.640	148.600
12.000	250.700

COEFICIENTES

0.2089083E 02
0.1942189E 02

METODO DOS MINIMOS QUADRADOS

AREA DE CONTATO FERRAMENTA-PECA VERSUS
FORCA DE CONTATO(AT X PC)- ACO ABNT 1045

DADOS

VALORES DE X VALORES DE Y

6.000	113.000
8.060	174.100
3.250	74.700
4.490	92.400
10.000	205.800
8.880	249.200
4.430	140.800
10.560	237.400

COEFICIENTES

0.9434140E 01
0.2176983E 02

METODO DOS MINIMOS QUADRADOS

AREA DE CONTATO (AT) X TEMPO (T)

DADOS

VALORES DE X VALORES DE Y

0:	000	0:	000
1:	000	0:	800
3:	000	1:	000
5:	000	1:	300
8:	000	1:	770
10:	000	2:	270
15:	000	2:	300
30:	000	2:	300

COEFICIENTES

0:	1973846E	00
0:	3136460E	00
-0:	1464734E	-01
0:	2175872E	-03

T	Lt
seg	mm
1	0.80
3	1.00
5	1.30
8	1.77
10	2.27
15	2.30
30	2.30

Tabela 1: Resultados experimentais da variação do comprimento de contato com o tempo de atuação da ferramenta.

Condições:

$$\gamma_n = 30^\circ$$

$$\alpha_n = 8^\circ$$

$$h = 0.145 \text{ mm}$$

$$V = 41 \text{ m/min}$$

Material: ABNT 1010

$$b = 3 \text{ mm}$$

Material	Corte Ortogonal	Corte Obl.	Corte Múltiplo
Al	-	-	-
1010	.723 (1)	.720 (2)	.52 (4)
	.709 (3)	.651 (7)	.57 (5)
			.73 (6)
			.81 (8)
Médias	.72	.69	.66
1020			.82 (4)
			.79 (6)
			.85 (7)
			1.00 (8)
Médias			.87
1035	.758 (1)	.69 (3)	.54 (4)
	.444 (2)	.67 (7)	.42 (5)
			.76 (6)
			.67 (8)
Médias	.60	.68	.60
	1.00 (1)	.52 (3)	1.12 (4)
	1.14 (2)		.53 (5)
			1.11 (6)
			.69 (8)
Médias	1.07	.52	.86

Tabela 2: Valores da relação área de aderência sobre área de escorregamento (Aad/Aes).

Obs.: Como esta correlação não depende das condições de corte deixou-se de especificá-las aqui mas através do número do ponto, tais condições poderão ser obtidas nas tabelas 11, 12 e 13.

V	h	γ	Material	A_0	τ_z	k_s	Ponto
74.6	.093	30°	Al	.463	32.8	86.4	7
74.6	.513	30°		2.565	24.1	60.7	10
19.3	.093	15°	1010	.465	73.3	301.3	1
86.3	.128	30°		.640	52.9	174.5	3
17.3	.069	30°	1020	.345	69.6	227.5	1
17.3	.208	30°		1.040	43.6	154.5	2
19.4	.093	15°	1035	.465	75.6	247.7	1
54.3	.208	30°		1.040	57.4	157.4	2
19.4	.093	15°	1045	.465	75.1	243.0	1
12.3	.208	30°		1.040	60.7	167.4	2
m/min	mm	Graus	Unidades	mm ²	kgf/mm ²	kgf/mm ²	-

Tabela 3: Variação aparente da tensão cisalhante do material (Corte Ortogonal).

Material	Pontos	CC	p	a	v
A1	25	40.6	2	.417	80
1010	8	28.6	3.2	.37	21.3
1020	8	13.3	3.	.37	21.5
1035	8	12.4	3.2	.37	21.4
1045	8	9.4	3.2	.37	21.2
--	-	mm	mm	mm/rot	m/min

Tabela 4: Variação do diâmetro de curvatura (CC) cavaco com o material, corte múltiplo ($\gamma = 15^\circ$; $\chi = 45^\circ$; $\alpha = 8^\circ$)

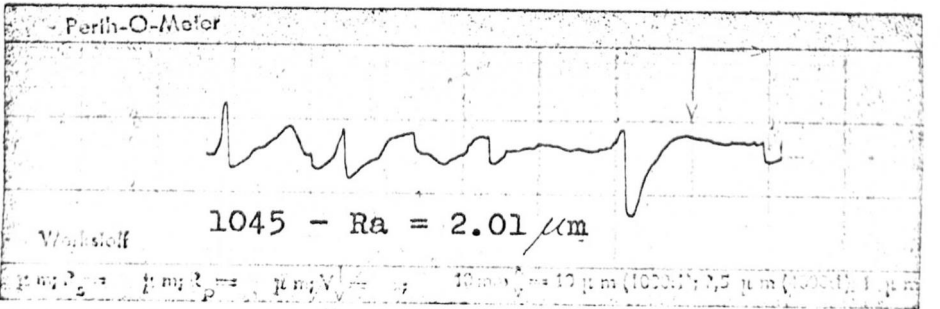
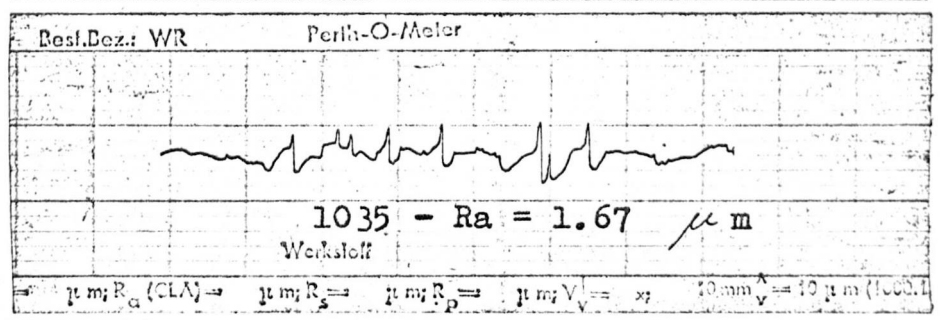
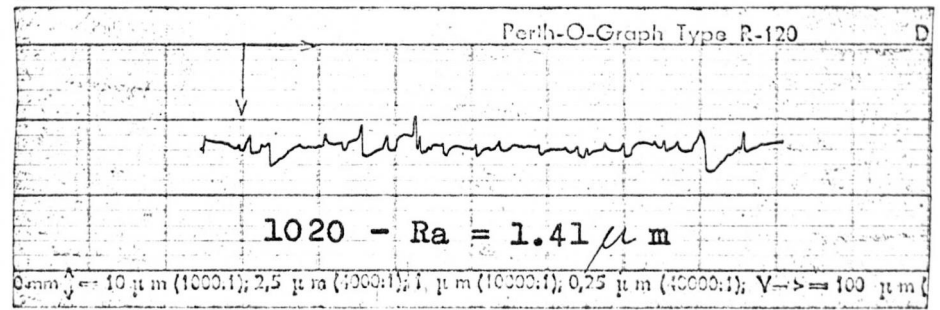
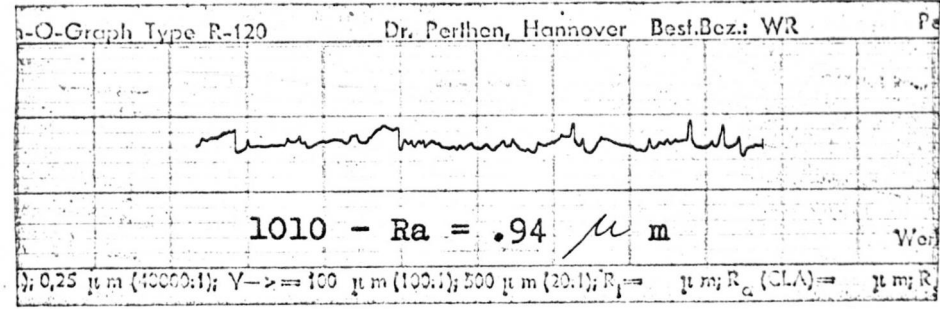
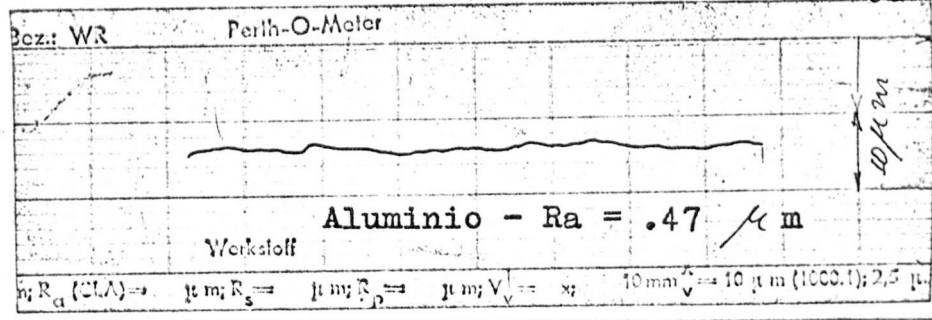
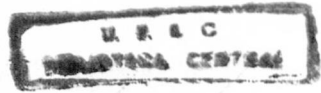


Tabela 7: Variação da rugosidade superficial com o material ($\gamma=20^\circ$; $\alpha=8^\circ$; $h= 0.145$ mm ; $v= 56$ m/min ; $b= 5$ mm ; - Corte ortogonal ; Lubrificação a sêco).



Ponto	h	R _a	γ
20	0.128	0.51	15°
19	0.256	0.80	15°
18	0.417	1.30	30°
21	0.702	1.48	30°
Unidade	mm	μm	Graus

Tabela 5: Variação da rugosidade superficial com o avanço - Al - Corte oblíquo (V = 74.6 m/min).

Ponto	Corte	R _a	Lubrif.	h
14	ort.	3.51	sêco	.351
13	ort.	0.47	CCl ₄	.351
22	obl.	0.47	sêco	.092
23	obl.	0.08	CCl ₄	.092
Unidades		μm		mm

Tabela 6: Variação da Rugosidade com o uso de lubrificante (Al).

$$\gamma = 15^\circ$$

$$V = 6.2 \text{ m}^3/\text{min.}$$

Ponto	V	R _a
14	6.2	3.51
5	74.6	1.39
15	157.5	0.52
Unidade	m/min	μ m

Tabela 8: Variação da rugosidade superficial com a velocidade de corte.

$$\gamma = 15^\circ$$

$$h = .351 \text{ mm}$$

Corte Ortogonal

$$b = 5 \text{ mm}$$

Material : Alumínio

Material	Ks
Al	93.7
1010	105.2
1020	134.8
1035	178.6
1045	195.3
Unidade	kgf/mm ²

$$\gamma = 25^\circ$$

$$h = 0.145 \text{ mm}$$

$$V = 56 \text{ m/min}$$

$$b = 5 \text{ mm}$$

Tabela 9 - Variação da pressão específica de Corte K_s com o material.

