

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

Departamento de Engenharia Mecânica  
Laboratório de Máquinas Ferramentas

# Processo de Brochamento

Rosalvo T. Ruffino

DEDALUS - Acervo - EESC



31100107415

São Carlos, fevereiro de 1998

Reimpressão

STILA  
AP

0811 - C  
secy

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

Departamento de Engenharia Mecânica  
Laboratório de Máquinas Ferramentas

# Processo de Brochamento

Rosalvo T. Ruffino

São Carlos, fevereiro de 1998

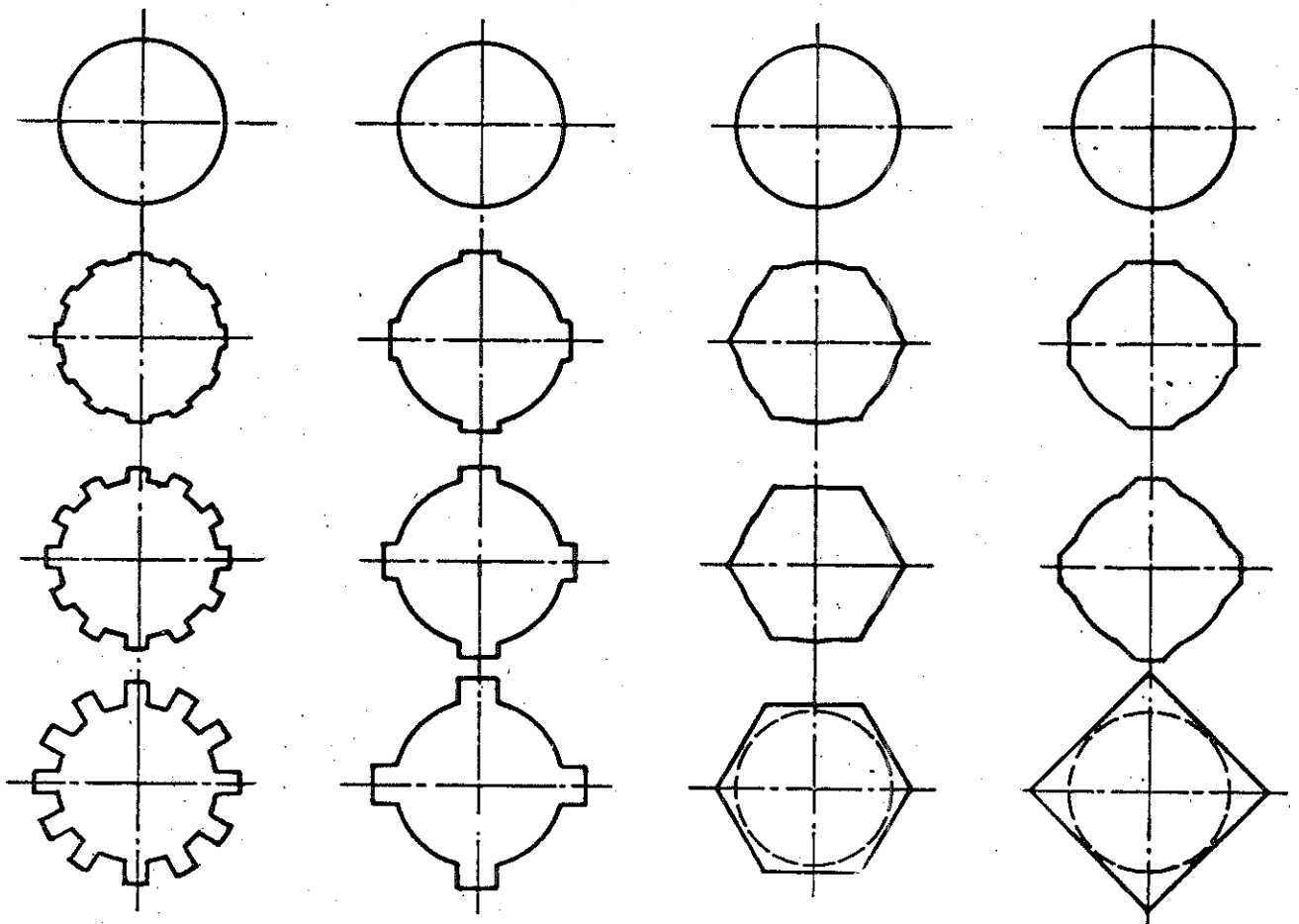
Denomina-se brochamento a operação que consiste na usinagem linear e progressiva da superfície de uma peça mediante uma sugestão ordenada de arestas de corte. A ferramenta que executa este trabalho denomina-se "brocha" e a máquina correspondente é a "brochadeira".

O brochamento pode ser externo ou interno. Em ambos os casos, o movimento de corte é retilíneo, realizado mecânica ou hidraulicamente. A ferramenta pode trabalhar à tração ou à compressão. Geralmente as brochadeiras verticais trabalham à compressão enquanto que as brochadeiras horizontais podem trabalhar à tração ou à compressão.

O processo de brochamento é um processo de produção em série, tendo sido introduzido inicialmente na indústria automobilística. As vantagens deste processo são a rapidez de execução, a boa apreciação (qualidade ISO - 7) e o baixo custo de produção; não necessita de mão de obra especializada, sendo superior aos demais processos de usinagem interna tais como o alargamento com alargadores, abertura de ranhuras em plainas e retificação interna. A utilização deste processo permite executar, numa só passagem os trabalhos executados por vários processos diferentes de usinagem.

O bom acabamento conseguido pelo brochamento explica-se pelo grande número de dentes da brocha. A sucessão dos dentes é tal que cada um remove uma camada de material relativamente fina, porém, a camada total de material removida pode ser espessa. A disposição conveniente dos dentes da brocha permite realizar simultaneamente a operação de desbaste, de semi-acabamento e de acabamento da peça.

O brochamento interno permite a execução de um ou mais rasgos de chaveta ou de transformar um furo circular num furo com entalhes, quadrado, hexagonal, etc. A figura abaixo dá alguns exemplos de operações de brochamento interno.



O brochamento interno permite também a execução de ranhuras helicoidais que podem ser realizadas de duas maneiras diferentes:

- A peça é presa e a brocha possui dois movimentos: um de translação e outro de rotação.
- A brocha executa o movimento de translação e a peça gira.

O segundo processo deu melhores resultados, evitando a ovalização do furo.

O brochamento externo pode ser realizado de duas maneiras distintas:

- A brocha executa o movimento de translação enquanto a peça permanece parada.
- A brocha permanece parada e a peça realiza o movimento de translação.

O primeiro processo é o mais empregado, sendo realizado em máquinas verticais que ocupam uma área pequena. No brochamento de superfícies grandes (blocos de motores por exemplo) torna-se necessário o emprêgo de máquinas horizontais devido ao curso grande da brocha. A superfície usinada dos blocos de motores é paralela à superfície de fixação, permitindo a fácil automatização do processo por meio de transportadores.

Em casos especiais, o brochamento externo pode ser realizado com movimento de ida e volta, necessitando um curso menor. Para economizar o tempo de volta das peças (em vazio), bem como o tempo de fixação, as peças podem ser presas numa plataforma giratória ou num transportador de correntes. Este último caso apresenta o problema do jogo na corrente e no suporte das peças nas guias.

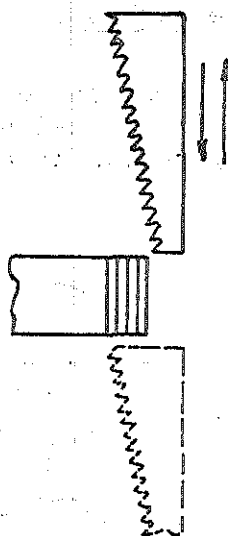


Fig. 3: Brochagem com máquina vertical. Peça fixa, ferramenta em movimento

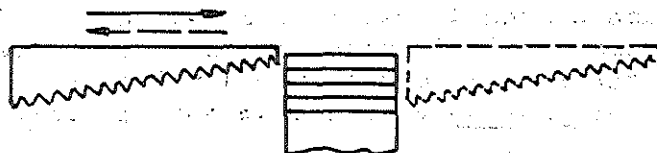


Fig. 4: Brochagem com máquina horizontal. Peça fixa e ferramenta em movimento.

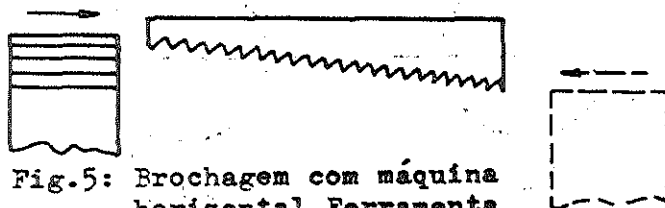


Fig. 5: Brochagem com máquina horizontal. Ferramenta fixa e peça em movimento de vai e vem

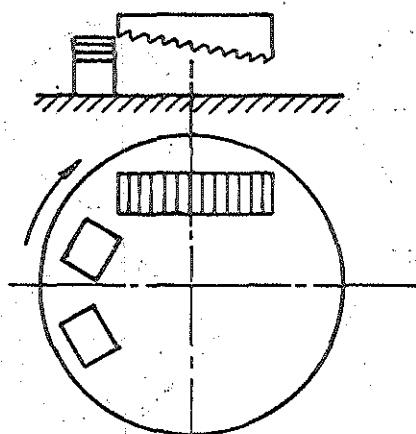


Fig. 6: Brochagem em Máquina especial

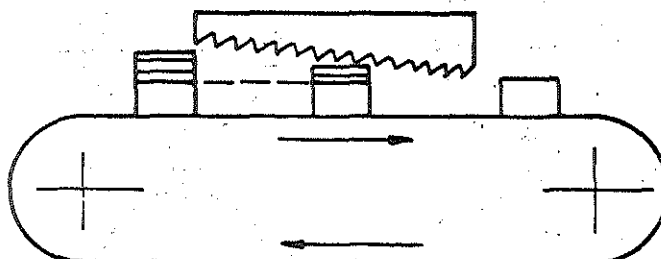


Fig. 7: Brochagem em transportador por corrente

## 2. O BROCHAMENTO INTERNO

### 2.1. O material empregado na confecção das brochas.

As brochas são feitas geralmente de aço rápido com a seguinte composição:

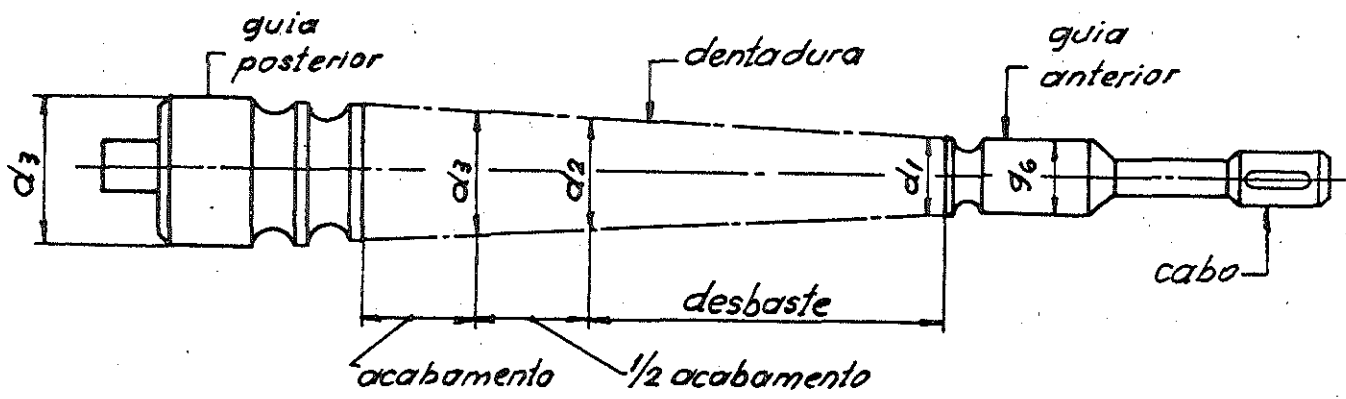
- W - 18%
- Cf - 4%
- V - 1%

correspondendo, por exemplo ao aço VW Super da firma Villares. São tratados termicamente para obter uma dureza Rockell C 63 a 65. Podem possuir dentes de acabamento de metal duro.

