

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS - EESC**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**  
**NÚCLEO DE MANUFATURA AVANÇADA - NUMA**

## **INTRODUÇÃO AO PROCESSO DE FRESAMENTO**

Prof. Dr. REGINALDO T. COELHO  
Prof. Dr. ERALDO JANONNE DA SILVA

Março 2018

## ÍNDICE

<b>1. <u>Processo de fresamento</u></b> .....	06
1.1 Generalidades .....	06
1.2 Fresamento e outras operações.....	06
1.3 Tipos fundamentais de fresamento.....	09
1.4 Processo de formação do cavaco.....	12
1.4.1 Forma do cavaco produzido por uma fresa cilíndrica tangencial.....	12
1.4.2 Forma do cavaco produzido por uma fresa frontal (ou de topo).....	14
1.4.3 Secção transversal do cavaco para um dente em operação.....	16
1.4.4 Secção transversal média do cavaco com vários dentes em ação.....	17
<b>2. <u>Formas construtivas e Normas</u></b> .....	18
2.1        Forma dos dentes.....	19
2.1.1 Dentes fresados ou agudos.....	19
2.1.2 Dentes detalonados.....	24
2.1.3 Dentes postiços.....	24
2.2 Ângulos das fresas.....	24
2.3 Formas das fresas.....	26
2.3.1 Fresas cilíndricas com dentes tangenciais.....	26
2.3.2 Fresas cilíndricas com corte tangencial e frontal.....	26
2.3.3 Fresas de disco.....	27
2.3.4 Fresas angulares.....	29
2.3.5 Fresas de haste com duas arestas cortantes.....	29
2.3.6 Fresas para rebaixos.....	31
2.3.7 Fresas de tubo.....	32
2.3.8 Fresas limas.....	33
2.3.9 Fresas com dentes postiços.....	34
2.3.10 Fresas de perfil constante.....	37
2.4 Normas.....	39
<b>3. <u>Materiais das fresas</u></b> .....	40
3.1 Aço ferramenta.....	41

3.1.1 Aço ferramenta sem liga.....	41
3.1.2 Aço ferramenta com liga.....	41
3.1.3 Aplicações do aço ferramenta.....	43
3.2 Aço rápido.....	42
3.2.1 Aplicações do aço rápido.....	43
3.3 Estelita.....	43
3.3.1 Aplicações da estelita.....	43
3.4 Metal duro.....	43
3.4.1 Aplicações do metal duro.....	44
3.5 Cerâmica.....	45
3.5.1 Aplicações da cerâmica.....	45
<b>4. <u>Afição de fresas</u>.....</b>	<b>46</b>
4.1 Afição de fresas tangenciais.....	47
4.1.1 Afição de dentes fresados ou agudos.....	47
4.1.2 Afição de dentes detalonados.....	53
4.2 Afição de fresas frontais.....	55
4.3 Afição dos demais tipos de fresas.....	55
4.4 Recomendações gerais.....	55
4.4.1 Qualidade dos rebolos abrasivos.....	55
4.4.2 Calor gerado na afiação.....	56
<b>5. <u>Forças de potências de corte</u> .....</b>	<b>56</b>
5.1 Fresas cilíndricas de dentes retos.....	56
5.1.1 Força de corte.....	56
5.1.2 Potência média total de corte.....	58
5.1.3 Força de corte máxima.....	59
5.1.4 Momento de torção.....	62
5.1.5 Volume de cavaco.....	64
5.1.6 Componentes da força de usinagem.....	64
5.1.7 Potência de avanço.....	66
5.2 Fresas cilíndricas de dentes inclinados.....	66
5.2.1 Generalidades.....	66
5.2.2 Potência e esforço de corte.....	71
5.3 Fresas frontais.....	73

5.3.1 Força de corte.....	75
5.3.2 Potência de corte.....	76
5.3.3 Momento de torção.....	77
5.3.4 Componentes da força de usinagem.....	78
5.3.5 Potência de avanço.....	79
5.4 Cálculo da potência de corte em base ao volume de cavaco removido.....	79
<b>6. <u>Seleção da velocidade de corte e do avanço</u>.....</b>	<b>85</b>
Bibliografia.....	88
Apêndice.....	89
Fábricas de fresas.....	89

## 1 - O PROCESSO DE FRESAMENTO

Antes de iniciar os cálculos de força e potência no processo de fresamento é aconselhável que se conheça o processo de formação de cavacos, o qual se encontra no texto sobre “FORÇA E POTÊNCIA NO PROCESSO DE TORNEAMENTO”. Sem essa primeira introdução pode ser difícil compreender algumas partes aqui tratadas. Adicionalmente uma breve descrição sobre generalidades em fresamento se faz necessária, como segue.

O fresamento é a operação de usinagem com formação de cavaco que se caracteriza pelos seguintes aspectos particulares:

- A ferramenta multicortante, chamada fresa, é provida de arestas cortantes dispostas simetricamente, ou não, ao redor de um eixo;
- A ferramenta, para executar a sua função, é provida de um movimento de rotação, ao redor do seu eixo, permitindo assim que cada uma das arestas cortantes (dentes da fresa) remova a parte de material que lhe compete fazê-lo na forma cavacos.
- O movimento de avanço que permite o prosseguimento da operação, é geralmente feito pela própria peça em usinagem, que está fixada na mesa da máquina, ou pela ferramenta em outros casos.
- O movimento de avanço obriga a peça passar pela ferramenta que lhe dá a forma e dimensão desejadas. A Figura 1.1 mostra algumas operações típicas de fresamento.

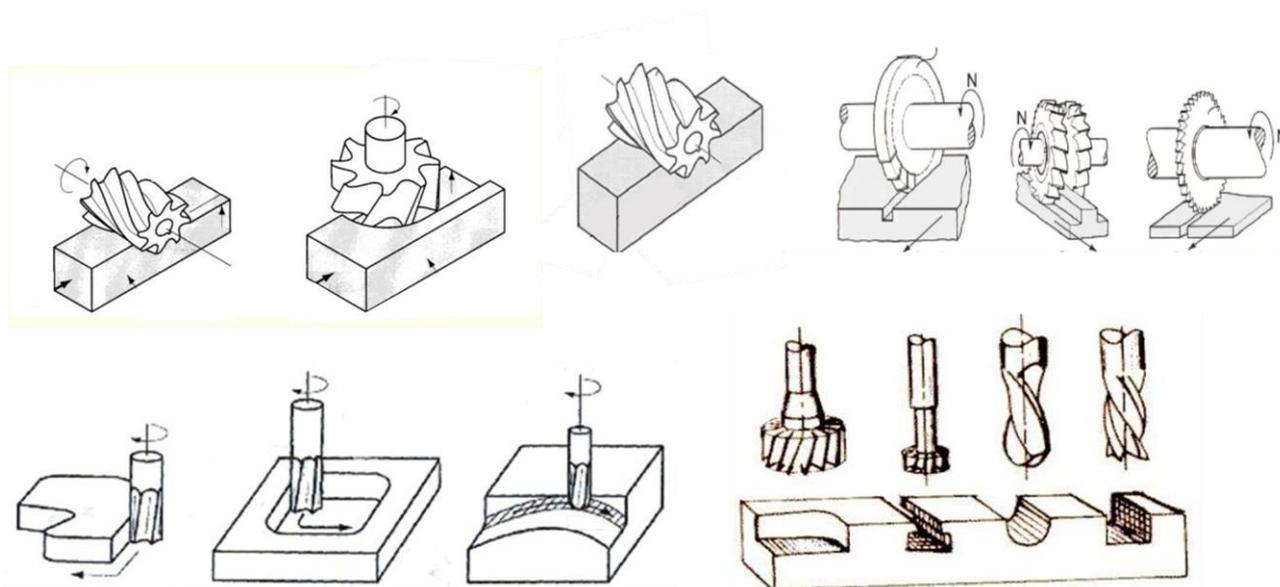


Figura 1.1: Exemplo de operações típicas de fresamento.

O fresamento utiliza ferramentas multicortante (fresas) e pode produzir superfícies planas, competindo assim com operações de aplainamento, muito embora nem sempre com vantagens. Da mesma forma, pode-se executar operações de furação, alargamento e mandrilamento em fresadoras apropriadas. Algumas fresadoras são capazes de usinar furos com alto grau de precisão em termos

de tolerâncias geométricas e de localização – tolerância alcançada de 0,025 mm a 0,050 mm. Podem competir com as furadeiras e mandriladoras levando vantagem econômica quando se tratar de pequenas quantidades de peças, sem o concurso de dispositivos ou gabaritos para a furação. No entanto, em caso de elevada precisão na locação de furos (tolerâncias inferiores a 0,02 mm) o uso de mandriladora se torna indispensável.

Com relação as superfícies planas aplaina limadora pode ser uma escolha mais apropriada para desbaste, uma vez que pode remover material mais rápido que um fresamento comum. No entanto, centros de usinagem com tecnologia CNC podem ser mais rápidos, muito embora seu custo inicial e de manutenção seja maior. Quando se trata de superfícies, curvas ou irregulares somente o Centro de Usinagem é capaz de realizar. Com relação a usinagem por abrasão, retificação plana, por exemplo, deve-se ressaltar a capacidade desta em conseguir tolerâncias bem menores que a do fresamento e um acabamento superior. Todavia a capacidade de remoção de material é maior no fresamento que na retificação. Disto decorre que, para boa qualidade de usinagem, é preciso fresar inicialmente, depois retificar.

### 1.3 Tipos fundamentais de fresamento

Segundo a disposição dos dentes ativos da fresa, classific-se a operação da seguinte maneira:

- Fresamento Tangencial – Nesta operação os dentes ativos estão na superfície cilíndrica da ferramenta. O eixo da fresa nesse caso é paralelo à superfície gerada, conforme Figuras 1.2(a) e 1.2(b);
- Fresamento Frontal – Nesta operação os dentes ativos estão na superfície frontal (topo) da ferramenta. O eixo da fresa neste caso é perpendicular a superfície gerada, conforme Figura 1.2(c);

No fresamento tangencial as fresas são chamadas fresas cilíndricas ou tangenciais enquanto que no fresamento frontal são chamadas fresas frontais ou de topo. As fresas cilíndricas podem operar segundo o fresamento concordante, caso em que o sentido do movimento de avanço coincide com o sentido do movimento rotatório da fresa, ou fresamento discordante, caso em que o sentido do movimento de avanço é contrário ao sentido do movimento rotatório da fresa, conforme Figuras 1.2(a) e 1.2(b).

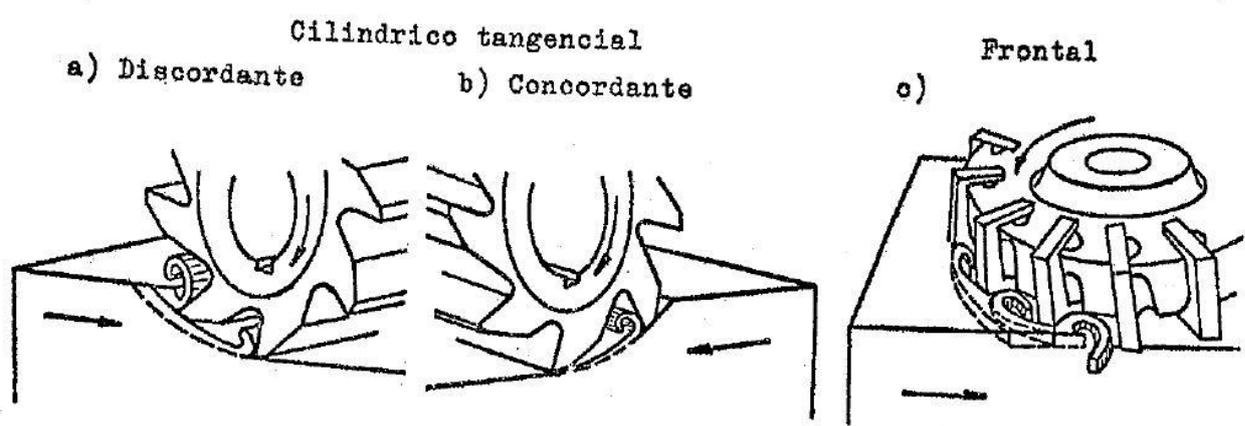


Figura 1.2 - Principais tipos de fresamento: Cilíndrico Tangencial e Cilíndrico Frontal

No fresamento discordante a espessura de usinagem,  $h$ , aumenta progressivamente de zero a um valor máximo  $h_{max}$  como mostra a Figura 1.3(b).

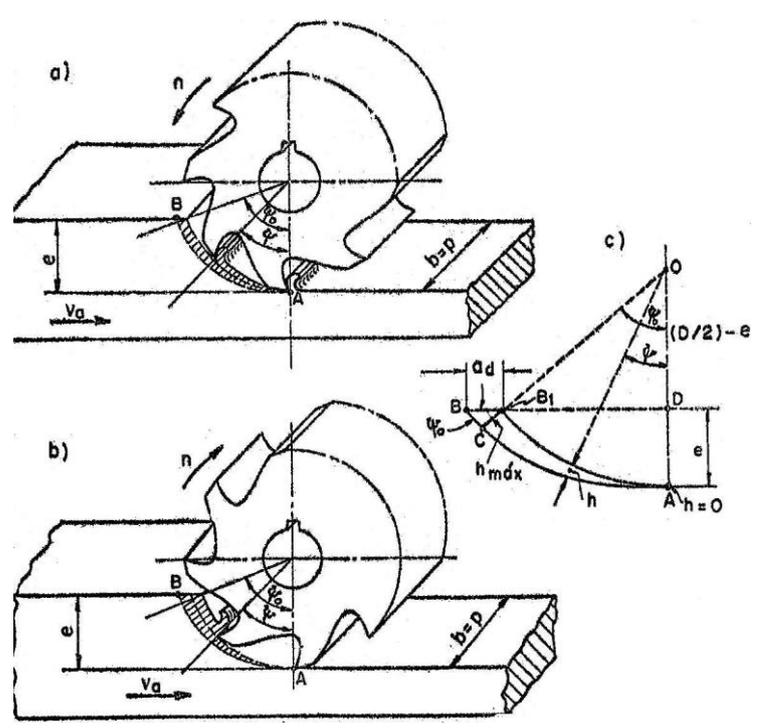


Figura 1.3 – Fresamento cilíndrico tangencial: a) concordante; b) discordante; c) secção transversal do cavaco.

Inicialmente há um notável atrito entre a ferramenta e a peça. Quando a tensão aplicada pela da aresta cortante atinge um valor capaz de vencer a tensão de ruptura do material, a mesma penetra na peça. Com a composição dos movimentos de corte e avanço a aresta cortante retira uma porção de cavaco em forma de virgula como mostra a Figura 1.3. Tem-se assim, no início da operação de

cada dente uma força vertical que tende a afastar o eixo árvore da mesa da fresadora (fresamento horizontal) enquanto que no fim de operação a aresta cortante tende a arrancar a peça da mesa. Esta alternância da componente vertical da força de usinagem pode produzir vibrações indesejáveis prejudicando o acabamento superficial e a tolerância dimensional da superfície fresada.

No fresamento concordante essas vibrações são minimizadas, pois a componente vertical da força de usinagem tende sempre a comprimir a peça sobre a mesa. No entanto, nas peças que apresentam uma camada superficial endurecida, crosta de fundição, etc, o contato inicial da aresta cortante se dá em condições desfavoráveis, o que pode diminuir a vida útil da ferramenta, além de originar uma componente maior de vertical da força de compressão. Outro inconveniente é que a componente horizontal da força de usinagem possui o mesmo sentido da força de avanço da mesa, e é de módulo variável. Este fato pode levar a um movimento oscilatório da mesa, quando esta componente é maior que a força de atrito entre a mesa da fresadora e suas guias. Este último inconveniente pode ser corrigido eliminando-se a folga entre a porca e o fuso da mesa da fresadora. Máquinas-ferramentas mais modernas usam fusos de esferas recirculantes montados com carga eliminando completamente esse problema. A utilização de ângulo de saída negativa em pastilhas de metal duro nas fresas cilíndricas tangenciais como mostra a Figura 1.4, melhora em vários casos o emprego do movimento concordante.

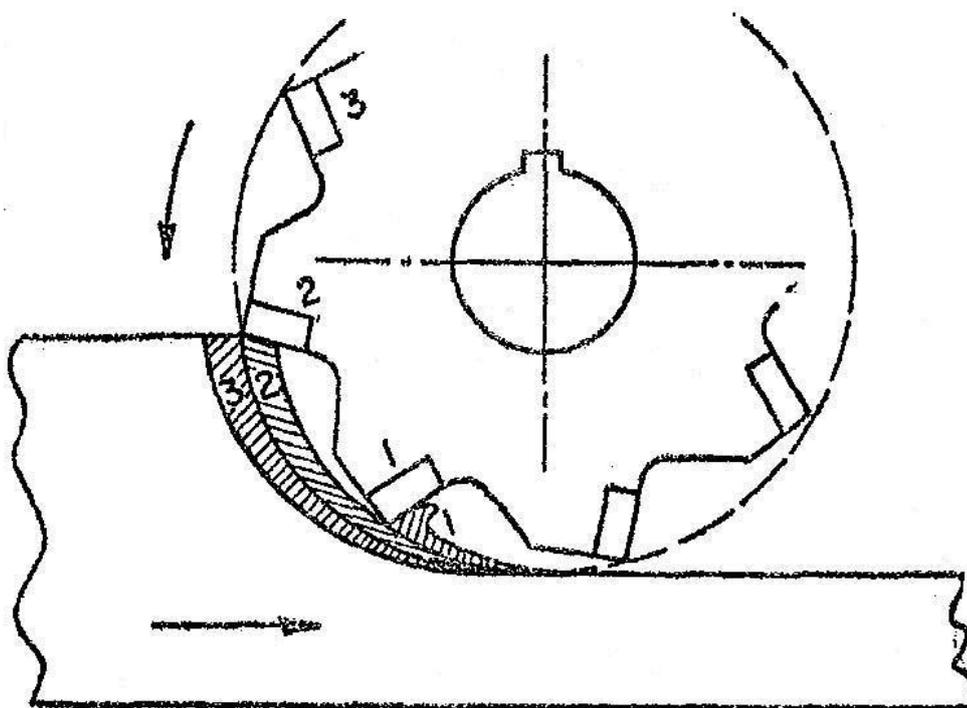


Figura 1.4 – Fresamento concordante com pastilhas de metal duro com ângulo de saída negativo.

No fresamento com fresas frontais o cavaco também se apresenta em forma de vírgula

(Figura 1.5), porém a variação da espessura de usinagem,  $h$ , não é tão grande como nas fresas cilíndricas tangenciais. Se o diâmetro da fresa for maior do que três vezes a largura da peça, conforme a Figura 1.5(b), o cavaco apresentará uma espessura praticamente constante, assemelhando-se assim a uma operação de torneamento.

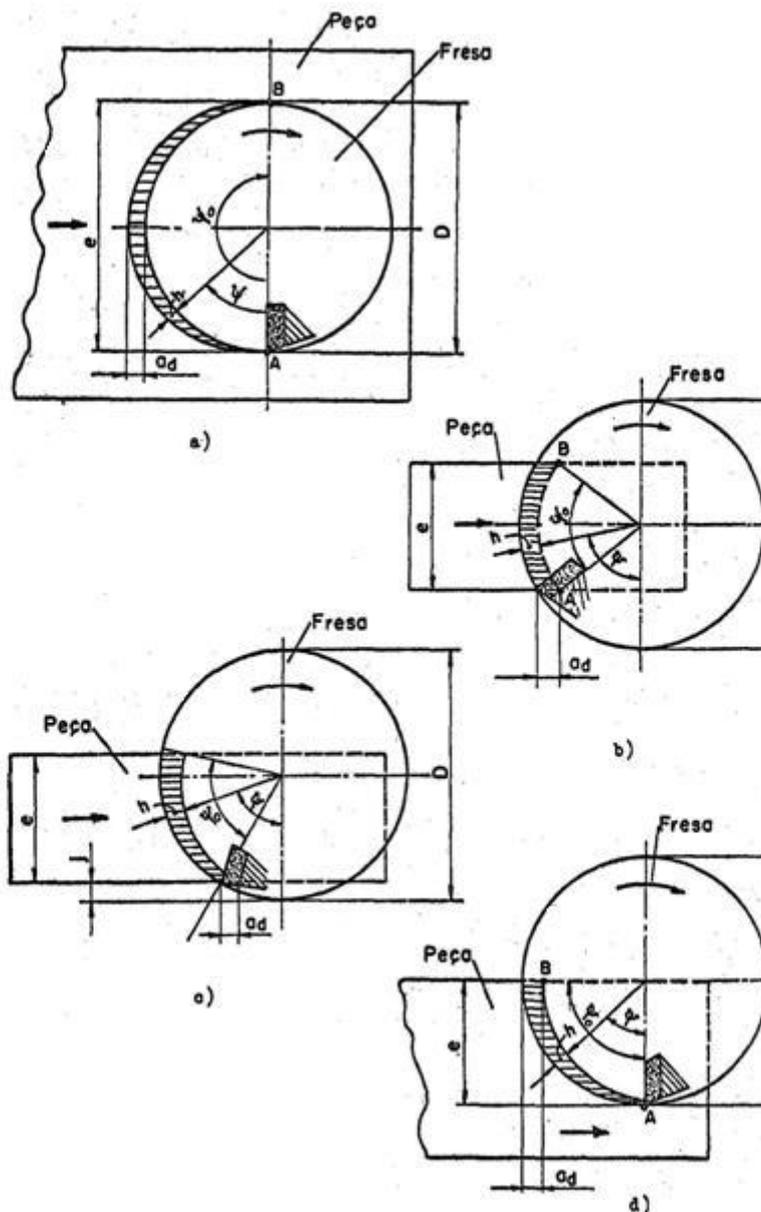


Figura 1.5 – Fresamento frontal: a) simétrico de rasgo; b) simétrico comum; c) assimétrico mostrando a dimensão “j”; d) assimétrico

A formação do cavaco na operação de fresamento obedece ao mesmo mecanismo descrito na referência bibliográfica [1]. Cumpre salientar, porém, que a forma do cavaco gerado no fresamento difere da forma daquele gerado no torneamento, furação, mandrilamento, alargamento e brochamento. No fresamento o cavaco tem a forma de uma vírgula, com a espessura,  $h$ , variável.

### 1.4.1 Forma do cavaco produzido por uma fresa cilíndrica tangencial.

Cada dente da fresa retira cavaco em forma de vírgula cujas secções transversais são limitadas por dois arcos, fig.1.6.

No fresamento tangencial discordante a camada retirada do material tem a espessura de corte variável: a espessura mínima é no ponto “A” onde o dente da fresa penetra o material e a espessura máxima é no ponto “B”

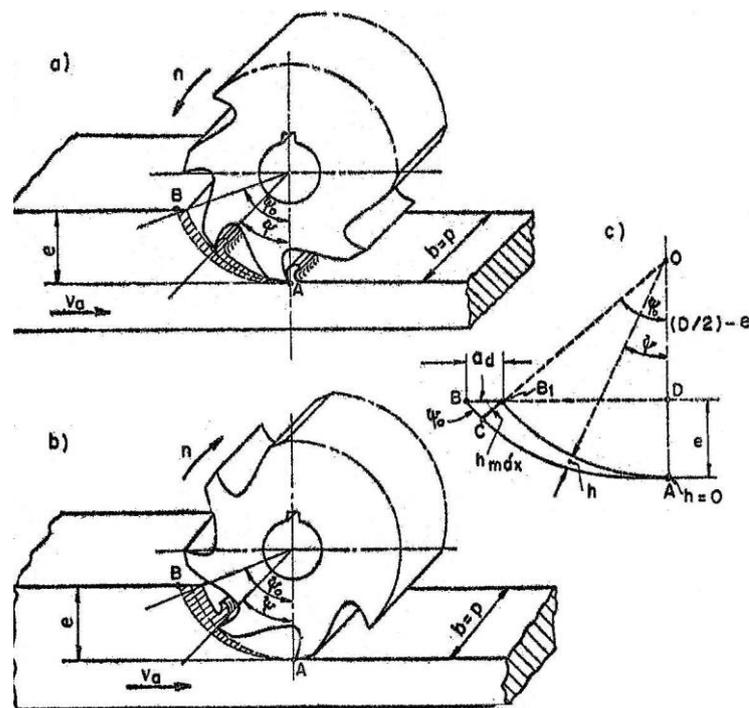


Fig. 1.6 – Fresamento cilíndrico tangencial: a) concordante; b) discordante; c) secção transversal do cavaco.

No fresamento tangencial concordante a camada retirada do material também tem a espessura de corte variável, porém em ordem diferente: a espessura máxima é onde o dente inicia a operação de corte penetrando no material, no ponto “B” e a espessura mínima é onde o dente sai do material em usinagem no ponto “A”, figura 1.6.a.

Para ambos os fresamentos, concordante ou discordante, pode-se definir o ângulo de contato do dente, representado por “ $\psi_0$ ” (“figura 1.6.c) como sendo o ângulo central formado pelos raios que ligam o centro da fresa com os pontos onde o dente penetra e sai do material em usinagem. Este ângulo, evidentemente, depende do diâmetro “D” da fresa e da espessura de penetração “e”. Sua expressão analítica é:

$$\cos \psi_0 = (D - 2 \cdot e)/D = 1 - 2 \cdot e/D \quad (1.1)$$

A espessura de corte, representada por “h”, é medida sempre numa direção radial (figura 1.5.c). A espessura máxima “ $h_{\max}$ ” é medida sobre o raio OC e é igual ao lado  $B_1 C$  do triângulo  $BCB_1$ , no qual o lado  $BB_1$  corresponde ao avanço por dente “ $a_d$ ” da fresa e o ângulo  $B_1 BC$  é igual ao ângulo de contato “ $\psi_0$ ”. Decorre disto que a máxima espessura de corte é:

$$h_{\max} = a_d \cdot \sin \psi_0 \text{ |mm|} \quad (1.2)$$

$$h_{\max} = a_d \cdot 2 \sqrt{e/D / (e/D)^2} \quad (1.3)$$

#### 1.4.2 Forma do cavaco produzido por uma fresa frontal (ou de topo)

No fresamento frontal distinguimos:  $P / X = 90^\circ$

Fresamento frontal simétrico – quando o deslocamento do eixo da fresa se faz sobre o eixo de simetria da peça em usinagem (figura 1.7.a e 1.7.b)

Fresamento frontal assimétrico – quando não se faz sobre o eixo de simetria da peça em usinagem (figura 1.7.c e 1.7.d)

As formas dos cavacos gerados no fresamento frontais simétricos e assimétricos podem ser vistas na figura 1.7.