Lubrificante	AT	CC
A sôco	10	9.8
CCl ₄	7,15	5
Unidade	mm ²	mm

Tabela 10: Variação do diâmetro de curvatura (CC) do cavaco com o uso de lubrificante (CCl₄).

$$\gamma = 15^\circ \quad \lambda = 20^\circ \quad h = 0.139 \text{ mm} \quad b = 5 \text{ mm}$$

$$V = 9.4 \text{ m/min} \quad \text{ABNT 1010}$$

Material	Lubrific.	Ponto	γ_n	h	s	n	D_m	D_{ex}	V_c	P_c	P_p	AT	r_c	A_{ad}	A_{es}	A_{ad}/A_{es}	f_n	ρ	μ	P_z	A_s	T_z	P_t	P_n	k_s	R_g	CC	Ponto
			Graus	mm	mm ²	rot/min	mm	mm	m/min	kgf	kgf	mm ²	mm	mm ²	mm ²	-	Graus	Graus	-	kgf	mm ²	kgf/mm ²	kgf	kgf	kgf/mm ²	mm	mm	
		1	5°	.0926	.463	180	132	137	74.600	65.1	45.1	5.000	0.250	0.000	0.000	0.0000	14°17'	39°43'	-	51.95	1.876	27.68	50.61	60.90	140.60	0.543	23.70	1
		2	5°	.2080	1.040	180	132	137	74.600	117.4	78.1	8.500	0.310	3.000	5.500	0.5450	17°35'	38°38'	-	88.27	3.442	25.64	87.98	110.12	112.79	0.624	34.30	2
		3	5°	.3510	1.755	180	132	137	74.600	162.5	98.0	11.950	0.370	5.500	6.450	0.8530	20°52'	36°06'	-	116.89	4.927	23.72	112.77	167.00	92.58	0.380	46.30	3
		4	5°	.5130	2.565	180	132	137	74.600	201.1	97.0	15.700	0.440	0.000	0.000	0.0000	24°32'	30°44'	-	142.67	6.177	23.10	114.10	192.00	78.40	0.601	52.80	4
		5	15°	.3510	1.755	180	132	137	74.600	143.2	63.0	10.575	0.396	5.690	4.890	1.1600	23°02'	38°45'	-	107.17	4.485	23.89	97.94	110.77	81.60	1.390	44.83	5
		6	15°	.5130	2.565	180	132	137	74.600	197.8	86.8	16.340	0.412	9.175	7.165	1.2800	21°53'	38°42'	-	150.99	6.881	21.94	135.00	168.48	77.00	0.620	35.25	6
		7	30°	.0926	.463	180	132	137	74.600	40.2	8.7	1.520	0.490	0.600	0.920	0.6500	29°21'	42°11'	-	30.80	0.944	32.77	27.60	30.48	86.40	0.473		7
		8	30°	.2080	1.040	180	132	137	74.600	72.3	12.5	3.580	0.537	0.870	2.710	0.3210	33°09'	39°49'	-	53.64	1.902	28.20	46.96	56.35	70.20	0.263		8
		9	30°	.3510	1.755	180	132	137	74.600	112.0	22.0	7.950	0.5010	0.880	7.070	0.1240	30°04'	41°06'	-	83.89	3.503	23.95	75.00	86.06	63.81	0.206		9
		10	30°	.5130	2.565	180	132	137	74.600	155.8	28.5	11.825	0.5250	0.940	10.89	0.0864	31°39'	40°22'	-	117.68	4.888	24.08	102.64	120.69	60.67	0.687		10
	Óleo Solúvel	11	15°	.3510	1.755	15	132	137	6.217	144.5	47.8	8.300	0.4060	0.000	0.000	0.0000	23°40'	33°19'	-	113.09	4.372	25.87	83.56	127.24	82.62	1.030	18.00	11
	Regal Oil	12	15°	.3510	1.755	15	132	137	6.217	146.9	47.6	7.836	0.4030	0.000	0.000	0.0000	23°30'	32°19'	-	115.81	4.401	26.32	82.60	130.48	83.70	0.404	25.00	12
	CCl ₄	13	15°	.3510	1.755	15	132	137	6.217	121.3	37.6	9.176	0.4220	0.000	0.000	0.0000	24°35'	30°45'	-	107.06	4.218	25.38	70.77	119.11	76.00	0.465	18.83	13
		14	15°	.3510	1.755	15	132	137	5.977	157.7	45.6	6.650	0.4170	0.000	0.000	0.0000	24°18'	32°24'	-	119.04	4.265	27.97	85.74	134.50	87.00	3.510	8.96	14
		15	15°	.3510	1.755	380	132	137	157.502	126.7	42.8	6.950	0.5340	0.390	5.000	0.0780	30°55'	33°41'	-	88.40	3.416	25.88	74.22	111.26	72.00	0.520	8.25	15
		16	15°	.0930	.465	180	132	137	74.600	54.5	26.5	3.745	0.2360	2.025	1.720	1.1770	13°39'	40°55'	-	39.33	1.917	20.52	39.69	45.81	115.52	0.770	17.78	16
		17	15°	.2340	1.170	180	132	137	74.600	102.0	50.0	7.650	0.3520	3.690	3.960	0.9310	20°31'	41°06'	-	78.04	3.338	23.38	74.64	85.65	87.17	1.150	31.25	17
		1	15°	.0930	0.465	60	97.6	102.6	19.330	140.1	75.1	10.350	0.3108	4.330	5.990	0.7230	18°05'	43°12'	0.93906	109.80	1.498	73.30	108.80	115.87	301.30	-	15.50	1
	1010	3	30°	.1280	0.640	268	97.6	102.6	86.340	111.7	47.6	6.280	0.4059	2.610	3.680	0.7090	23°48'	53°05'	1.33110	83.90	1.586	52.90	72.93	174.50	-	-	3	
	Aço	1	30°	.0690	0.345	53	99.0	104.0	17.300	73.5	35.7	1.860	0.4358	-	-	-	25°46'	54°27'	1.39940	55.20	0.793	69.60	70.16	50.14	227.50	-	58.00	1
	1020	2	30°	.2080	1.040	53	99.0	104.0	17.300	160.7	35.7	9.030	0.4313	-	-	-	25°28'	42°31'	0.91687	105.30	2.418	43.55	111.25	12.13	158.50	-	45.80	2
	Aço	1	15°	.0930	0.465	60	98.0	103.0	19.400	115.2	54.8	6.380	0.4571	2.750	3.625	0.7580	25°37'	40°26'	0.85207	78.50	1.038	75.62	82.74	97.10	247.74	-	5.05	1
	1035	2	30°	.2080	1.040	168	98.0	103.0	54.330	164.2	48.6	5.200	0.5160	2.044	4.600	0.4440	31°04'	46°29'	1.05320	115.40	2.015	57.37	124.20	117.91	157.88	-	11.97	2
	Aço	1	15°	.0930	0.465	60	98.0	103.0	19.400	113.0	55.6	6.000	0.5096	3.000	3.000	1.0000	29°31'	41°12'	0.87543	70.80	0.942	75.10	82.95	94.75	243.01	-	3.63	1
	1055	2	30°	.2080	1.040	38	98.0	103.0	12.300	174.1	55.6	8.010	0.5725	4.260	3.745	1.1370	34°47'	48°00'	1.11060	110.70	1.823	60.72	136.05	122.50	167.40	-	7.40	2

Tabela 11 - Corte Ortogonal (b=5mm)

Tabela 12 - Corte Oblíquo (b=5mm)

Material	Lubrif.	Ponto	γ_n	λ	h	s	n	D_m	Dex	v	P_c	P_a	P_p	AT	r_c	Ad Aes	α_n	ρ	μ	P_z	A_s	t_z	P_t	P_n	k_s	R_s	CC	Ponto		
			Gráus	Gráus	mm	mm ²	rot/min	mm	mm	m/min	kgf	kgf	kgf	mm ²	mm	mm ²	- Gráus	Gráus	-	kgf	mm ²	kgf/mm ²	kgf	kgf	kgf/mm ²	mm				
Alumínio		18	30°	30°	.417	2.085	180	132	137	74.6	124.5	40.7	25.1	9.32	.506	-	-	30°22'	40°52'	.865	49.46	4.76	10.39	90.22	104.30	59.71	1.296	34.00	18	
		19	15°	40°	.256	1.280	180	132	137	74.6	100.8	50.0	41.6	6.22	.414	-	-	24°08'	38°36'	.798	56.66	4.08	13.89	73.43	92.02	78.75	.497	19.66	19	
		20	15°	20°	.128	.640	180	132	137	74.6	57.3	19.3	31.0	4.44	.338	-	-	19°41'	43°57'	.964	26.88	2.02	13.30	45.61	47.31	89.53	.506	8.67	20	
		21	30°	10°	.702	3.510	180	132	137	74.6	183.5	26.4	24.8	13.25	.585	-	-	35°37'	37°45'	.774	59.95	6.12	9.73	125.18	161.73	52.28	1.480	42.17	21	
		22	15°	20°	.092	.460	15	132	137	6.2	54.1	16.3	25.7	3.29	.380	-	-	22°09'	41°12'	.875	25.33	1.30	19.64	39.55	45.20	117.39	.470	13.88	22	
Aço	CCl ₄	23	15°	20°	.092	.460	15	132	137	6.2	47.7	14.5	14.4	1.99	.330	-	-	19°13'	32°33'	.634	31.03	1.49	20.83	26.92	42.47	103.69	.080	5.00	23	
		2	30°	30°	.408	1.040	56	57.0	102.0	12.24	184.7	108.1	26.6	11.74	.402	4.689	6.554	.720	23°33'	.758	193.90	3.01	64.53	140.00	185.58	178.84	-	68.67	2	
1010	CCl ₄	7	15°	20°	.139	.695	30	95.0	100.0	9.42	164.6	38.5	75.3	7.15	.485	3.068	4.071	.651	28°10'	.868	102.78	3.57	65.63	114.55	131.93	236.80	-	5	9.8	7
Aço		3	15°	20°	.069	.345	15	99.0	104.0	4.90	124.1	24.1	61.2	5.27	.162	-	-	9°17'	41°07'	.843	150.10	2.28	65.98	93.55	111.00	359.70	-	13.33	3	
1020	CCl ₄	5	15°	20°	.069	.345	15	99.0	104.0	4.90	87.1	24.4	38.7	2.46	.287	-	-	16°40'	38°13'	.787	106.92	1.28	83.47	61.10	77.06	252.50	-	3.42	5	
Aço		3	30°	30°	.069	.345	90	98.0	103.0	29.1	76.6	24.1	29.9	3.03	.524	1.237	1.787	.692	31°36'	.123	54.46	.76	71.65	67.37	54.78	222.00	-	7.21	3	
1035		7	15°	20°	.139	.695	30	98.0	103.0	9.7	148.6	37.9	57.8	4.64	.484	1.872	2.783	.673	28°07'	.720	164.54	1.57	104.87	96.52	130.07	213.80	-	2.50	7	
Aço		3	30°	30°	.069	.345	168	98.0	103.0	54.33	74.7	27.2	32.4	3.52	.522	1.168	2.242	.520	31°27'	.130	51.75	.76	67.82	69.20	51.59	216.50	-	4.10	3	
1045	CCl ₄	7	15°	20°	.139	.695	30	98.0	103.0	9.7	140.8	39.1	60.9	4.43	.565	-	-	32°36'	37°41'	.772	91.17	1.37	66.50	97.20	125.04	202.60	-	4.25	7	