### 2.2. Forma da ferramenta

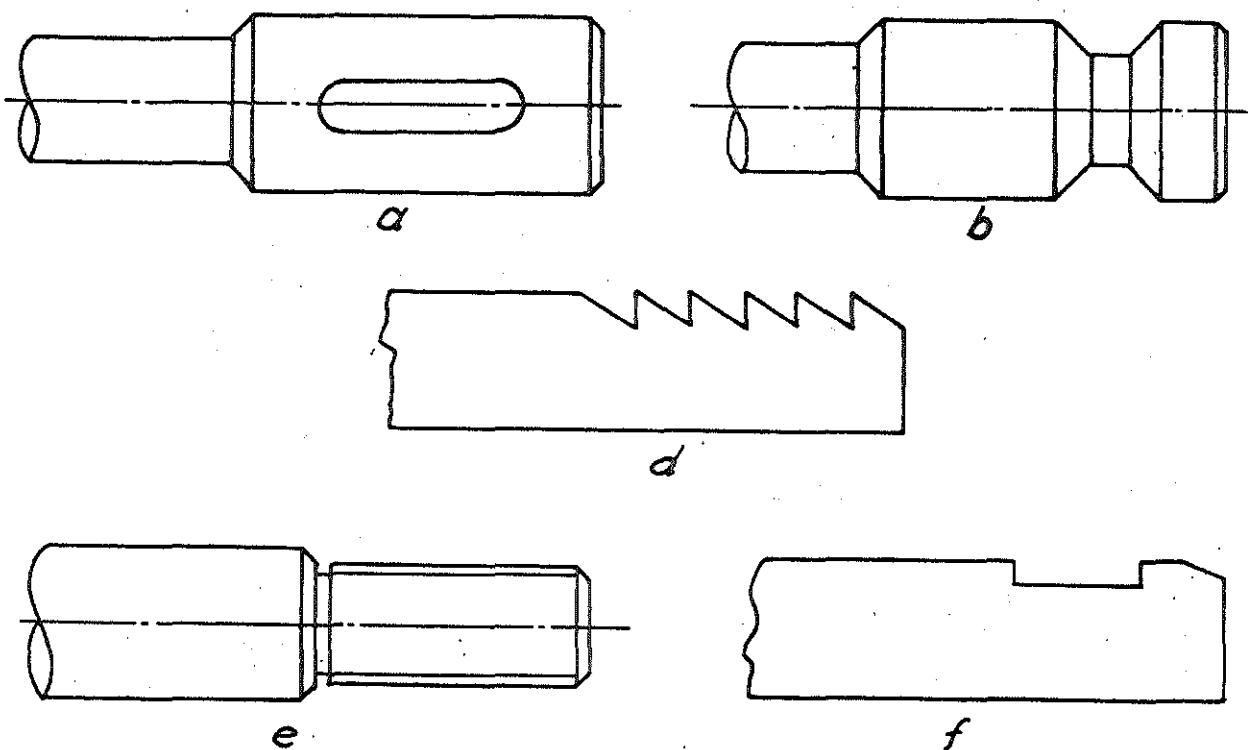
A brocha pode trabalhar à tração e compressão. A brocha de tração permite um curso maior, podendo remover um volume grande de cavaco. A brocha de compressão tem um comprimento limitado por causa do problema da flambagem.

Em geral, as brochas de tração são compostas de 4 partes principais : cabo, guia anterior, dentadura, guia posterior.



#### Cabo da brocha:

A forma da ligação entre a brocha e a máquina brochadeira dependerá do tamanho da construção da ferramenta e da máquina. A norma DIN 1415 apresenta os seguintes tipos de cabos de brochas:

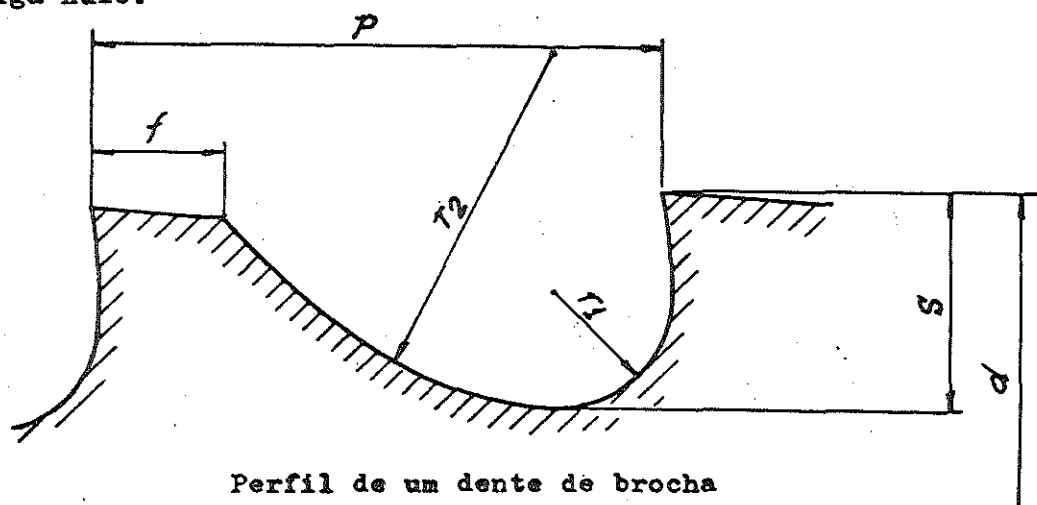


Tipos de cabos das brochas

A fixação b apresenta a vantagem de possibilitar o engate e desengate automáticos. Em qualquer caso, o diâmetro externo do cabo deve ser menor que o diâmetro do furo.

Dentadura

Geralmente, a dentadura de uma brocha é constituída de duas partes: a parte destinada ao desbaste e a parte destinada ao acabamento. Na região de desbaste, o número de dentes deve ser suficientemente grande para retirar todo o material a ser removido. A região de acabamento ou calibragem possui pelo menos 4 dentes de diâmetro externo constante e ângulo de folga nulo.



Perfil de um dente de brocha

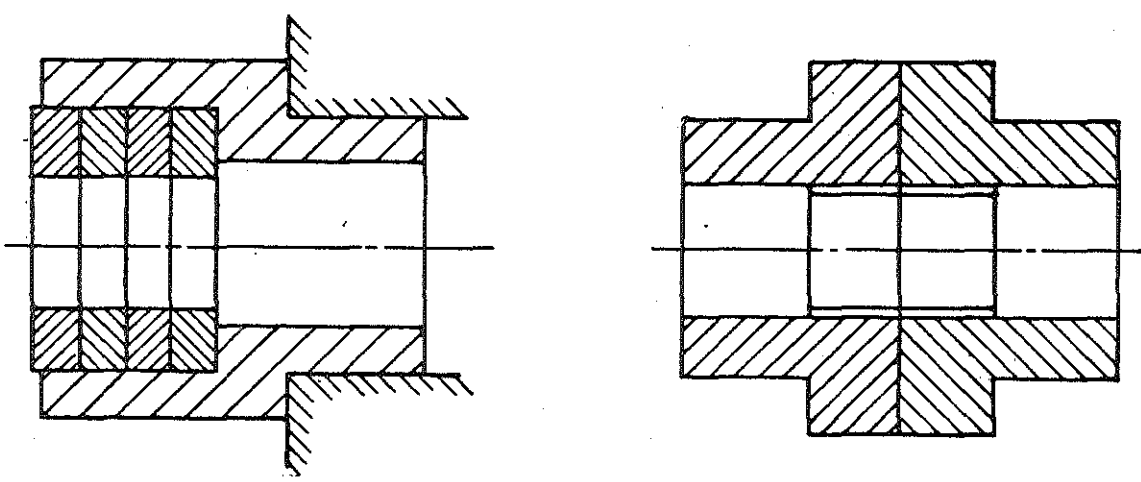
- P = passo - distância entre dois dentes consecutivos
- S = altura do dente
- d = diâmetro externo do dente

Valores práticos:

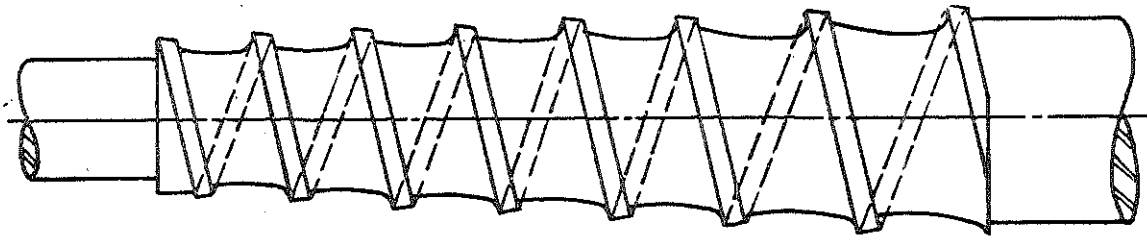
- S = 0,3 ... 0,4P para aço e aço fundido
- S = 0,45P para bronze e ferro fundido
- S = 0,5P para alumínio
- r<sub>1</sub> = 0,4 ... 0,6 s; r<sub>2</sub> = P; f = 0,3P

A escolha correta do passo dos dentes, "P", é de grande importância, devendo ser observadas as seguintes condições:

- 1º- Durante a operação de brochamento devem trabalhar pelo menos dois dentes. Excepcionalmente, no brochamento de furos curtos é permitido o trabalho de um dente. No entanto neste caso prefere-se juntar 2 ou várias peças ou empregam-se brochas helicoidais.



Disposição de várias peças iguais de pequena espessura para brochamento simultâneo



Brocha de dentes helicoidais para o brochamento de peças de pequena espessura.