O ângulo de contato do dente “ $\psi_0$ ” ‘formado pelos raios traçados do centro da fresa aos pontos onde o dente penetra e sai do material em usinagem – são os pontos onde o dente inicia e termina sua operação de corte durante uma rotação completa da fresa.

O fresamento frontal simétrico pode ser subdividido em fresamento frontal de rasgo (u canal), quando  $e = D$  e o ângulo de contato do dente  $\psi_0 = 180^\circ$  (figura 1.7.a), e fresamento frontal comum, quando  $e < D$  (figura 1.7.b) neste caso o ângulo “ $\psi_0$ ” é dado por:

$$\text{sem}(\psi_0/2) = e/D$$

Na figura 1.7 constata-se que a espessura de corte “h”no caso de fresamento frontal simétrico de rasgo, varia de zero (onde o dente penetra o material) até “ $a_d$ ” quando  $\psi_0/2 = 90^\circ$ . Assim a espessura máxima de corte é igual, neste caso, ao avanço por dente “ $a_d$ ” da fresa.

$$h_{\max} = a_d \text{ |mm|} \quad (1.5)$$

No caso de fresamento frontal simétrico comum (figura 1.7 b)a espessura de corte “h”para qualquer posição do dente da fresa e é determinada através do ângulo  $\psi_0$ , a partir de  $\psi_0 = 90^\circ - (\psi_0/2)$ , por:

$$h = a_d \cdot \text{sen} \psi_0 \text{ |mm|} \quad (1.6)$$

Neste caso, como se observa na figura 1.7.b, a espessura mínima de corte “ $h_{\min}$ ”, no ponto “A” não é igual a zero; e a espessura máxima é no ponto “C”, a  $\psi = 90^\circ$ , onde  $= a_d \text{ |mm|}$

No caso de fresamento frontal assimétrico a espessura de corte varia da mesma maneira que no fresamento tangencial. Assim se tem (1.7.c e 1.7.d)

$$h = a_d \cdot \text{sen} \psi_0 \text{ |mm|} \quad (1.7)$$

$$h_{\max} = a_d \cdot \text{sen} \psi_0 \text{ |mm|} \quad (1.8)$$

No fresamento frontal assimétrico como na figura 1.7.c as condições mais favoráveis para a penetração do dente no material em usinagem são obtidas quando o afastamento “j” é:

$$J = 0,05 \cdot D \text{ |mm|} \quad (1.9)$$

#### 1.4.3 Secção transversal do cavaco para um dente em operação

A área da secção transversal do cavaco é o produto da espessura de corte ‘h’ pela largura de corte ‘b’, que neste caso coincide com a profundidade de corte ‘p’.

$$S = h \cdot b = h \cdot p \text{ |mm}^2 \text{ |} \quad (1.10)$$

onde  $S$  = área da secção transversal do cavaco | mm<sup>2</sup> |

$b$  = largura de corte |mm|

$h$  = espessura de corte |mm|

$p$  = profundidade de corte |mm|

Como a espessura de corte varia durante a operação de um dente da fresa, desde zero até ‘ $h_{\max}$ ’ (para uma fresa tangencial comum), também a área da secção transversal do cavaco varia desde zero até um valor máximo. Este máximo será:

$$S_{\max} = p \cdot h_{\max} = p \cdot a_d \cdot \sin \psi_0 \text{ |mm}^2 \text{ |} \quad (1.11)$$

ou

$$S_{\max} = p \cdot h_{\max} = 2p \cdot a_d \cdot \sqrt{e/D - (e/D)^2} \text{ |mm}^2 \text{ |} \quad (1.12)$$

A secção transversal média do cavaco para uma fresa tangencial comum será naturalmente igual a metade da secção máxima ‘ $S_{\max}$ ’ porque  $S_{\min} = 0$

Assim:

$$S_m = (p/2) \cdot h_{\max} = (p/2) \cdot a_d \cdot \sin \psi_0 \text{ |mm}^2 \text{ |} \quad (1.13)$$

ou

$$S_m = (p/2) \cdot h_{\max} = p \cdot a_d \cdot \sqrt{e/D - (e/D)^2} \text{ |mm}^2 \text{ |} \quad (1.14)$$

A secção transversal média do cavaco para uma fresa frontal é aproximadamente igual a secção transversal máxima do cavaco no caso do fresamento frontal simétrico comum, ao passo que é a metade do valor máximo no caso do fresamento frontal simétrico de rasgo, e finalmente, no caso do fresamento frontal assimétrico vale 70% do valor máximo. No item relativo a potência de corte tratar-se-á exatamente destes valores com relações matemáticas deduzidas para a espessura atual do cavaco.

#### 1.4.4 Secção transversal média do cavaco com vários dentes em ação.

As equações 1.11, 1.12, 1.13 e 1.14 podem ser usadas para o cálculo da secção transversal máxima e média do cavaco, quando apenas um dente está operando. No caso de vários dentes operarem simultaneamente e, ainda mais, tais dentes serem helicoidais (vantagem de suavidade de operação) as fórmulas acima não são válidas.

Assim sendo, apresenta-se abaixo um método simples para a determinação da secção transversal média do cavaco removido para todos os dentes helicoidais (ou angulares) que operam simultaneamente.

A quantidade de cavaco removido por uma fresa em minuto tem seu volume dado por:

$$Q\mu = p \cdot e \cdot v_a \text{ |mm}^3/\text{min|} \quad (1.15)$$

onde:

$$Q\mu = \text{quantidade de cavaco |mm}^3/\text{min|}$$

$$p = \text{profundidade de corte |mm|}$$

$$e = \text{espessura de penetração |mm|}$$

$$v_a = \text{velocidade de avanço da fresa |mm/min|}$$

Multiplicando-se a secção transversal média “ $S_m$ ” do cavaco removido, expressa em  $\text{mm}^2$  pela velocidade de corte em m/min, isso é, por  $1000 \cdot v$ , obtém-se o volume do cavaco removido por minuto. Assim:

$$Q\mu = 1000 \cdot v \cdot S_m \text{ |mm}^3/\text{min|} \quad (1.16)$$

Substituindo-se  $Q\mu$  pela expressão (1.15) vem:

$$p \cdot e \cdot v_a = 1000 \cdot v \cdot S_m$$

de onde:

$$S_m = (p \cdot e \cdot v_a) / 1000 \cdot v \text{ |mm}^2 \text{|} \quad (1.17)$$

ou sabendo-se que  $v_a = a_d \cdot Z \cdot n$ ;  $v = (\pi \cdot n \cdot D) / 1000$ , tem-se :

$$S_m = (p \cdot e \cdot a_d \cdot Z \cdot n) / (1000 a_d \cdot \pi \cdot n \cdot D) / 1000$$

$$S_m = (p \cdot e \cdot a_d \cdot Z) / \pi \cdot D \text{ |mm}^2 \text{|} \quad (1.18)$$

## 1. FORMAS CONTRUTIVAS E NORMAS

A qualidade da superfície fresada depende do emprego da ferramenta correta, estado das arestas cortantes, centragem da fresa, e para cada material em usinagem há um número de dentes recomendado, assim como os ângulos de corte ( $\alpha, \beta, \gamma, \lambda \dots$ ). Decorre deste fato a necessidade de se ter em mão um grande estoque de ferramentas, o que naturalmente é muito custoso. Uma solução

simplificativa é dividir os materiais a usinar em três grupos, e para tais são fixadas as dimensões das fresas. Os grupos são:

- aços e Fo Fo comuns de construção mecânica:

São os aços carbono bem como os aços para beneficiamento e cementação até uma resistência de  $70\text{kgf/mm}^2$ , ferro fundido e ferro maleável.

- materiais tenazes duros:

São os aços ligas para cementação e beneficiamento com resistência superior a  $70\text{kgf/mm}^2$ , bem como os aços ferramenta, aços rápido e aço fundido.

- materiais leves e moles:

São o alumínio e suas ligas, ligas de magnésio e ligas de zinco.

A tabela II.1 da valores orientativos para a escolha dos números de dentes, e as tabelas II.2 e II.3, valores dos ângulos de fresas.

## 2.1 Forma dos dentes

Os dentes podem ser fresados (ou agudos), detalonados ou postiços. (figura 2.1)

### 2.1.1 Dentes fresados ou agudos

É a forma mais comum, mais simples de ser feita. A figura 2.1.a mostra o tipo dito dente de serra que apresenta a desvantagem de ser pouco resistente. As afiações sucessivas conduzem a uma variação progressiva da forma dos dentes e a uma vida pequena para a ferramenta.

A figura 2.1.b apresenta um tipo mais resistente. De maneira geral as fresas com dentes fresados ou agudos se prestam para serviços de desbaste e de acabamento de superfícies planas. A afiação se faz apenas na superfície de incidência (ou folga).

TABELA IL.1 – NÚMEROS DE DENTES RECOMENDADOS PARA FRESAS [2]

Diâmetro (mm)	Fresa tangencial de aço rápido	Fresa de haste	Fresas de disco		Fresas frontais de dentes posições			
			Aço rápido	Metal duro	Aço rápido para aço	Metal duro para aço		Metal duro para F <sub>0</sub> F <sub>0</sub>
						Desbaste	Acabamento	
50	6	4-5	10					
63	8	6-8	10					
80	8	6-8	12					
100	10		14		10	8		8
125	12		16	8-10	12	8		8
160	14		18	10-14	12	8	10	10
180			20		14	8	10	12
200			22	12-18	14	8	12	12
225					16	10	14	14
250				14-22	16	10	16	16
300					16	10	16	18
315				16-26	20	12	18	18
360					24	12	20	20
400					28	14	22	22
450					32	14	24	24
500					36	16	26	26
560						18	28	28
600						18	28	30
630						20	30	30
650						20	30	32
700						22	32	32
750						22	32	34
800						24	34	34
850						24	34	36
900						26	36	36
950						26	36	40
1000						28	40	40

TABELA II.2.a – VALORES RECOMENDADOS DOS ANGULOS DAS FRESAS SEGUNDO  
H. SCHALLBROCH [2]

FRESAS DE AÇO RÁPIDO													
Material	Resist. $\sigma_t$ Ou dureza HB (Kg*/mm <sup>2</sup> )	Fresas cilíndricas tangenciais			Fresas cilíndricas fr. tangenciais			Fresas de disco			Fresas de haste		
		$\alpha$	$\gamma$	$\phi$	$\alpha$	$\gamma$	$\phi$	$\alpha$	$\gamma$	$\phi$	$\alpha$	$\gamma$	$\phi$
Aço carbono	Até 50												
	50-70	7	18	45	7	15	25	7	15	20	8	15	4
	70-90	6	15	45	6	12	25	6	12	15	6	12	3
	90-110	6	10	40	6	8	25	6	8	12	6	8	3
Aço liga	38-52	5	8	40	5	6	20	5	6	10	6	8	2
Aço fundido		5	14	40	5	10	22	5	10	20	6	12	4
F <sub>0</sub> F <sub>0</sub> cinzento	Até 200HB	6	15	45	6	12	25	6	12	15	6	12	3
F <sub>0</sub> F <sub>0</sub> modular	AC. 200HB	5	12	40	6	12	20	6	12	15	7	12	3
F <sub>0</sub> F <sub>0</sub> maleável		6	14	40	6	12	22	6	12	15	6	12	3
		5	15	40	5	12	22	5	12	20	6	12	3
Ligas de Al.		8	25	45	8	25	35	8	25	35	8	25	4
Latão		6	15	40	6	12	20	6	12	20	6	10	3
Bronze		6	12	40	6	12	20	6	12	15	6	10	3
Plásticos		8	25	40	8	25	35	8	20	35	8	20	4
Código:	Observação: nas fresas com dentes helicoidais os ângulos $\alpha$ , $\gamma$ e $\phi$ são medidos num plano perpendicular à hélice.												
	$\alpha$ - ângulo de folga												
	$\gamma$ - ângulo de saída												
	$\lambda$ - ângulo de inclinação												
	$\phi$ - ângulo de hélice												

**TABELA II.2.b – VALORES RECOMENDADOS DOS ANGULOS DAS FRESAS SEGUNDO H. SCHALLBROCH [2]**

FRESAS DE FACEAR COM DENTES POSTIÇOS													
Material	Resist. $\sigma_t$ Ou dureza HB (Kg*/mm <sup>2</sup> )	Aço Rápido						Metal duro					
		$\alpha$	$\gamma$	$\lambda$	X	$\gamma_x$	$\gamma_y$	$\alpha$	$\gamma$	$\lambda$	X	$\gamma_x$	$\gamma_y$
Aço Carbono	Até 50	7	15	15	60	-6	19	8	-5	4	60	-6	-3
	50-70	7	15	15	60	-6	19	8	-8	5	60	-8	-5
	70-90	6	10	12	60	-6	14	8	-12	5	60	11	-9
	90-110	5	6	7	60	-4	8	8	-12	5	60	11	-9
Aço liga	100-120	5	6	7	60	-4	8	8	-15	10	60	-16	-8
Aço fundido	38-52	5	10	7	60	-1	11	6	-11	5	60	-10	-7
F <sub>0</sub> F <sub>0</sub> cinzento	Até 200HB	6	15	12	60	-3	18	5	5	5	60	-3	6
F <sub>0</sub> F <sub>0</sub> modular	ac. 200HB	6	12	12	60	-5	16	5	-3	5	60	-6	-1
F <sub>0</sub> F <sub>0</sub> maleável		6	5	10	30	-2	11	5	0	5	30	-3	4
		5	12	12	60	-5	16	8	-12	5	60	-11	-9
Ligas de Al.		8	25	20	30	12	28	10	20	-4	30	19	8
Latão		6	10	12	60	-6	14	5	10	5	60	0	11
Bronze		6	15	12	60	-3	18	5	6	-5	60	7	2
Plásticos		8	20	20	30	7	27	8	20	-4	30	19	7
Código: $\alpha$ - ângulo de folga $\gamma$ - ângulo de saída $\lambda$ - ângulo de inclinação X – ângulo de posição $\gamma_x$ - ângulo lateral de saída $\gamma_y$ - ângulo faceal de saída $\phi$ - ângulo de hélice		Observação: nas fresas com dentes helicoidais os ângulos $\alpha$ , $\gamma$ e $\phi$ são medidos num plano perpendicular à hélice.											

Tabela II.3 - Valores orientativos para a escolha do número de dentes e dos ângulos de corte das fresas de aço rápido.

Tipo da fresa	Material a ser usinado															
	Aços normais até 75 kg/mm <sup>2</sup> de resistência					Materiais tenazes até 100 kg/mm <sup>2</sup> de resistência					Metais leves					
	Diâm	Nº dentes	Ângulos de corte $\alpha$	Diâm	Nº dentes	Ângulos de corte $\alpha$	Diâm	Nº dentes	Ângulos de corte $\alpha$	Diâm	Nº dentes	Ângulos de corte $\alpha$				
Cilíndrica tangencial	D	Z	$\alpha$	$\gamma$	$\phi$	D	Z	$\alpha$	$\gamma$	$\phi$	D	Z	$\alpha$	$\gamma$	$\phi$	
	40	6	Avanço em sentido contrário	40	10	Avanço em sentido contrário	40	4	4	Avanço em sentido contrário	40	4	4	Avanço em sentido contrário	40	
	50	6		50	10		50	4		50	4		50	4		
	60	6		60	10		60	4		60	4		60	4		
	75	6	7º 10º 38º	75	12	4º 5º 35º	75	5	8º 25º 45º	75	5	8º 25º 45º	75	5	8º 25º 45º	
	90	8	Avanço no mesmo sentido	90	14	Avanço no mesmo sentido	90	5	Avanço no mesmo sentido	90	5	Avanço no mesmo sentido	90	5	Avanço no mesmo sentido	
	110	8		110	16		110	6		110	6		110	6		
	130	10		130	16		130	6		130	6		130	6		
	150	10	12º 16º 35º	150	18	8º 12º 30º	150	8	14º 30º 45º	150	8	14º 30º 45º	150	8	14º 30º 45º	
	Cilíndrica tangencial e frontal	40	8	Avanço em sentido oposto ao da rotação da fresa	40	12	Avanço em sentido oposto ao da rotação da fresa	40	4	4	Avanço em sentido oposto ao da rotação da fresa	40	4	4	Avanço em sentido oposto ao da rotação da fresa	40
50		10		50	14		50	5		50	5		50	5		
60		10		60	14		60	6		60	6		60	6		
75		10		75	16		75	6		75	6		75	6		
90		12		90	18		90	6		90	6		90	6		
110		12		110	20		110	6		110	6		110	6		
130		14		130	22		130	7		130	7		130	7		
150		16		150	24		150	8		150	8		150	8		
Disco		50	10	Avanço em sentido oposto	50	16	Avanço em sentido oposto	50	4	4	Avanço em sentido oposto	50	4	4	Avanço em sentido oposto	50
		60	10		60	16		60	6		60	6		60	6	
	75	12		75	18		75	6		75	6		75	6		
	90	12	7º 12º 15º	90	20	5º 6º 10º	90	8	8º 25º 30º	90	8	8º 25º 30º	90	8	8º 25º 30º	
	110	14	Avanço no mesmo sentido	110	22	Avanço no mesmo sentido	110	8	Avanço no mesmo sentido	110	8	Avanço no mesmo sentido	110	8	Avanço no mesmo sentido	
	130	16		130	24		130	10		130	10		130	10		
	150	18		150	26		150	10		150	10		150	10		
	175	18	12º 18º 15º	175	28	8º 14º 12º	175	12	14º 30º 30º	175	12	14º 30º 30º	175	12	14º 30º 30º	
	200	20		200	30		200	12		200	12		200	12		
	Tôpo (com haste)	10	4	Avanço em sentido oposto ao da rotação da fresa	10	6	Avanço em sentido oposto ao da rotação da fresa	10	3	3	Avanço em sentido oposto ao da rotação da fresa	10	3	3	Avanço em sentido oposto ao da rotação da fresa	10
12		4		12	6		12	3		12	3		12	3		
14		5		14	6		14	3		14	3		14	3		
16		5		16	8		16	3		16	3		16	3		
20		6		20	8		20	4		20	4		20	4		
24		6	7º 8º 15º	24	8	4º 6º 15º	24	4	8º 20º 25º	24	4	8º 20º 25º	24	4	8º 20º 25º	
30		6		30	10		30	4		30	4		30	4		
36		6		36	10		36	5		36	5		36	5		
40		6		40	10		40	5		40	5		40	5		

**Código:**

- $\alpha$  - ângulo de folga.
- $\gamma$  - ângulo de saída.
- $\phi$  - ângulo de hélice.
- D - diâmetro da fresa [mm].
- Z - número de dentes.



**Observações:**

- a) entende-se como fresa tangencial e frontal aquelas que atuam basicamente como tangencial, mas também cortam o material em sua parte frontal (ver figura l.l.f.).
- b) os ângulos de folga e de saída nas fresas helicoidais devem ser medidos num plano perpendicular à hélice.
- c) para diâmetros da fresa até aproximadamente 16 milímetros são válidos os valores maiores do ângulo de folga.
- d) nas pastilhas de Metal Duro reduzir os ângulos de folga e de saída, de maneira que o ângulo de cunha aumente de 5 a 10 graus.
- e) na produção seriada recomenda-se adaptar especialmente os ângulos de corte ao material e as condições de trabalho, após estudo prévio do caso em questão.

É a forma empregada nas fresas de perfil. Os dentes são afiados apenas na superfície de saída, o que faz manter sempre o perfil original. É o caso das fresas-módulos, para usinagem de engrenagens em fresadoras (figura 2.1c).

### 2.1.3 Dentes postiços

É a solução mais econômica para as fresas de grande diâmetro. É o caso típico das fresas frontais para faceamento. O corpo da fresa é feito em aço carbono e os dentes geralmente são de metal duro, como mostra a figura 2.1d. A fixação das figuras de metal duro pode ser através da solda oxiacetilênica ou através de parafuso. A possibilidade de usinagem com maior velocidade de corte, devido ao uso de metal duro, permite uma produtividade bastante grande para esse tipo de fresamento frontal.

## 2.2 Ângulos de fresas

Os ângulos das fresas são definidos pela Norma DI 6581.

As tabelas II.2 e II.3 fornecem os valores recomendados para os ângulos das fresas tangenciais de aço rápido e para as fresas de topo com dentes postiços.

Os ângulos são medidos num plano normal ao dente da fresa (figura 2.2). No caso das fresas tangenciais helicoidais é mais prático trabalhar com os ângulos medidos no plano frontal da fresa, onde são medidos  $\alpha'$  e  $\gamma'$ .

Valem as seguintes relações para ângulos das fresas tangenciais helicoidais:

$$\operatorname{tg} \gamma' = \operatorname{tg} \gamma \cdot \cos \phi \quad (2.1)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} \alpha' / \cos \phi \quad (2.2)$$

Para as fresas frontais com dentes postiços é de interesse para a execução e afiação dos dentes o conhecimento dos ângulos x (lateral de saída) e y (facial de saída) já definidos pela DIN 6581. As relações entre os ângulos  $\gamma_x$ ,  $\gamma_y$ ,  $\gamma$ ,  $\lambda$  e x são:

$$\operatorname{tg} \gamma_x = \operatorname{tg} \gamma \cdot \operatorname{sen}_x - \operatorname{tg} \lambda \cdot \cos_x \quad (2.3)$$

$$\operatorname{tg} \gamma_y = \operatorname{tg} \gamma \cdot \lambda \cdot \cos_x + \operatorname{tg} \lambda \cdot \operatorname{sen}_x \quad (2.4)$$

O ângulo x pode ser tirado da tabela II.2

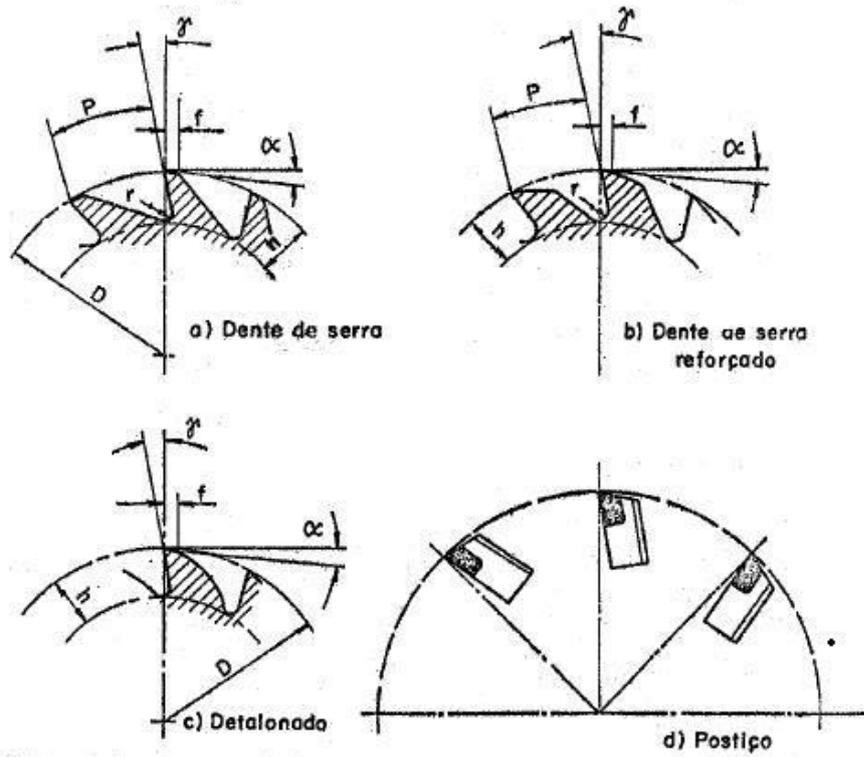
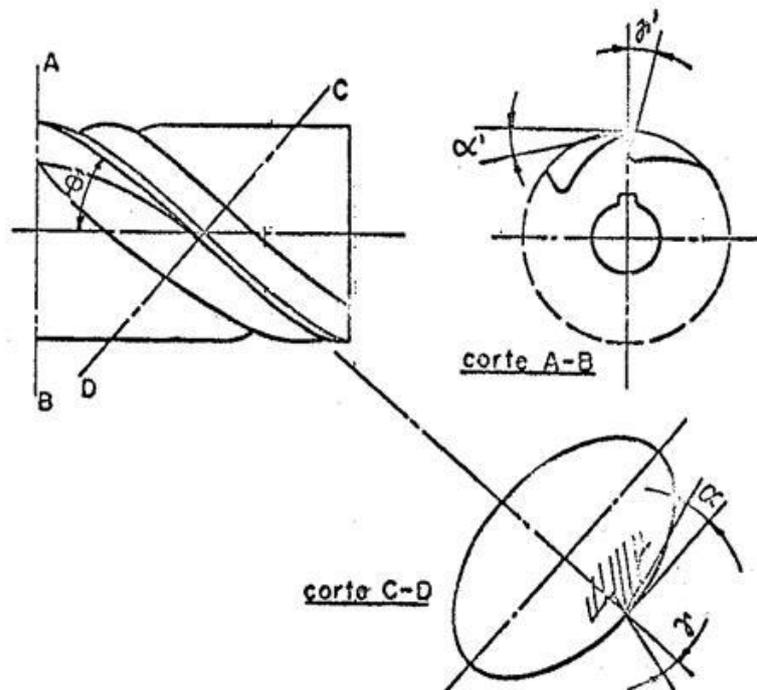


Figura 2.1 : Formas dos dentes.

\*) a correspondente Norma ABNT encontra-se no prelo.



### 2.3 Forma das fresas

De uma maneira geral, quanto a forma, pode-se classificar as fresas em:

- cilíndricas
- cônicas
- de forma

As fresas cilíndricas podem ter as arestas cortantes retas (paralelas ao eixo) ou helicoidais. A suavidade de operação das arestas helicoidais é devida a sua forma e ao fato de varias arestas cortarem simultaneamente; por outro lado há um grande esforço axial que o cabeçote da fresadora deverá suportar. Este esforço axial poderá ser equilibrado dispondo-se duas fresas que apresentem ações contrárias - arestas cortantes helicoidais de iguais inclinações, porem de sentidos opostos.

As fresas cônicas apresentam a profundidade do dente variável – as arestas cortantes apresentam-se geralmente retilíneas.