Tabela 13 - Corte Múltiplo

Material	Lubríf.	Ponto	γ_n	α	p	a	s	n	D_m	D_{ex}	v	P_c	P_a	P_p	AT	A_{ad}	A_{es}	A_{ad}/A_{es}	r_c	ϕ_n	k_s	CC	Ponto
		-	Graus	Graus	mm	mm	mm ²	rot/min	mm	mm	m/min	kgf	kgf	kgf	mm ²	mm ²	mm ²	-	mm	Graus	kgf/mm ²	mm	-
Alumínio		24	15°	45°	2.0	.702	1.404	180	139.5	141.5	79.97	109.4	48.5	40.3	8.62	-	-	-	.381	23°13'	77.92	323.64	24
		25	15°	85°	2.0	.417	0.834	180	139.5	141.5	79.97	72.8	42.3	5.4	5.49	-	-	-	.424	24°43'	87.29	40.63	25
		26	30°	45°	2.0	.208	0.416	180	139.5	141.5	79.97	25.8	14.4	0.0	1.40	-	-	-	.536	32°23'	124.03	83.03	26
		27	30°	85°	3.0	.303	0.909	180	138.5	141.5	79.97	57.3	20.9	neg.	4.00	-	-	-	.552	33°27'	63.03	19.33	27
		28	15°	45°	3.0	.093	0.279	15	132.0	136.0	6.40	35.0	20.9	14.4	3.09	-	-	-	.428	24°56'	125.44	8.17	28
	CCl ₄	29	15°	45°	3.0	.093	0.279	15	132.0	136.0	6.40	24.8	14.5	7.3	2.40	-	-	-	.416	24°14'	88.88	6.02	29
	Aço 1010		4	30°	85°	3.5	.104	0.364	50	109.7	113.2	17.17	78.3	20.8	0.0	6.43	2.17	4.22	0.52	.370	21°09'	215.10	60.57
		5	30°	45°	4.0	.303	1.212	42	109.2	113.2	14.92	214.6	80.6	17.2	14.14	5.15	8.99	0.57	.410	24°20'	177.10	53.00	5
		6	15°	85°	3.0	.417	1.251	22	110.2	113.2	7.81	273.4	130.8	26.9	15.28	6.42	8.82	0.73	.280	16°30'	218.54	19.83	6
Óleo Solúvel		8	15°	45°	3.2	.370	1.184	60	110.0	113.2	21.33	250.3	107.0	91.4	17.14	7.63	9.44	0.81	.400	23°33'	211.40	28.63	8
Aço 1020		4	15°	45°	3.0	.350	1.050	53	111.0	114.0	18.97	214.6	87.2	70.5	11.06	4.95	6.07	0.82	.390	40°31'	204.38	19.17	4
	Óleo Solúvel Puro	6	30°	45°	3.5	.238	0.833	53	110.5	114.0	18.97	175.6	25.3	28.8	7.62	3.36	4.25	0.79	.510	30°32'	210.80	19.33	6
	Óleo com Enxofre	7	15°	85°	2.0	.208	0.416	60	112.0	114.0	21.47	91.6	16.7	24.4	3.86	1.76	2.08	0.85	.440	25°48'	220.19	11.00	7
	Óleo Solúvel 30:1	8	15°	45°	3.0	.370	1.110	60	111.0	114.0	21.47	230.0	0.0	65.5	12.02	6.00	6.00	1.00	.420	24°39'	207.20	13.33	8
Aço 1035		4	30°	85°	3.5	.104	0.364	50	110.0	113.5	17.82	82.3	37.9	neg.	5.70	2.00	3.68	0.54	.470	27°49'	226.10	21.33	4
		5	30°	45°	4.0	.303	1.212	42	109.5	113.5	14.96	155.6	63.5	12.9	9.00	3.80	9.13	0.42	.530	31°51'	128.38	18.17	5
		6	15°	85°	3.0	.417	1.251	22	110.5	113.5	7.84	273.4	123.2	19.7	10.66	4.58	6.05	0.76	.400	23°30'	218.55	9.50	6
	Óleo Solúvel	8	15°	45°	3.2	.370	1.184	60	110.3	113.5	21.38	250.7	101.5	84.0	11.00	6.24	9.22	0.67	.490	28°41'	211.74	12.42	8
Aço 1045		4	30°	85°	3.5	.128	0.448	50	109.0	112.5	17.66	92.4	34.9	neg.	4.49	2.35	2.11	1.12	.260	14°36'	206.25	6.13	4
		5	30°	45°	4.0	.303	1.212	42	108.5	112.5	14.83	205.8	24.8	15.1	10.00	3.73	7.10	0.53	.590	35°41'	169.80	8.80	5
		6	15°	85°	3.0	.417	1.251	42	109.5	112.5	14.83	249.2	102.4	17.8	8.53	4.49	4.04	1.11	.370	21°27'	199.20	6.08	6
	Óleo Solúvel	8	15°	45°	3.2	.370	1.184	60	109.3	112.5	21.19	237.4	95.5	73.8	10.56	4.28	6.22	0.69	.490	28°18'	200.50	9.42	8