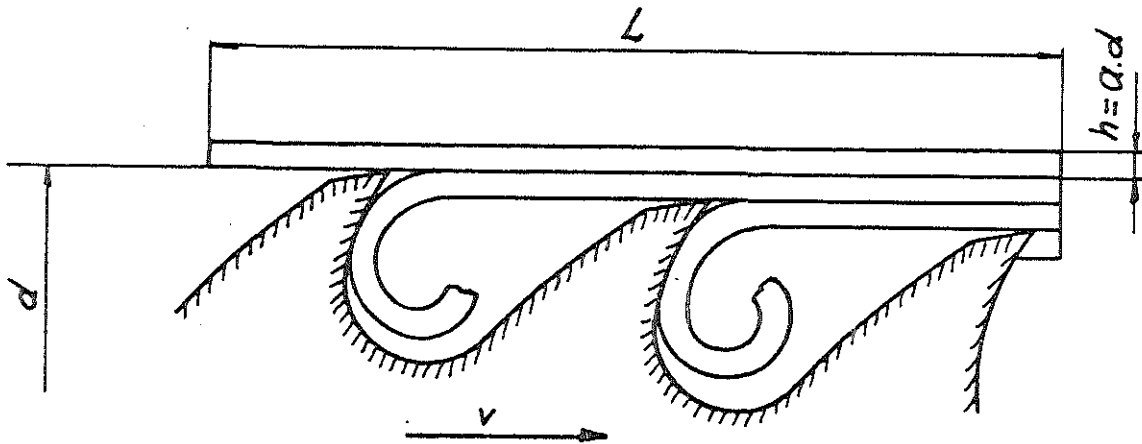
2ª- O volume de cavaco usinado por dente, ao longo do comprimento  $L$  da peça deve ser acondicionado no intervalo entre dois dentes consecutivos. Segundo esta condição, o passo dos dentes de uma brocha circular pode ser determinado como segue:

$$V = \pi (d - h) \times h \times L$$

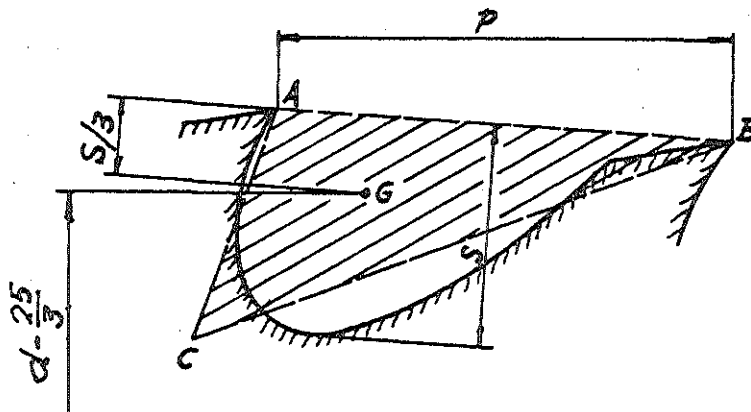
$V$  = volume de cavaco removido por dente

$h = a_d$  = espessura de corte

$L$  = comprimento da peça



Assimilando a forma do intervalo entre dois dentes consecutivos a um triângulo ABC, tem-se:



$$V' = \pi \left( d - \frac{2s}{3} \right) \times p \times \frac{s}{2} \quad \text{onde } s \approx 0,35 p$$

O volume de cavaco removido por um dado dente da brocha deverá ser menor que o volume  $V'$  do intervalo entre dois dentes. Pode-se definir o "coeficiente de acomodação" do cavaco como sendo:

$$C = \frac{V'}{V}$$

cujo valor dependerá do material usinado.

C = 4 ... 6 para desbaste de material que forma cavaco quebradiço  
 C = 8,5 para o acabamento de material que forma cavaco quebradiço  
 C = 6 ... 10 para o desbaste de material que forma o cavaco contínuo  
 C = 12 para o acabamento de material que forma cavaco contínuo

Substituindo os valores de V e V', tem-se:

$$C \times \pi (d-h) \times h \times L = \pi \left( d - \frac{2s}{3} \right) \times p \times \frac{s}{2}$$

com  $s \approx 0,35 p$  resulta:

$$C \times h \times L - \frac{h^2}{d} L \times C = (1 - 0,23 \frac{p}{d}) 0,175 p^2$$

O valor de "h" é muito pequeno comparado com as demais dimensões, e a relação  $p/d = 1/6$ . Com estas simplificações tem-se:

$$C \times h \times L \approx (1 - 0,23 \times \frac{1}{6}) 0,175 p^2$$

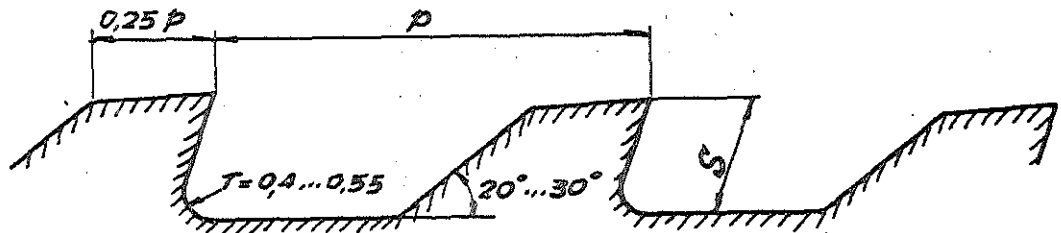
$$p \approx - 2,5 \sqrt{h \times L \times C}$$

Para um valor médio de  $h = 0,05$  mm e  $C \approx 8$ , resulta a fórmula prática

$$p \approx 1,75 \sqrt{L}$$

- 3º- O passo deve ser tal que a solicitação máxima da seção perigosa da brocha se mantenha abaixo dos limites admissíveis. Esta condição será vista no cálculo da força de corte.
- 4º- O passo deve ser tal que a força máxima de brochamento seja inferior à capacidade da máquina brochadeira.
- 5º- Para evitar vibrações que prejudicariam o acabamento da superfície brochada, o passo dos dentes da brocha deve ser variável.

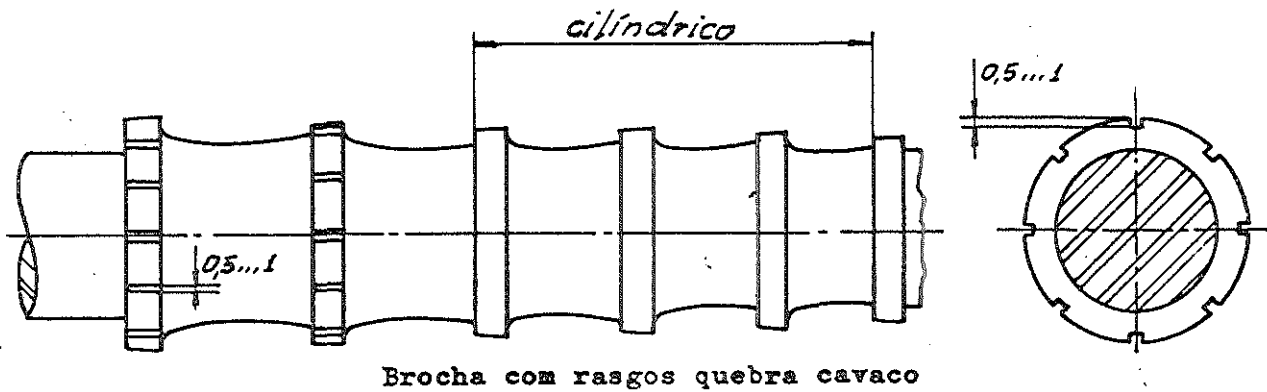
Quando o comprimento do furo brochado for grande, o número de dentes pode ser reduzido, obtendo-se um passo maior e, conseqüentemente, um diâmetro de núcleo maior.



Brocha de dentadura alongada

A fim de melhorar as condições de formação do cavaco, os dentes de desbaste da brocha possuem rasgos quebra-cavaco.





A espessura de corte "h" dos dentes de desbaste é dada experimentalmente em função do material a ser usinado e do diâmetro do furo. Em geral, a brocha é construída com "h" variável, tendo o  $h_{\text{máx}}$  na parte inicial da brocha e  $h=0$  na parte final do acabamento.

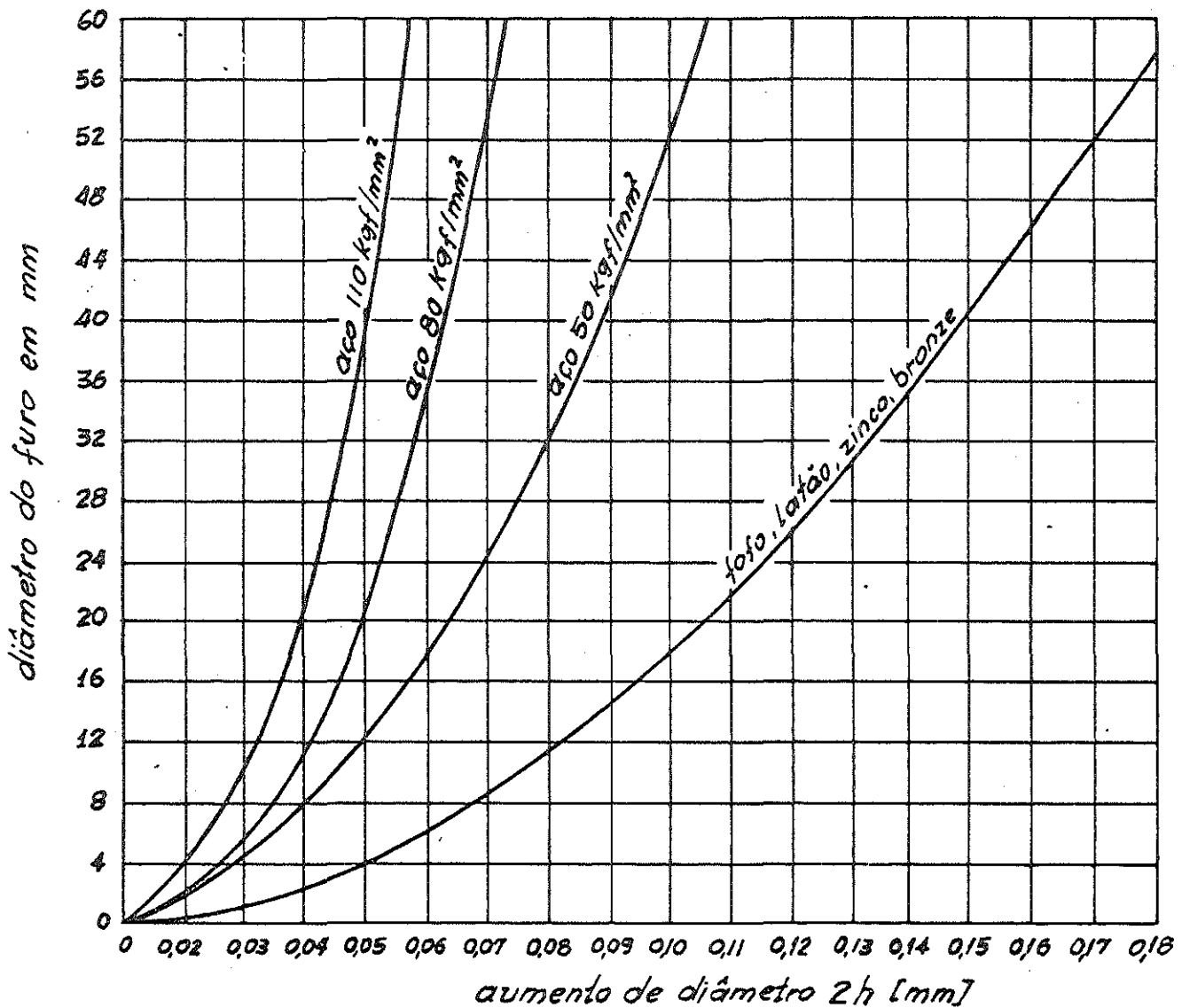
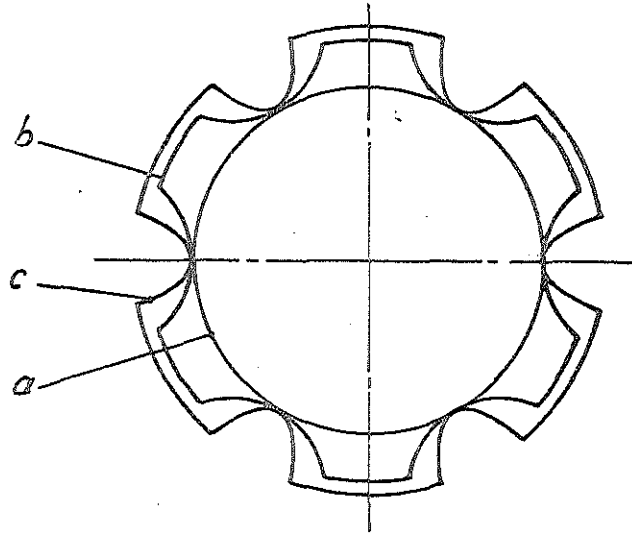


Gráfico para a determinação da espessura de corte h dos dentes de desbaste de uma brocha interna.