As fresas de forma apresentam formas especiais e os dentes são do tipo detalonados. Sua característica fundamental é pois o perfil constante, independente do número de afiações. A afiação se dá somente na superfície de saída. Desta forma não será prejudicado o arco da espiral logarítmica que é a forma do perfil de cada seção normal ao eixo da fresa, nos trechos que constituem as superfícies da folga.

### 2.3.1 Fresas cilíndricas com dentes tangenciais

Quanto a de dentes retilíneos nada há de especial para comentar.

Quanto a de dentes helicoidais, realça-se o seguinte:

Hélice: pode-se apresentar à direita ou à esquerda.

Corte: pode ser à direita ou à esquerda.

Pode-se ter uma fresa cilíndrica com dentes tangenciais em qualquer combinação de sentidos de hélice e corte. Ex: fresa cilíndrica com corte à direita e hélice à direita, etc.

Os ângulos de hélices recomendados acham-se na tabela II.2 em função do material a ser usinado.

### 2.3.2 Fresas cilíndricas de corte tangencial e frontal

Distinguem-se três tipos:

- de cabo cilíndrico, para diâmetros de 2 a 2mm(fig. 2.3).
- de cabo cônico, para diâmetro de 6 a 40 mm (fig. 2.4).
- ocas, para diâmetros de 30 a 150 mm (fig. 2.5).

### 2.3.3 Fresas de disco

Sua forma lhe dá o nome – pequena espessura relativamente ao diâmetro. Subdividem-se em:

- fresas de disco de dois cortes (fig. 2.6.a).

- fresas de disco de três cortes (fig. 2.6.b).

As fresas de disco de três cortes podem se apresentar com espessura variável, dentro de certos limites (Fig.2.7). Apresenta a vantagem de poder fresar ranhuras diversas com uma só ferramenta moela substituição de arruelas calibradas BA junção das duas metades da fresa.



Figura 2.3 – Fresa com cabo cilíndrico, hélice à esquerda.

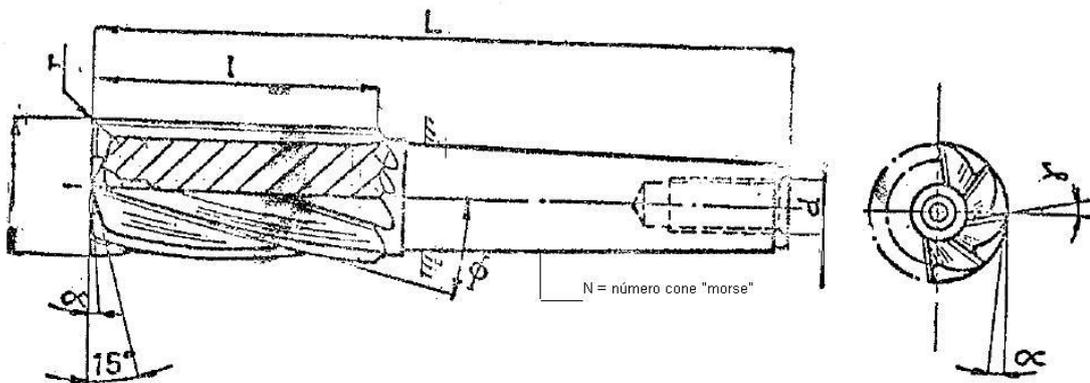


Figura 2.4 – Fresa com cabo cônico

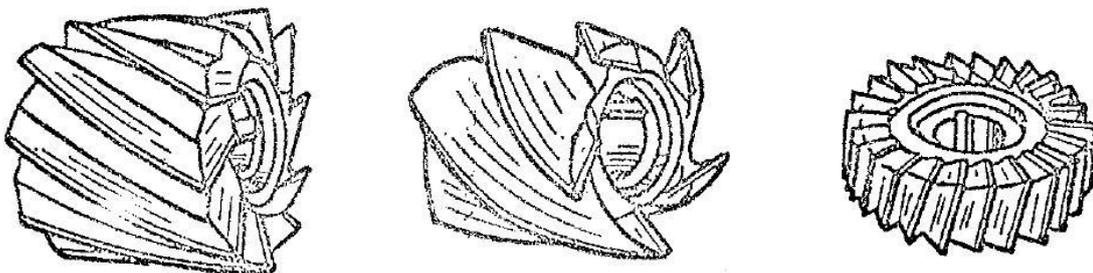


Figura 2.5 – Fresas ocas para fixação em haste paralela ou cônica

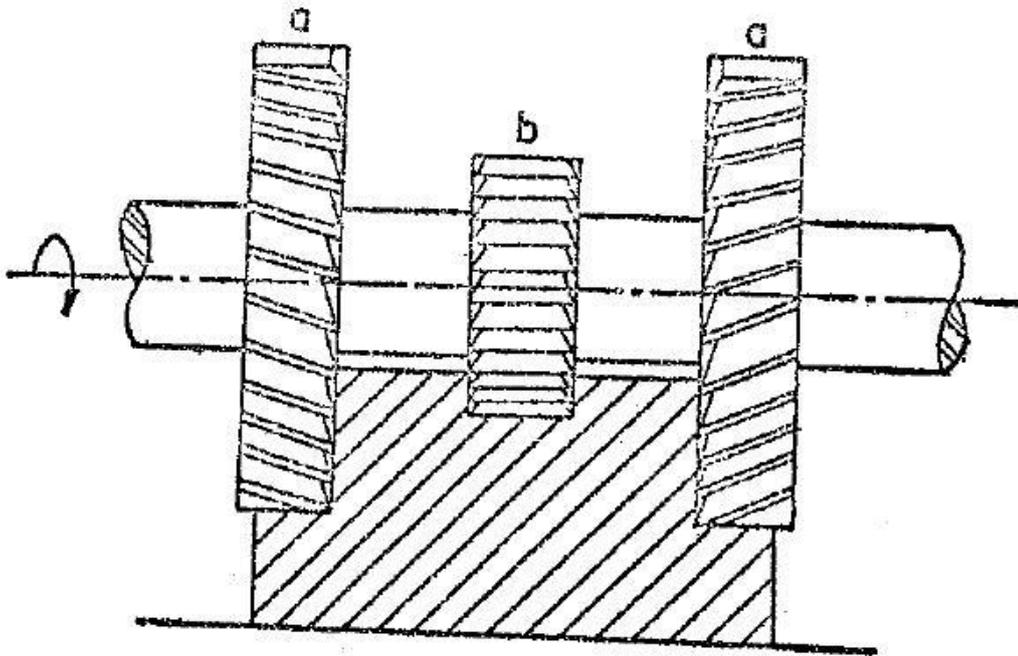


Figura 2.6 Fresas de disco em operação: a) de dois cortes; b) de três cortes

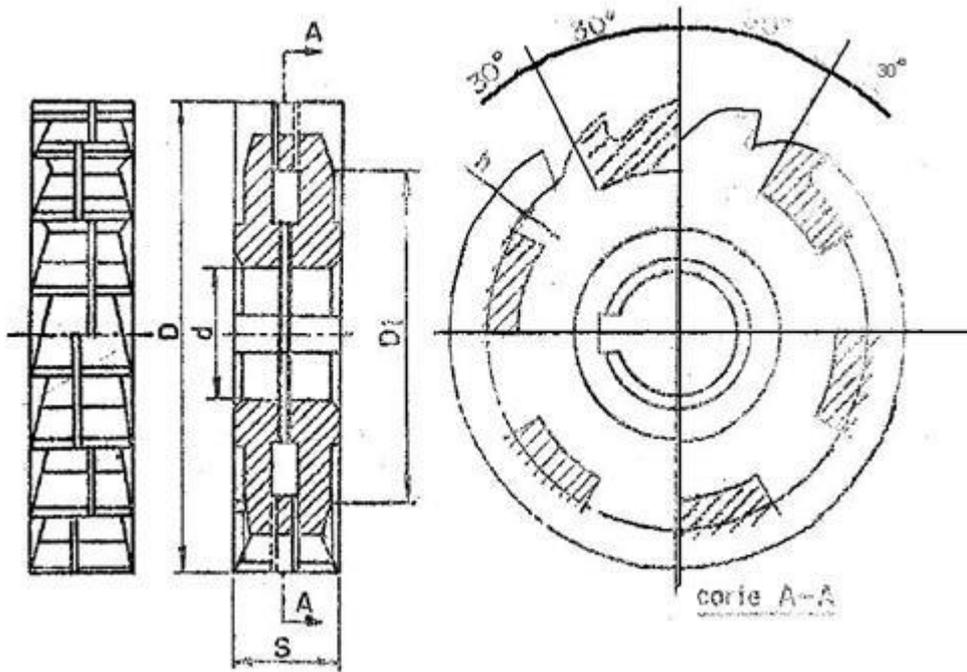


Figura 2.7 – Fresas de disco acoplada, graduável.

As fresas “Woodruff” pertencem à categoria de fresas de disco, porém dadas suas pequenas dimensões, são construídas em uma única peça, juntamente com o cabo, segundo DIN 850 e DIN 851 para fresar ranhuras em “T”

2.3.4 Fresas angulares São fresas que se prestam para usinar superfícies que formam ângulos entre si. Subdividem-se em:

- fresas angulares simétricas (fig. 2.8.a)
- fresas frontais de ângulo (figura 2.8.b)
- fresas angulares plano-cônicas (figura 2.8.c)
- fresas angulares bicônicas (figura 2.8.d)
- fresas angulares para usinar fresas de perfil constante (figura 2.8.e)
- fresas com cabo ((figura 2.8.f)

#### 2.3.5 Fresas de haste com duas arestas cortantes

São fresas que se prestam para a execução de rasgos para chavetas, alargamento de furos passantes, e, permitem, graças a sua forma, penetrar diretamente a peça em usinagem sem furo prévio.

Podem apresentar as arestas cortantes retilíneas ou helicoidais, como mostra a figura 2.9.

O cabo pode ser cilíndrico – para diâmetros de 2 a 40 mm – ou cônico (cone Morse) -para diâmetros de 8 a 40 mm – ou cilíndrico central – para diâmetros de 2 a 12 mm – arestas cortantes nas duas extremidades como mostra a figura 2.9.

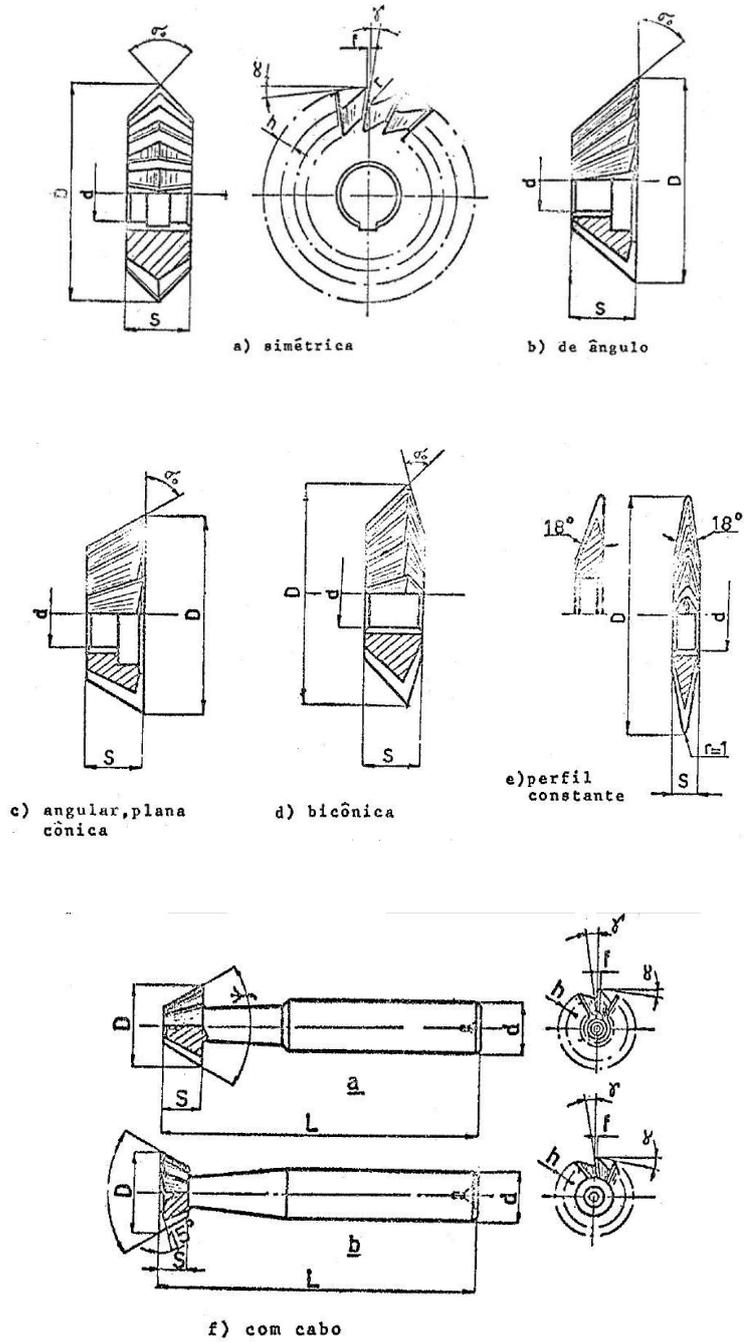


Figura 2.8 – Tipos de fresas angulares

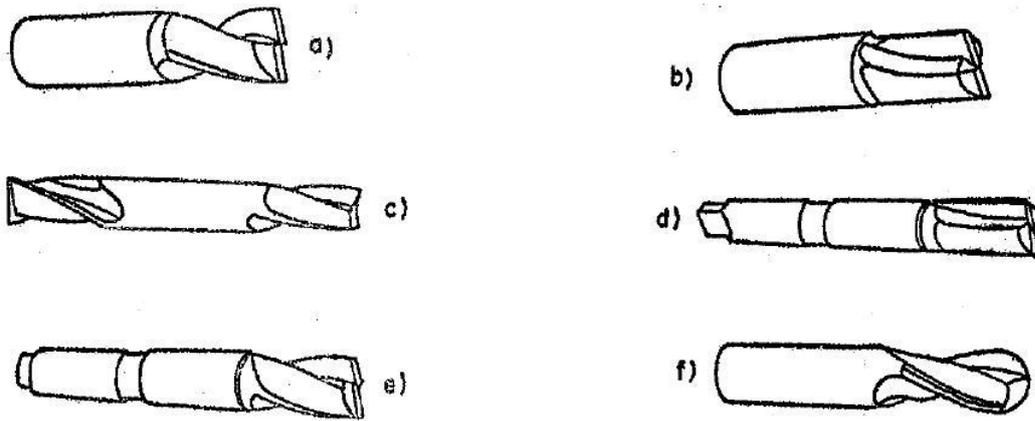


Figura 2.9 – Fresas de haste com 2 dentes

### 2.3.6 Fresas para rebaixas

São fresas destinadas a fazer rebaixas em forma de coroa.

São fresas do tipo frontal com três arestas cortantes (para uma usinagem de alumínio) ou quatro arestas cortantes (para usinagem dos materiais ferrosos e bronzes).

Podem ter rebaixas:

- exteriores
- interiores

Para rebaixo exterior é aconselhável usar fresa do tipo apresentado na figura 2.10. Para rebaixo interior, fresa do tipo apresentado na figura 2.11 – dentes laterais e frontais.

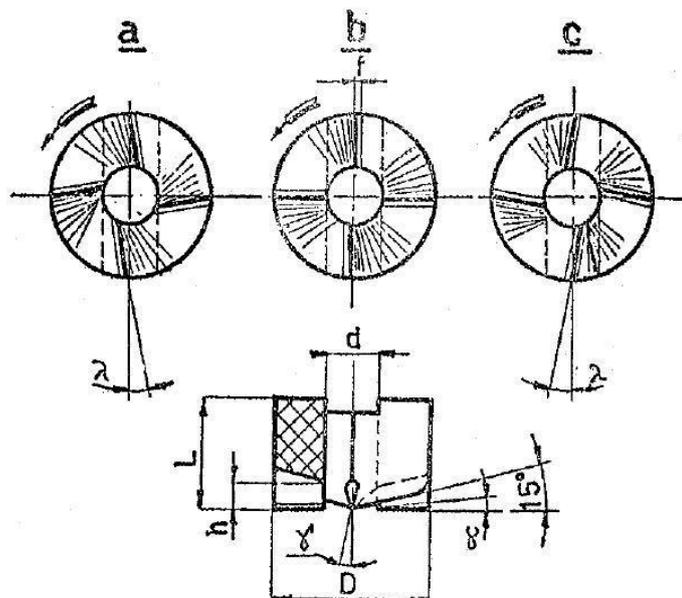


Figura 2.10 – Fresas para rebaixas exteriores

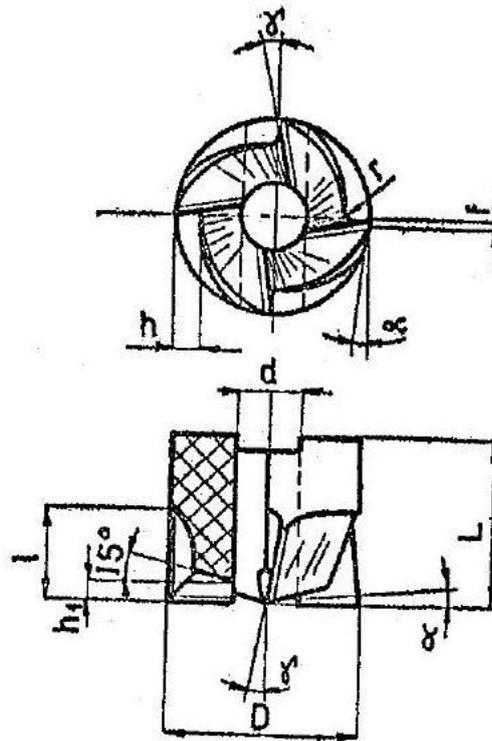


Figura 2.11 – Fresa para rebaixo interior, com corte lateral e frontal

### 2.3.7 Fresas de tubo

São fresas especiais para determinados contornos de eixos, espigas, rebaixos, etc. A tolerância atingida é da ordem de 0.02 a 0.05 mm (figura 2.12)

### 2.3.8 Fresas limas

Têm este nome devido seu dentado ser similar ao das limas, (fig. 2.13). São empregadas geralmente na extremidade de eixos flexíveis acionados por motor. Podem apresentar as mais variadas formas, o que facilita muito o trabalho de acabamento de superfícies as mais diversas

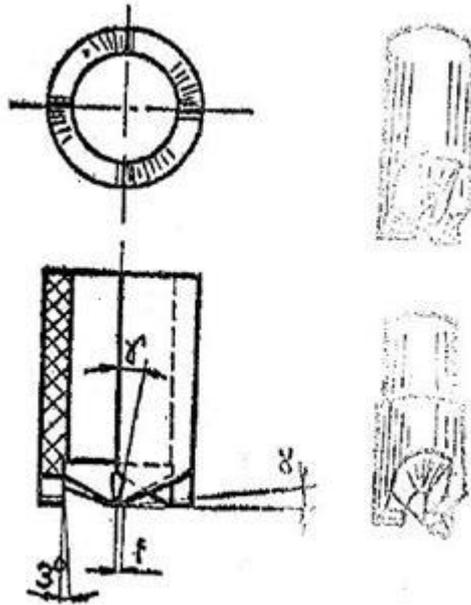


Figura 2.12 - Fresas de tubo

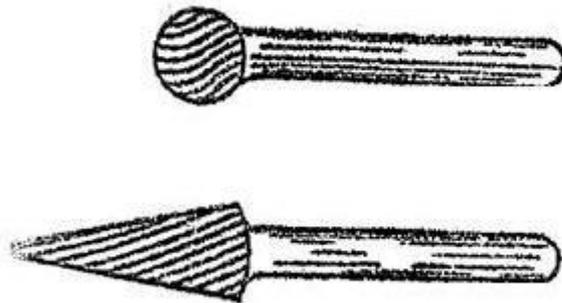


Figura 2.13 – Fresas de lima

### 2.3.9 Fresas com dentes postiços

Certas operações de fresamento exigem grandes diâmetros para as ferramentas. Resulta um grande volume de material necessário para a fabricação de ferramentas. É evidente, economicamente, a vantagem do emprego de material adequado para o corte apenas na porção necessária (os dentes), utilizando-se um aço carbono comum para as demais partes – corpo e eventualmente o cabo da fresa.

Os dentes postiços são pois de:

- aço rápido

- estelita
- metal duro
- cerâmica, em casos de usinagem de ferro fundido cinzento, grafite e plásticos.

Os tipos de fresa com dentes postiços mais comum são:

- fresas com três arestas cortantes, dentes paralelos (figura 2.14)
- fresas com três arestas cortantes, dentes inclinados alternadamente (figura 2.15)
- fresas frontais (figs. 2.16, 2.17, 2.18)
- fresas de forma – geralmente obtidas pela combinação de fresas simples acopladas.

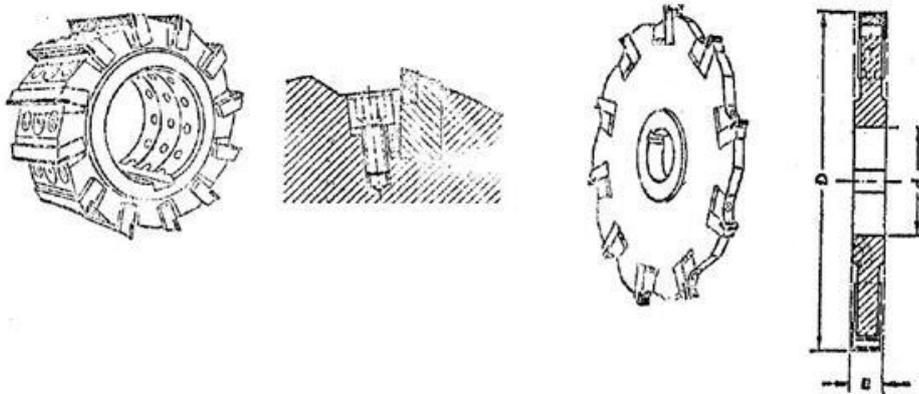


Figura 2.14 – Fresas com dentes postiços paralelos e três arestas cortantes

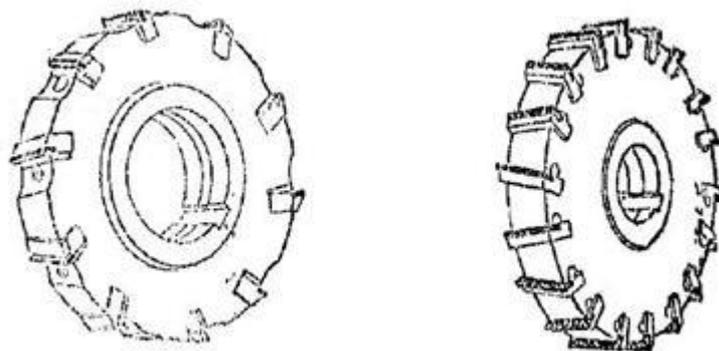


Figura 2.15 – Fresas com dentes postiços inclinados e três arestas cortantes

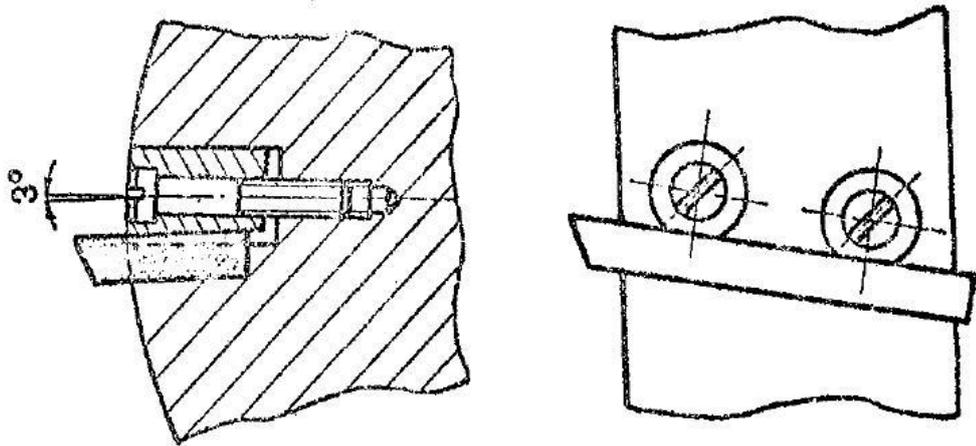


Figura 2.16 – Fresas com dentes postiços, fixados por meio de cunha

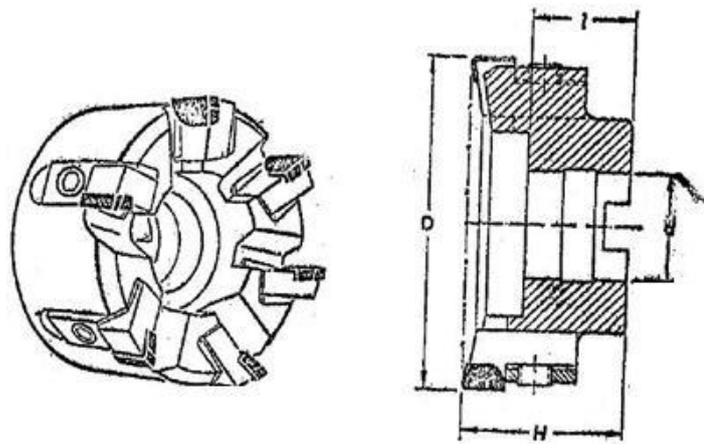


Figura 2.17 – Fresa frontal com 6 dentes, pastilhas de metal duro soldadas em um cabo fixados por parafuso ao corpo da fresa

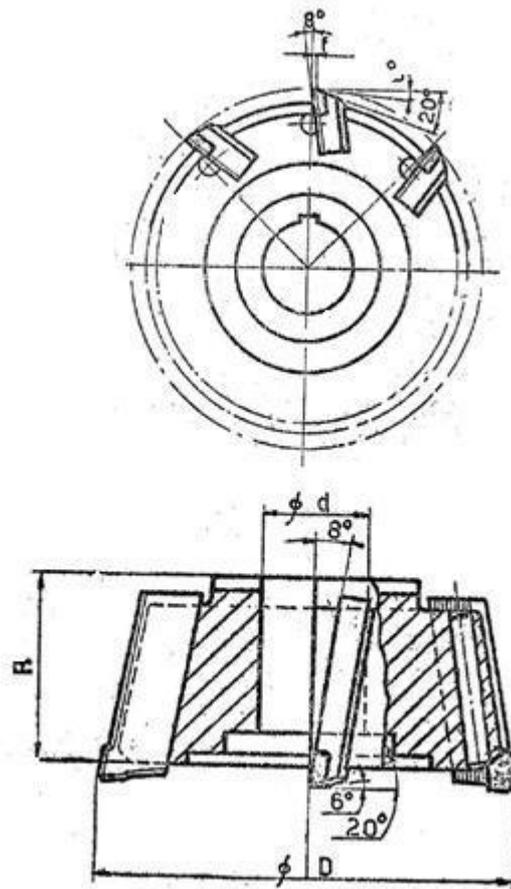


Figura 2.18 – Fresa frontal com pastilhas de metal duro soldados em um cabo, fixadas no corpo da fresa.