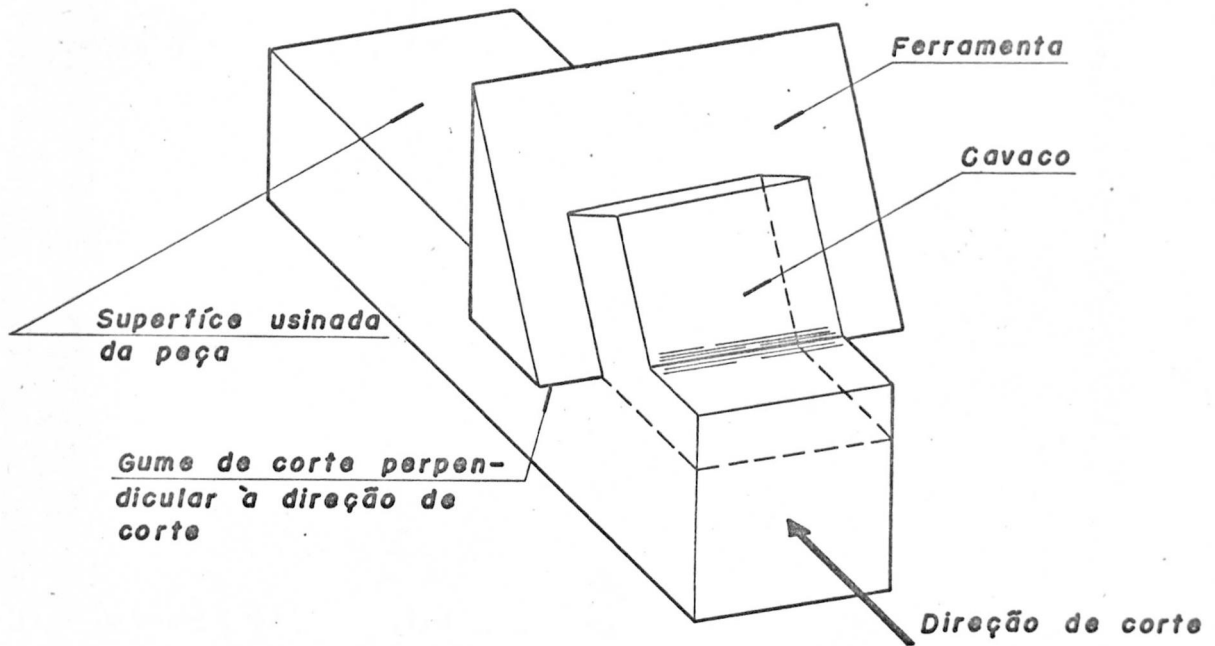


Fig. 1 — CORTE ORTOGONAL

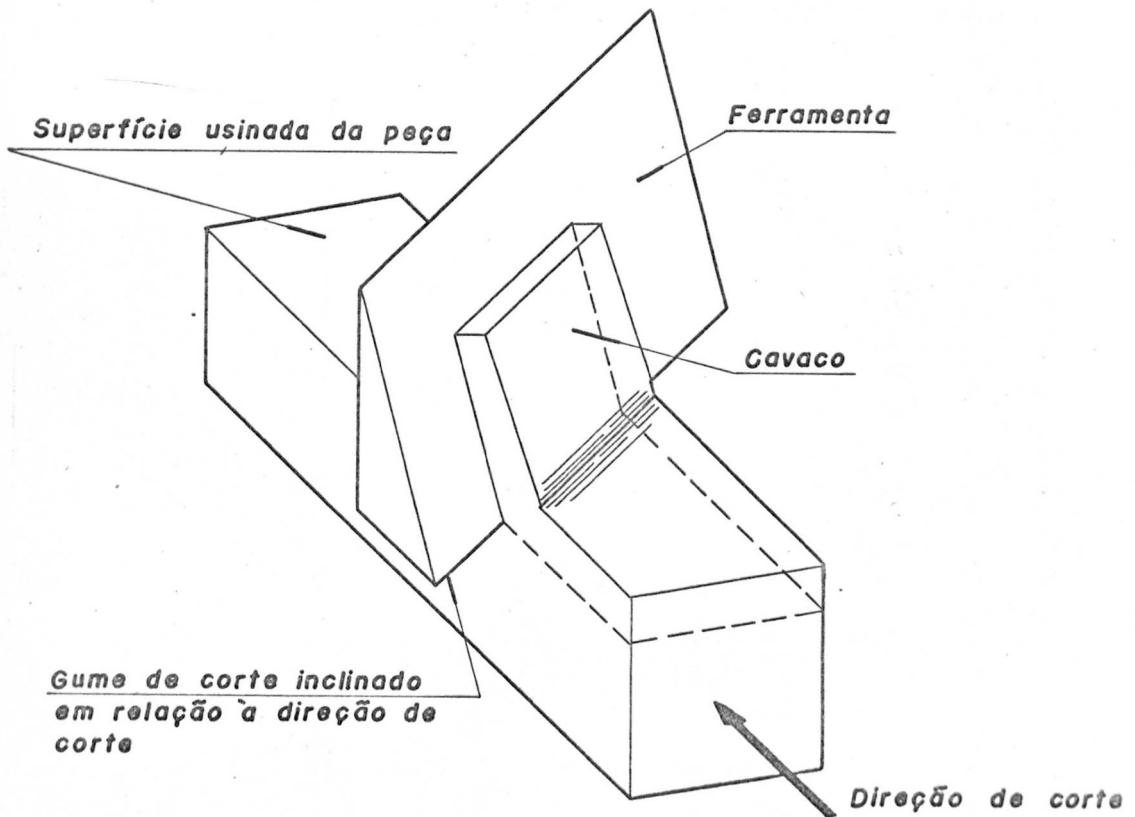


Fig. 2 — CORTE OBLÍQUO

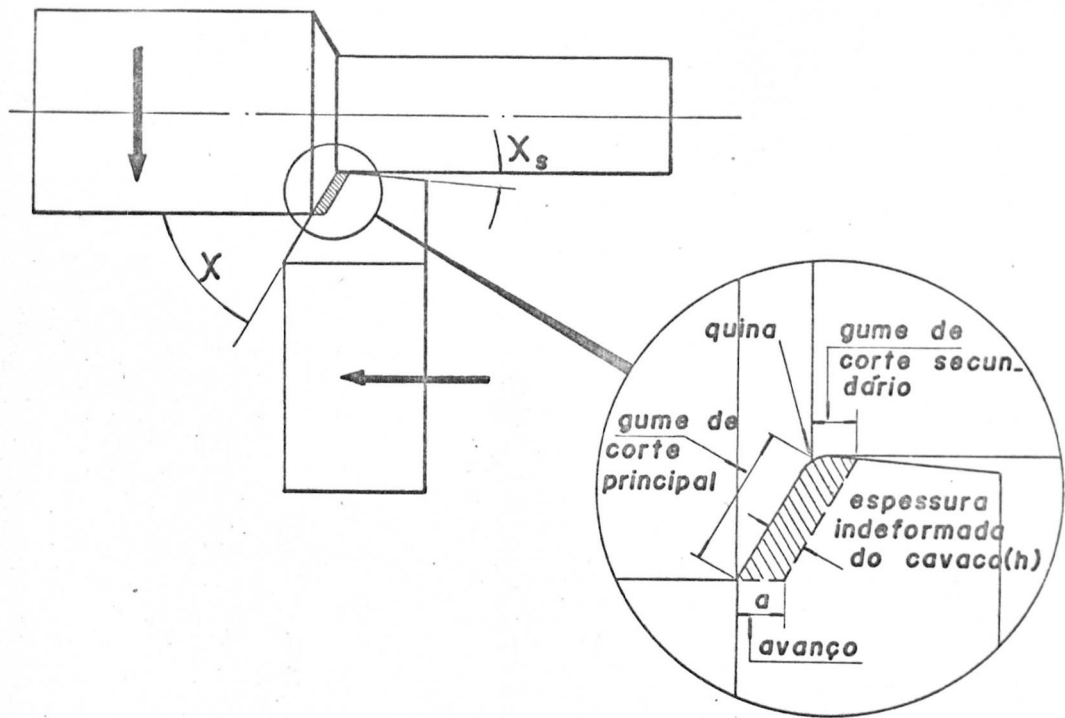


Fig. 3 — CORTE MÚLTIPLO

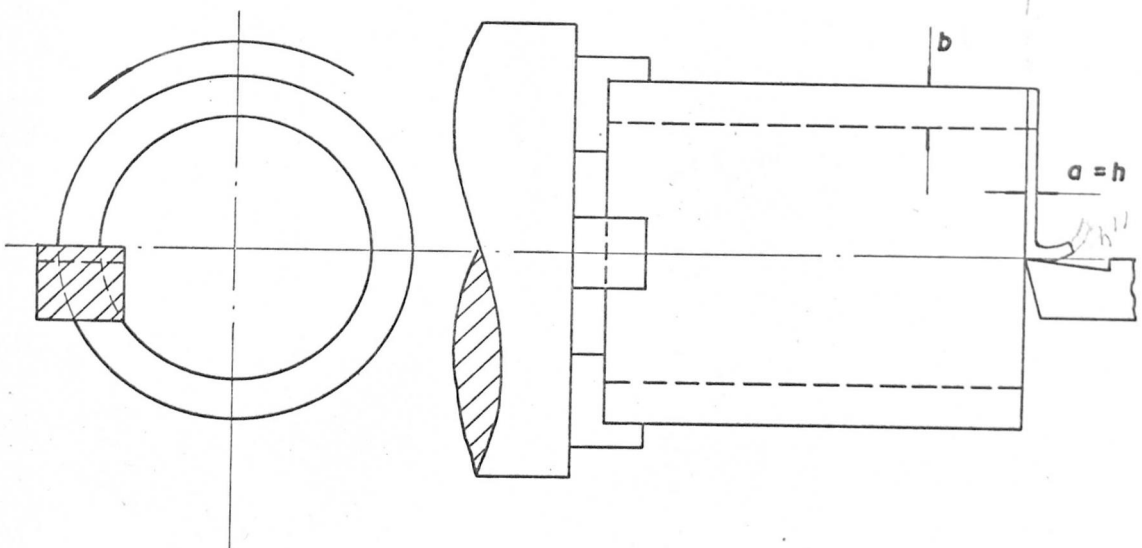


Fig. 4 — CORTE ORTOGONAL UTILIZANDO UM TUBO COMO MATERIAL DA PEÇA

$$l_1 = 360 \text{ mm}$$

$$l_2 = 30 \text{ mm}$$

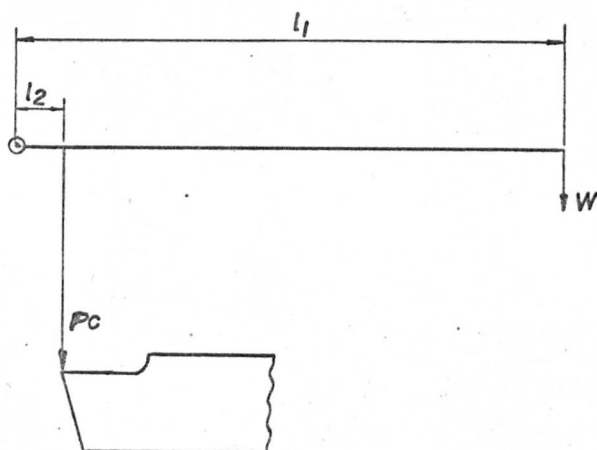


Figura 5 - Aferição da força principal de corte (P_c).

$$l_1 = 400 \text{ mm}$$

$$l_2 = 40 \text{ mm}$$

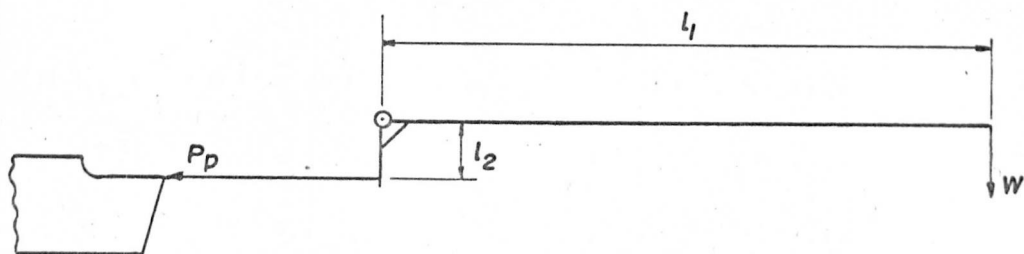


Figura 6 - Aferição da força passiva (P_p).

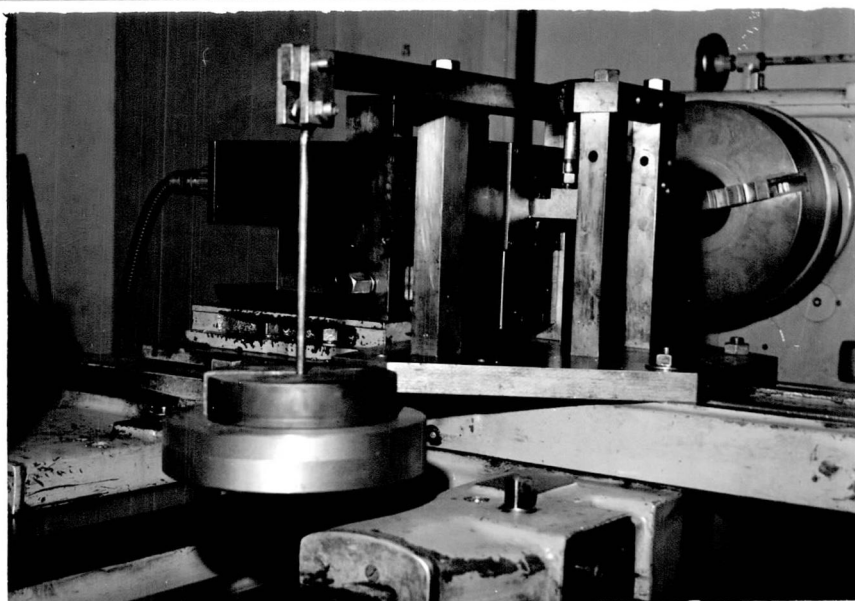


Figura 7 - Conjunto da montagem realizada para aferir o dinamômetro.

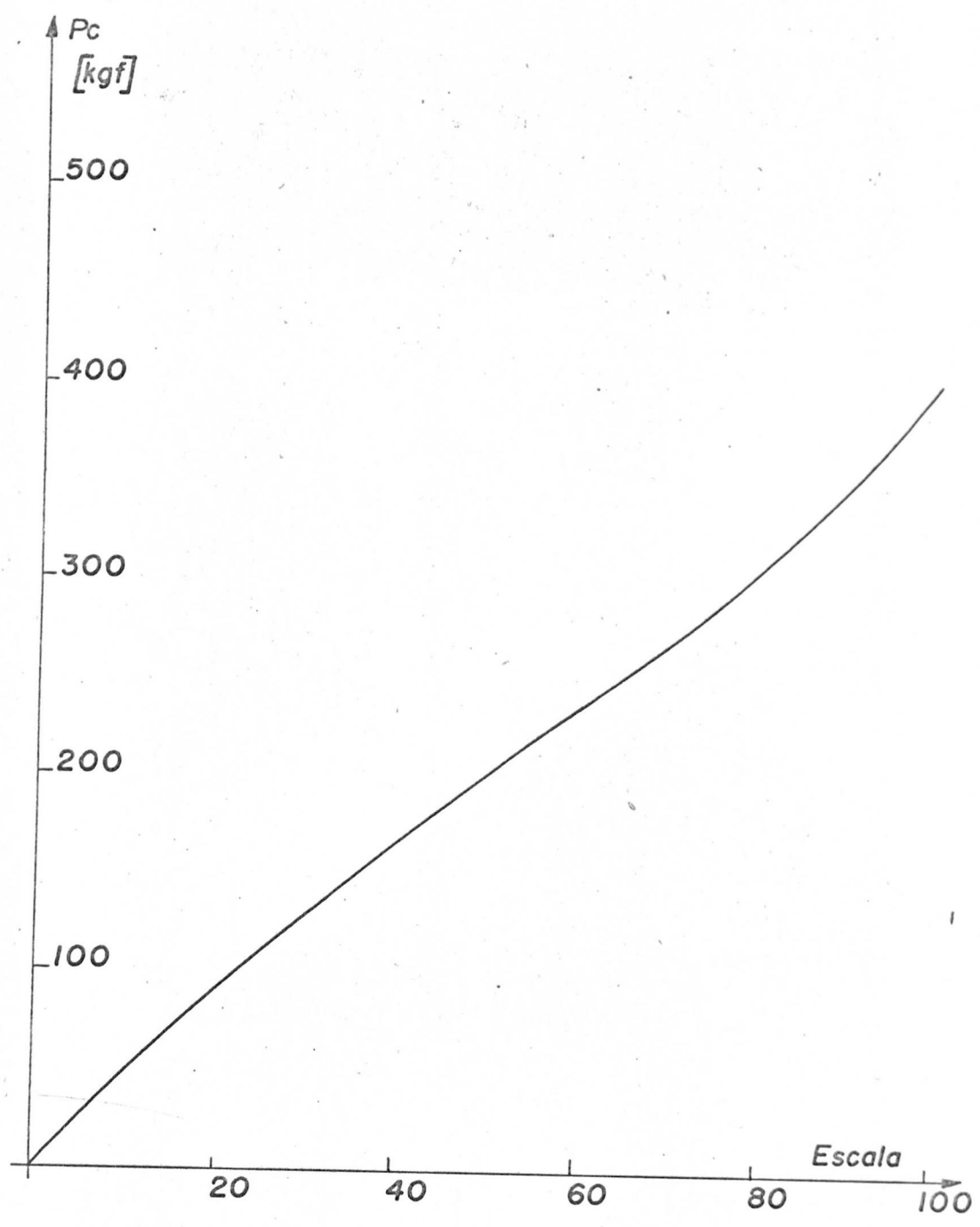


Figura 8 - Aferição do dinamômetro.

Fôrça principal de corte (Pc).