No brochamento de furos fundidos, os dentes da brocha se desgastam rapidamente. Nestes casos, obtêm-se resultados melhores empregando brochas com corte lateral como mostra a figura. No corte lateral, a espessura de corte "h" é tomada consideravelmente maior de acordo com a tabela seguinte:



Brochamento com corte lateral:

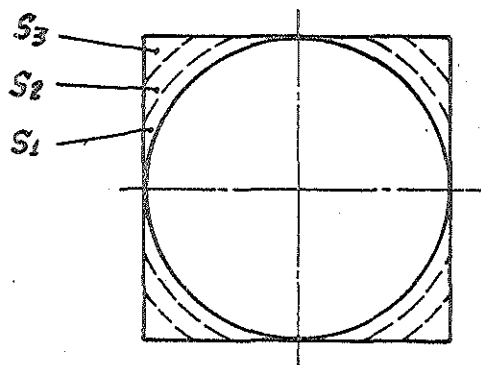
a = furo fundido

b = dente de entrada (primeiro dente)

c = segundo dente

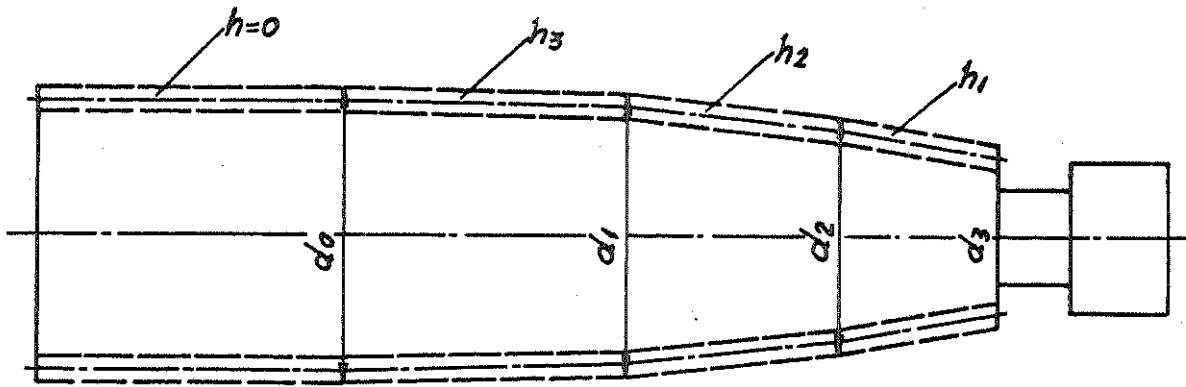
Material	h [mm]
Aço, $\sigma_R \approx 80 \text{ kg/mm}^2$	0,10 ... 0,30
Aço, $\sigma_R \approx 50 \text{ kg/mm}^2$	0,25 ... 0,75
Aço fundido	0,25 ... 0,75
ferro fundido	0,30 ... 1,0

No brochamento de furos de seção quadrada ou retangular, o valor de "h" é variável de maneira que a área da seção de cavaco retirada em cada dente, seja aproximadamente constante. Assim sendo, a força que atua em cada dente será constante.



Brochamento de um furo de seção quadrada:  $S_1 = S_2 = S_3$

O número total de dentes da brocha dependerá da espessura total do material a ser removido.

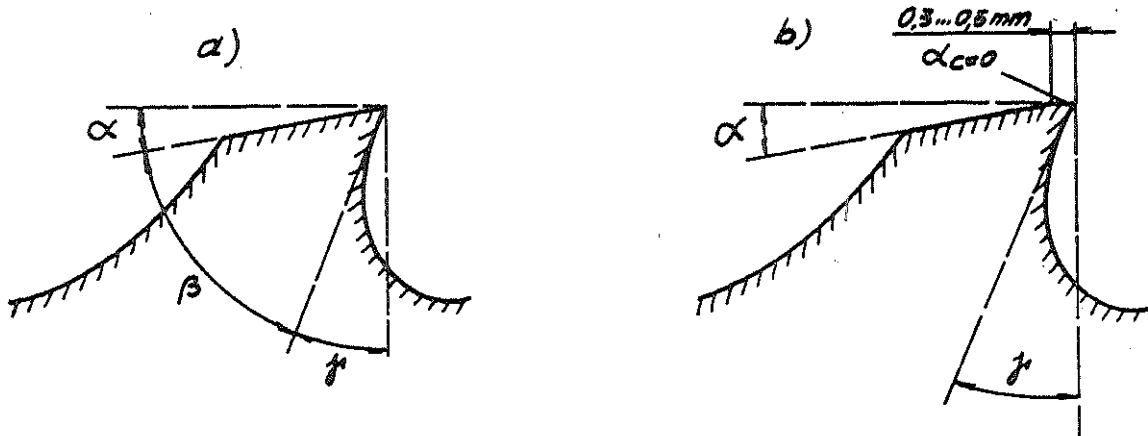


$$Z' = \frac{d_2 - d_3}{2 h_1} + \frac{d_1 - d_2}{2 h_2} + \frac{d_0 - d_1}{2 h_3}$$

admitindo 5 dentes de acabamento. o número total de dentes da brocha será:  
 $Z = Z' + 5$

Quando resultaria uma brocha excessivamente comprida, dado o grande número de dentes, é necessário construir duas ou mais brochas, dada a limitação im posta pelo curso máximo da máquina brochadeira.

Os ângulos de corte são definidos no plano de medida da ferramenta (DIN 6581). No caso de brochas de dentes retos que constituem a grande maioria, o plano de medida é o plano meridiano.



Ângulos dos dentes de uma brocha

- a) dente de desbaste
- b) dente de acabamento

Os valores recomendados para os ângulos de folga e de saída são apresentados nas tabelas seguintes:

Material	$\alpha$
aço .....	0,5 ... 3°
ferro fundido .....	2 ... 5°
latão, bronze .....	0,25... 0,5

Recomenda-se adotar  $\alpha = 3^\circ$  para os primeiros dentes da brocha, diminuindo este valor gradativamente até  $\alpha = 0,5^\circ$  nos últimos dentes. Os dentes de aca bamento ou calibração da brocha apresentam um chanfro cilíndrico, permitindo a manutenção da tolerância da brocha após afiações sucessivas.

Valores recomendados do ângulo de saída das brochas internas segundo A. Schatz

Material	$\gamma$
Aço $\sigma_R > 90 \text{ kg/mm}^2$ .....	8°
Aço $\sigma_R = 50 \dots 90 \text{ kg/mm}^2$ .....	10 .. 12°
Aço $\sigma_R < 50 \dots 50 \text{ kg/mm}^2$ .....	14 .. 18°
Aço fundido .....	10°
fo fo maleável .....	7°
fo fo cinzento .....	10°
Latão mole .....	10°
Latão duro .....	5°
Bronze .....	12°
Alumínio Mole .....	20°
Liga de alumínio com cobre .....	15°
Liga de alumínio com silício .....	12°
metal patente .....	2°
Zinco .....	12°

2.3. Força de corte

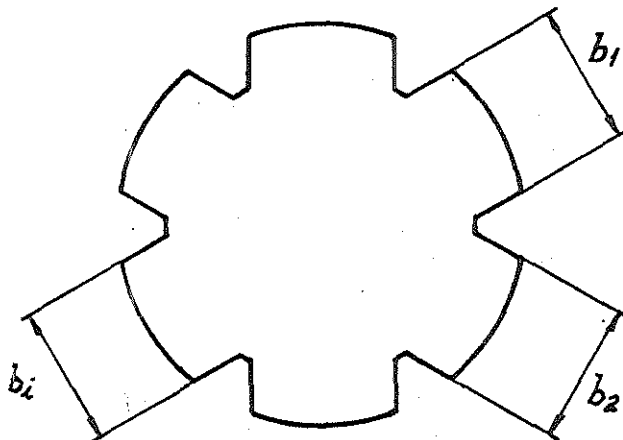
A força de corte por dente, segundo a direção do eixo da brocha é dada por:

$$P_c = k_s \times b \times h$$

$k_s$  = pressão específica de corte [ $\text{kg/mm}^2$ ]

$h$  =  $a_d$  = espessura de corte

$b$  = largura de corte  $\sum b_i$

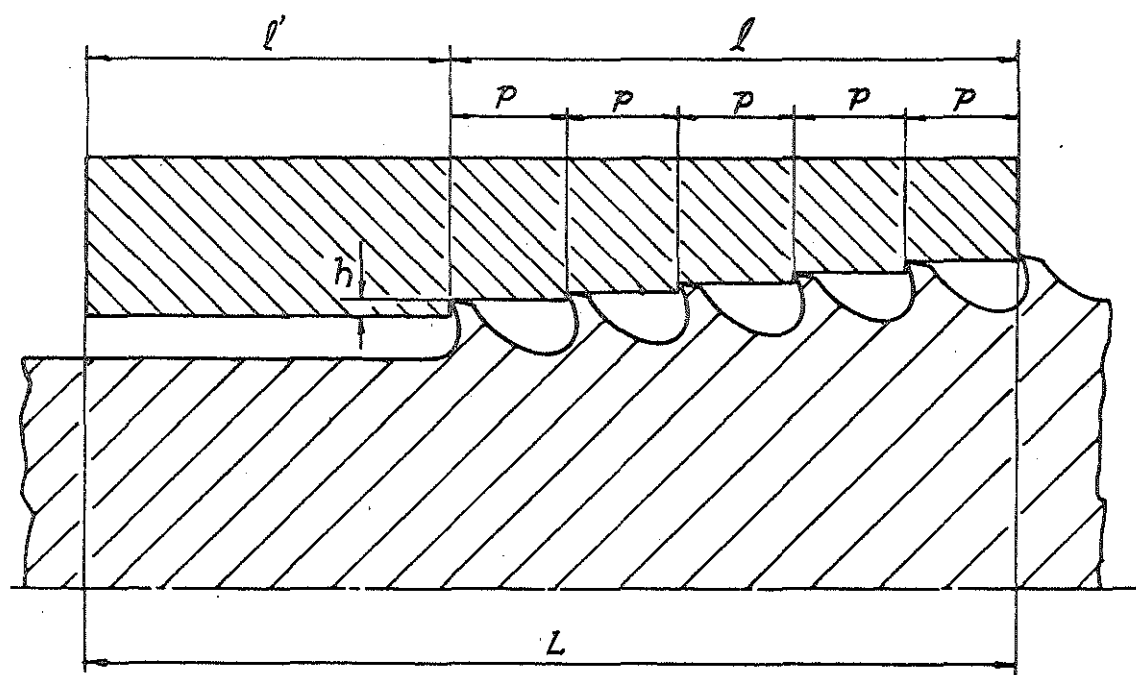


A pressão específica de corte pode ser calculada pela fórmula de Kienzle:

$$k_s = k_{s1} \cdot h^{-z} \quad \text{donde} \quad P_c = k_{s1} \times b \times h^{1-z}$$

Convém ressaltar que os valores da " $k_{s1}$ " e " $z$ " da fórmula de Kienzle foram determinados em ensaios de torneamento, devendo-se esperar um certo desvio entre a força de corte calculada e a medida num ensaio de brochamento. A força total de corte será a soma das forças por dente em ação: Quando  $h$  = constante, tem-se:

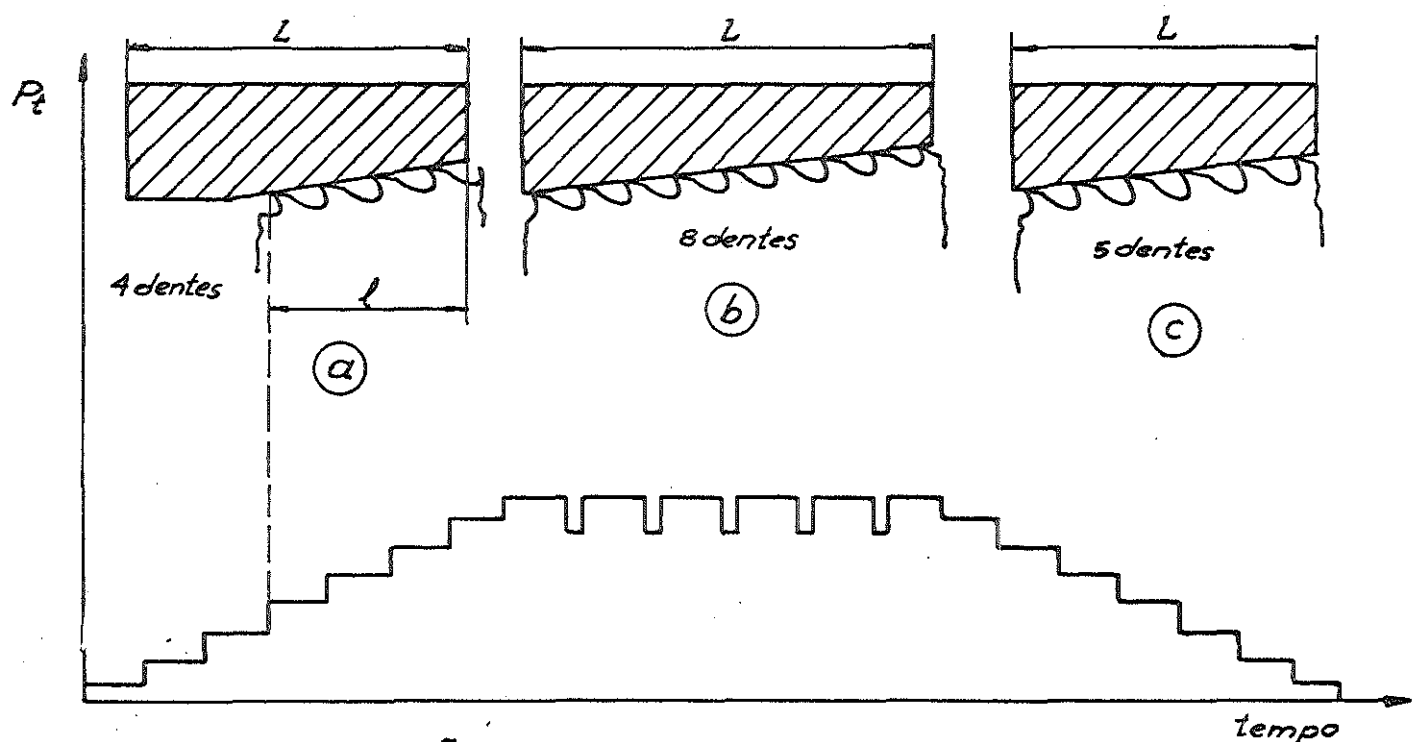
$$P_t = \sum P_{ci} = Z \times P_c \quad Z = \text{número de dentes em ação.}$$



O número de dentes em ação num dado instante será:

$$Z = \frac{l}{p} + 1$$

A variação da força total de brochamento no caso de  $h = \text{constante}$  pode ser vista na figura abaixo:



Variação da força de brochamento

A força máxima de brochamento deve ser menor ou igual à força máxima de tração (ou compressão) admissível na brocha,  $F_{\text{máx}}$ :

$$F_{\text{máx}} = \sigma_a \times S_{\text{min}}$$

onde  $S_{\text{min}}$  = área da seção mínima da brocha [ $\text{mm}^2$ ]

$\sigma_a$  = tensão admissível

= 12  $\text{kg/mm}^2$  para brochas de aço carbono; 16  $\text{kg/mm}^2$  p/ brochas de aço rápido.

Devemos ter:  $P_t < F_{\text{máx}}$

## 2.4. Velocidade de corte

A velocidade de corte empregada no brochamento dependerá do material usinado, das condições de usinagem e da máquina.

O limite superior da velocidade de corte dependerá da qualidade do acabamento, da vida da brocha e da capacidade da máquina.

O limite inferior da velocidade de corte dependerá das condições econômicas.

Recomendam-se os valores práticos indicados na tabela abaixo. Quando as características de brochamento de um dado material não são conhecidas, recomenda-se partir de velocidades de corte baixas ( $v \approx 1 \text{ m/min}$ ), que poderá ser aumentado gradativamente, até atingir um valor ótimo.

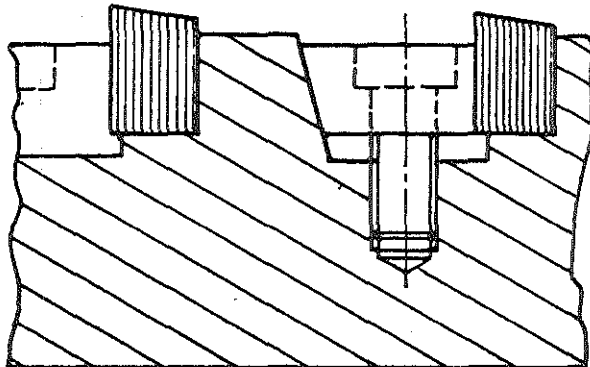
Material	Velocidade de corte $v$ [m/min]
Aço, $\sigma_R = 70 \dots 80 \text{ kg/mm}^2$ .....	3 ... 6
Brocha circular .....	3 ... 4,5
Brocha ranhurada .....	4,5 ... 5,5
Brocha de uma única ranhura .....	4,5 ... 6
Aço liga de alta resistência .....	1 ... 2
Aço de corte fácil .....	6 ... 8
Ferro fundido .....	4 ... 8
Latão e bronze .....	7,5 ... 10
Aço fundido .....	3 ... 7
Alumínio e suas ligas .....	6 ... 14

## 3. O brochamento externo

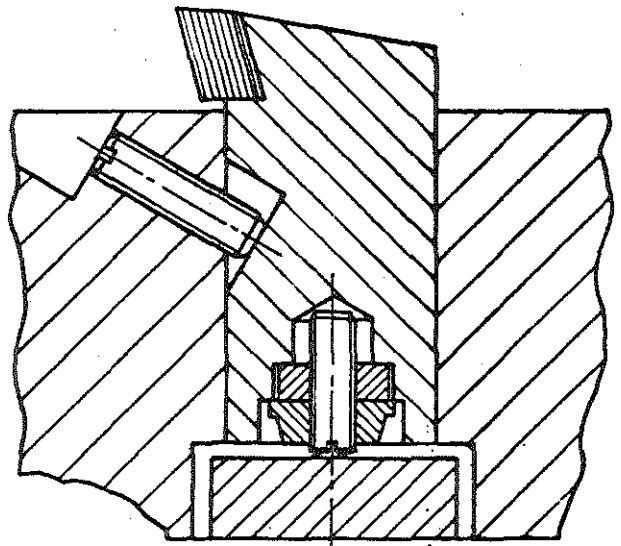
### 3.1. O material empregado na confecção das brochas

As brochas externas são geralmente fabricadas de aço rápido, cuja composição é idêntica à das brochas internas.

A velocidade de corte das brochas é baixa, de modo que o aço rápido terá uma vida suficientemente grande. O emprego de pastilhas de metal duro não é econômico. Somente em alguns casos especiais, como por exemplo no brochamento de materiais muito duros ou de superfícies brutas de fundição, o emprego das pastilhas de metal duro pode oferecer vantagens. As pastilhas de metal duro também são usadas na parte de acabamento da brocha para manter a tolerância durante muito tempo.



Fixação das pastilhas em metal em brochas

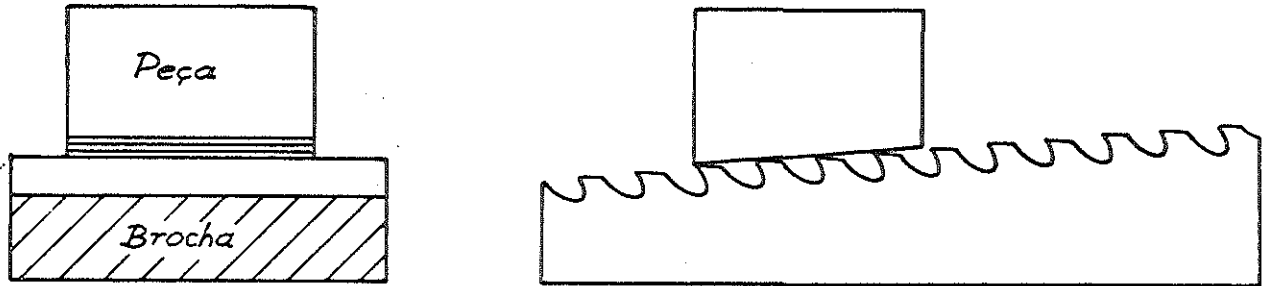


### 3.2. Forma das ferramentas

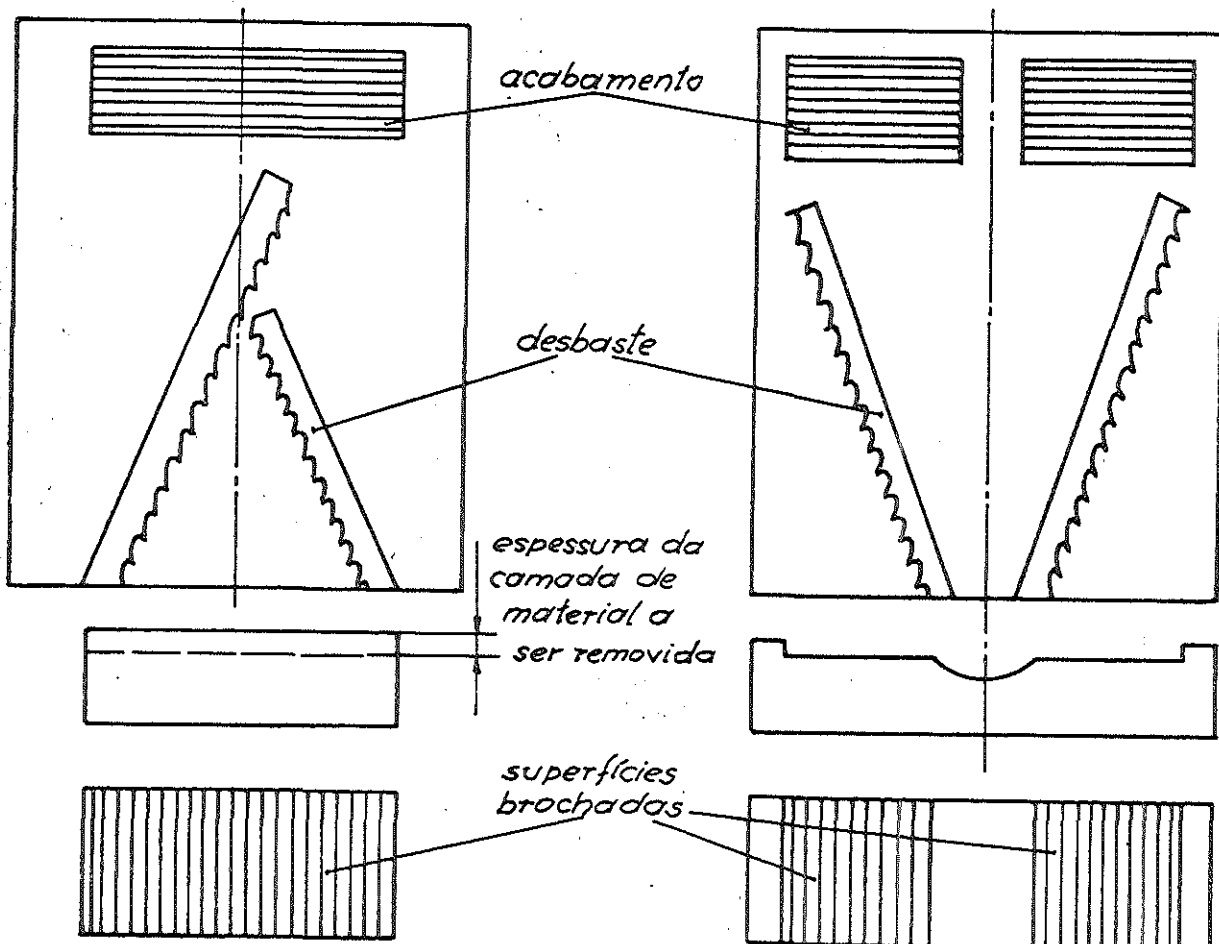
Dependendo da disposição das arestas cortantes nas brochas externas, distinguem-se 3 tipos de brochamento externo.