### 2.3.10 Fresas de perfil constante

A usinagem de perfis circulares especiais ou conjugados requer a inalterabilidade do perfil da fresa, mesmo após as afiações sucessivas. Esta necessidade é satisfeita com as fresas de perfil constante, cujos dentes são detalonados segundo uma espiral logarítmica. Todavia, na prática se usa, com boa aproximação, a espiral de Arquimedes. O detalonamento do dorso do dente (superfície de folga) pode ser curvilíneo ou retilíneo. O tipo curvilíneo é o mais usado. Para facilitar o controle do perfil, assim como a operação de afiação dos dentes, faz-se coincidir o plano de forma – com o plano radial. Com exceção de casos especiais, o ângulo de saída é nulo.

Com as operações de afiação é necessário se observar a exatidão da divisão entre os dentes de maneira que todas as arestas cortantes resultem equidistantes do eixo de rotação (fig.02.19)

O material desse tipo de fresa é geralmente aço rápido de alta qualidade e as faces são retificadas. Apesar disso o rendimento dessas fresas é baixo devido a:

- ângulo de saída nulo
- ângulo de folga pequeno
- velocidade de corte e de avanço baixas afim de aumentar a vida da fresa.

As figuras 2.20 e 2.21 mostram outros tipos de fresas onde o perfil contantes é uma necessidade – a adoção de dentes detalonados é pois vantajosa.

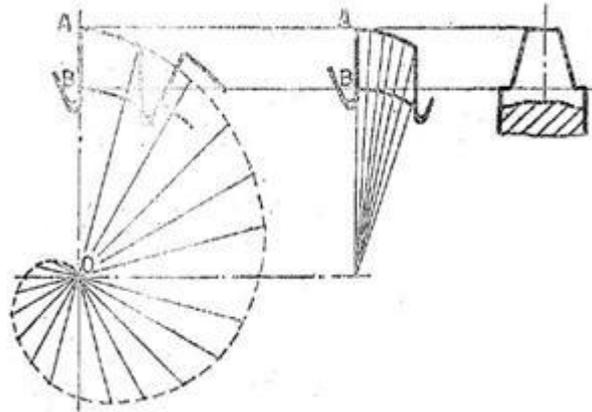


Figura 2.19 – Fresa de perfil constante, detalonada segundo espiral de Arquimedes. O perfil é constante em todos os planos radiais [12]

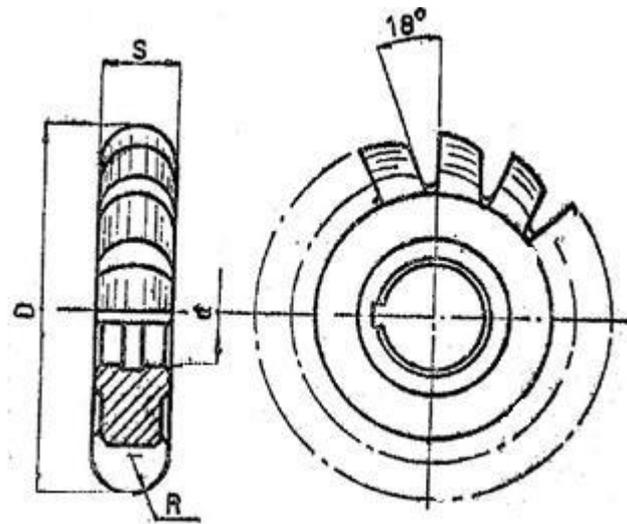


Figura 2.20 – Fresa de perfil constante para rasgo circular.

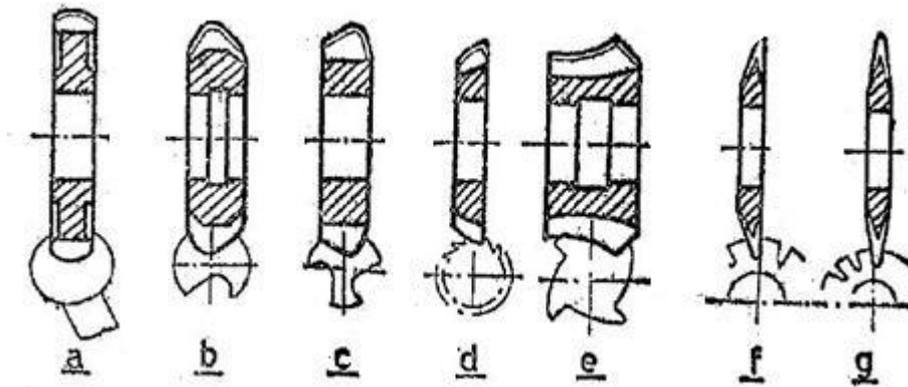


Figura 2.21 – tipos de fresas de perfil constante, para fresar:

- a) chaves
- b) canais helicoidais de brocas
- c) canais de machos para roscar
- d) ranhuras de fresas
- e) ranhuras de alargadores
- f) ranhuras em fresas de perfil constante
- g) ranhuras helicoidais em fresas de perfil constante

#### 2.4 Normas

São transcritas abaixo os números das Normas que regem a construção das fresas mais comuns:

- DIN 138 – Furos, rasgos de chaveta e rasgo para arraste.
- DIN 857 – Sentido da hélice, do corte e do esforço axila cônico.
- DIN 326 – Fresas de haste com duas arestas cortantes, cabo cônico.
- DIN 327 – Fresas de haste com duas arestas cortantes, cabo cilíndrico.
- DIN 328 - Fresas de haste com duas arestas cortantes, tipo duplo.
- DIN 842 – Fresas cônicas frontais.
- DIN 844 – Fresas de haste, com cabo cilíndrico.
- DIN 845 - Fresas de haste, com cabo cônico
- DIN 847 – Fresas angulares simétricas.
- DIN 849 – Fresas para chaves de porca.
- DIN 850 - Fresas de disco para rasgo de chaveta (woodruff).
- DIN 851 - Fresas de disco para rasgo em “T”.

- DIN E 852 – Fresas para rosquear (rosca métrica).
- DIN 855 – Fresa côncava de perfil semicircular.
- DIN 856 - Fresa convexa de perfil semicircular.
- DIN 858 – Fresas para criadores de engrenagens .
- DIN 884 – Fresas cilíndricas tangenciais com dentes helicoidais.
- DIN 885 – Fresas de disco com dentes cruzados.
- DIN 1821 – Precisão de formas e de furos das fresas de modulo para Mecânica de precisão.
- DIN 1823 – Fresas angulares plano-cônicas e bicônicas.
- DIN 1831 – Fresas de disco com dentes posições de aço rápido, dispostos alternadamente.
- DIN 1833 – Fresas cônicas com haste cilíndrica.
- DIN E 1836 - Emprego de fresas tipo N, H, W.
- DIN 1880 – Fresas cilíndricas frontais tangenciais.
- DIN 1889 – Fresas especiais.
- DIN 1890 – Fresas de disco para rasgo de chaveta, dentes cruzados.
- DIN 1891 - Fresas de disco para rasgo de chaveta, de espessura graduável.
- DIN 1892 – Fresas cilíndricas tangenciais com dentes helicoidais para trabalhar conjugada com outra igual.
- DIN 6513 – Fresas côncavas com perfil  $\frac{1}{4}$  de círculo.
- DIN 8026 – 8027 – 8028 – 8044 – 8045 – Fresas especiais.
- DIN E 8046 – Fresas frontais com pastilhas de metal duro, haste cone Morse, e lingüeta de arraste.
- DIN 8048 – Nariz do eixo árvore de fresadoras.
- ASA – B5.3 - 1959-
- DIN 2079 -

### **3. MATERIAIS DAS FRESAS**

A função das fresas é remover cavaco economicamente. Neste sentido tem as mesmas funções das ferramentas de barra (para torno e plaina), brocas, alargadores, etc. Para satisfazer a essas funções, a fresa precisa ser feita de material mais tenaz e mais duro do que os materiais em usinagem.

Não se encontram todas as qualidades desejadas para uma fresa em um único material - decorre disso que para cada caso é necessário selecionar o material mais adequado., muito embora sejam deixados para segundo plano alguns aspectos também influentes na vida da ferramenta. O resultado dessas considerações é que existe uma variedade muito grande de materiais para fresas – todos esses materiais podem ser agrupados, segundo características gerais em:

- aço ferramenta
- aço rápido

- estelita
- metal duro
- cerâmica

Como orientação geral, a tabela III.1 apresenta os materiais de corte indicados para cada tipo de fresa e material a ser usinado.

### 3.1 Aço Ferramenta

O aço ferramenta é o material cujo principal constituinte é o ferro. É obtido através de fusão a altas temperaturas de ferro e vários outros elementos.

Os aço ferramentas são subdivididos em:

- aço ferramenta sem liga.
- aço ferramenta com liga.

#### 3.1.1 Aço Ferramenta sem liga

São os aços ferramenta que apresentam um teor de carbono da ordem de 1 a 1.25%, 0.27% de silício e 0.2% de manganês. Sua estrutura é construída de martensita e cementita, obtida através de tratamento térmico – Têmpera em água – Estes aços ferramentas perdem sua capacidade de corte quando ultrapassam a temperatura de 250°C. Quanto maior a velocidade de corte, maior a quantidade de calor gerado e mais alta a temperatura atingida pelos dentes da fresa. Por outro lado, quanto maior a tenacidade do material usinado, maior a quantidade de calor gerado e mais alta a temperatura atingida pelos dentes da fresa. Isso significa duas limitações naturais para o uso do aço ferramenta sem liga – baixas velocidades e materiais pouco tenazes são o determinante do emprego deste material.

Aplicação típica deste material é na fabricação de fresas de forma de pequenos diâmetros, com dentes detalonados, para trabalhos em baixas velocidades de corte.

#### 3.1.2 Aço Ferramenta com liga

Com o intuito de aumentar a tenacidade e a dureza a quente das fresas, são acrescentados elementos de liga ao aço ferramenta. Assim tem-se: tungstênio, cromo vanádio e manganês. O tratamento térmico empregado é a têmpera em óleo. A vantagem da adição de cromo ao aço é conferir melhor temperabilidade, enquanto que a adição de vanádio aumenta a resistência da aresta cortante. O teor de carbono pode ser de 1 a 1,4%, enquanto que os teores de cromo vão até 1.5%, de vanádio até 0,25%, tungstênio até 3% e manganês até 0,7%.

Aplicação típica deste material é na fabricação de fresas de forma, com dentes detalonados operando a velocidades de corte normais e pequena secção de cavaco.

### 3.1.3 Aplicações do aço ferramenta

Os aço ferramenta são empregados para a fabricação de quaisquer tipos de fresas. Estas fresas podem operar todos os materiais, incluindo alumínio, bronze, latão, baquelite, plásticos, ferro fundido, aço, etc. ; - é claro que as limitações impostas por sua resistência devem ser observadas.

### 3.2 Aço rápido

O aço rápido é uma liga de ferro com vários teores de carbono, cromo, tungstênio, molibdênio, vanádio e cobalto. O vanádio combina-se com o carbono, resultando carbonetos que conferem ao aço rápido resistência à abrasão e tenacidade, qualidades muito importantes para a ferramenta.

A ação do cobalto é no sentido de aumentar a dureza a quente, mas diminui a tenacidade da fresa.

A tenacidade e dureza a quente alcançadas pelo aço rápido permitem às fresas trabalharem até uma temperatura dos dentes da ordem de 6000°C – permitem usinar com alta velocidade de corte (cerca de 2,5 vezes a velocidade de corte dos aços ferramenta) e com velocidade de avanço maiores.

A dureza dos aços rápidos é obtida através de tratamento térmico – têmpera, que lhe confere uma estrutura martensítica com incrustações de carbonetos.

Os aços rápidos podem ser subdivididos, segundo o teor dos elementos da liga em:

- aços rápidos com elevado teor de tungstênio (18%).
- aços rápidos ao tungstênio (de 9 a 12%).
- aços rápidos ao molibdênio e tungstênio (5% Mo; 6% W).
- aços rápidos ao molibdênio (8,5%).

A firma Villares em São Paulo, fabrica dois tipos de aço rápido que se enquadram na classe dos aços rápidos com elevado teor de tungstênio:

- VW-Super, com 18% W, 4% Cr, 1.6% V.
- VWK 10, com 18% W, 4% Cr, 1,6% V, 1% Mo, 10% Co.

A Villares fabrica ainda:

- VWK 5, com 14% W, 4% Cr, 2% V, 5% Co. (Pertence à classe dos aços rápidos ao tungstênio).
- VWM 2, com 6% W, 4% Cr, 2% V, 5% Mo. (Pertence à classe dos aços rápidos ao tungstênio e molibdênio).

Todos esse materiais são ótimos para a fabricação de fresas. A ressalva deve ser feita, porém, no uso adequado da fresa de VWK 10 e VWK 5, onde a presença do cobalto torna a fresa menos tenaz que os outros dois tipos. Os aços rápidos VW-Super e VWM-2 são de elevada tenacidade e são os indicados para a fabricação de qualquer tipo de fresa.

### 3.2.1 Aplicações do aço rápido

O aço rápido é aplicado na construção de todos os tipos de fresas: fresas cilíndricas, fresas de haste, fresas de disco, fresas frontais, fresas de forma, etc.

Sua aplicação pode se apresentar na construção integral da fresa ou apenas na construção dos dentes. Nesse último caso temos a chamada fresa de dentes postiços – fresa com corpo (ou corpo de cabo) de aço carbono e dentes de aço rápido.

### 3.3 Estelita

Estelita é um material cujo principal constituinte é o cobalto. Além do cobalto (38 a 53%) entram em sua composição o tungstênio (10<sup>a</sup> 13%), o cromo (30%) e o carbono (1,5 a 2,5%).

É obtido por fusão e sua estrutura básica é uma massa de cobalto onde estão incrustados carbonetos de tungstênio e de cromo.

Apresentam dureza natural elevada, chegando a 54RC. Após a fusão podem ser afiadas sem qualquer tratamento térmico. Podem operar em temperaturas mais elevadas que as correspondentes aos aços rápidos. Isto significa emprego de velocidade de corte e de avanço maiores, usinagem de desbaste pesado ou usinagem de acabamento. Podem usinar quaisquer materiais – com exceção do ferro fundido duro e do aço manganês.

#### 3.3.1 Aplicação da estelita

A estelita é aplicada na construção dos dentes das fresas. É o caso de dentes postiços, quer em fresas cilíndricas tangenciais, quer em fresas frontais. As pastilhas de estelita podem ser soldadas nos dentes da fresa ou então fixadas mecanicamente.

### 3.4 Metal duro

O metal duro é um produto sintetizado, a partir do pó dos carbetos de tungstênio, titânio e tântalo, tendo o cobalto como aglomerante.

Sua elevada dureza permite que a capacidade de corte se mantenha até temperaturas da ordem de 1000°C.

Isso significa que a usinagem com esse material pode se processar com altas velocidades de corte tanto para operações de desbaste como para operações de acabamento.

Existem várias classes de metal duro – a norma ISSO classificou-as em:

- classe P – constituído por materiais duros e elevado teor de TiC + TAC, com elevada dureza a quente, e por isso própria para usinar aços com resistência de 50 a 140 kgf/mm<sup>2</sup>.

- classe K – constituído por metais duros de elevado teor de WC e Co, com elevada resistência a choques e à abrasão, e por isso própria para usinar ferro fundido duro.

- classe M – classe intermediária própria para ferramentas de múltiplas aplicações.

Cada uma dessas classe apresenta uma série de graus em uma certa ordem, segundo as condições de usinagem.

Não há um tipo de metal duro que seja apto a usinar todos os metais em quaisquer condições. Para um uso eficiente do metal duro é preciso uma escolha criteriosa do grau de cada classe em confronto com o material a usinar.

Outro fator importante a considerar é a condição da fresadora – esta tem de ser de construção rígida de molde a resistir a deformações e solicitações mais elevadas, inerentes ao emprego de ferramentas de metal duro (maiores velocidades de corte e de avanço). Este aspecto não poderá ser esquecido, sob pena de quebra prematura das arestas cortantes de metal duro, frágeis em face da vibração ou trepidação da fresadora.

O refrigerante de corte tem que ser rigorosamente escolhido seguindo orientação dos fabricantes da ferramenta e do óleo, a fim de evitar trincas e quebras prematuras do metal duro.

Existem algumas operações de fresamento que não podem ser feitas com metal duro. São elas:

- fresamento de topo, profundo com fresas de pequeno diâmetro.
- fresamentos de rasgos profundos e estreitos.
- fresamento de peças delgadas, pouco rígidas e que não podem ser adequadamente fixadas.
- fresamento onde há necessidade de fresas de formas complicadas.

### 3.4.1 Aplicação do metal duro

É aplicado na construção dos dentes das fresas. É o caso das fresas com dentes postiços, quer em fresas cilíndricas tangenciais, quer em fresas frontais, ou de discos, etc...

As pastilhas de metal duro podem ser soldadas ou fixadas mecanicamente no corpo das fresas.

### 3.5 Cerâmica

Os óxidos sinterizados ou cerâmicos, são fornecidos em forma de pastilhas, para aplicação dos dentes das fresas. São fixados mecanicamente por parafusos.

A cerâmica é obtida através da sinterização do óxido de alumínio, e em alguns casos, acréscimo de óxido de cromo, titânio e magnésio.

Apresenta uma elevadíssima dureza a quente (permitindo temperaturas de corte da ordem de 1200°C) ao lado de uma fragilidade muito grande. Estas duas características físicas dão lugar a:

- usinagem com velocidade de corte altíssimas (de 100 a 500 m/min).

- impossibilidade ou as vezes limitação do emprego de cerâmica no fresamento de superfícies interrompidas, fresamento de desbaste.

### 3.5.1 Aplicações da cerâmica.

A cerâmica se aplica com vantagens em operações de acabamento com altíssimas velocidades, portanto em tempos bastante reduzidos.

Os materiais que podem ser fresados com pastilha de cerâmica são:

- ferro fundido cinzento
- grafite
- plásticos
- bronze
- ligas leves fundidas

TABELA III.1 – Indicação geral do material da fresa.

Tipo de fresa	Material da fresa	Aço			Aço fundido	Aço inox	Ferro fundido		Não Ferroso	Não Metálicos
		Mole	Médio	Duro			Cinzento	Branco		
Tangencial	AR	Bom	Bom	Reg.	Bom	Bom	Bom	Ruim	Bom	Bom
	Stel.	Reg	Reg.	Ruim	Ruim	Ruim	Bom	Ruim	Reg	Bom
	Md	Bom	Reg.	Reg.	Reg.	Ruim	Bom	----	Bom	Bom
De haste	AR	Bom	Bom	Reg.	Bom	Bom	Bom	Ruim	Bom	Bom
	Stel.	Reg	Reg	Ruim	Ruim	Ruim	Bom	Ruim	Reg	Bom
	MD	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom
Frontal de disco	AR	Bom	Bom	Reg.	Bom	Bom	Bom	Ruim	Bom	Bom
	Stel.	Bom	Reg	Ruim	Ruim	Ruim	Bom	Ruim	Bom	Bom
	MD	Bom	Bom	Bom	Bom	Reg.	Bom	Reg.	Bom	Bom
Serra	AR	Bom	Bom	Reg.	Bom	Bom	Bom	Ruim	Bom	Bom
	Stel.	----	----	----	----	----	----	----	----	----
	MD	Bom	Bom	Reg.	Bom	----	Bom	Reg.	Bom	Bom
De ranhuras	AR	Bom	Bom	Reg.	Bom	Bom	Bom	Ruim	Bom	Bom
	Stel.	Reg	Reg	Ruim	Ruim	Ruim	Bom	Ruim	----	----
	MD	Bom	Bom	Reg	Reg.	Ruim	Bom	Reg.	Bom	Bom

De forma	AR	Bom	Bom	Reg.	Bom	Bom	Bom	Ruim	Bom	Bom
	Stel.	Reg	Reg.	Ruim	Ruim	Ruim	-----	-----	-----	Reg
	MD	Bom	Reg.	Ruim	Reg.	Ruim	Bom	Reg	Bom	Bom
Código:										
AR – Aço Rápido, Stel. – Estelita, MD – Metal Duro										

#### 4. AFIAÇÃO DAS FRESAS

As fresas são ferramentas muito caras em relação às ferramentas de barras comuns para torno. Por esta razão os cuidados dispensados à sua afiação, controle e armazenagem não poderão ser relegados a segundo plano.

Quanto ao armazenamento recomenda-se que as fresas sejam cuidadosamente dispostas sobre a madeira ou plásticos de tal maneira que suas arestas cortantes não sejam tocadas por materiais duros que as danifiquem.

Quanto ao controle das dimensões é preciso que a quantidade de material a ser removido na afiação seja a mínima possível. Isto significa: as fresas deverão ser afiadas freqüentemente – para se afiar uma fresa com pequeno desgaste é preciso alguns minutos e as dimensões dos dentes são reduzidas em uma pequena quantidade, ao passo que para se afiar uma fresa com grande desgaste é preciso muitos minutos e uma porção muito grande de dente deverá ser sacrificada.

Quanto à afiação das fresas realçam-se os seguintes fatos:

- uma fresa afiada corretamente apresenta um consumo mínimo de potencia, quando em operação.
- uma fresa afiada corretamente produz, quando em operação, uma superfície usinada de melhores qualidades – o acabamento superficial normal para fresas de aço rápido varia de 1,25 a 6,3 Ra ( $\mu\text{m}$ ), enquanto que para fresas de Metal Duro varia de 0,50 a 1,0 Ra ( $\mu\text{m}$ ).
- uma fresa afiada corretamente apresenta maior capacidade de corte com um mínimo de calor gerado em operação, significando isso maior vida da ferramenta.

Tendo em vista uma determinada operação, nem sempre é aceitável a fresa standard afiada pelo seu fabricante. Pode ocorrer a necessidade de se resfriar a fresa, para nela impor um determinado ângulo recomendado pela operação particular.

##### 4.1 Afiação de fresas tangenciais

A afiação de fresas tangenciais pode se processar com rebolos cujos formatos padrões são o seguintes: \*)

- Reto (RT), tipo 1, perfil A, em forma de um disco definido pelas dimensões: diâmetro externo, altura e diâmetro do furo

- Corpo Reto (CR), tipo 6, forma D – sua forma é a de um corpo cilíndrico definido pelas dimensões: diâmetro externo, altura, diâmetro interno, altura interna, espessuras de parede e diâmetro do furo.
- Corpo Cônico (CC), tipo 11, forma E – sua forma é a de um corpo cônico definido pelas dimensões: diâmetro externo máximo, altura, espessuras de parede, diâmetro interno mínimo, diâmetro externo mínimo e diâmetro do furo.
- Prato (PR), tipo 12, forma B – sua forma é a de um prato, definido pelas dimensões: diâmetro externo máximo, altura, diâmetro externo mínimo, espessuras, diâmetro interno mínimo e diâmetro do furo.
- Cônico dos 2 lados, tipo 4 – sua forma é a de um disco chanfrado em ambas as faces, definido pelas dimensões: diâmetro externo, altura, diâmetro inicial da chanfradura., espessura mínima e diâmetro do furo.
- Faca, tipo 9, Prato A, forma A, - sua forma é a de um disco chanfrado em uma das faces, definido pelas dimensões: diâmetro externo, altura, diâmetro inicial da chanfradura, espessura mínima e diâmetro do furo.

#### 4.1.1 Afiação dos dentes fresados (ou agudos)

Os dentes fresados (ou agudos) são afiados somente na superfície de folga.

A afiação dos dentes fresados se faz dispondo-se rebolo e fresa conforme as figuras 4.1, 4.2 e 4.3. Na figura 4.1(a, b, c) tem-se 3 disposições possíveis para o caso de afiação com rebolo Reto (tipo 1). Esse tipo de rebolo é as vezes preferido por alguns afiadores de ferramenta, todavia, todavia o seu uso deve ser controlado porque se o diâmetro do rebolo não for suficientemente grande, ao invés de formar uma superfície de folga plana, formará uma superfície de folga côncava – o que é indesejável.

Na figura 4.2 (a,b) tem-se duas disposições possíveis para o caso de afiação com rebolo de corpo cônico (tipo 11) – diga-se a mesma coisa para o caso de rebolo de copo Reto (tipo 6). Os rebolos de copo são os mais indicados para a afiação da superfície de folga das fresas porque sempre formam superfície de folga plana, qualquer que seja o seu diâmetro . A título de ilustração, enquanto é necessário um diâmetro de 150mm para um rebolo Reto, um diâmetro máximo externo de apenas 89mm será suficiente para um rebolo de copo cônico, no caso de afiação de uma fresa cilíndrica comum.

\*) Estes formatos padrões são tirados do Catálogo Geral da firma: REBOLOS BRASIL, S.A. (Brasil).

Na figura 4.3 tem-se a disposição indicada para afiação de uma fresa tangencial de dentes helicoidais. Se os dentes fossem retos, a disposição seria a mesma, afim de evitar que a coroa abrasiva trabalhe em duas regiões simultaneamente. O rebolo neste caso é de copo reto, todavia poderá ser também de copo cônico.