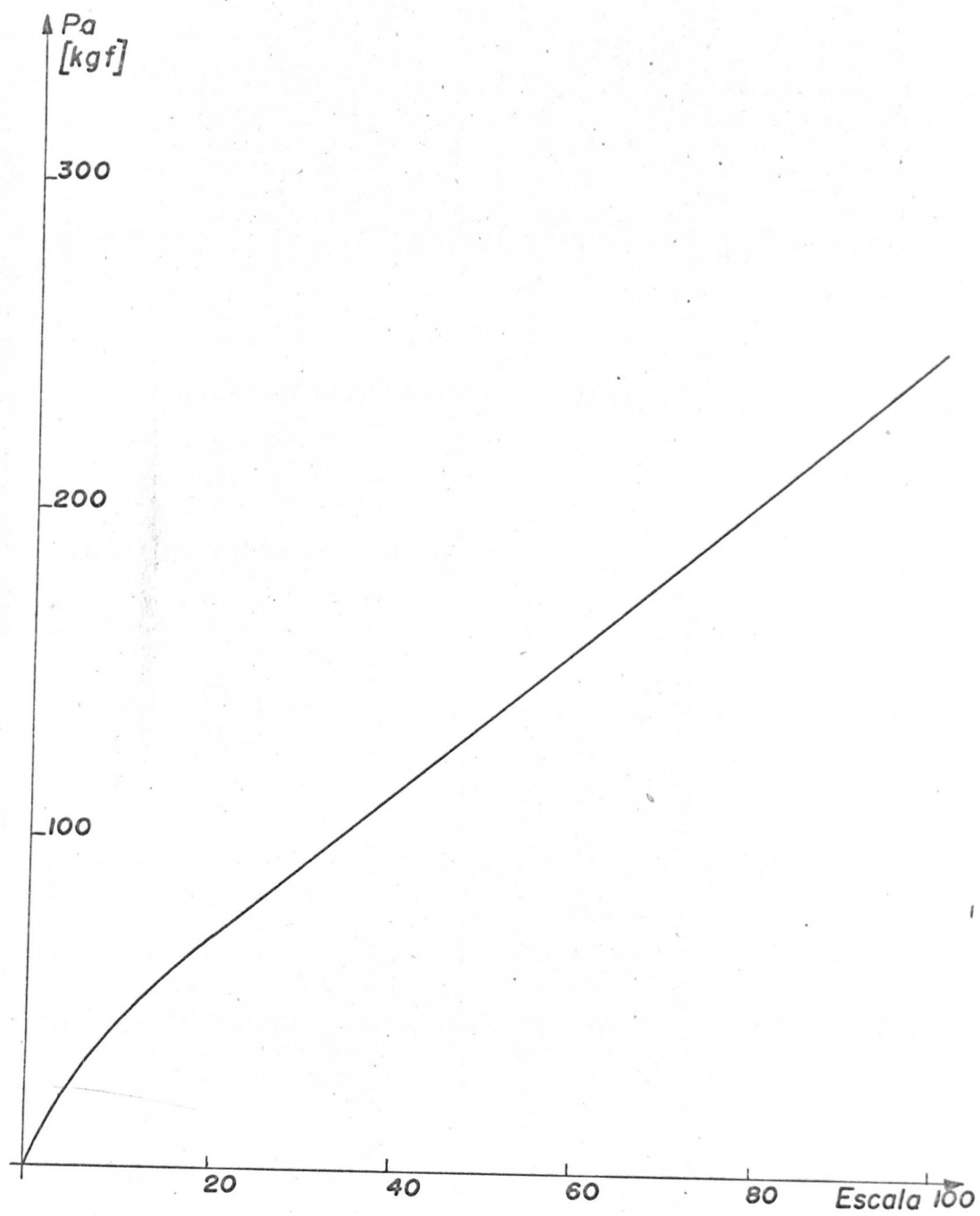


Figura 9 - Aferição do dinamômetro.
Fôrça de avanço (Pa).

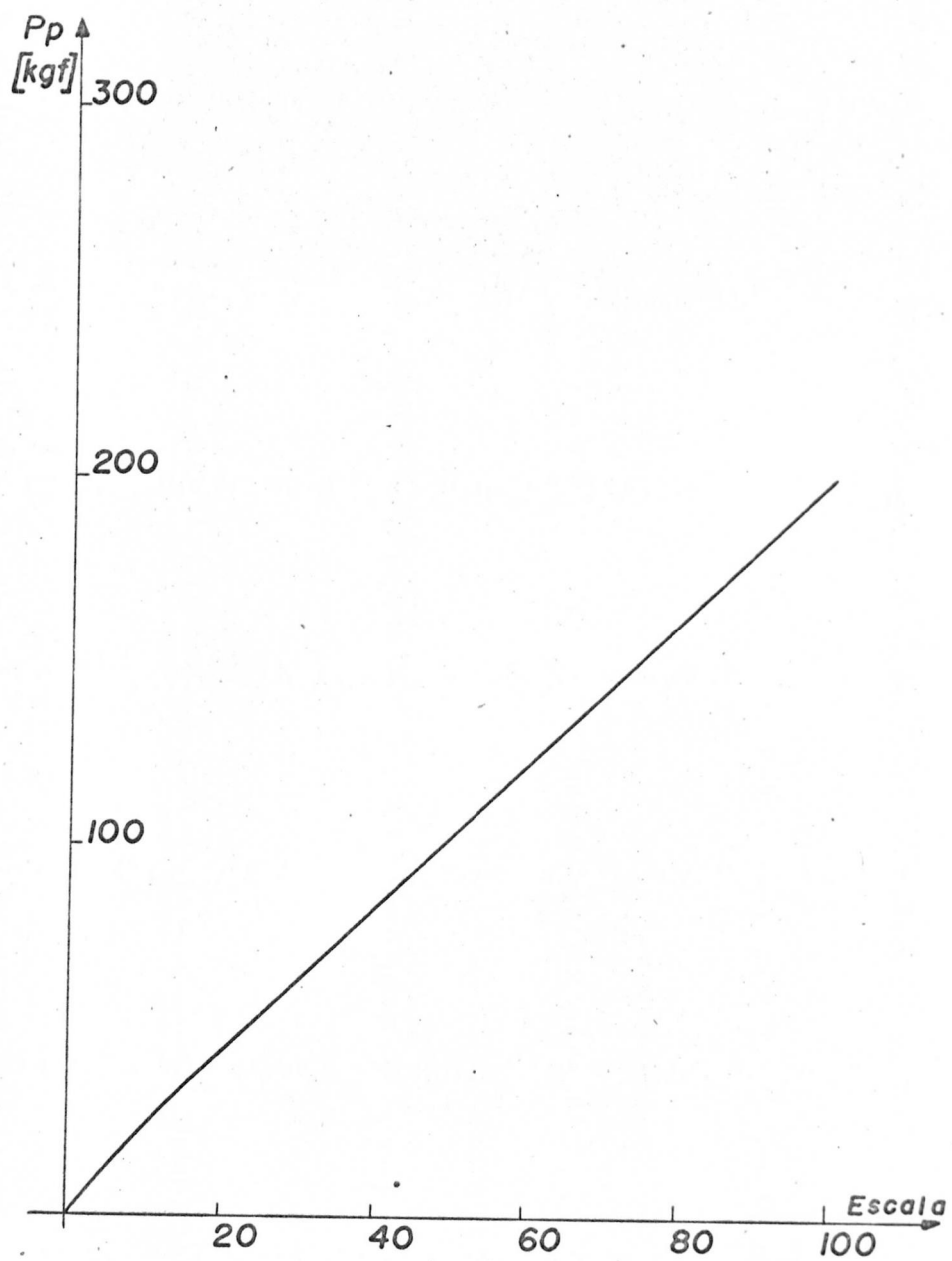


Figura 10 - Aferição do dinamômetro.

Fôrça, passiva.

Figura 12 - Diagrama de forças na usinagem

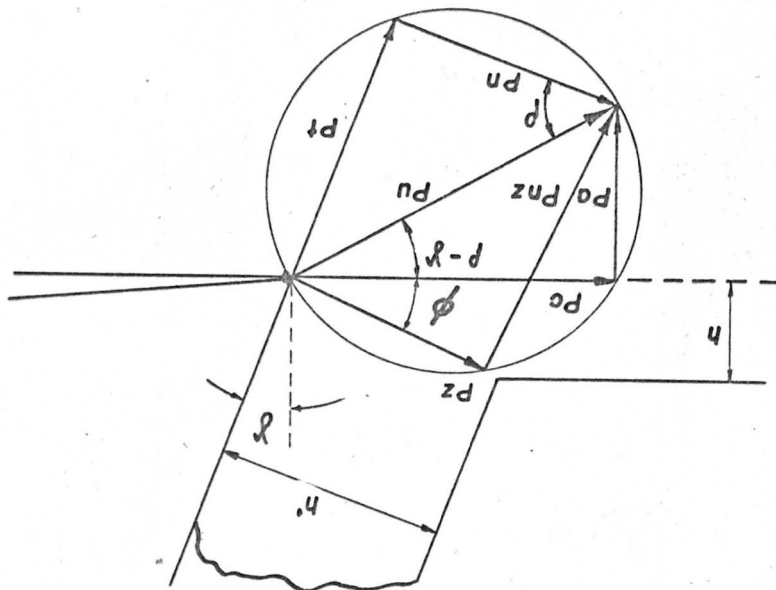


Figura 11 - Distribuição das tensões na superfície de saída da ferramenta.

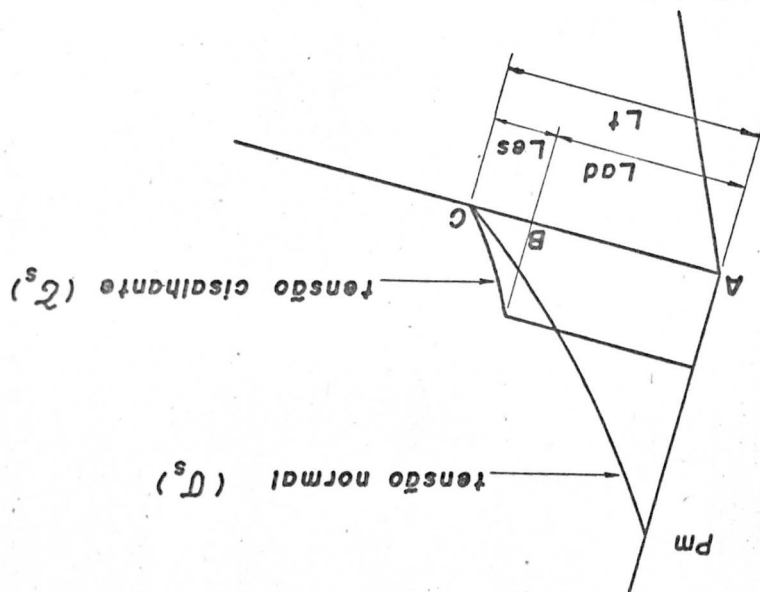
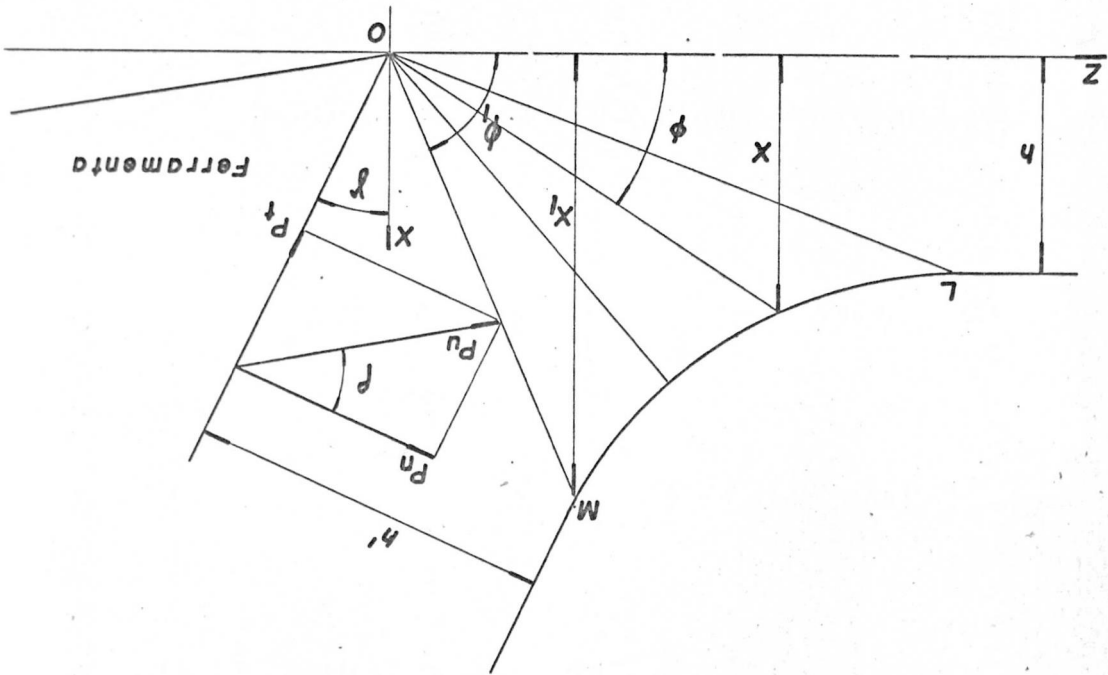


Fig. 13 — Esquema simplificado da zona de formação do
cavaco mostrando, segundo Zorev, as linhas de
tensão tangencial constantes, abrindo-se em
forma de leque.