- brochamento por ataque frontal
- brochamento por ataque lateral
- brochamento por ataque combinado

O tipo mais freqüente é o brochamento por ataque frontal. A remoção de cavaco se dá em toda a largura da peça. É um processo empregado em peças laminadas ou em peças previamente usinadas, nas quais a espessura da camada a ser retirada é relativamente pequena.



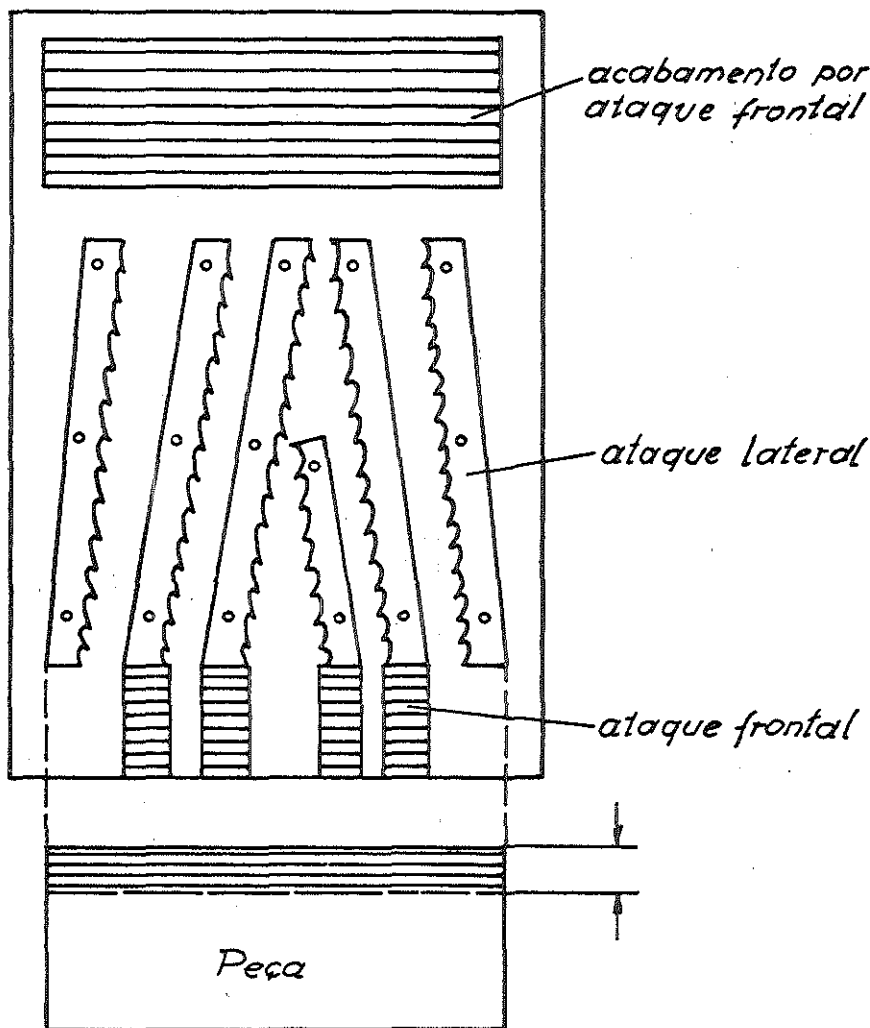
O brochamento por ataque lateral é empregado no brochamento de superfícies brutas de fundição ou forjamento. Os dentes estão dispostos perpendicularmente à superfície trabalhada e o comprimento dos dentes é igual à espessura total da camada de material a ser removida. Por via de regra, tais dentes realizam apenas o trabalho de desbaste e a ferramenta possui uma parte de acabamento por ataque frontal. Exemplos de trabalhos de brochamento externo por ataque lateral na parte de desbaste e ataque frontal na parte de acabamento



Quando a superfície a ser trabalhada for plana, o brochamento por ataque lateral pode ser realizado de fora para dentro da peça (a).

No caso de uma superfície do tipo (h), o brochamento por ataque lateral poderá ser divergente.

No brochamento de superfícies planas de extensão relativamente grande, emprega-se o brochamento externo por ataque combinado. Executam-se inicialmente uma série de ranhuras por meio de ataque frontal, as quais permitirão o prosseguimento por ataque lateral, executado por várias ferramentas de dentes laterais. A parte final da ferramenta apresenta dentes frontais, para o acabamento da superfície.



Brochamento externo por ataque combinado

O projeto da dentadura leva em conta uma série de fatores:

- A) Forma e Dimensão da peça
- B) Potência e características da máquina

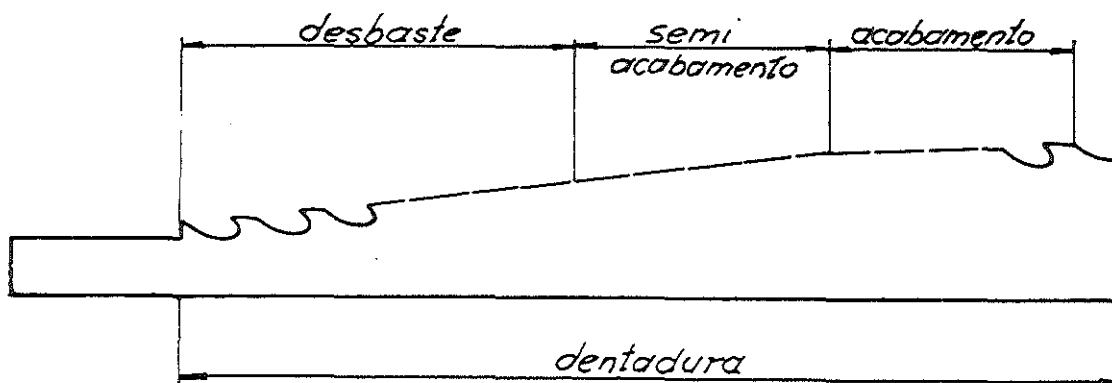
O projeto deve ser tal que:

- 1) o consumo de energia seja mínimo
- 2) as tolerâncias prescritas sejam mantidas
- 3) o acabamento superficial da peça seja ótimo
- 4) A vida da ferramenta seja grande
- 5) A saída do cavaco seja facilitada

Analogamente ao brochamento interno, a brocha externa apresenta sua dentadura subdividida em 3 partes:



- dentes de desbaste
- dentes de semi-acabamento
- dentes de acabamento ou calibração



Dentadura de uma brocha externa

Os dentes de desbaste removem a maior parte do material. Os dentes de semi-acabamento, de número reduzido, preparam o estado final de acabamento da superfície. Os dentes de acabamento, de número relativamente grande e proporcional ao comprimento de brochamento e ao acabamento desejado devem permitir a calibração de um número grande de peças mesmo após várias afiações. Cada uma das 3 partes da dentadura é caracterizada pelo passo p, a profundidade s dos dentes e pelos ângulos de corte.

Analogamente às brochas internas, o passo é dado pela expressão:

$$p = 2,5 \sqrt{L \times h \times C} \quad [\text{mm}]$$

L = comprimento de brochamento [mm]

h = espessura de corte por dente [mm]

C = coeficiente de acomodação do cavaco

C = 5 ... 8 para desbaste de materiais que formam cavaco quebradiço

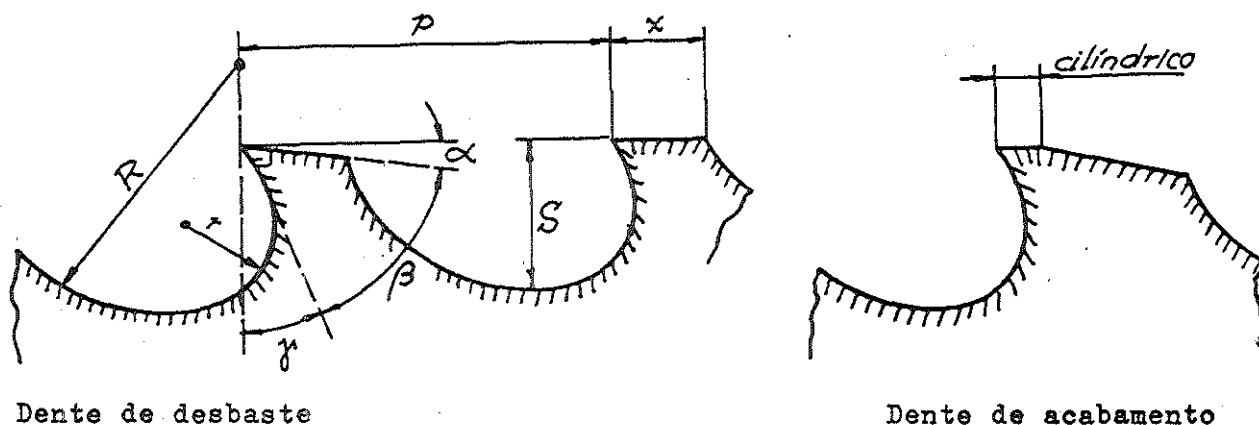
C = 10 para acabamento de materiais que formam cavaco quebradiço

C = 8 ... 13 para desbaste de materiais que formam cavaco contínuo

C = 16 para acabamento de materiais que formam cavaco contínuo

Valores recomendados da espessura de corte "h" segundo A. Schatz

Material	h [mm]	
	Desbaste	Acabamento
Aço, $\sigma_R \leq 60 \text{ kg/mm}^2$ .....	0,03.0,08	0,01
Aço, $\sigma_R > 60 \text{ kg/mm}^2$ .....	0,02.0,05	0,01
Aço fundido .....	0,05.0,10	0,02
fo fo maleável .....	0,05.0,10	0,01
fo fo cinzento .....	0,07.0,15	0,01
latão .....	0,05.0,20	0,01
zinco fundido sob pressão .....	0,08.0,20	0,02
bronze .....	0,10.0,30	0,01
liga de alumínio com cobre .....	0,08.0,20	0,02
liga de alumínio com silício .....	0,08.0,20	0,02
magnésio fundido sob pressão .....	0,20.0,40	0,02



Dente de desbaste

Dente de acabamento

Forma dos dentes de brochas externas

Dimensões recomendadas dos dentes de brochas externas, segundo A. Schatz

DIMENSÕES	C A S O	
	Normal	Comprimento de brochamento "L" grande
Altura do dente "S" .....	0,4 x p	0,3 p
Raio "r" .....	0,5 ... 0,6S	0,4 ... 0,6 S
Raio "R" .....	1,5 ... 2,0S	1,5 ... 2,0 S
Espessura "x" .....	0,3 ... 0,35p	0,25 p

Quanto maior fôr o ângulo de saída  $\gamma$ , menor será a força de corte e melhor será o acabamento superficial obtido porém, a resistência do dente será diminuída. Em face do exposto é interessante ter um ângulo de saída pequeno na parte de desbaste da brocha e um ângulo de saída grande na parte de acabamento da brocha. O ângulo de folga  $\alpha$  deve ser pequeno, a fim de não enfraquecer o dente.