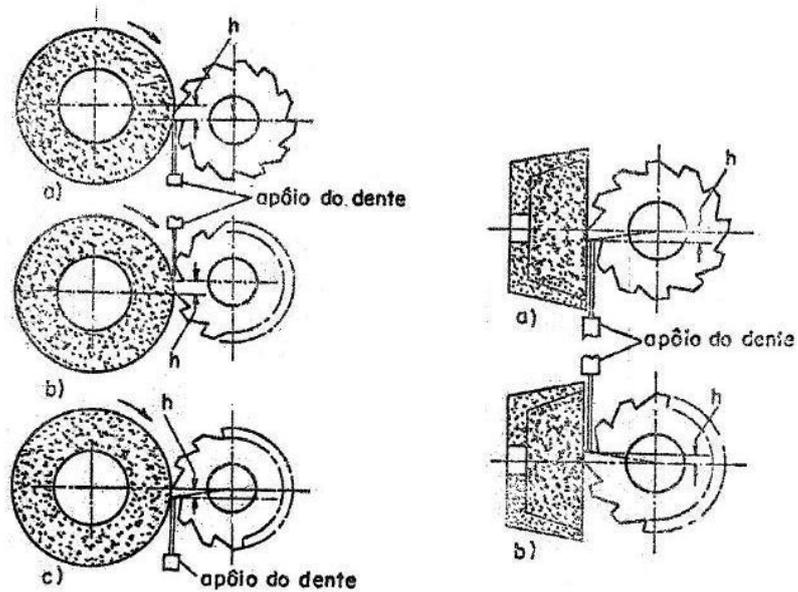


Figura 4.1 – Afiação com rebolo reto    Figura 4.2 – Afiação com rebolo de copo cônico

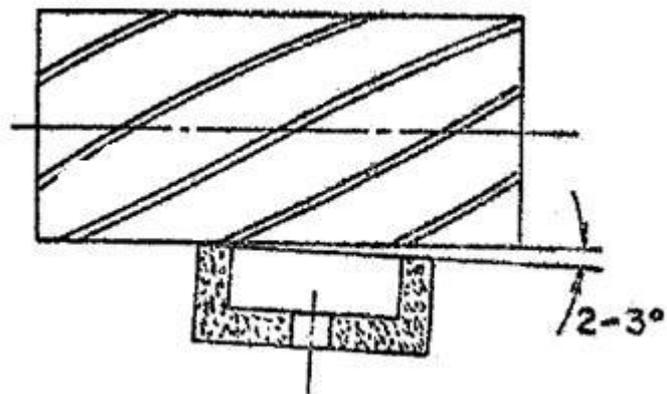


Figura 4.3 Afiação com rebolo de copo

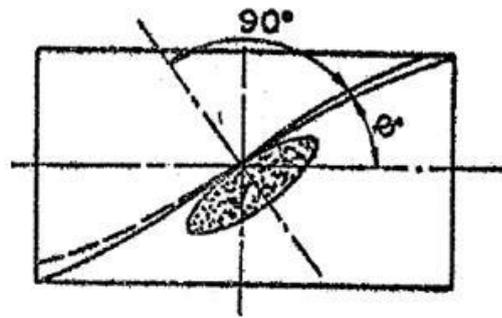


Figura 4.4 – Afiação com rebolo cônico dos dois lados.

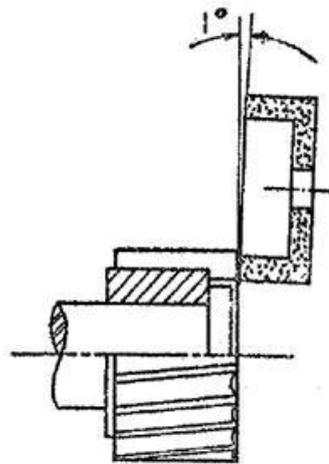


Figura 4.5 – afiação com rebolo de copo

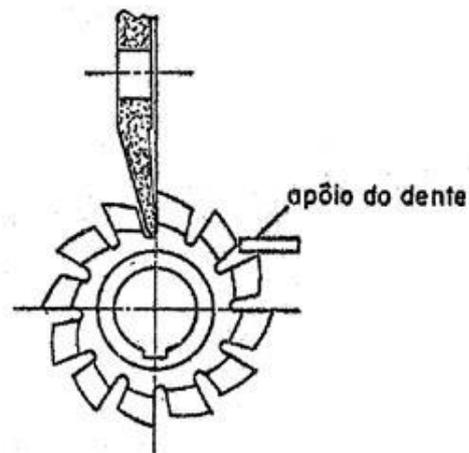


Figura 4.6 Afiação com rebolo tipo Prato

O sentido de rotação do rebolo pode ser qualquer, todavia, é preferível adotar o sentido em que o rebolo gire contra a aresta cortante, a fim de evitar a formação de rebarbas que deverão ser retiradas

após a afiação. A figura 4.1.a mostra o caso em que se evita a rebarba. Em particular, quando o dente for de metal duro somente se deve usar o sentido da figura 4.1.b.

No caso em que a superfície de saída do dente apresentar deformação muito grande, há necessidade de se retificar também essa região do dente. Para tanto usa-se um rebolo cônico dos dois lados (tipo 4) com o mínimo diâmetro possível, disposto segundo a figura 4.4.

Note-se que nas figuras 4.1 e 4.2 aparece uma dimensão “h” responsável pela geração do ângulo de folga na afiação. A tabela IV.1 apresenta os valores de “h” em função do diâmetro da fresa, do ângulo de hélice dos dentes e do ângulo de folga (ou ângulo de folga frontal).

Uma maneira prática e aproximada de se medir o ângulo de folga é a seguinte: prende-se a fresa entre centros (pode ser o próprio eixo-árvore da fresadora, no caso da fresa já estar montada); em seguida dispõe-se um comparador com o eixo de seu apalpador na horizontal cruzando o eixo da fresa; ajusta-se uma aresta cortante da fresa contra a ponta do apalpador. Desloca-se a mesa suporte do apalpador no sentido do apalpador percorrer a superfície de folga do dente num comprimento menor que a largura dessa superfície. Mede-se exatamente este deslocamento do suporte e também o quanto o comparador acusa no seu mostrador. O ângulo de folga será dado aproximadamente pela fórmula:

$$\alpha \text{ |graus|} \cong 57,29 \times \text{medida do comparador} \div \text{percurso do suporte}$$

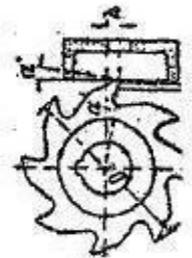
No caso da fresa ser de dentes helicoidais este procedimento conduz ao ângulo de folga frontal.

A afiação se faz em cada dente após posicioná-lo com o auxílio do suporte do dente como se vê nas figuras 4.1 e 4.2.

Este suporte do dente de uma haste que serve para locar o dente que vai ser afiado. Por outro lado a fresa deverá ser mantida nessa posição através de um contrapeso ou então manualmente, durante a afiação.

Tab. IV.1 - Valores do deslocamento  $h$  [ mm ], na afiação de fresas com rebêlo tipo "Copo".

Ângulo		Diâmetro da Fresa D (mm)																										
		10	12	15	18	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	110	120	130	140	150	
3°	3°	0,26	0,31	0,39	0,47	0,52	0,63	0,70	0,82	1,05	1,18	1,31	1,44	1,57	1,70	1,83	1,96	2,09	2,22	2,36	2,40	2,02	2,88	3,14	3,40	3,66	3,92	
	4°	0,35	0,43	0,53	0,63	0,70	0,81	1,05	1,28	1,41	1,57	1,74	1,92	2,09	2,27	2,44	2,62	2,79	2,97	3,14	3,21	3,49	4,19	4,53	4,88	5,23		
	5°	0,44	0,53	0,66	0,78	0,87	1,10	1,31	1,51	1,74	1,98	2,18	2,40	2,61	2,83	3,05	3,27	3,49	3,70	3,92	4,21	4,36	4,79	5,23	5,67	6,10	6,54	
	6°	0,52	0,63	0,78	0,94	1,05	1,30	1,57	1,83	2,09	2,35	2,61	2,87	3,14	3,40	3,66	3,92	4,18	4,44	4,70	4,97	5,23	5,75	6,27	6,79	7,32	7,84	
	7°	0,61	0,73	0,91	1,10	1,22	1,52	1,83	2,13	2,44	2,74	3,05	3,35	3,66	3,96	4,27	4,57	4,87	5,18	5,48	5,79	6,09	6,70	7,31	7,92	8,53	9,14	
15°	3°	0,67	0,83	1,05	1,24	1,39	1,73	2,09	2,44	2,78	3,13	3,47	3,82	4,17	4,52	4,87	5,22	5,56	5,91	6,26	6,60	6,90	7,65	8,34	9,04	9,73	10,43	
	4°	0,87	1,04	1,30	1,51	1,74	2,17	2,61	3,03	3,48	3,91	4,35	4,78	5,22	5,65	6,09	6,52	6,96	7,39	7,83	8,20	8,70	9,57	10,44	11,31	12,18	13,05	
	5°	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1,00	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05	1,06	1,07	1,08	1,09	1,10	1,11	1,12	1,13	1,14	1,15	1,16	1,17	1,18	1,19	1,20	
	6°	0,96	0,97	0,98	0,99	1,00	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05	1,06	1,07	1,08	1,09	1,10	1,11	1,12	1,13	1,14	1,15	1,16	1,17	1,18	1,19	1,20	1,21	1,22
	7°	0,97	0,98	0,99	1,00	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05	1,06	1,07	1,08	1,09	1,10	1,11	1,12	1,13	1,14	1,15	1,16	1,17	1,18	1,19	1,20	1,21	1,22	1,23
30°	3°	0,23	0,27	0,34	0,41	0,45	0,57	0,68	0,79	0,91	1,02	1,13	1,25	1,37	1,50	1,62	1,75	1,87	2,00	2,12	2,25	2,37	2,50	2,75	3,00	3,25	3,50	3,75
	4°	0,30	0,36	0,45	0,55	0,60	0,75	0,91	1,06	1,21	1,36	1,51	1,66	1,81	1,96	2,11	2,26	2,41	2,56	2,71	2,86	3,01	3,26	3,51	3,76	4,01	4,26	
	5°	0,38	0,45	0,57	0,68	0,73	0,95	1,13	1,32	1,51	1,70	1,89	2,08	2,27	2,46	2,65	2,84	3,03	3,22	3,41	3,60	3,79	4,08	4,37	4,66	4,95	5,24	
	6°	0,45	0,54	0,67	0,82	0,91	1,12	1,36	1,59	1,81	2,04	2,26	2,49	2,72	2,95	3,17	3,40	3,63	3,86	4,08	4,31	4,53	4,98	5,43	5,89	6,34	6,80	
	7°	0,53	0,63	0,79	0,95	1,06	1,33	1,59	1,85	2,11	2,38	2,64	2,91	3,17	3,44	3,70	3,96	4,23	4,49	4,76	5,02	5,28	5,82	6,34	6,87	7,40	7,93	
45°	3°	0,60	0,72	0,90	1,00	1,21	1,50	1,81	2,11	2,41	2,72	3,02	3,32	3,62	3,92	4,22	4,52	4,83	5,13	5,43	5,73	6,04	6,64	7,24	7,85	8,45	9,05	
	4°	0,75	0,90	1,12	1,35	1,50	1,87	2,25	2,62	3,00	3,37	3,75	4,12	4,50	4,87	5,25	5,62	6,00	6,37	6,75	7,12	7,50	8,25	9,00	9,75	10,50	11,25	
	5°	0,83	1,01	1,26	1,51	1,68	2,10	2,52	2,94	3,36	3,78	4,20	4,62	5,04	5,46	5,88	6,30	6,72	7,14	7,56	7,98	8,40	9,24	10,08	10,92	11,76	12,60	
	6°	0,91	1,10	1,38	1,65	1,84	2,30	2,76	3,22	3,68	4,14	4,60	5,06	5,52	5,98	6,44	6,90	7,36	7,82	8,28	8,74	9,20	10,04	10,88	11,72	12,56	13,40	
	7°	1,00	1,20	1,50	1,80	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	5,50	6,00	6,50	7,00	7,50	8,00	8,50	9,00	9,50	10,00	10,80	11,60	12,40	13,20	14,00	
60°	3°	0,18	0,22	0,27	0,33	0,45	0,55	0,65	0,74	0,83	0,92	1,02	1,12	1,21	1,30	1,39	1,48	1,57	1,66	1,75	1,85	2,03	2,21	2,40	2,58	2,77		
	4°	0,25	0,30	0,37	0,44	0,49	0,62	0,74	0,86	0,99	1,11	1,24	1,36	1,48	1,61	1,73	1,85	1,98	2,10	2,22	2,35	2,47	2,73	2,97	3,21	3,46	3,71	
	5°	0,33	0,39	0,47	0,55	0,62	0,75	0,92	1,08	1,23	1,38	1,54	1,69	1,85	2,00	2,15	2,30	2,45	2,60	2,75	2,90	3,05	3,29	3,69	4,00	4,31	4,61	
	6°	0,37	0,44	0,53	0,67	0,74	0,93	1,11	1,30	1,48	1,67	1,85	2,04	2,23	2,41	2,60	2,78	2,97	3,15	3,33	3,52	3,71	4,08	4,45	4,82	5,19	5,56	
	7°	0,43	0,52	0,64	0,78	0,87	1,07	1,30	1,53	1,73	1,95	2,16	2,38	2,60	2,81	3,03	3,24	3,46	3,68	3,90	4,11	4,33	4,76	5,19	5,63	6,06	6,49	



Código :  
 $\phi$  - ângulo de hélice.  
 $\alpha$  - ângulo de folga.  
 $\alpha'$  - ângulo de folga frontal.  
D - diâmetro da fresa.

Os dentes detalonados são afiados somente na superfície de saída. A superfície de folga responsável pela forma da superfície fresadora não deve ser afiada para não alterar o seu perfil.

Distinguimos vários casos possíveis na afiação deste tipo de dente:

1º caso – afiação de dentes detalonados retilíneos, ângulo de saída nulo. Neste caso se emprega um rebolo Prato (tipo 12) disposto segundo a figura 4.6. é preciso que o plano da face do rebolo contenha o eixo da fresa para que o ângulo de saída seja nulo e para que o perfil fresado resulte correto.

2º caso – afiação de dentes detalonados helicoidais, ângulo de saída nulo. Neste caso se emprega um rebolo cônico dos dois lados (tipo 4), disposto segundo a figura 4.7. É preciso que a intersecção da superfície de saída helicoidal do dente com qualquer plano frontal da fresa tenha seu prolongamento passando pelo eixo da fresa.

3º caso – afiação de dentes detalonados, ângulo de saída positivo. Neste caso se emprega um rebolo cônico dos dois lados (tipo 4) disposto segundo a figura 4.8.

Fig. 4.8 – disposição do rebolo e fresa, quando o dente detalonado apresenta ângulo de saída positivo.

A distancia “x” da figura 4.8 é definida pela relação:

$$X = r \operatorname{sen} (\gamma + \delta)$$

A tabela IV.2 apresenta os valores de “x” em função do diâmetro da fresa e dos ângulos de saída  $\delta = 0^\circ$  (caso de rebolo de disco).

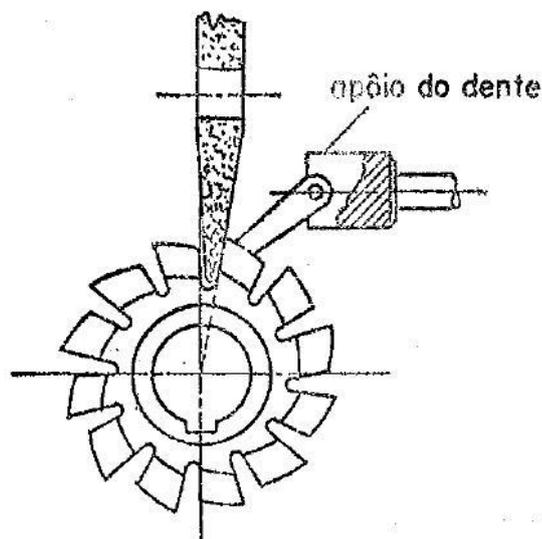


Figura 4.7 – Afiação com rebolo tipo prato, na face cônica

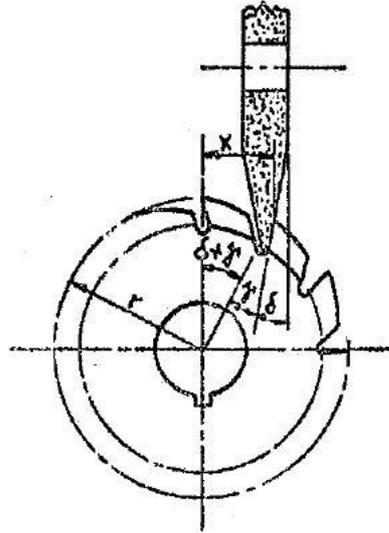


Figura 4.8 – Disposição do rebolo e fresa, quando o dente detalonado apresenta ângulo de saída positivo.

Tabela IV.2 – Valores do deslocamento “x” em milímetros na afiação de fresas com rebolo tipo Prato, cônico dos dois lados.

Diâmetro da fresa (mm)	Ângulo de saída “ $\gamma$ ”				
	5°	10°	15°	20°	25°
10	0,44	0,87	1,29	1,71	2,11
20	0,87	1,74	2,59	3,42	4,23
25	1,00	2,17	3,23	4,27	5,28
30	1,31	2,61	3,88	5,13	6,34
35	1,53	3,04	4,53	5,98	7,40
40	1,74	3,48	5,18	6,84	8,46
45	1,96	3,91	5,83	7,69	9,52
50	2,18	4,34	6,47	8,55	10,57
55	2,40	4,78	7,12	9,40	11,63
60	2,61	5,22	7,77	10,26	12,69
65	2,83	5,65	8,42	11,11	13,75
70	3,05	6,09	9,06	11,97	14,80
75	3,27	6,52	9,71	12,82	15,86
80	3,49	6,96	10,36	13,68	16,92
90	3,92	7,83	11,65	15,39	19,03
100	4,36	8,68	12,94	17,10	21,13
110	4,79	9,57	14,24	18,81	23,26
120	5,23	10,44	15,54	20,52	25,38
130	5,66	11,31	16,83	22,23	27,49
140	6,10	12,18	18,13	23,94	29,61
150	6,54	13,05	19,42	25,65	31,72
175	7,63	15,22	22,66	29,92	37,01
200	8,72	17,36	25,88	34,20	42,26

#### 4.2 Afiação de fresas frontais

A afiação de fresas frontais pode se processar com rebolos cujo formato usual é copo reto (tipo 6) ou copo cônico (tipo 11). A disposição empregada para fresa e rebolo é a da figura 4.5.

A afiação das fresas frontais, tanto para o tipo integral – quanto para o tipo de dentes, se faz afiando as superfícies de folga da parte cilíndrica da parte frontal e também da parte chanfrada dos dentes. Recomenda-se retificar inicialmente a face da fresa, a fim de formar uma superfície de folga estreita com ângulo nulo, em cada dente; em seguida retificar a parte cilíndrica da fresa, a fim de formar uma superfície de folga estreita com ângulo nulo em cada dente; depois se faz a mesma coisa na parte chanfrada dos dentes. Depois dessas operações preliminares é que se procede à afiação de cada dente. Nessa afiação é recomendado deixar uma pequena faixa da superfície de folga com ângulo nulo – largura aproximada de 0,05 a 0,07 mm.

#### 4.3 Afiação dos demais tipos de fresas

Todos os demais tipos de fresas apresentam, ou dentes na parte cilíndrica frontal ou ainda dentes em ambas as partes. Dessa forma são afiados segundo as recomendações dos parágrafos 4.1 e 4.2.

#### 4.4 Recomendações gerais

Toda afiação de fresa se faz por etapas sucessivas. A primeira etapa do desbaste é feita retirando material do dente em quantidade nunca superior a 0,01mm; Depois outra; mais outra; etc... A segunda etapa, a do acabamento, é feita retirando material do dente em quantidade nunca superior a 0,003 mm por vez – dá-se uma passada em todos os dentes com 0,003 mm; depois outra; mais outra; etc...

##### 4.4.1 Qualidade dos rebolos abrasivos

As fresas de aço rápido podem ser afiadas satisfatoriamente com rebolos de características:

- abrasivo: óxido de alumínio
- liga vitrificada
- granulação: 46 a 80
- dureza: H, I ou J

As fresas com dentes postiços de estelita usam os mesmos rebolos, porém com a menor dureza possível para evitar eventuais trincas nas arestas cortantes muito duras.

As fresas com dentes postiços de metal duro requerem cuidado muito maior e habilidades especial do afiador. Os rebolos usados têm as seguintes características:

a) para desbaste: usa-se rebolo de carboneto de silício (granulação verde) ou rebolo de diamante; IGA a base de resina sintética.

b) para acabamento: usa-se somente rebolo de diamante. A prática geral é usar rebolo de diamante com granulação de 100 a 220 e dureza J e L, dependendo do acabamento desejado. Não se deve usar rebolo de diamante senão nas pastilhas de metal duro - nunca no corpo da fresa, o que poderá causar entupimento dos poros do rebolo.

O rebolo de diamante deverá trabalhar a uma velocidade de 25 a 28m/s. O uso de querosene ou óleo solúvel como refrigerante de corte é aconselhável para conservar os poros do rebolo desentupido – esta aplicação poderá ser feita por meio de uma almofada de feltro em contato com o rebolo ou por meio de uma corrente uma corrente de líquido caindo em uma região a operação c-contato fresa/rebolo. Após afiação é recomendável proceder-se a um acabamento com uma pedra de granulação 400, manualmente operando com óleo, em movimentos curtos de vai e vem paralelos à aresta de corte, com leve pressão. Isto se faz até que desapareçam as marcas de afiação que ainda estejam na superfície s. Desta forma se consegue um acabamento superficial da pastilha de metal duro entre 0,025 a 0,125 Ra(  $\mu$  m).

##### 4.4.2 Calor gerado na afiação

Recomenda-se iniciar a operação de afiação na aresta cortante, percorrendo progressivamente a superfície que está sendo afiada. Se esta operação for feita com leve pressão rebolo-dente da fresa, o calor gerado será pequeno, não chegando a prejudicar a tempera ou revenimento da ferramenta. Não se deve usar refrigerante de corte (apenas se usa quando a operação particular requer) o que poderá provocar trincas que danificam as arestas cortantes. É aconselhável após a afiação, fazer-se

uma inspeção pormenorizada com lentes nas superfícies afiadas pra verificar a existência de eventuais trincas ou qualquer outra irregularidade.

## **5. FORÇAS E POTENCIAS DE CORTE \*)**

### 5.1 Fresas cilíndricas de dentes retos

#### 5.1.1 Força de corte

Como nas ferramentas de barra, a componente principal (tangencial)  $P_c$  da força de corte, norma; à sessão do cavaco é:

$$P_c = k_s \cdot h \cdot b \quad (5.1)$$

Onde a pressão específica  $k_s$  pode ser dada através da espessura  $h$  do cavaco (pelo critério de kienzle).

Nas fresas a espessura  $h$  do cavaco varia a cada instante, de maneira que a força  $P_c$  de corte vai variar não só em direção, como também em grandeza. Aproximadamente, tanto no movimento discordante quanto no movimento concordante podemos tomar a relação:

$$H \cong a_d \cdot \text{sen } \varphi$$

ou

$$h = \frac{v_a}{n \cdot Z} \cdot \text{sen } \varphi \quad (5.2)$$

\*) baseado nos estudos desenvolvidos por D. Ferraresi

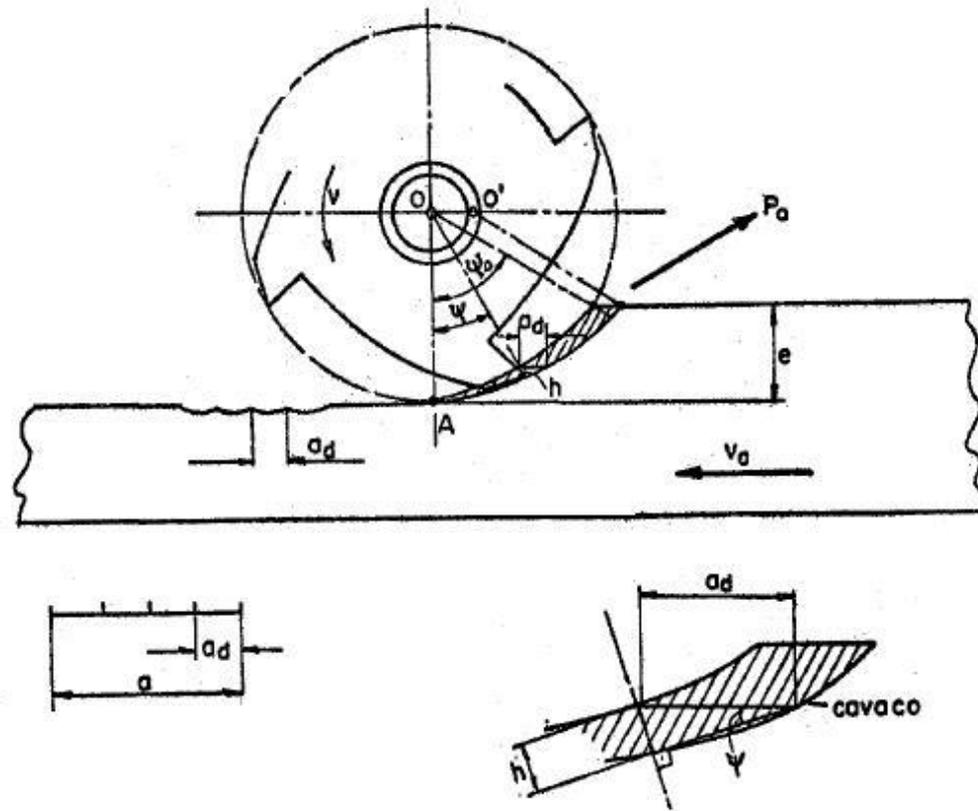


Fig. 5.1: Grandezas geométricas no processo de formação do cavaco com fresas cilíndricas de dentes retos.

onde:

$a_d$  = avanço da peça por dente e por volta em  $\text{mm}/\text{rpm} \cdot z$ .

$v_a$  = velocidade avanço em  $\text{mm}/\text{min}$ .

$n$  = rotação da fresa em  $\text{rpm}$ .

$Z$  = número de dentes da fresa.

$H$  = espessura instantânea de cavaco, em  $\text{mm}$ .

$\varphi$  = ângulo central correspondente a  $h$ .

Na realidade o  $h$  verdadeiro para o movimento discordante é sensivelmente menor que o calculado por esta fórmula. Para o movimento concordante temos o inverso (o  $h$  real é maior que o  $h$  calculado aqui), porém a diferença se torna desprezível em face de outros fatores, quais sejam: diferenças entre o  $k_s$  do material ensaiado e do que se está usinando.