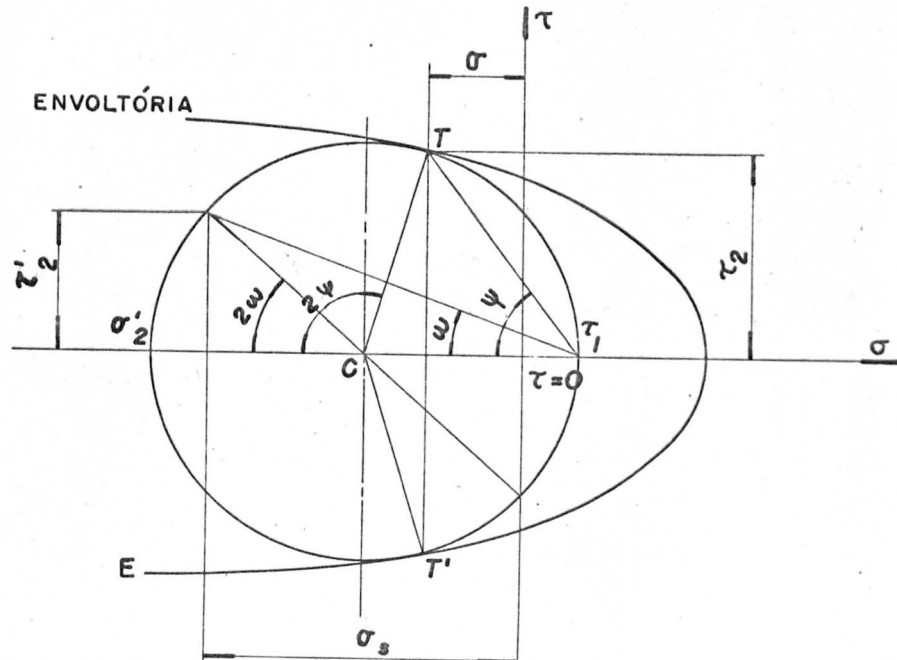


Fig. 14 - DETERMINAÇÃO DO PLANO DE CISALHAMENTO DE UM MATERIAL ATRAVÉS DA ENVOLTÓRIA E DO CÍRCULO DE MOHR

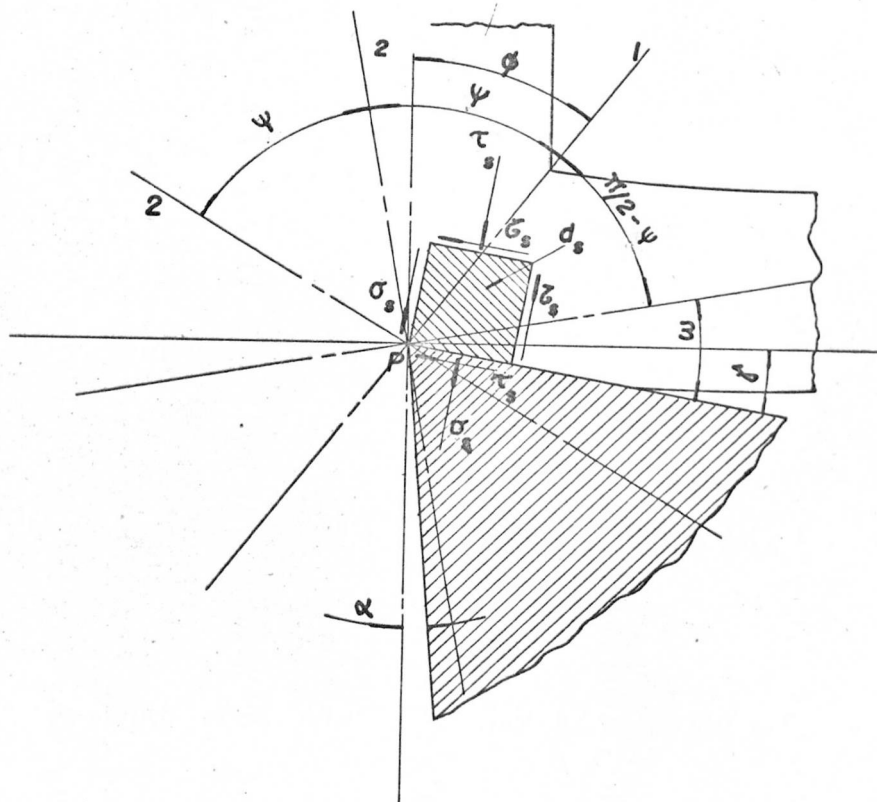


Fig. 15 - TENSÕES NUM ELEMENTO DE CAVACO, JUNTO DO GUME DE CORTE

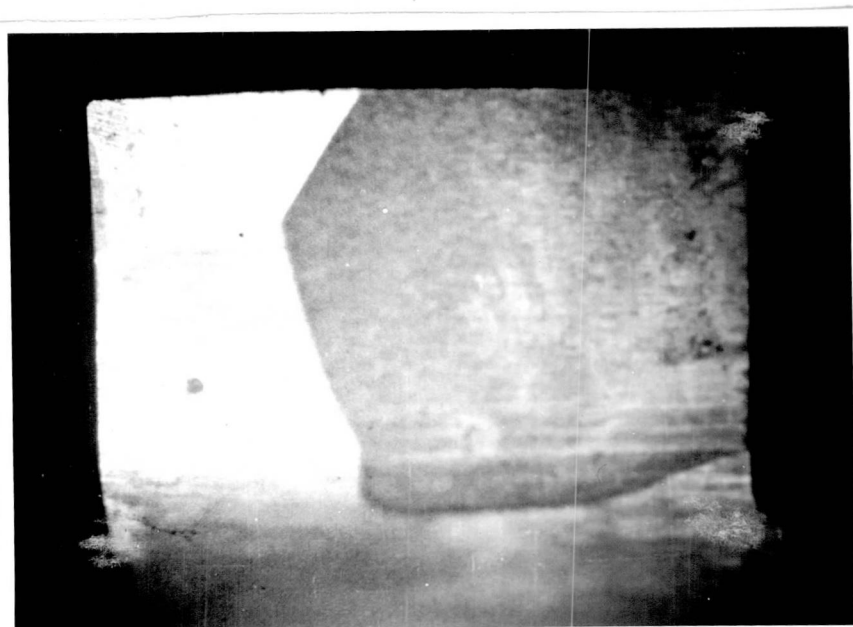


Figura 16 - Ferramenta afiada e iluminada de maneira inadequada com a marca de contato praticamente imperceptível.

$$\gamma = 5^{\circ}$$

$$\alpha = 8^{\circ}$$

Corte Ortogonal

$$h = 0.315 \text{ mm}$$

$$b = 5 \text{ mm}$$

$$v = 19.3 \text{ m/min}$$

Material: ABNT 1010

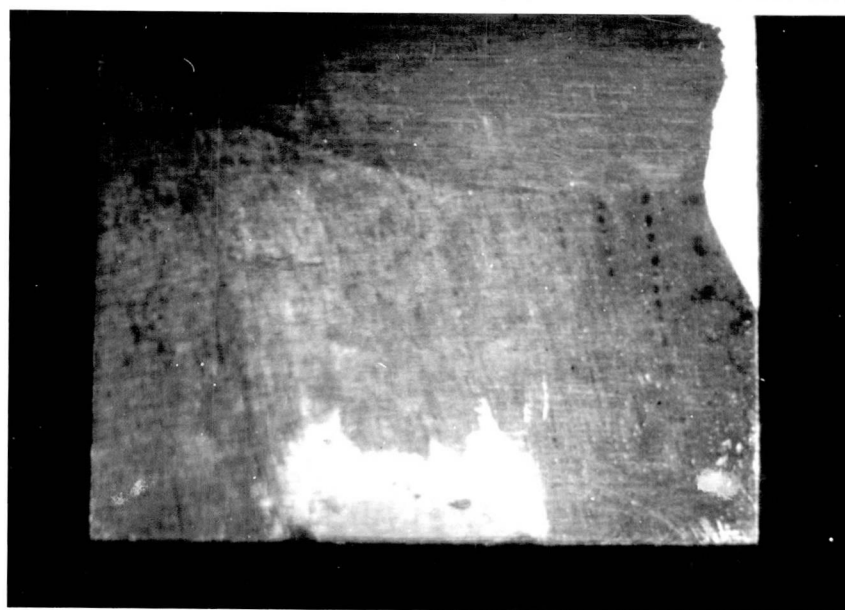


Figura 17 - Ferramenta afiada e iluminada de maneira adequada aparecendo a marca nitidamente.

$$\gamma = 5^{\circ}$$

$$\alpha = 8^{\circ}$$

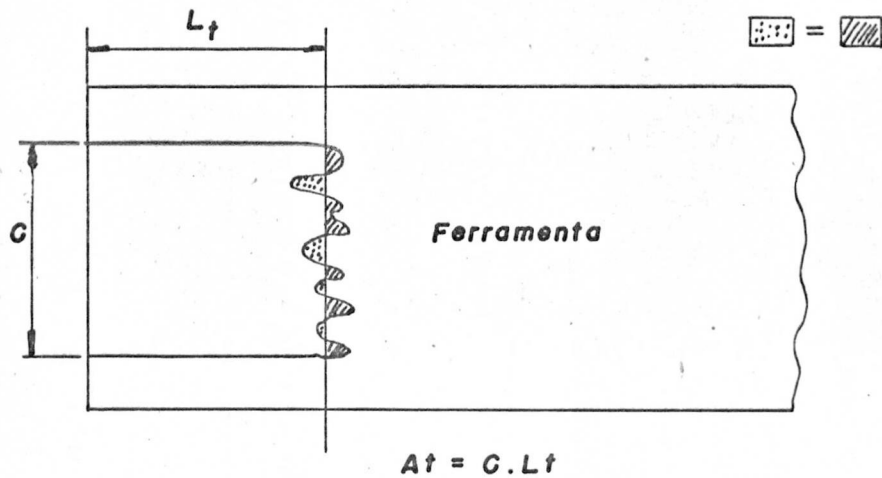
Corte Ortogonal

$$h = 0.315 \text{ mm}$$

$$b = 5 \text{ mm}$$

$$v = 19.3 \text{ m/min}$$

Material ABNT 1010.