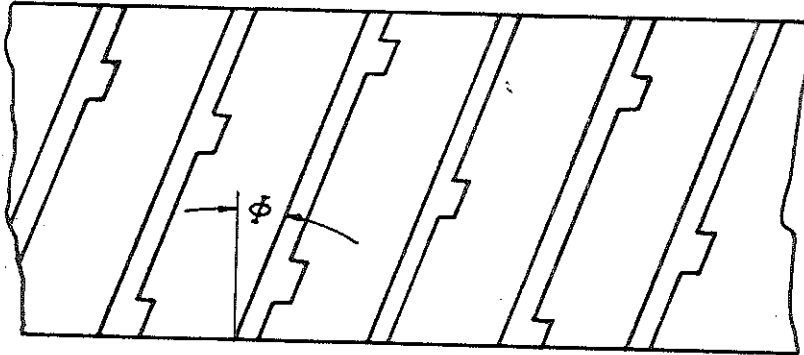
Valores recomendados dos ângulos das brochas externas, segundo A. Schatz

Material	$\gamma^\circ$	$\alpha^\circ$ *)
Aço, $\sigma_R$ 60 kg/mm <sup>2</sup> .....	15...20	1 ... 3
Aço, $\sigma_R$ 60 kg/mm <sup>2</sup> .....	8...12	0,5 ... 2
Aço fundido .....	10	1 ... 3
F <sup>2</sup> F <sup>2</sup> maleável .....	7	1 ... 3
F <sup>2</sup> F <sup>2</sup> cinzento .....	8	1 ... 5
F <sup>2</sup> F <sup>2</sup> duro .....	6	1 ... 3
Latão mole .....	8	0,5 ... 2
Latão quebradiço .....	0...5	0,5 ... 2
Zinco fundido sob pressão .....	12	1 ... 5
Bronze .....	0...8	0,5 ... 2
Alumínio fundido sob pressão .....	20	2 ... 5
Liga de alumínio com silício .....	15	1 ... 3
Magnésio fundido sob pressão .....	20	1 ... 3
Liga de alumínio com cobre .....	18	1 ... 3

Os valores superiores entendem-se para dentes de acabamento e os valores inferiores para dentes de desbaste.

A fim de reduzir as variações da força de corte total, as arestas de corte são inclinadas de um ângulo  $\phi \leq 30^\circ$ .

A figura abaixo mostra as ranhuras quebra-cavaco, cuja largura é de 0,5... 1 mm e a profundidade de 0,4 ... 0,8 mm. A distância entre as ranhuras varia de 5 ... 15 mm.



Brocha externa de dentes inclinados

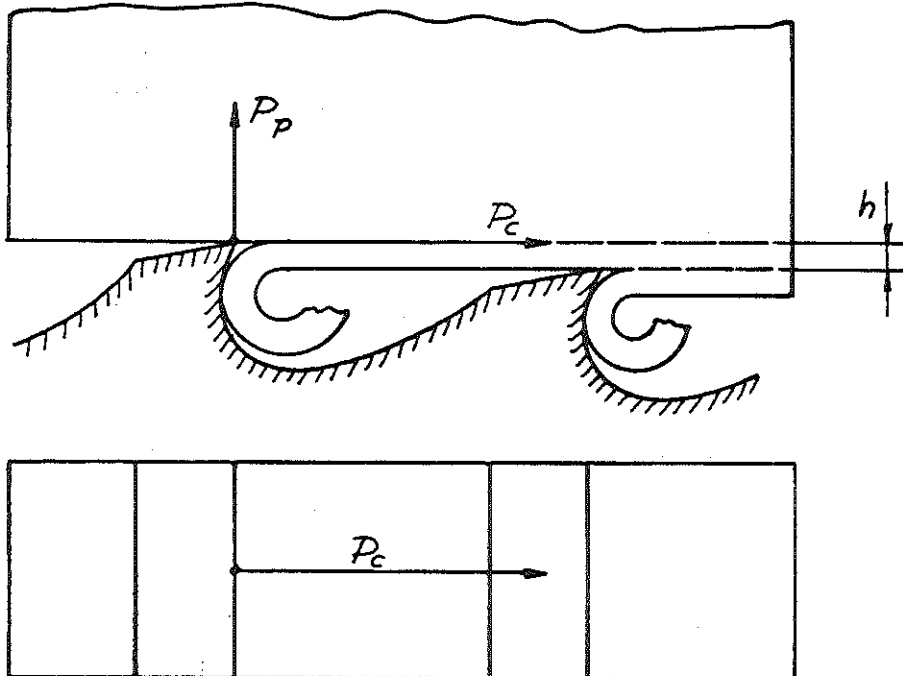
### 3.3. Força de corte

#### 3.3.1. Brocha com dentes retos

A força de corte é dada por:

$$P_c = k_{sl} \times b \times h^{1-z}$$

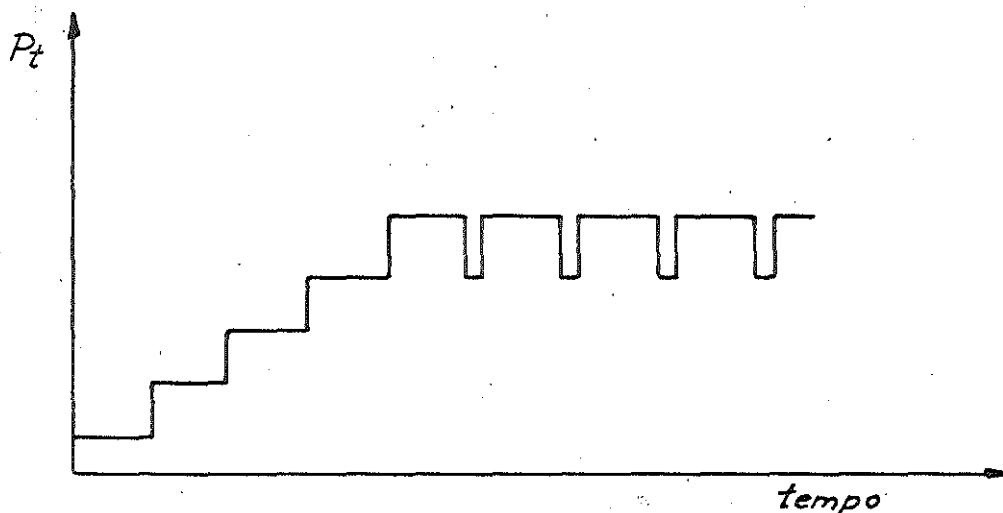
onde  $k_{sl}$  e  $z$  são os coeficientes da fórmula de Kienzle



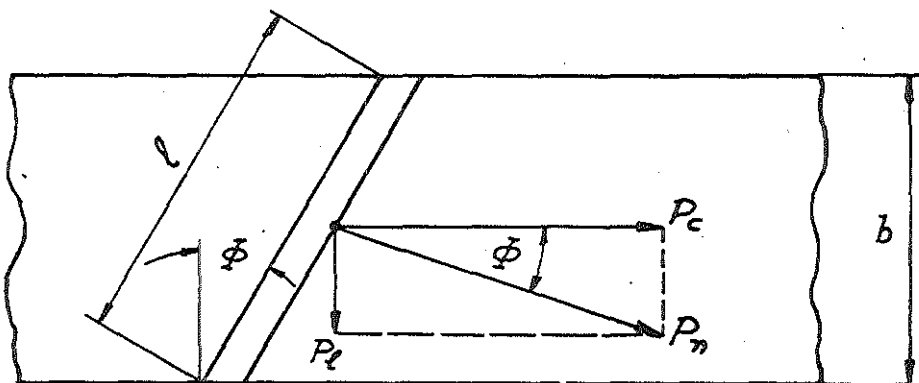
A componente  $P_p$  é a responsável pelas forças de atrito nas guias da brochadeira.

$$P_p \approx 0,3 \dots 0,5 P_c$$

A variação da força total de brochamento é análoga à do brochamento in terno.



### 3.3.2. Brocha com dentes inclinados



$$P_n = k_{sl} \cdot l \cdot h^{1-z}$$

$$\text{onde } l = \frac{b}{\cos \phi}$$

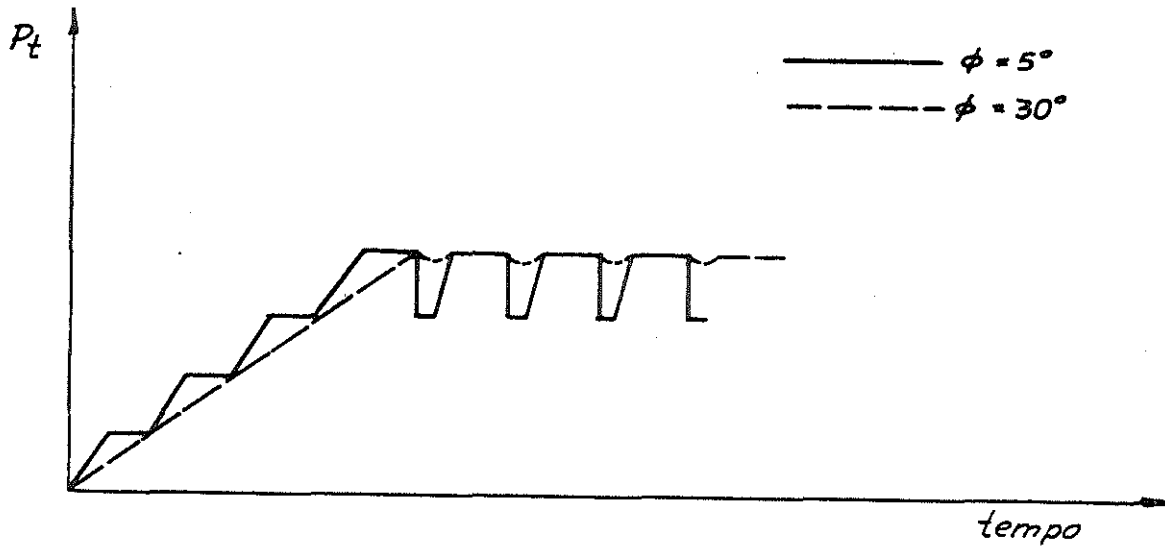
$$P_n = k_{sl} \cdot \frac{b}{\cos \phi} \cdot h^{1-z}$$

As componentes  $P_c$  e  $P_e$  são dadas por:

$$P_c = P_n \cdot \cos \phi \quad \therefore \quad P_c = k_{sl} \cdot b \cdot h^{1-z}$$

$$P_e = P_c \cdot \operatorname{tg} \phi \quad \therefore \quad P_e = k_{sl} \cdot b \cdot \operatorname{tg} \phi \cdot h^{1-z}$$

A figura abaixo representa a variação da força total de brochamento para  $\phi = 5^\circ$  e  $\phi = 30^\circ$



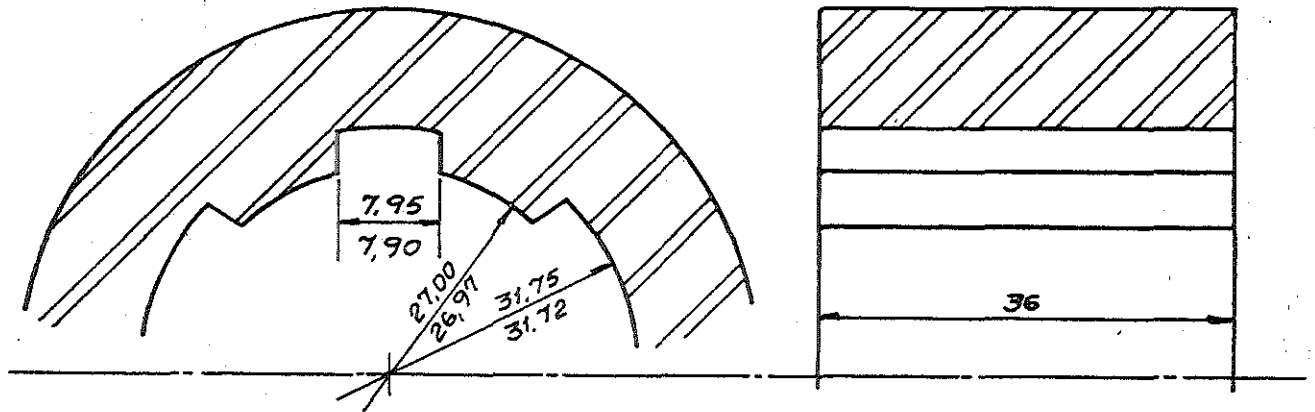
### 3.4. Velocidade de corte

Material	Velocidade de corte $v$ [m/min]
Aço muito duro .....	1 ... 2
Aço, tenaz .....	4 ... 6
Aço de boa usinabilidade .....	6 ... 10
Ferro fundido cinzento .....	8 ... 10
Latão, bronze, zinco .....	8 ... 12
Liga de metais leves .....	Velocidade máxima da máquina

Valores recomendados da velocidade de corte no brochamento externo, segundo A. Schatz.