Substituindo-se o valor de  $h$  na expressão de  $P_c$ :

$$P_c = k_s \cdot \frac{v_a \cdot b}{Z \cdot n} \cdot \text{sen } \varphi \quad (5.3)$$

Uma vez que  $h = f(\varphi)$ , a pressão específica de corte  $k_s$ , será também função de  $\varphi$  através de  $h$ .

Segundo Kienzle:

$$k_s = k_{s1} \cdot h^{-z}$$

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

$$k_s = k_{s1} \cdot b \left( \frac{v_a}{n \cdot Z} \right)^{1-z} \cdot \sin^{1-z} \varphi \quad (5.4)$$

Como o emprego desta equação é muito trabalhoso, principalmente quando necessitamos integrá-la para o cálculo da potência, costumamos empregar um valor médio da pressão específica de corte,

$k_m$ , definido para espessura média  $h_m$  do cavaco, ou seja, para  $\varphi_m = \frac{1}{2} \varphi_0$

$$k_m = k_s (h_m)$$

$$h_m = h(\varphi_m) \quad \varphi_m = \frac{1}{2} \varphi_0$$

ainda faltam ensaios pra se determinar o erro cometido nesta aproximação.

Temos assim a fórmula aproximada:

$$P_c' = k_{m_s} \cdot \frac{v_a \cdot b}{Z \cdot n} \cdot \sin \varphi \quad (5.5)$$

### 5.1.2 Potencia média total de corte

O trabalho elementar por dente e por volta da ferramenta é:

$$dT = P_c' \cdot \frac{D}{Z} \cdot d\varphi \cdot \frac{1}{1000} \quad |kh^* \cdot m|$$

Integrando-se entre os limites de 0 e  $\varphi_0$  e substituindo-se (para simplificar os cálculos)  $P_c$  por  $P_c'$  teremos:

$$T = \int_0^{\varphi_0} km \cdot \frac{v_a \cdot b}{Z \cdot n} \cdot D \cdot \sin \varphi \cdot d\varphi \cdot \frac{1}{2000}$$

ou

$$T = k_m \cdot \frac{v_a \cdot b \cdot D}{2000 \cdot Z \cdot n} \cdot (1 - \cos \varphi_0)$$

que é o trabalho por dente da ferramenta.

Pela figura temos:

$$\cos \varphi_0 = \frac{\frac{D}{2} - e}{\frac{D}{2}} = 1 - \frac{2e}{D}$$

logo,

$$T = k_m \cdot \frac{v_a \cdot b \cdot e}{1000 \cdot Z} \quad |\text{kg}^* \cdot \text{m}| \quad (5.6)$$

A potência média total de corte será:

$$N_c = \frac{T \cdot Z \cdot n}{60 \cdot 75} = \frac{k_m \cdot v_a \cdot b \cdot e}{1000 \cdot Z \cdot n} = 2,22 \cdot 10^{-7} \cdot k_m \cdot b \cdot e \cdot v_a \quad |\text{CV}| \quad (5.7)$$

O valor de  $k_m$  encontra-se na figura 5.2 e na tabela V.1.

Para tanto precisamos ter o valor de  $h_m$  dado pela relação:

$$h_m = a_d \cdot \text{sen} \frac{\varphi_0}{2} = \frac{v_a}{Z \cdot n} \cdot \text{sen} \frac{\varphi_0}{2} = \frac{v_a}{Z \cdot n} \cdot \sqrt{\frac{1 - \cos \varphi_0}{2}}$$

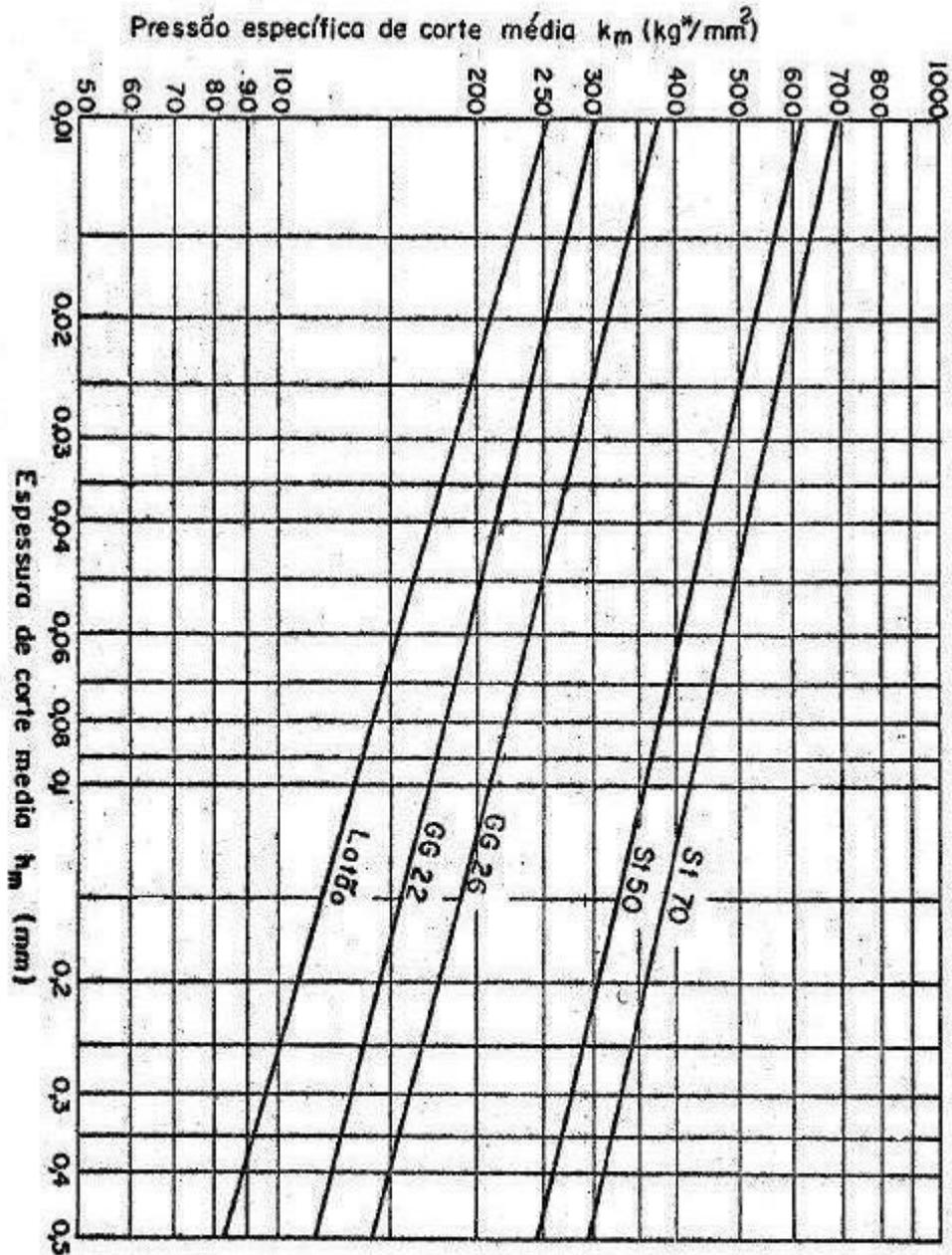
$$h_m = \frac{v_a}{Z \cdot n} \cdot \sqrt{\frac{e}{D}}$$

A potência média total de corte também pode ser calculada em base ao volume de cavaco removido, o que será visto no item 5.4.

### 5.1.3 Força de corte máxima

O valor da força de corte  $P_{\max}$  (para  $\varphi = \varphi_0$ ) obtido pela equação 5.5 através de  $k_m$  nos dá um valor maior que o real (ver figura 5.3). Para tal cálculo é preferível usar a equação 5.4, empregando-se a tabela de Kienzle-Haidit (tab. V.1) ou a equação 5.3 em que  $k_s$  será o valor da pressão específica de corte para  $\varphi = \varphi_0$  (obtida no gráfico para um  $h = a_d \cdot \text{sen} \varphi_0$ ).

Fig. 5.2 : Determinação da pressão específica de corte média  $k_m$  segundo Graupner.



Equivalência aproximada dos materiais		
DIN	ABNT	Tipo do material
St50 St70	1030 - 1035 1050 - 1060	Aço carbono
GG22 GG26	FF20 FF25	Ferro fundido

Tab. V.1- Valores da pressão específica de corte para o fresamento, segundo Kienezle - Haidt [14]

Nº	Material Especificação	Resistência $\sigma_t$ [kg/mm <sup>2</sup> ] ou Dureza HB	Ângulo de Saída $\gamma_c/\gamma_e$	Expoente $1 - z$	Pressão espec. de corte $k_s$	Valor aproximado pressão espec. $k_s$ [kg/mm <sup>2</sup> ]									
						Espessura de corte h (mm)									
						0,025	0,04	0,063	0,1	0,16	0,25	0,4	0,63	1,0	
1	St50.11	52	-79/129	0,74	205	535	475	425	375	330	295	260	230	205	
2	C35	58	-79/129	0,80	195	405	370	340	310	280	255	235	215	195	
3	St60.11	62	-79/129	0,83	220	415	380	350	325	300	280	260	240	220	
4	St70.11	75	-79/129	0,80	220	460	420	380	350	320	290	265	240	220	
5	CK45	67	-79/129	0,86	230	385	360	340	320	300	280	260	245	230	
6	CK60	77	-79/129	0,82	220	425	390	360	330	305	280	260	240	220	
7	(aço fundido)	50 70	-79/129	0,82	180	350	320	295	270	250	235	220	200	180	
8	16MnCr5	77	-79/129	0,74	220	570	510	455	400	355	315	280	250	220	
9	18CrNi6	63	-79/129	0,70	230	695	605	525	460	400	350	300	265	230	
10	37MnSi5	72	-79/129	0,80	235	490	450	405	370	340	310	280	255	235	
11	42CrMo4	73	-79/129	0,74	260	675	600	535	475	420	370	330	290	260	
12	34CrMo4	60	-79/129	0,79	230	495	455	415	375	340	310	280	255	230	
13	50CrNiMo8	76	-79/129	0,80	270	565	515	470	425	390	355	325	295	270	
14	50CrV4	60	-79/129	0,74	230	600	530	475	420	370	330	290	260	230	
15	55NiCrMoV6	94	-79/129	0,76	180	440	390	350	315	280	250	225	200	180	
16	55NiCrMoV6	HB-352	-79/129	0,76	200	490	435	385	350	310	280	250	225	200	
17	ECHO	59	-79/129	0,83	240	450	415	380	355	330	305	280	260	240	
18	Meehanite A	36	89	0,74	115	300	265	235	210	185	165	145	130	115	
19	Fofo duro	HRC=46	29/89	0,81	210	420	390	355	325	300	275	250	230	210	
20	Fofo GG26	HB=200	89	0,75	105	270	240	215	190	170	150	135	120	105	

**OBSERVAÇÕES:**

\*) valores aproximadamente iguais ao do torneamento.

\*\*) valores um pouco maiores do que os correspondentes ao torneamento.

$$P_{c\max} = k_{s1} \cdot b \cdot \left( \frac{v_a}{n \cdot Z} \right)^{1-z} \cdot \sin^{1-z} \varphi_0 \quad (5.9)$$

$$P_{c \max} = k_{s(\max)} \cdot b \cdot \left( \frac{v_a}{n \cdot Z} \right) \cdot \sin \varphi_0 \quad (5.10)$$

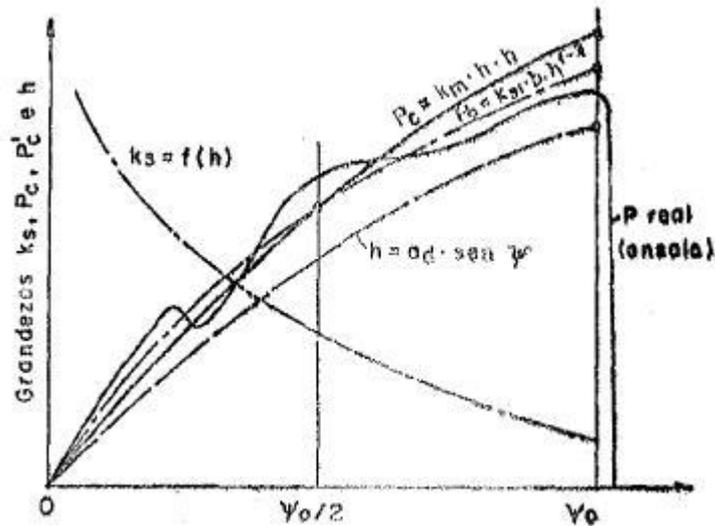


Fig. 5.3: Variação de  $k_s$ ,  $P_c'$  e  $h$  em função do ângulo para um determinado valor do avanço por dente  $a_d$ , no fresamento discordante.

#### 5.1.4 Momento de torção

O momento de torção no eixo da fresa vai depender além de  $P_c'$  do número de dentes em trabalho no mesmo instante.

Para o cálculo de  $M_{t \max}$  deverá ser feito um esquema da fresa em trabalho, colocando-se os dentes da ferramenta na pior posição, (figura 5.5).

Temos assim, num certo instante:

$$M_t = \sum_i B_{c1} \cdot \frac{D}{2} \quad (5.1)$$

e

$$M_{t \max} = (P_{c1} + P_{c2}) \cdot \frac{D}{2}$$

$$P_{c1} = k_{s1} \cdot b \cdot (h_1)^{1-z} = k_{s1} \cdot b \cdot (a_d \cdot \sin \varphi_1)^{1-z}$$

$$P_{c2} = k_{s1} \cdot b \cdot (h_2)^{1-z} = k_{s1} \cdot b \cdot (a_d \cdot \sin \varphi_2)^{1-z}$$

$$\varphi_1 = \varphi_0, \varphi_2 = \varphi_0 - \frac{360}{Z}$$

O momento de torção médio pode ser calculado através da potência média de corte:

$$M_{tm} = \frac{N_c \cdot 60 \cdot 75}{2 \cdot \pi \cdot n} = P_{tm} \cdot \frac{D}{2} \quad |\text{kg}^* \cdot \text{m}| \quad (5.12)$$

Logo, a força tangencial média medida na periferia da fresa será:

$$P_{tm} = \frac{k_m \cdot v_a \cdot b \cdot e}{1000 \cdot v} \text{ |kg*|} \quad (5.13)$$

ou, em função da espessura de penetração média

$$P_{tm} = k_m \cdot b \cdot e_m$$

$$e_m = e \cdot \frac{v_a}{v} \cdot \frac{1}{1000}$$

Na determinação de  $k_m$  é utilizada a equação (5.7) ou a (5.14) através do momento médio, de maneira que nos valores de  $k_m$  já estão incluídas as simplificações anteriores.

Dessa forma, obtém-se no calculo da potencia com  $k_m$  valores bem próximos da realidade. Como a diferença entre a espessura  $h$  do cavaco para o movimento discordante e para o movimento concordante é mínima, podemos usar a mesma formula da potência e as mesmas considerações para o movimento concordante.

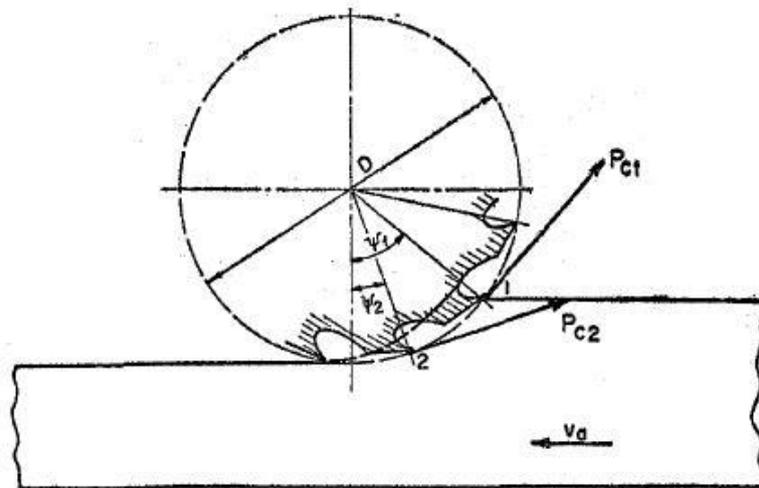


Fig. 5.4 – Posição dos dentes em que o Momento de torção é máximo.

### 5.1.5 Volume do cavaco

O volume de cavaco  $V_d$ , em  $\text{mm}^3$ , removido em cada dente em uma volta na fresa pode ser calculado por:

$$V_d = \int_0^{\varphi_0} b \cdot h \cdot \frac{D}{2} \cdot d\varphi = \frac{b \cdot D}{2} \cdot a_d \cdot \int_0^{\varphi_0} \text{sen } \varphi \cdot d\varphi$$

$$V_d = \frac{b \cdot D}{2} \cdot a_d (1 - \cos \varphi_0)$$

$$V_d = \frac{b \cdot D}{2} \cdot a_d \cdot \left(1 - \frac{\frac{D}{2} - e}{\frac{D}{2}}\right) = b \cdot e \cdot a_d$$

O volume total arrancado por minuto para Z dentes, e n voltas será:

$$V = b \cdot e \cdot a_d \cdot n \cdot Z = b \cdot e \cdot v_a \text{ |mm}^3/\text{min|} \quad (5.16)$$

### 5.1.6 Componentes da força de usinagem

Além da força tangencial  $P_c$  de corte, temos a componente  $P_r$  também importante no dimensionamento da máquina. Composto-se essas duas forças vamos ter a resultante  $P_t$ , que é a força que vai agir no eixo da fresadora. Esta  $P_t$  por sua vez pode ser decomposta nas forças  $P_a$  e  $P_{ap}$ . De acordo com a figura 5.5 temos:

$$\text{tg } \alpha = \frac{P_R}{P_c} \quad P_t = \sqrt{P_c^2 + P_R^2} = \sqrt{P_a^2 + P_{ap}^2}$$

O valor da relação  $P_R/P_c$  vai depender do ângulo  $\varphi$ , dos ângulos de corte e do tipo de movimento relativo da ferramenta (concordante ou discordante). Para  $\varphi$  pequeno esta relação é muito grande no movimento discordante, devido ao efeito de cunha da ferramenta.

$$P_a = P_t \cdot \cos(\alpha - \varphi)$$

} movimento discordante

$$P_{ap} = P_t \cdot \text{sen}(\alpha - \varphi)$$

(5.17)

$$P_a = P_t \cdot \cos(\alpha + \varphi)$$

} movimento concordante

$$P_{ap} = P_t \cdot \text{sen}(\alpha + \varphi)$$

Os valores médios de  $P_a$ ,  $P_{ap}$ ,  $P_R$  foram obtidos experimentalmente através da força tangencial média  $P_{tm}$  e encontram-se na tabela abaixo, segundo Graupner

Tipo de fresamento	Relação		
	$P_{Rm}/P_{tm}$	$P_{am}/P_{tm}$	$P_{apm}/P_{tm}$
Concordante	0,35 – 0,40	0,80 – 0,90	0,75 – 0,80
Discordante	0,35 – 0,40	1,00 -1,20	0,20 -0,30

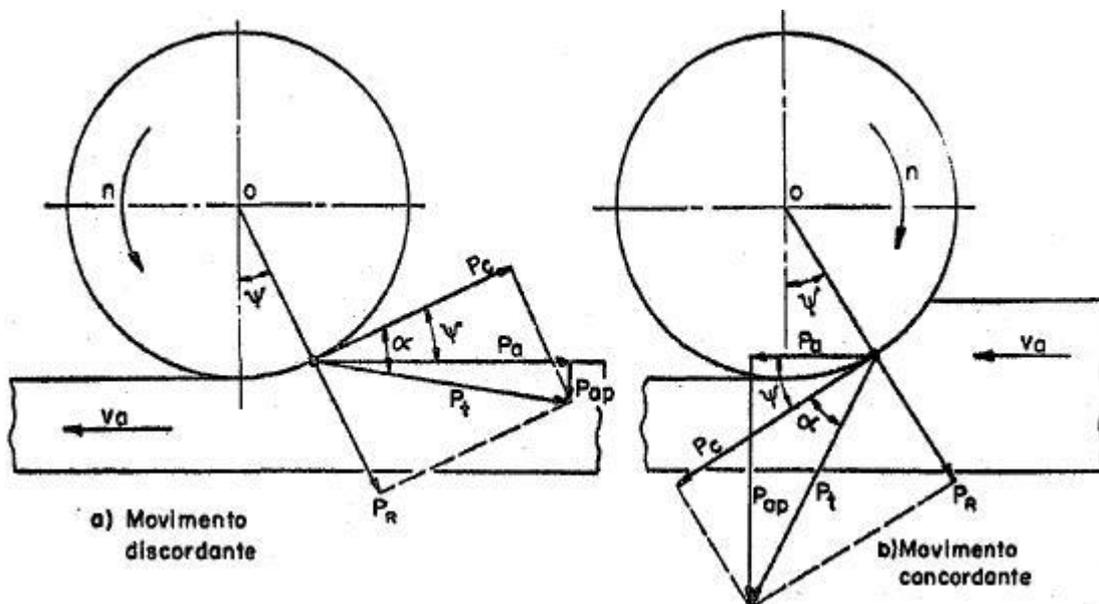


Fig. 5.5 – Decomposição da força ativa  $P_t$  no fresamento com fresas cilíndricas de dentes retos.

### 5.1.7 Potência de avanço

A potência de avanço desenvolvida pelo carro pode ser facilmente calculada por:

$$N_a = \frac{P_{am} \cdot v_a}{60 \cdot 75 \cdot 1000} \quad (5.18)$$

Tomando-se  $P_{am} = 1,1 P_{tm}$  (movimento discordante), teremos através da equação (5.13):

$$N_a = \frac{k_m \bullet v_a^2 \bullet b \bullet e}{10^6 \bullet 60 \bullet 75 \bullet v} \bullet 1,1 \quad (5.19)$$

Comparando-se com a potência de corte vem:

$$\frac{N_a}{N_c} = \frac{v_a}{1000 \bullet v} \bullet 1,1$$

Sendo  $\frac{v_a}{1000 \bullet v}$  da ordem de 0,02, teremos aproximadamente no movimento discordante  $N_a \cong 2\%$  de  $N_c$

Devido as perdas do sistema de movimento de avanço da mesa serem muito grandes (perda nas guias, parafusos de acionamento, engrenagens, mancais, etc.) tomamos a potência do motor de acionamento da mesa da ordem de 15% da potência de acionamento do motor da fresa.

O rendimento do sistema de acionamento da fresa deve ser tomado da ordem de 70 a 80%. Se a fresadora tiver um motor só para acionamento da fresa deve ser tomado da ordem de 60 a 70%.

## 5.2 Fresas cilíndricas de dentes inclinados

### 5.2.1 Generalidades

Enquanto nas fresas cilíndricas de dentes retos a força de corte  $P_c$  aumenta rapidamente com o ângulo  $\varphi$ , caindo bruscamente a zero ( $\varphi = \varphi_0$ ) como podemos ver nas figuras 5.6a e 5.7, nas fresas cilíndricas de dentes helicoidais ou inclinados, isto não acontece. Neste último caso, a área da secção do cavaco de um dente em trabalho cresce também de zero a um valor máximo, porém, mantém este valor alguns instantes enquanto o dente se desloca ao longo da largura da fresa ( a secção do cavaco se desloca paralelamente ao eixo da fresa)). Em seguida a secção vai lentamente diminuindo enquanto o dente sai da peça (figura 5.6b). Para uma fresa de 4 dentes (figura 5.8), o dente nº1 corta de A a B, a secção do cavaco permanece igual de B e C e decresce a partir de C até chegar ao seu valor zero em D. O dente seguinte 2, defasado de 90°, inicia o seu trabalho em E, prosseguindo igualmente ao anterior, segundo a sucessão E F G H, e assim por diante. O segundo dente inicia seu trabalho, enquanto ainda o primeiro está cortando. A figura 5.8 apresenta ainda a curva resultante  $\sum S_i$ . Para uma fresa de 8 dentes, em iguais condições de usinagem, figura 5.9, vamos ter uma superposição melhor das curvas de áreas de secções, e a curva resultante  $\sum S_i$  apresenta uma oscilação bem menor. A forma dessa curva vai depender da largura  $b$  da peça e das características geométricas da fresa. Pode-se chegar ao caso (fig. 5.10) em que a curva  $\sum S_i$  seja

aproximadamente uma reta e desta forma a força resultante de corte (função destas áreas) seria constante. Isto se dá quando a largura  $b$  for igual ou um múltiplo inteiro do passo da fresa.

A figura 5.11 apresenta diagramas do momento de torção no eixo da fresa para diferentes larguras  $b$  da peça, em iguais condições de usinagem, obtidas por Salmon.

Concluimos assim, que nas fresas cilíndricas de dentes helicoidais, em iguais condições de usinagem, a força máxima de corte, como também a sua oscilação, é bem menor que nas fresas cilíndricas de dentes retos. Por essa razão emprega-se sempre que possível fresa cilíndrica de dentes helicoidais. Porém com relação a força de corte média resultante isso não acontece, pois a inclinação do dente a espessura do cavaco é menor (figura 5.6b) e a pressão específica será maior.

Além disso o atrito do dente com o material é bem maior devido ao aparecimento da componente axial, como podemos verificar através dos ensaios de R. Stock (fig.5.12). Dessa forma a potência média de corte vai aumentar com o ângulo de inclinação do dente, conforme mostra a figura 5.13.

Por essas razões não se costuma empregar fresas com ângulos de inclinação  $\phi$  muito grande. Toma-se sempre que possível  $\phi \leq 45^\circ$ .