**Figura 18 — Medida da área de contato.
ferramenta-cavaco.**

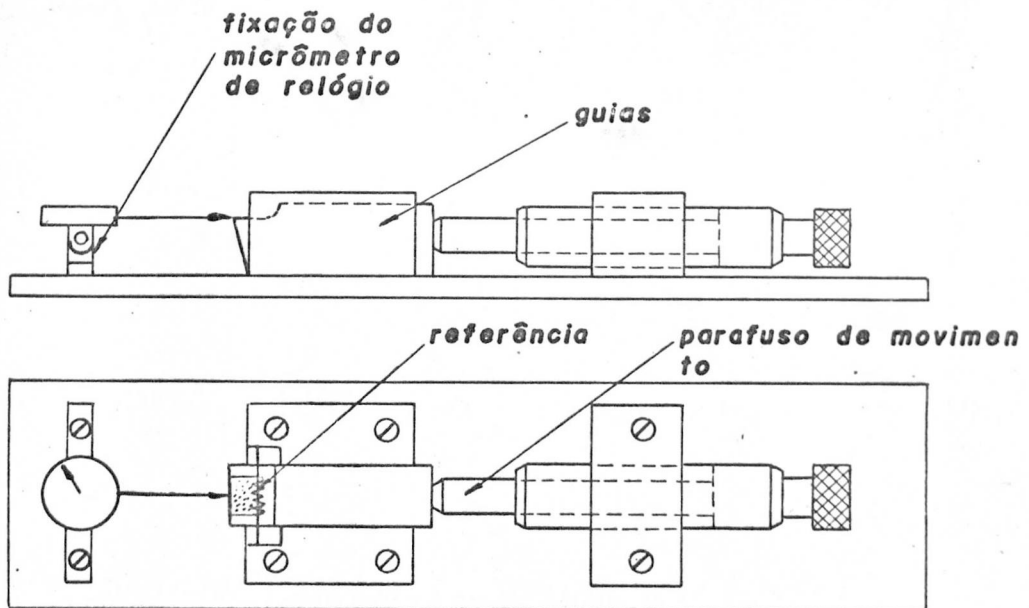


Figura 19 — Dispositivo simples para medida do comprimento de contato.

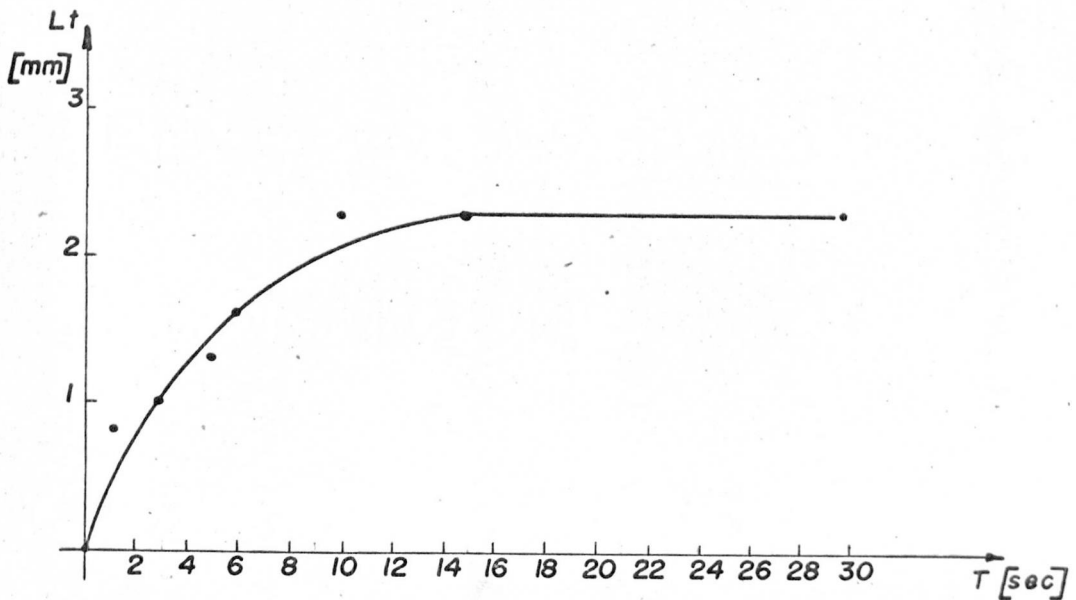


Figura 20 - Variação do comprimento de contato ferramenta - cavaco com o tempo de usinagem.

$$\phi = 30^\circ$$

$$\alpha = 8^\circ$$

$$h = 0.145 \text{ mm}$$

Corte Ortogonal

Material ABNT 1010

$$b = 3 \text{ mm}$$

$$V = 41 \text{ m/min}$$



Figura 21 - Medição dos comprimentos do cavaco no projetor de perfil com auxílio de um curvímeter.



Figura 22 - Medição da curvatura do cavaco no projetor de perfil com o auxílio de curvas de diâmetro cohencido.

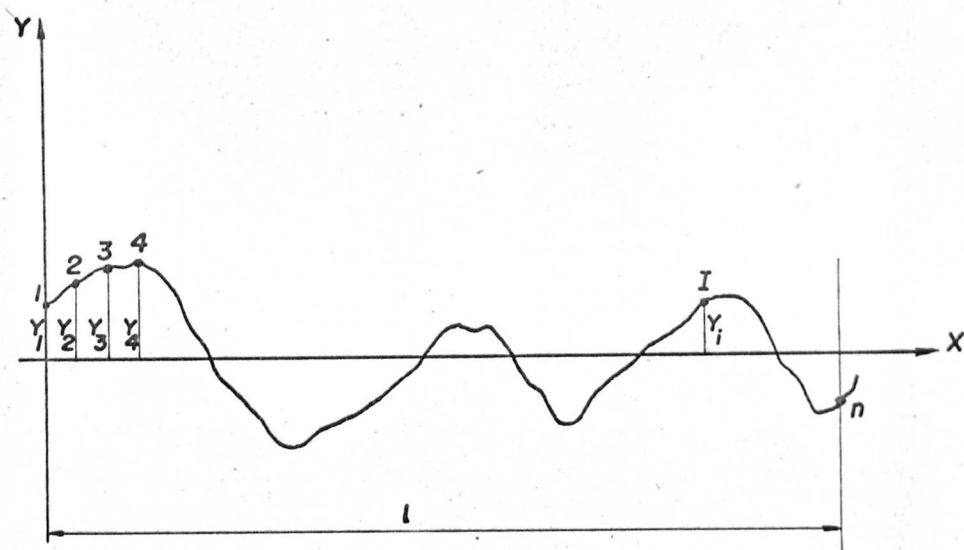


Figura 23 - Perfil efetivo de uma peça mostrando os elementos necessários ao cálculo de R_a (ou C.L.A.).

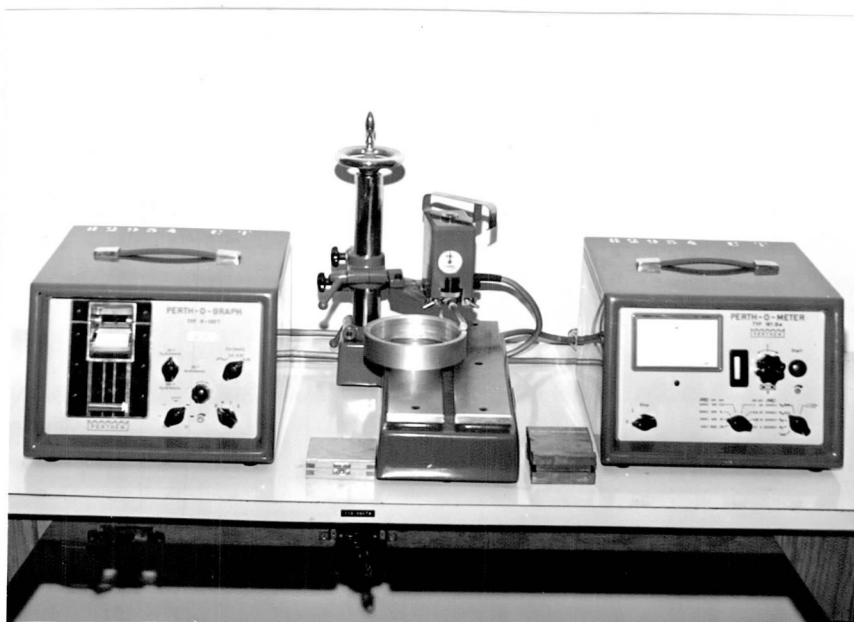


Figura 24 - Conjunto mostrando os três elementos fundamentais do rugosímetro: Traçador de gráfico (Perth-o-Graph), mesa de apoio da peça com cabeçote de captação (ao centro) e integrador eletrônico Perth-o-Meter (a direita).

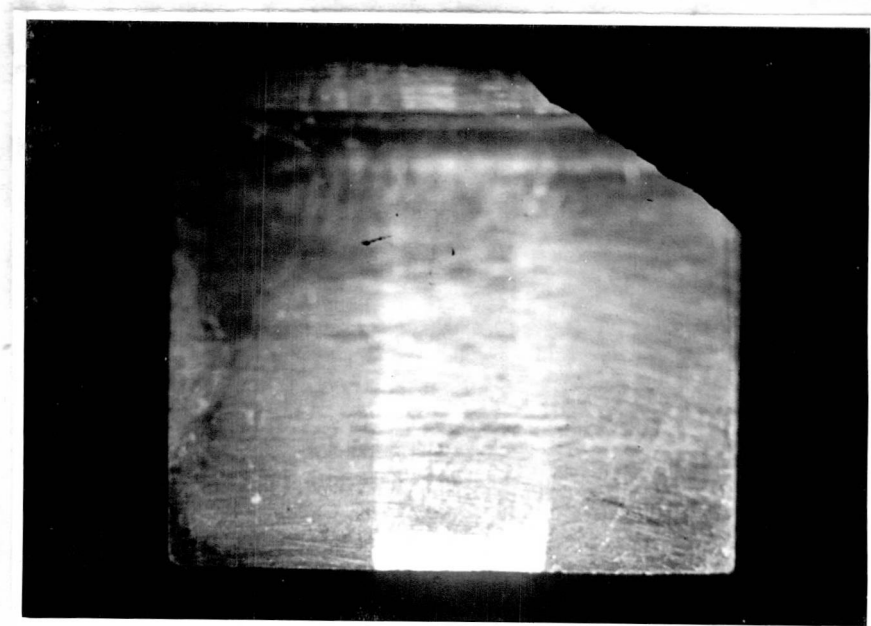


Figura 25 - Marca de contato entre ferramenta e cavaco obtida na usinagem de alumínio.

$$\gamma = 15^{\circ}$$

$$\alpha = 8^{\circ}$$

$$h = 0.145 \text{ mm}$$

$$b = 5 \text{ mm}$$

$$v = 74.6 \text{ m/min.}$$

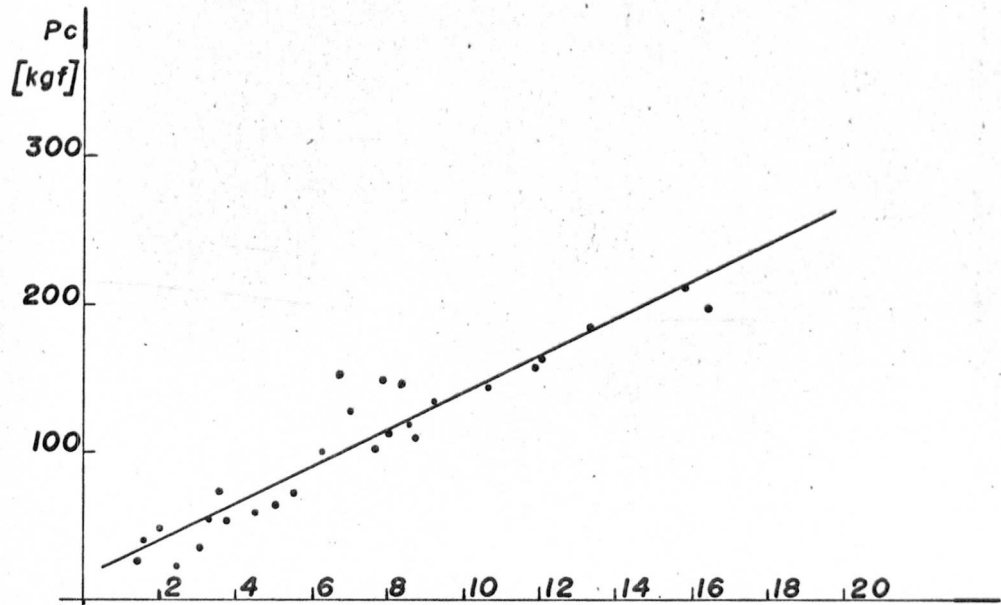


Figura 26- Correspondência linear entre área de contato ferramenta-cavaco (AT) e força principal de corte (Pc).
Aluminio.