PROBLEMA SOBRECROCHAS

Projetar uma brocha para a execução de furos rarunhados conforme o desenho abaixo, numa peça de aço ABNT 1045 ( $\sigma_R \approx 60 \text{ kg/mm}^2$  cujo furo inicial é de 25,4 mm.



Ranhura segundo SAE D = 1.1/4"  
Material da brocha: VW-Super (Villares)

Solução:

A. Vamos dividir o trecho de usinagem da brocha em 3 partes:

- 1) Desbaste e semi-acabamento do furo
- 2) Desbaste e semi-acabamento das ranhuras
- 3) Acabamento e calibragem do furo e das ranhuras

1) Desbaste e semi-acabamento do furo

Determinação da espessura de corte  $h$ , segundo o gráfico da apostila:

- para aço  $\sigma_R = 60 \text{ kg/mm}^2$  e diâmetro médio 26 mm temos  $2h = 0,068 \text{ mm}$

Determinação do passo  $p$  mínimo:

$$p = 2,5 \sqrt{h \cdot L \cdot C}$$

$$p = 2,5 \sqrt{\frac{0,068}{2} \cdot 36 \cdot 8} \quad \text{para } C=8 \text{ (desbaste de material de cavaco contínuo)}$$

$$p \approx 7,9 \text{ mm}$$

Adotaremos

$p = 8 \text{ mm}$

$p = 8,5 \text{ mm}$

$p = 9 \text{ mm}$

a fim de evitar vibrações durante a usinagem.

Distribuição dos dentes:

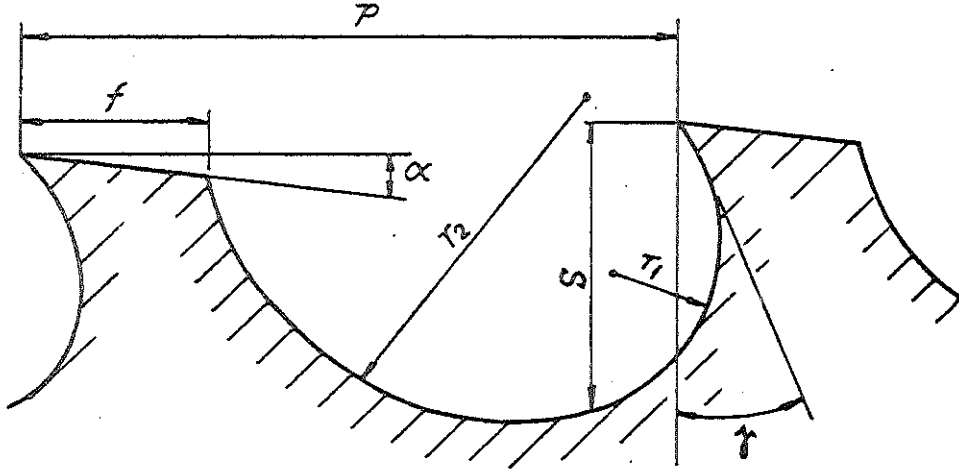
$\phi$  inicial .....: 25,4 mm } 20 dentes, com  $2h = 0,068 \text{ mm}$   
 $\phi$  intermediário...: 26,76 mm }

$\phi$  intermediário...: 26,76 mm } 5 dentes, com  $2h = 0,04 \text{ mm}$   
 $\phi$  final .....: 26,96 mm }

Alternando regularmente o passo, teremos um passo médio de 8,5 mm e o comprimento desta parte da brocha neste trecho será:

$$l_1 = (20 + 5) \cdot 8,5 = 212,5 \text{ mm}$$

Geometria dos dentes:



$$p = 8; 8,5; 9 \text{ mm (variável)}$$

$$s = 0,35 \cdot 8,5 \approx 3 \text{ mm}$$

$$r_1 = 0,4 \times 3 = 1,2 \text{ mm}$$

$$r_2 = 8,5 \text{ mm}$$

$$f = 0,3 \cdot 8,5 \approx 2,5 \text{ mm}$$

$$\alpha = 3^\circ \text{ para os primeiros dentes}$$

$$\alpha = 0,5^\circ \text{ para os últimos dentes}$$

$$\gamma = 11^\circ$$

## 2) Desbaste e semi-acabamento das ranhuras

Determinação da espessura de corte  $h$  segundo o gráfico da apostila:

- agora o diâmetro médio é  $\approx 29 \text{ mm}$

$$\cdot \cdot \cdot 2h = 0,070 \text{ mm}$$

Determinação do passo  $p$  mínimo:

-  $p \approx 7,9 \text{ mm}$

Adotaremos passo  $p = (8 + 8,5 + 9) \text{ mm}$  variável para evitar vibrações.

Distribuição dos dentes:

$\phi$ inicial .....	: 27 mm	} 64 dentes com $2h = 0,07 \text{ mm}$
$\phi$ intermediário .....	: 31,48 mm	

$\phi$ intermediário .....	: 31,48 mm	} 6 dentes com $2h = 0,04 \text{ mm}$
$\phi$ final .....	: 31,72 mm	

Alternando regularmente o passo teremos um passo médio de 8,5mm e o comprimento desta parte da brocha será:

$$l_2 = (64 + 6) \cdot 8,5 = 595 \text{ mm}$$

A geometria dos dentes é a mesma do trecho anterior.

### 3) Acabamento e calibragem do furo e das ranhuras

Para o acabamento:  $2h = 0,01 \text{ mm}$  . . . . .  $\left\{ \begin{array}{l} \text{para o furo: 4 dentes com } 2h = \\ 2h = 0,01 \rightarrow 0,04 \text{ mm} \\ \text{para a ranhura: 3 dentes com} \\ 2h = 0,01 \rightarrow 0,03 \text{ mm} \end{array} \right.$

Adotaremos 5 dentes para calibragem do furo e mais 5 dentes para calibragem das ranhuras.

O passo  $p$  continuará variando de 8 + 9 mm para ambos os tipos de dentes. Os ângulos serão:  $\alpha = 0$  e  $\gamma = 11^\circ$  e as demais dimensões dos dentes permanecem.

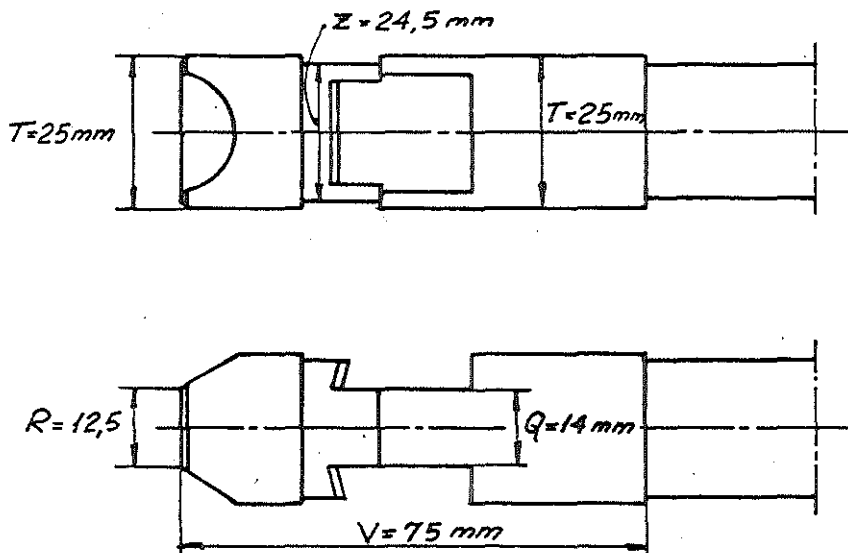
O comprimento desta parte da brocha será:

$$l_3 = (4 + 3 + 5 + 5) \cdot 8,5 = 144,5 \text{ mm}$$

Comprimento total da brocha:

$$L = l_{\text{cabo}} + l_{\text{guia anterior}} + l_1 + l_2 + l_3 + l_{\text{guia posterior}}$$

$$l_{\text{cabo}} = 75 \text{ mm}$$





$$L = 75 + 50 + 212,5 + 595 + 144,5 + 50 = 1127 \text{ mm}$$

$$L = 1127 \text{ mm}$$

### B. Esforços de corte

Segundo Kienzle

$$P = k_{s1} \cdot b \cdot h^{1-z}$$

$$k_{s1} = 200 \text{ kg/mm}^2$$

$$z = 0,17$$

$$h = \frac{0,068}{2} \text{ para desbaste do furo}$$

$$b_{\text{máx}} = \pi \cdot d_{\text{máx}} = \pi \cdot 26,76$$

$$P = 200 \cdot \pi \cdot 26,76 \cdot \left(\frac{0,068}{2}\right)^{1-0,17} = 16800 \times 0,06 = 1008 \text{ kg}$$

Como temos  $\frac{L}{p} + 1$  dentes usinando simultaneamente, a força total de corte será:

$$P_t = \left(\frac{36}{8,5} + 1\right) 1008 \approx 5000 \text{ kg}$$

Nota: Esta é apenas a força máxima no final do desbaste do furo. No final do semi-acabamento do furo seria:

$$P_t = \left(\frac{36}{8,5} + 1\right) \cdot 200 \cdot \pi \cdot 27 \cdot \left(\frac{0,06}{2}\right)^{1-0,17} \approx 4700 \text{ kg}$$

O esforço de corte no desbaste de ranhuras é menor que o calculado para o furo. É o bastante notar que o perímetro de corte é menor que o calculado.

Verificação da secção crítica: é o cabo a secção crítica. Segundo o esquema do cabo, já desenhado, temos:

$$S = Q \cdot Z = 14 \cdot 24,5 = 343 \text{ mm}^2$$

$$P_{ad} \leq S \cdot \sigma_{ad} = 343 \cdot 16 \approx 5500 \text{ kg}$$

Como a força total de corte  $P_t$  para o nosso caso é menor que  $P_{ad}$ , poderemos operar normalmente com tal brocha:

### Potência de corte

Para uma velocidade de corte 4,5 m/min:

$$N_c = \frac{P_t \cdot v}{60 \cdot 75} = \frac{5000 \cdot 4,5}{60 \cdot 75} = 5 \text{ CV}$$