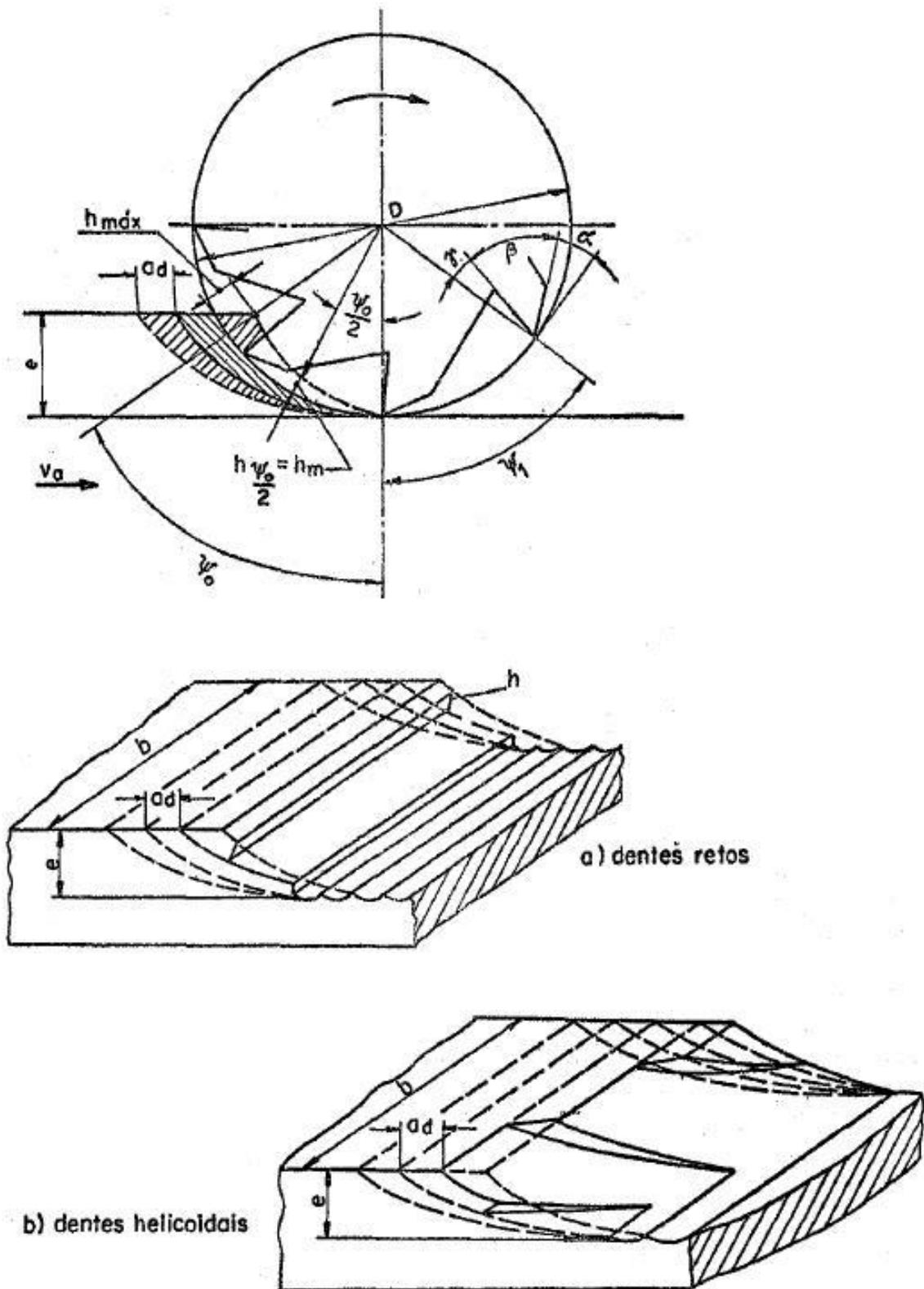


Fig. 5.6 – forma do cavaco e grandezas envolvidas no fresamento tangencial.

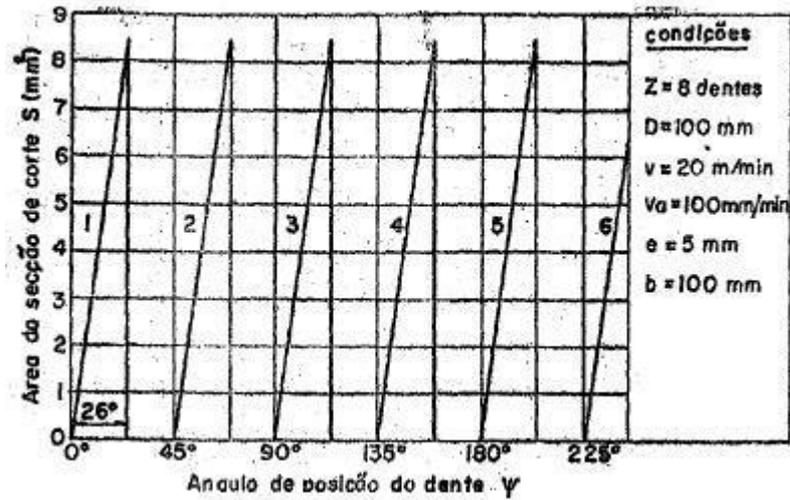


Fig. 5.7 – Variação da secção de cavaco S no fresamento com fresas de dentes retos.

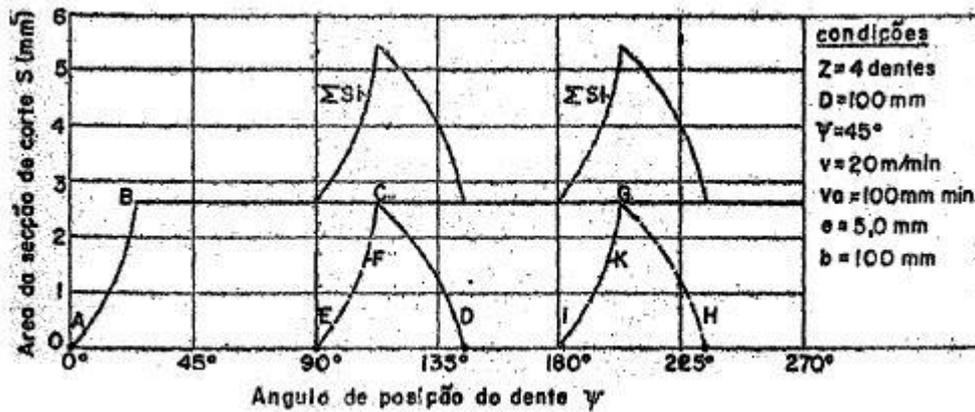


Fig. 5.8 – Variação de secção de cavaco S no fresamento com fresas helicoidais: dente 1 – ABCD, dente 2 – EFGH, etc, secção resultante -  $\sum S_i$

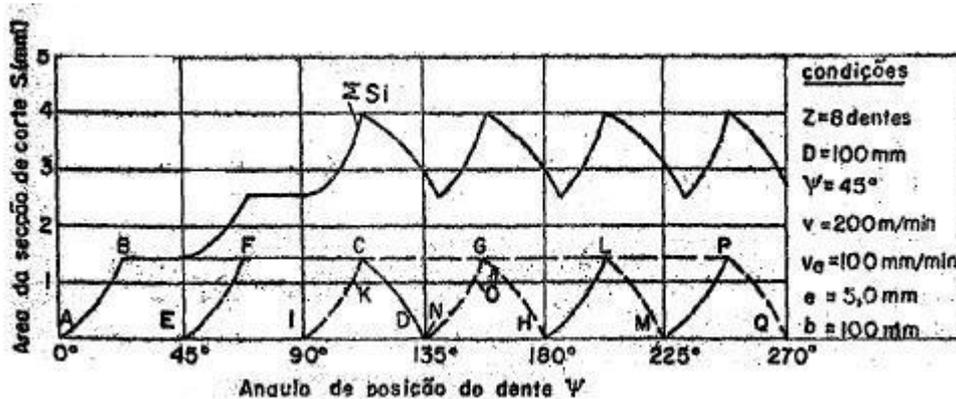


Fig. 5.9 – Variação da secção do cavaco, em condições de usinagem idênticas as da figura 5.8, porem com número de dentes maior. Dente 1 – ABCD, dente 2 – EFGH, etc.

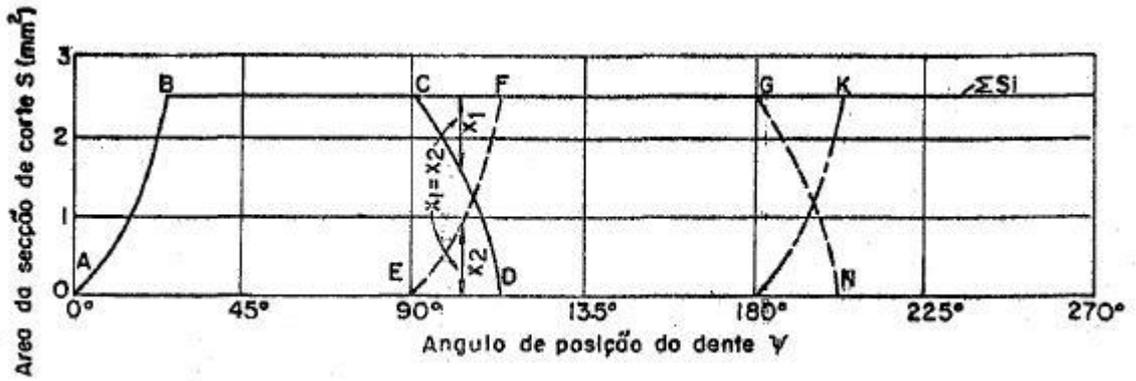


Fig. 5.10 – Variação da secção de cavaco no fresamento com fresas de dentes helicoidais, escolhendo-se convenientemente as condições de usinagem Dente 1 – ABCD, dente 2 – EFGH, etc.  
 $\sum S_i$  : secção resultante.

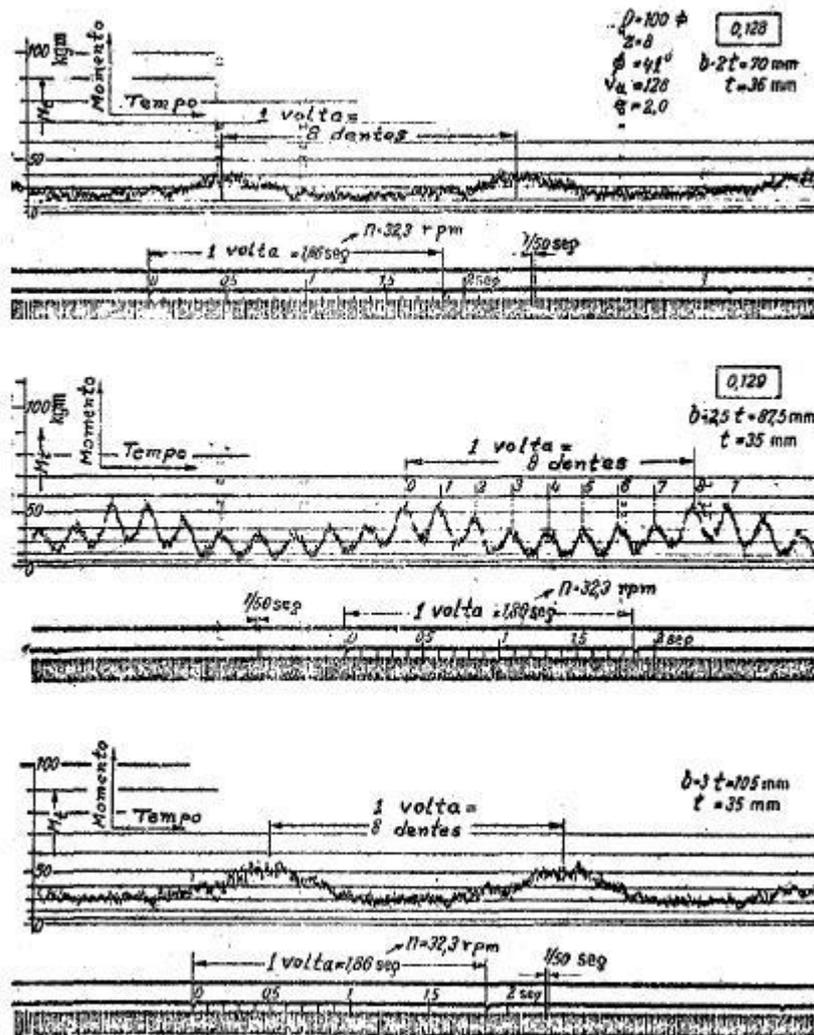


Fig. 5.11 – Variação do momento de torção em função da largura de corte b (mm) [15].

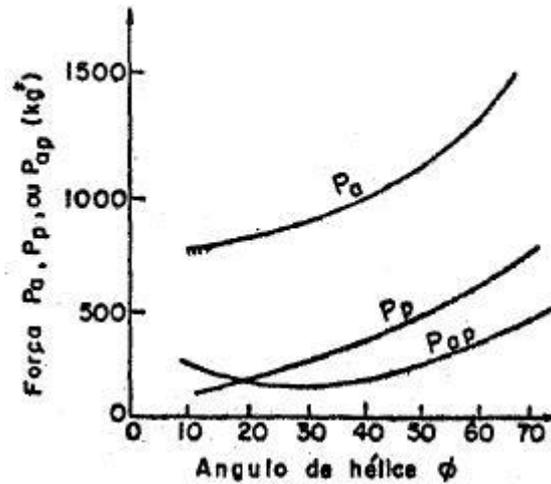


Fig. 5.12 – Variação das componentes da força média de corte em função do ângulo de hélice do dente.

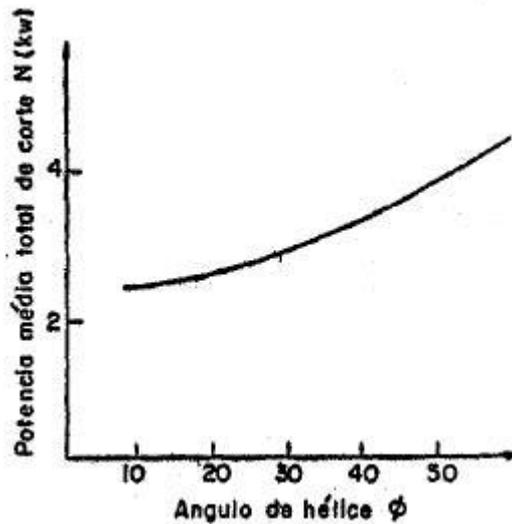


Fig. 5.13 – Variação da potência média de corte em função do ângulo de hélice do dente.

### 5.2.2 Potência e esforço de corte

O cálculo é aproximado e o erro é tanto maior, quanto maior o ângulo de inclinação  $\phi$  da aresta de corte. Para  $\phi \leq 30^\circ$  o erro é inferior a 5 %. De acordo com a figura 5.14 as arestas da fresa executam o corte num comprimento “g” variável de zero a máximo e novamente a zero. Um elemento de aresta tem o valor:

$$dg = \frac{d_c}{\text{sen}\phi}$$

$$dg = \frac{D}{2} d\phi \cdot \frac{1}{\text{sen}\phi} \quad h = a_d \cdot \text{sen}\phi = \frac{v_a}{n \cdot Z} \cdot \text{sen}\phi$$

A área da secção de cavaco correspondente ao elemento  $dg$  é:

$ds = dg \cdot h'_m$  é a espessura média de cavaco, podendo ser dada aproximadamente por:

$$h'_m = h \cdot \cos \phi$$

ou

(5.20)

$$h'_m = \frac{v_a}{n \cdot Z} \cdot \sin \varphi \cdot \cos \phi$$

Logo,

$$Ds = \frac{D \cdot v_a}{n \cdot Z \cdot 2} \cdot \sin \varphi \cdot \frac{\cos \phi}{\sin \phi} \cdot d\varphi \quad (5.21)$$

A força de corte correspondente a esta secção é  $dP_{c0} = km \cdot ds$

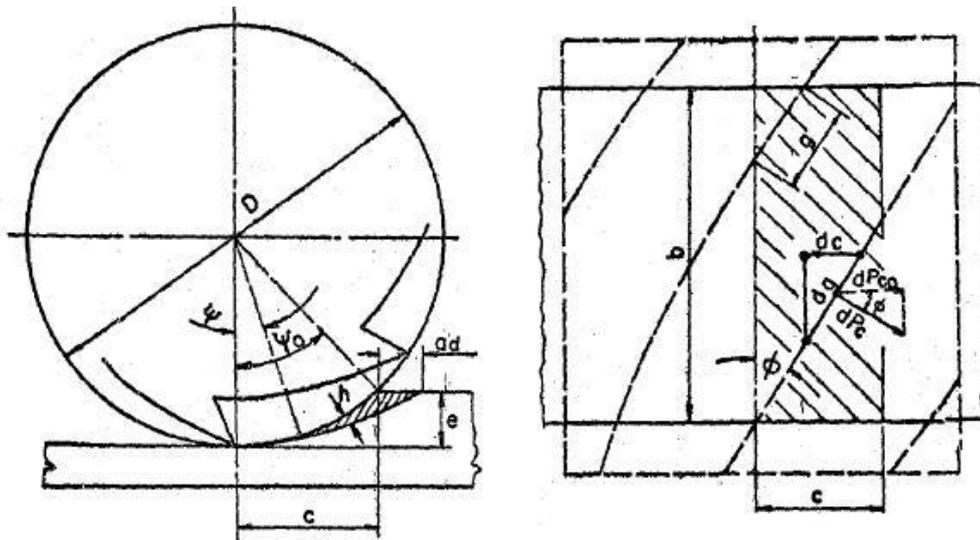


Fig. 5.14 – Grandezas de corte no fresamento com dentes helicoidais.

Projetando-se no plano normal ao eixo da fresa vem:

$$dP'_{c0} = km \cdot ds \cdot \cos \phi$$

ou substituindo-se:

$$dP'_{c0} = \frac{km \cdot D \cdot v_a}{n \cdot Z \cdot 2} \cdot \frac{\cos^2 \phi}{\sin \phi} \sin \varphi \cdot d\varphi$$

Integrando-se num intervalo correspondente aos ângulos  $\varphi_1$  a  $\varphi_2$ , no qual a aresta cortante está trabalhando, teremos para essa aresta:

$$P'_{c0} = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} km \cdot \frac{D \cdot v_a}{2 \cdot n \cdot Z} \cdot \frac{\cos^2 \phi}{\sin \phi} \cdot (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2) \quad (5.22)$$

Considerando-se várias arestas de corte em trabalho, teremos:

$$P_t = km \cdot \frac{D \cdot v_a}{2 \cdot n \cdot Z} \cdot \frac{\cos^2 \phi}{\text{sen} \phi} \cdot \sum (\cos \varphi_1) \quad (5.23)$$

O valor da força tangencial máxima,  $F_{t_{\max}}$  pode ser facilmente determinado procurando-se uma posição da fresa na qual  $\sum (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2)$  tem o valor máximo.

O momento e a posição de corte serão:

$$M_t = P_t \cdot \frac{D}{20} \text{ [kg*} \cdot \text{cm]} \quad (5.24)$$

$$N_0 = P_t \cdot \frac{v}{60 \cdot 75} \text{ [CV]} \quad (5.25)$$

A força axial de corte correspondente será:

$$P_a = P_t \cdot \text{tg} \phi$$

### 5.3 Fresas Frontais

Afim de obter um contato favorável entre aresta cortante e o material a ser usinado, o centro da fresa deve estar situado dentro da largura e da peça, figura 5.15.

Através de longa prática verificou-se que as condições ótimas de usinagem são para

$e \cong 0,75 \cdot D$  em ferro e aço fundido.

e

$e \cong 0,60 \cdot D$  em aço

Nas fresas frontais com pastilhas de metal duro, devido a sua grande sensibilidade aos choques, é muito importante o estudo da posição de ataque da pastilha com o material. Tal posição de ataque vai depender dos ângulos da ferramenta e da posição relativa da fresa com a peça. Na figura 5.16 estão representados com as letras STUV os quatro vértices da secção do cavaco no início do trabalho.

Para que a solicitação por choque na pastilha de metal duro seja pequena, é necessário que a ferramenta toque o material primeiramente no ponto U, o qual é o mais distante da aresta principal e transversal de corte. Seria muito prejudicial para a pastilha, o choque inicial no ponto S, isto é, na sua extremidade. Chamamos de tempo de choque o tempo gasto entre o primeiro contato da ferramenta e o contato completo da mesma com a secção de cavaco. As pesquisas sobre usinagem revelam que o tempo de choque deve ser o maior possível para que o efeito de choque na pastilha seja pequeno.

Para que o tempo de choque seja grande, tomamos nas fresas frontais a distância de ajustagem “j”, figura 5.15 bem pequena, ou seja:

$$j = \frac{D}{2} - e_1 = 0,05 \cdot D$$

Igualmente como nas fresas cilíndricas, as arestas de corte vão descrever, durante a operação de corte, ciclóides alongadas; a espessura do cavaco varia com o ângulo “ $\varphi$ ” (figuras 5.16 e 5.17).

Para o seu cálculo, podemos fazer a mesma aproximação que vimos anteriormente.

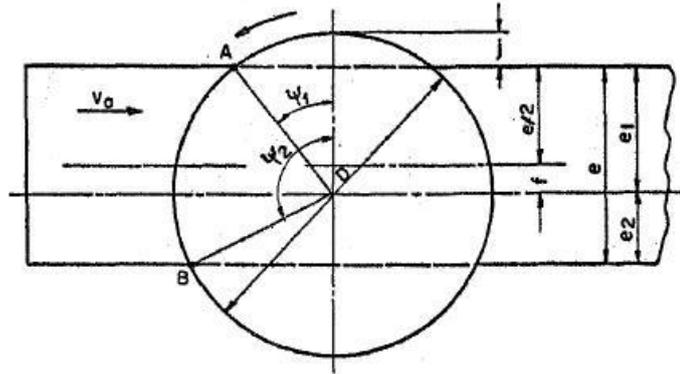


Fig. 5.15 – Posição de uma fresa frontal em relação à peça.

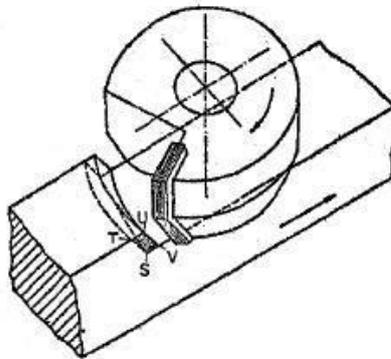


Fig. 5.16 – Representação esquemática da posição de ataque da pastilha de Metal Duro com o material.

$$h = a'_d \cdot \text{sen } X$$

$$a'_d = a_d \cdot \text{sen } \varphi$$

$$h = a_d \cdot \text{sen } \varphi \cdot \text{sen } X$$

Onde  $a_d$  é o avanço por dente e por volta da ferramenta e X é o ângulo de posição.

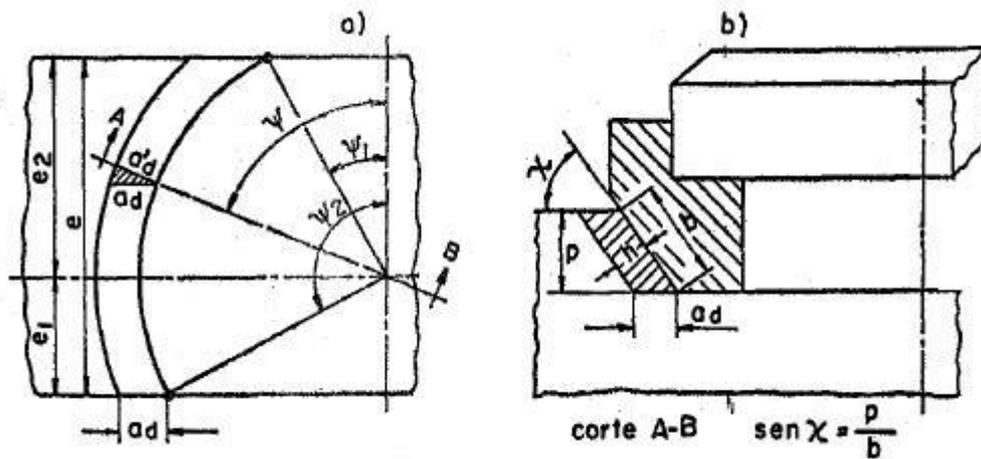


Fig. 5.17 – Espessura do cavaco em função do ângulo de posicionamento do dente e do ângulo de posição.

### 5.3.1 Força de corte

A força de corte  $p_c$  tangencial será:

$$P_c = k_s \cdot h \cdot b$$

ou

$$P_c = k_s \cdot b \cdot a_d \cdot \sin \varphi \cdot \sin X \quad (5.29)$$

Segundo o critério de Kienzle teremos:

$$P_c = k_{s1} \cdot b \cdot (a_d \cdot \sin \varphi \cdot \sin X)^{1-z} \quad (5.30)$$

ou

$$P_c = k_s \cdot p \cdot a_d' = k_s \cdot p \cdot a_d \cdot \sin \varphi$$

Os valores de  $k_s$  e  $k_{s1}$  podem ser obtidos na figura 5.2 e na tabela V.1.

A espessura média de cavaco é dada por:

$$h_m = \frac{\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} h \cdot d\varphi}{\varphi_2 - \varphi_1}$$

$$h_m = \frac{1}{\varphi_2 - \varphi_1} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} (a_d \cdot \sin \varphi \cdot \sin X) \cdot d\varphi$$

ou seja,

$$h_m = \frac{1}{\varphi_2 - \varphi_1} \cdot a_d \cdot \sin \varphi \cdot (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2) \quad (5.31)$$

A figura 5.18 representa esquematicamente os valores de  $h$  segundo a fórmula (5.28),  $P_c$  segundo a fórmula (5.30) e  $P'_c$  para uma pressão específica  $k_m$  correspondente a uma espessura média de cavaco dado pela fórmula (5.31).

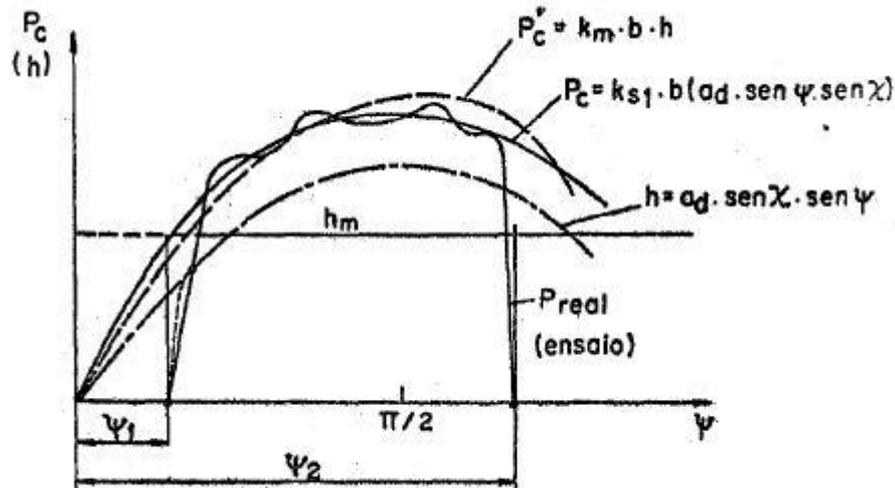


Fig. 5.18 – Representação esquemática da espessura de corte e das forças em função do ângulo de posicionamento do dente.