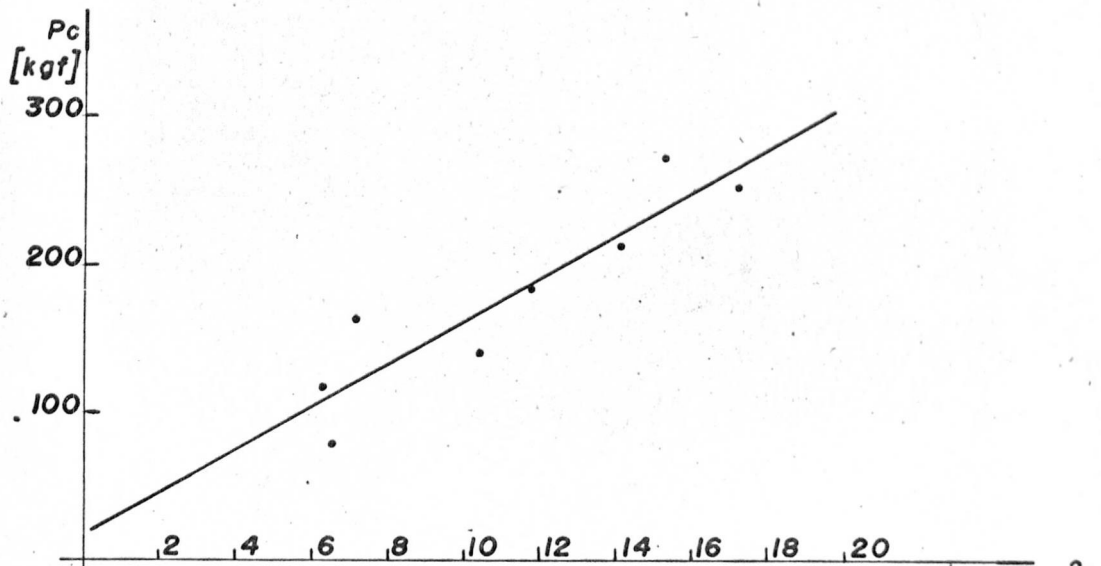


Figura 27- Correspondência linear entre área de contato ferramenta-cavaco (AT) e força principal de corte (Pc).
Aço ABNT 1010.

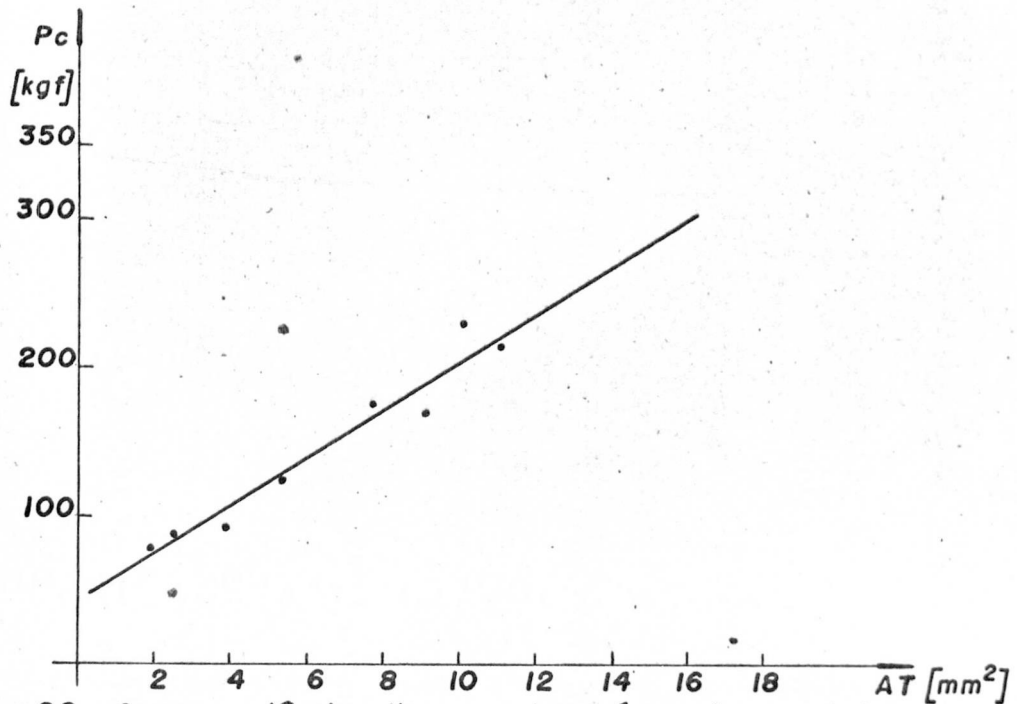


Figura 28 - Correspondência linear entre área de contato ferramenta-cavaco (AT) e força principal de corte (Pc). Aço ABNT 1020.

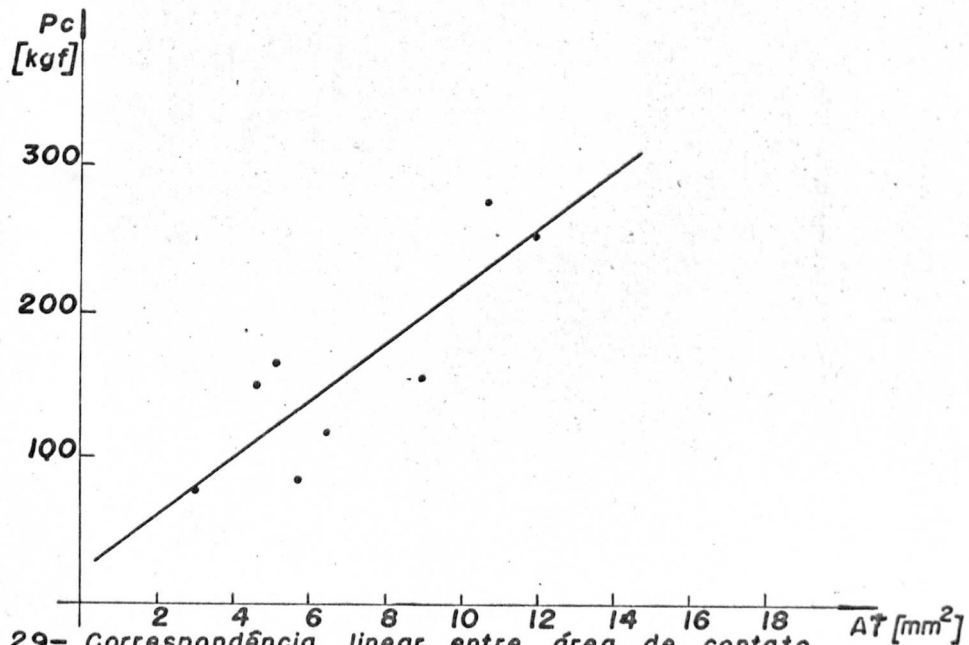


Figura 29 - Correspondência linear entre área de contato ferramenta-cavaco (AT) e força principal de corte (Pc). Aço ABNT 1035.

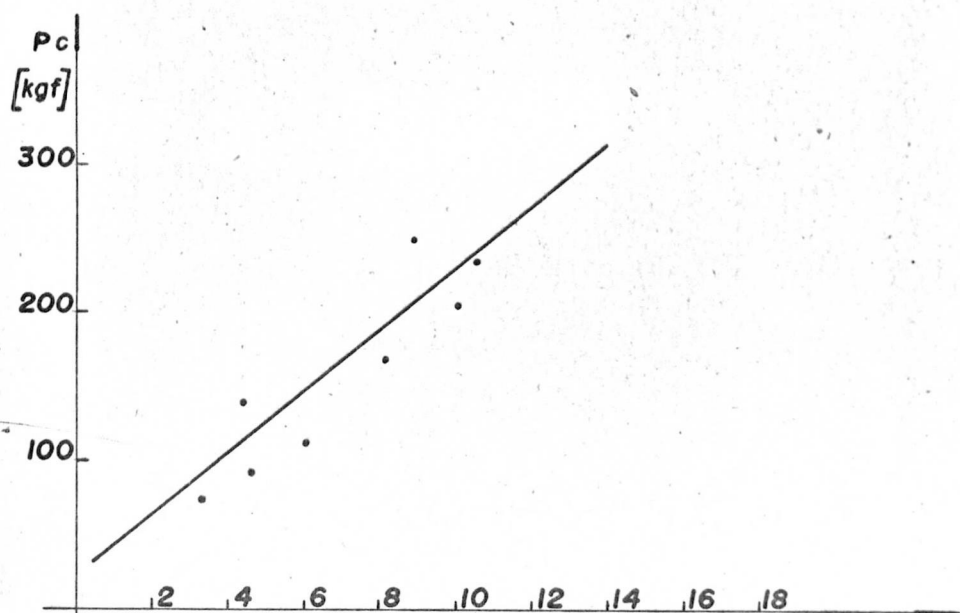


Figura 30-- Correspondência linear entre área de contato AT [mm²] ferramenta-cavaco(AT) e força principal de corte (Pc). Aço ABNT 1045.

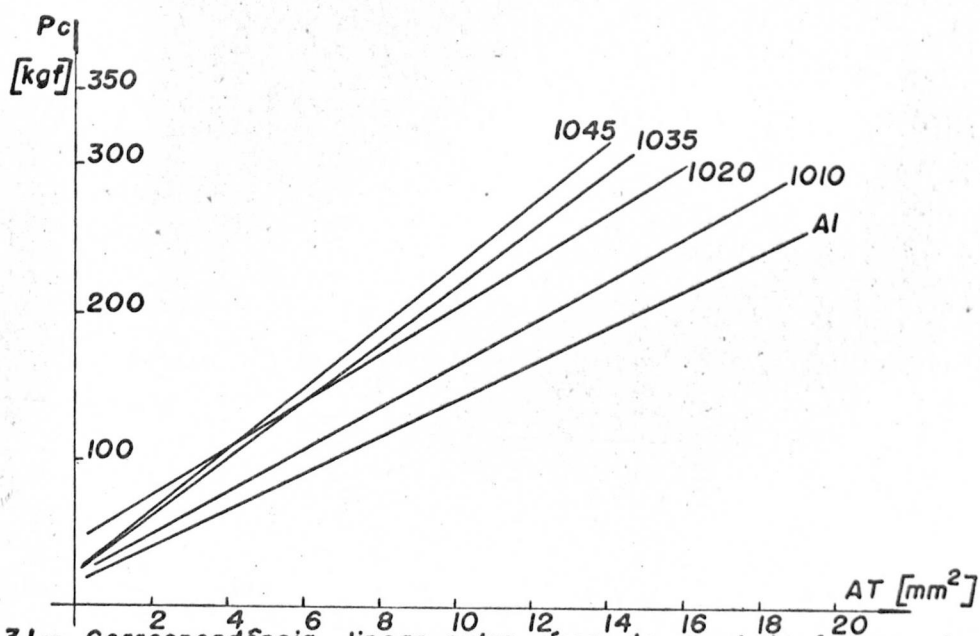


Figura 31-- Correspondência linear entre área de contato ferramenta-cavaco(AT) e força principal de corte (Pc). Conjunto dos materiais ensaiados.