### 5.3.2 Potência de corte

O trabalho de corte realizado por um dente no percurso correspondente aos ângulos  $\varphi_1$  a  $\varphi_2$  será:

$$T = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} P_c \cdot \frac{D}{2} \cdot d\varphi$$

E para uma pressão específica média  $k_m$  temos:

$$T = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} k_m \cdot b \cdot h \cdot \frac{D}{2} \cdot d\varphi$$

$$T = k_m \cdot a_d \cdot \text{sen}X \cdot (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2) \cdot \frac{D}{2000} \text{ [kg*m]}$$

Pela figura 5.17 temos:

$$\cos \varphi_1 = \frac{2 \cdot e_1}{D}; \quad \cos \varphi_2 = -\frac{2 \cdot e_2}{D} \quad (5.32)$$

logo,

$$T = k_m \cdot a_d \cdot b \cdot \text{sen}X \left( 2 \cdot \frac{e_1}{D} + \frac{2 \cdot e_2}{D} \right) \cdot \frac{D}{2000}$$

$$T = k_m \cdot a_d \cdot b \cdot e \cdot \text{sen}X \cdot \frac{1}{1000} \quad (5.33)$$

A potência de corte média correspondente para uma rotação  $n$  e para um número de dentes  $Z$  da fresa será:

$$N_c = \frac{T \cdot n \cdot Z}{60 \cdot 75}$$

$$N_c = \frac{k_n \cdot a_d \cdot b \cdot e \cdot n \cdot Z}{60 \cdot 75 \cdot 1000} \cdot \text{sen} X \quad (5.34)$$

Ou ainda (figura 5.17)

$$N_c = \frac{k_m \cdot a_d \cdot e \cdot p \cdot n \cdot Z}{60 \cdot 75 \cdot 1000} |C \cdot V|$$

$$N_c = 2,22 \cdot 10^{-7} \cdot k_m \cdot e \cdot p \cdot v_a |C \cdot V| \quad (5.35)$$

Esta fórmula é idêntica à (5.7), com a única diferença que  $k_m$  é definido pra uma espessura de cavaco dada pela expressão (5.31).

### 5.3.3 Momento de torção

O momento de torção vai depender do número de dentes em trabalho num determinado instante.

$$M_t = \sum P_{ci} \cdot \frac{D}{2}$$

Tomando-se um valor médio de  $P_c$ , definido para um  $h_m$  e  $k_m$ , podemos escrever aproximadamente

$$M_m \cong P_{cm} \cdot \frac{D}{2} \cdot \left( Z \cdot \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2\pi} \right) + 1 \quad (5.37)$$

### 5.3.4 Componentes da força de usinagem

#### Plano de trabalho

Neste plano podemos decompor a força de usinagem  $P_u$  nas seguintes componentes (figura 5.19<sup>a</sup>):

- força de corte  $P_c$ , na direção de corte.
- força de avanço  $P_a$ , na direção de avanço.
- força de apoio  $P_{ap}$ , na direção perpendicular à direção de avanço.

A projecção da força de usinagem  $P_u$  no plano de trabalho é a componente  $P_t$ , chamada força ativa.

#### Plano de referência

As forças contidas neste plano não contribuem na potência de usinagem. Neste caso podemos decompor a força de usinagem  $P_u$  nas componentes (figura 5.19b):

- força radial  $P_R$  na direção perpendicular à direção de corte.
- força passiva  $P_p$  (ou força de profundidade), sobre a direção perpendicular ao plano de trabalho.

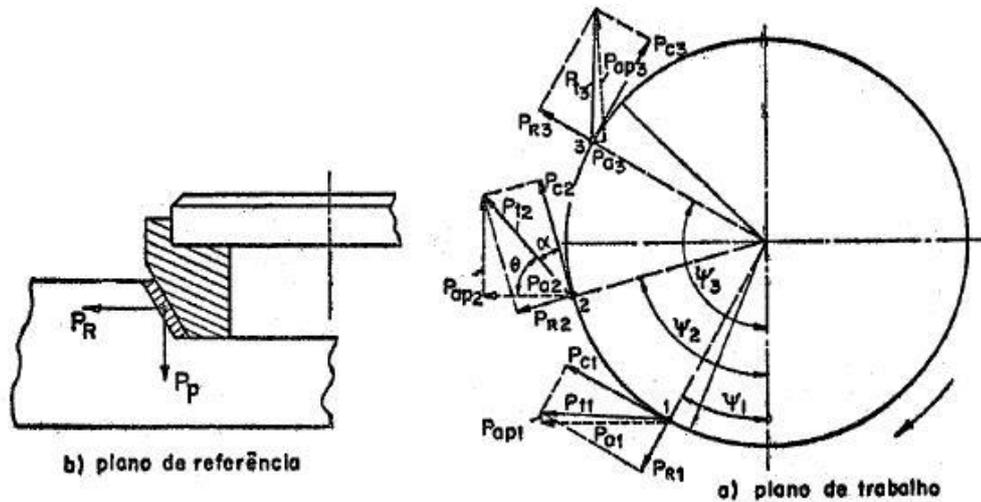


Fig. 5.19 – Decomposição da força de usinagem para diferentes posições da aresta cortante em relação à peça.

A figura 5.20 apresenta o valor relativo destas forças, em função do ângulo  $\varphi$ ; na mesma estão representadas, com os números de 1 a 5 as posições dos dentes em trabalho num instante dado. A força de avanço resultante seria:

$$\sum P_{ai} \cong P_{a1} + P_{a2} + \dots - P_{a5}$$

Para dimensionamento do carro tomamos em favor da segurança e para simplicidade dos cálculos

$$\sum P_a \cong P_{cm} \cdot Z \cdot \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2\pi} \cdot \frac{1}{2} \quad (5.38)$$

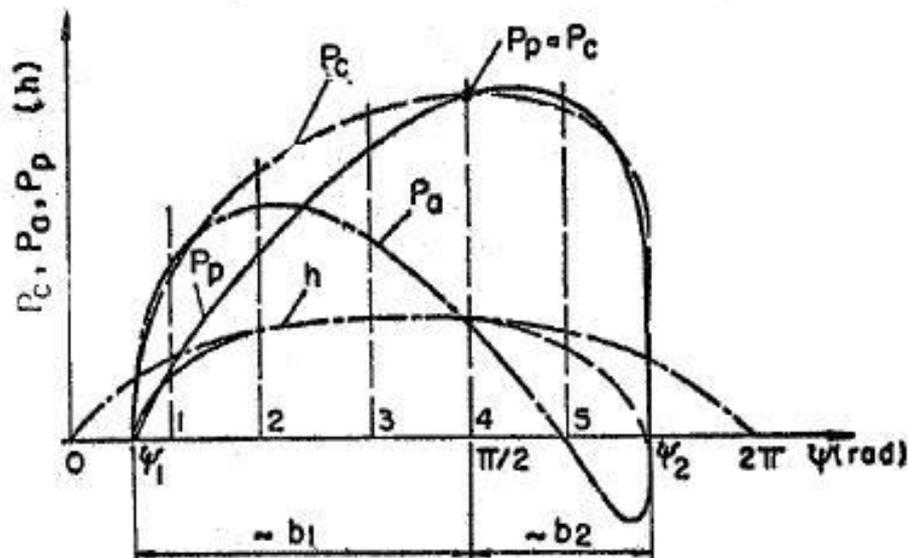


Fig. 5.20 – Valores das componentes da força ativa  $P_t$  em função do ângulo de posicionamento.

### 5.3.5 Potência de avanço

A potência de avanço desenvolvida pelo carro será:

$$N_a = \frac{\sum P_a \cdot v_a}{60 \cdot 75} \quad [\text{CV}] \quad (5.39)$$

onde  $v_a$  é dada em  $|\text{m/min}|$  e a força de avanço em  $|\text{Kg}^*|$ .

### 5.4 Calculo da potência de corte em base ao volume de cavaco removido

No visto no parágrafo 5.1.5 o calculo do volume de cavaco removido por minuto no fresamento cilíndrico tangencial com dentes retos.

Por idêntico processo de cálculo chegaríamos à conclusão de que para todos os tipos de fresamento é válida a fórmula (5.16), ou seja:

$$V = b \cdot e \cdot a_d \cdot n \cdot Z = b \cdot e \cdot v_a$$

onde:

$V$  = volume de cavaco removido, em  $\text{mm}^3/\text{min}$ .

$b$  = largura de corte, mm.

$e$  = espessura de corte, mm.

$a_d$  = avanço por dente, mm.

$n$  = velocidade de rotação da fresa, mm.

$Z$  = número de dentes da fresa.

$v_a$  = velocidade de avanço da fresa, mm/min.

Chamando-se  $V^{\wedge}$  o volume de cavaco removido ( $\text{mm}^3$ ) por unidade de potência (KW, HP ou CV) em um minuto de trabalho, o qual pode ser medido experimentalmente, tabelado ou colocado em gráficos para cada tipo de material usinado, temos por definição:

$$N_c = \frac{V^{\wedge}}{V}$$

onde  $N_c$  é a potência de corte necessária para remover um volume  $V$  de cavaco por minuto. As tabelas V.2 e V.3 fornecem os valores de  $V^{\wedge}$  segundo várias fontes.

A potência a ser fornecida pelo motor de acionamento da fresadora será:

$$N_m = \frac{N_c}{N_t}$$

Onde  $N_t$  é o rendimento mecânico total da transmissão, cujos valores orientativos, em função da

potência do motor de acionamento são dados na tabela V.4. Para uma rápida avaliação do volume máximo removível por minuto para uma dada potência do motor de acionamento, a tabela V.5 fornece os valores já calculados, baseados nos rendimentos mecânicos fornecidos pela tabela V.4.

Embora o método de cálculo da potência pelo volume de cavaco removido seja mais rápido, o valor calculado só apresenta uma boa precisão quando as condições de usinagem, principalmente o avanço por dente, são valores normais. Isto se deve ao fato de que as tabelas são baseadas em condições normais de usinagem. Por isso, quando se tratar de operações de usinagem que utilizem avanços por dente muito menores ou maiores que os valores usuais é preferível calcularmos a potência do corte pelo método da pressão específica de corte média  $k_m$ , fornecido no parágrafo 5.1.1 (fresa tangencial) e parágrafo 5.3.1 (fresa frontal).

#### Exemplos de aplicação

- Calcular a potencia consumida pelo motor de acionamento, numa operação de fresamento frontal sendo dados:

Material: aço carbono com 200 HB ( $\sigma_t \cong 67 \text{ kg}^* / \text{mm}^2$ )

Condições de usinagem:

- Largura de corte:  $b = 3,0 \text{ mm/min}$ .

- velocidade de avanço:  $v_a = 300 \text{ mm/min}$ .

- espessura de corte:  $e = 100 \text{ mm}$

Fresadora: - Rendimento mecânico:  $\eta_t = 0,55$  (55%)

a) Cálculo segundo Tool Engineers Handbook (tabela V.2), para aços com 150 a 300HB:

$V^{\wedge} = 11000 \text{ mm}^3 / \text{HB} \bullet \text{min}$  (valor aproximado)

$V = v_a \bullet b \bullet e = 300 \bullet 30 \bullet 100 = 90000 \text{ mm}^3 / \text{min}$

$$N_m = \frac{N_c}{\eta_t} = \frac{1}{\eta_t} \cdot \frac{V}{V^*} = \frac{1}{0,55} \cdot \frac{90000}{11000} = 14,9 \text{ HP}$$

b) Cálculo segundo Nearney e Trecker (tabela V.2), para aço de média resistência:

$$V^* = 10600 \text{ mm}^3 \text{ HP} \cdot \text{min}$$

$$N_m = \frac{90000}{0,55 \cdot 10600} = 15,5 \text{ HP}$$

c) Cálculo segundo Cincinnati (tabela V.2), para aço com 200HB:

$$V^* = 10600 \text{ mm}^3 \text{ HP} \cdot \text{min}$$

$$N_m = \frac{90000}{0,55 \cdot 10600} = 15,5 \text{ HP}$$

d) Cálculo segundo Graupner (tabela V.3), para aço carbono com resistência entre 60 – 70

kg\*/mm<sup>2</sup> e fresamento forntal:

$$V^* = 14000 \text{ mm}^3/\text{Kw} \cdot \text{min} = 14000 \cdot 0,745 = 10430 \text{ mm}^3/\text{HP} \cdot \text{min}$$

$$N_m = \frac{90000}{0,55 \cdot 10430} = 15,7 \text{ HP}$$

TABELA V.2: VALORES RECOMENDADOS DO FATOR DE REMOÇÃO DE CAVACO (V') SEGUNDO VÁRIAS FONTES.

TOOL ENGINEERS HANDBOOK	V' $\frac{103 \cdot \text{mm}^3}{\text{HP} \cdot \text{min}}$	KEARNEY & TRECKER	V' $\frac{103 \cdot \text{mm}^3}{\text{HP} \cdot \text{min}}$	CINCINNATI MILLING	V' $\frac{103 \cdot \text{mm}^3}{\text{HP} \cdot \text{min}}$
Alumínio e Magnésio	41,0-65,5	Alumínio	37,4	Alumínio fundido	32,8
Bronze e latão, mole	27,9-41,0	Latão, mole	32,8	Magnésio	41,0
Bronze e latão, médio	16,4-22,9	Bronze, duro	22,9	Latão	29,5
Bronze e latão, duro	9,8-16,4	Bronze, muito duro	10,6	Ferro fundido	20,5
Ferro fundido, mole	24,6	FoFo, mole	22,1	Ferro Fundido mal.	20,5
Ferro fundido, médio	13,1-16,4	FoFo, duro	13,9	Aço 100 HB	13,1
Ferro fundido, duro	9,8-13,1	FoFo, coquilhado	10,6	Aço 150 HB	11,5
FoFo mal. e Aço Tref. SAE 6140	14,7	FoFo, maleável	14,7	Aço 200 HB	0,6
Aço Tref. SAE 1112, 1120 e 1315	16,4	Aço, mole	13,9	Aço 250 HB	2,8
Enrijados e aços liga SAE 3120, 1020, 2320 e 2345, c/150-300HB	10,3-14,3	Aço, médio	10,6	Aço 300 HB	9,0
Aços liga 300-400 HB	8,2	Aço, duro	7,9	Aço 400 HB	8,2
Aço inox. de corte livre AISI 416	18,0				
Aço inox. austenítico de corte livre AISI 303	13,6				
Aço inox. austenítico, AISI 304	11,8				
Metá monel	9,0				
Cobre, recozido	13,8				
Aço ferramenta	8,3				
Níquel	8,6				
Titânio	12,3				

TABELA V.3 - Valores do fator de remoção de cavaco V'  
(segundo-G. Graupner)

Material	Resistência $\sigma_t$ [kg*/mm <sup>2</sup> ] ou dureza	Fresa cilíndrica [mm <sup>3</sup> /KW.min.]	Fresa Frontal [mm <sup>3</sup> /KW.min.]
Aço Carbono	50 - 60	13000	16000
	60 - 70	12000	14000
	70 - 85	10000	12000
Aço - liga	70 - 85	9000	11000
	85 - 100	8000	9000
	100 - 140	7000	8000
Aço fundido	30 - 50	11000	14000
	50 - 70	9000	12000
Ferro fundido cinzento	até 200 HB	30000	36000
	200 - 250 HB	25000	30000
	250 - 400 HB	18000	22000
Ferro Fundido Duro	GTW-35	14000	20000
Cobre		30000	40000
Latão		40000	50000
Alumínio		50000	70000
Duralumínio		45000	55000
Bronze GSnbz 14		20000	25000

TABELA V.4 - Rendimento mecânico total da transmissão  $\eta_t$ , em %,  
segundo KEARNEY e TRECKER.

Potência do motor [HP]	3	5	7,5	10	15	20	25	30	40	50
Rendimento [%]	40	48	52	52	55	60	65	70	75	80
Potência disponível no eixo árvore	1,2	2,4	3,9	5,2	8,2	12	16,3	21	30	40

TABELA V.5 – Volume máximo removível para diversas potências do motor, incluindo o rendimento mecânico da transmissão\*), segundo Kearney e Trecker.

MATERIAL	POTÊNCIA DO MOTOR [HP]									
	3	5	7,5	10	15	20	25	30	40	50
	VOLUME MÁXIMO REMOVÍVEL									
Alumínio	50	90	145	195	310	450	610	780	1100	1500
Latão, mole	40	80	130	170	270	390	530	690	980	1300
Bronze, duro	27,5	55	90	120	190	275	370	480	690	920
Bronze, muito duro	13,5	25,5	41,5	55	88	130	170	220	320	425
Ferro fundido, mole	26,5	53	86	115	180	265	360	465	660	885
Ferro fundido, duro	16,5	33,5	54	72,5	115	165	225	290	420	560
Ferro fundido coquilhado	13	25,5	41,5	55	88	130	170	220	320	425
Ferro fundido maleável	18	35,5	57,5	77	120	175	240	310	440	590
Aço, mole	16,5	33,5	54	72,5	115	165	225	290	420	560
Aço, médio	13	25,5	41,5	55	88	130	170	220	320	425
Aço, duro	9,5	19	30,5	41	65	95	130	165	235	315

\*) O rendimento mecânico da transmissão adotado é o fornecido pela tabela V.4

## 6. SELEÇÃO DA VELOCIDADE DE CORTE E DO AVANÇO

Desde que a precisão dimensional, acabamento superficial e produtividade estão intimamente relacionados com a velocidade de corte e avanço por dente, é conveniente um cuidadoso estudo destes dois parâmetros, em função do material da peça, tipo da fresa, operação e demais condições de usinagem.

A publicação de várias tabelas, provenientes de várias fontes proporcionam uma orientação quanto aos valores a serem adotados, que servirão de base para um eficiente planejamento da operação de fresamento. Obviamente, os valores reais a serem adotados deverão ser verificados na prática, desde que é praticamente impossível verificar avaliar com suficiente precisão o comportamento do par ferramenta- peça na usinagem. As tabelas VI.1 e VI.2 fornecem os valores normais indicados para uma primeira aproximação das condições ótimas de usinagem, e não devem ser entendidos como valores definitivos, devido ao constante aperfeiçoamento das máquinas ferramentas e usinabilidade dos diversos materiais da peça.

TABELA VI.1 - Valores recomendados do avanço por dente ad [mm] no fresamento 2

MATERIAL	Resistência σ <sub>t</sub> [kg*/mm <sup>2</sup> ] ou dureza HB	Tangen- cargas		Tang. Frontais		Disco		Topo c/ haste		Forma		Frontais (com insertos)	
		AR	MD	AR	MD	AR	MD	AR	MD	AR	MD	AR	MD
Aço	- até 50	0,20	0,25	0,25	0,28	0,07	0,10	0,05	0,05	0,04	0,04	0,15	0,25
	50 - 70	0,15	0,20	0,20	0,25	0,06	0,07	0,05	0,04	0,04	0,03	0,15	0,20
	70 - 90	0,10	0,15	0,15	0,22	0,06	0,06	0,04	0,04	0,03	0,03	0,12	0,15
Carbono	90 - 110	0,08	0,15	0,10	0,22	0,05	0,05	0,03	0,03	0,02	0,02	0,12	0,15
	-	0,08	0,15	0,10	0,22	0,05	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02	0,10	0,12
Aço Fundido	38 - 52	0,15	0,15	0,15	0,22	0,07	0,07	0,05	0,05	0,04	0,04	0,12	0,20
Fogo	< 200 HB	0,20	0,20	0,20	0,25	0,07	0,07	0,05	0,05	0,05	0,04	0,10	0,30
	> 200 HB	0,10	0,20	0,15	0,22	0,05	0,07	0,03	0,05	0,02	0,04	0,10	0,20
Fogo nodular	-	0,20	0,20	0,20	0,22	0,07	0,07	0,05	0,05	0,05	0,04	-	-
Fogo maleável	-	0,20	0,20	0,20	0,25	0,07	0,07	0,05	0,05	0,04	0,04	0,10	0,30
Ligas de Al.	-	0,15	0,10	0,10	0,15	0,07	0,07	0,04	0,05	0,03	0,04	0,10	0,20
	-	0,20	0,25	0,20	0,30	0,07	0,07	0,05	0,05	0,04	0,04	0,10	0,25
Latão	-	0,15	0,25	0,15	0,30	0,06	0,07	0,04	0,05	0,03	0,04	0,10	0,25
Bronze	-	0,15	0,25	0,15	0,30	0,06	0,07	0,04	0,05	0,03	0,04	0,10	0,25
Plásticos	-	0,15	0,25	0,20	0,30	0,10	0,10	0,06	0,07	0,04	0,06	0,10	0,20

**OBSERVAÇÕES:****CÓDIGO:**

AR - AÇO RÁPIDO  
MD - METAL DURO

a) Os valores indicados correspondem a uma espessura de penetração de 3,0 a 5,0 mm. no fresamento cilíndrico tangencial e a uma profundidade de corte de 3,0 a 5,0 no fresamento frontal.

b) Entende-se como fresas frontais aquelas utilizadas para o faceamento.

TABELA VI.2 - Valores recomendados da velocidade de corte v [m/min], no fresamento | 2 |

MATERIAL	Resistência $\sigma_t$ [kg*/mm <sup>2</sup> ] ou dureza HB	Fresas de tampo (para facear)		Demais tipos de fresas	
		AR	MD	AR	MD
Aço	< 50	21 - 30	90 - 200	17 - 24	100 - 150
	50 - 70	20 - 28	80 - 160	16 - 24	80 - 120
Carbono	70 - 90	15 - 23	60 - 110	15 - 20	60 - 100
	90 - 110	12 - 19	50 - 100	11 - 18	50 - 80
Aço liga	-	12 - 20	45 - 80	13 - 17	60 - 100
Aço Fundido	38 - 52	15 - 25	50 - 90	13 - 19	40 - 70
Fofo Cinzento	< 200 HB	19 - 26	65 - 100	14 - 19	50 - 80
	> 200 HB	14 - 25	40 - 70	10 - 16	40 - 60
Fofo nodular	-	-	-	10 - 20	50 - 100
Fofo maleável	-	18 - 28	80 - 120	16 - 22	50 - 80
Ligas de Alumínio	-	180 - 270	300 - 1000	200 - 300	200 - 600
Latão	-	50 - 70	120 - 240	34 - 48	80 - 120
Bronze	-	40 - 65	100 - 200	30 - 40	80 - 120
Plásticos	-	60 - 80	80 - 120	30 - 50	80 - 100
<b>CÓDIGO:</b>					
<b>AR - AÇO RÁPIDO</b>					
<b>MD - METAL DURO</b>					
<b>OBSERVAÇÃO:</b>					
- Quando existir crosta de fundição e laminação ou outros defeitos superficiais a velocidade de corte deve ser reduzida.					

- 1 – Ferraresi, D. : Fundamentos da Usinagem dos Metais : Ed. Edgard Blücher; 1970
- 2 - Schallbroch, H. : Das Waagerecht – Bohr und Fraswerk und seine Anwendung; Springer – Verlag, 1959
- 3 – ASTME – Tool engineers Handbook: New York; Mc Graw Hill Book Company Inc: Second Ed. 1959
- 4 – AVRUTIN, S. – Fundamentals of Milling Practice: Peace Publishers, Moscow.
- 5 -Bolz, Roger; Metals engineering Processes, ASME Hanbook; New York; Mc Graw Hill Book Company Inc; 1958.
- 6 – BURGHARDT, H. D.: AKELROD, A.: and ANDERSON, J.: Machine Tool Operation; New York; Mc Graw Hill Book Company Inc: 4ª Ed. 1960
- 7 – CASTILLAS, A L.: Ferramentas de corte; São Paulo: Editora Mestre Jou; 1965
- 8 – DAAR, H. L. A.: Os Materiais empregados nas Ferramentas de Corte; São Carlos. SP. Depart. Publicações da EESCUSP; 1966
- 9 – DOYLE, L. E. ; MORRIS, J. L.; LEACHS, J. L. ; and SCHARDER, G. F.; Processos de Fabricação e Materiais para Engenheiros. São Paulo, Editora Edgar Blücher LTDA, 1967
- 10 – KOTHAUS, H. : Técnica da Produção Industrial – 3º Vol. – Processos e Dispositivos de produção; São Paulo, Editora Polígono; 1966
- 11 – HUTTE; Manual del Ingeniero de Taller; Tomo I: Barcelona, Esditorial Gustavo Gili, S. A.; 1959
- 12 – ROSSI, Mario; Máquinas Ferramentas Modernas: Barcelona; Hoepli, HOEPLI, S.L.; 1958
- 13 – ASME: Machining, vol.3 da coleção Metals Handbook
- 14 – HAIDIT, H; Der Leistungsbedarf bei der apanendem Formung: Das Industrieblatt, Stutagart , 87-94, 1970
- 15 – SCHWERD, f. : Spanende Werknengmaschinen; spinger – Verlag, 1958

### **Apêndice**

1.           Industria e Comércio TWILL S.A.  
Rua Presidente Altino, 2650  
Centro Industrial do Jaguaré  
Fone: 260 4058 – Cx. Postal 4504

2. KOLM – Máquinas e Ferramentas S.A.  
Rua Salete, 312 – Fone: 298.0381  
Cx. Pistal – 3200  
Santana – SP
  
3. Fábrica Paulista de Brocas e Ferramentas de corte  
Rua Barão do Ladário, 1224  
Campo Belo – SP
  
4. Industria de Ferramentas “NOVART”  
Rua Guaicurús, 475 – Fone 62.3424  
São Paulo – SP
  
5. Fábrica de Ferramentas de Precisão ALM.  
Rua Javoraú, 316 – Freguesia do Ó  
Fone: 62.3770 – Cx. Postal – 1094  
São Paulo – SP.
  
6. SANDIWIC DO BRASIL S.A.  
Av, das Nações unidas, 1130  
Foen: 61.7667  
Santo Amaro – SP
  
7. FAGERSTA DO BRASIL S.A.  
Av. Álvaro Guimarães, 1020 – Fone: 43.2600  
Cx. Postal 4620 – São Bernardo do Campo – SP
  
8. VULCANO DO BRASIL  
Rua Marechal Deodoro, 2510 – fone: 43.2400  
São Bernardo do Campo – SP.