UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS - EESC

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

NÚCLEO DE MANUFATURA AVANÇADA - NUMA

FORÇA E POTÊNCIA DE CORTE EM FRESAMENTO

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

Março 2018

ÍNDICE

Sumário

1 - O PROCESSO DE FRESAMENTO 3
1.3 Tipos fundamentais de fresamento.....4
2. FORÇAS E POTENCIAS DE CORTE 12
2.1 - Fresas Frontais .....**Erro! Indicador não definido.**
2.2 - Calculo da potência de corte em base ao volume de cavaco removido 13
3. SELEÇÃO DA VELOCIDADE DE CORTE E DO AVANÇO.....14

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.

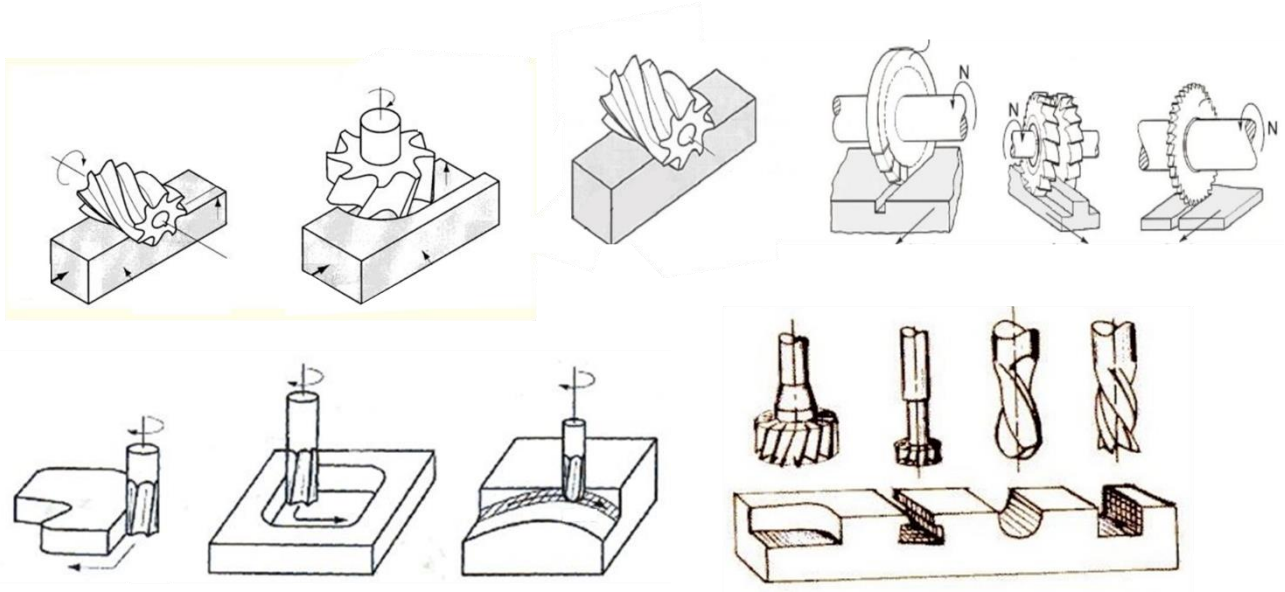


Figura 1.1: Exemplo de operações típicas de fresamento.

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 (tolerância 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, classifica-se a operação da seguinte maneira:

- Fresamento Tangencial – Nesta operação as arestas ativas estão, predominantemente, 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 as arestas ativas estão, predominantemente, na superfície frontal (topo) da ferramenta. O eixo da fresa neste caso é perpendicular à 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).

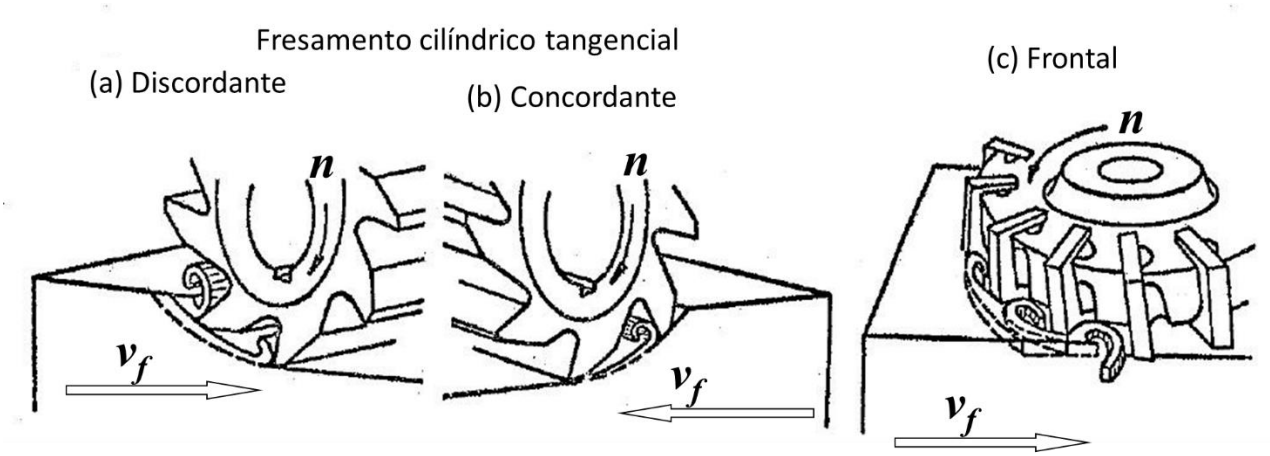


Figura 1.2 - Principais t tipos de fresamento: Cilíndrico Tangencial e Cilíndrico Frontal

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

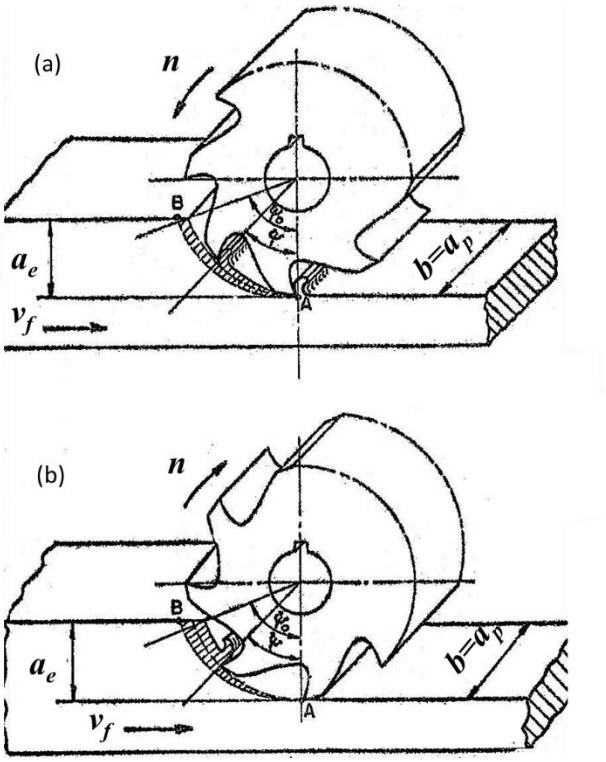


Figura 1.3 – Fresamento cilíndrico tangencial: a) concordante; b) discordante.

Nas operações discordantes, 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 ($\boldsymbol{F_v}$) 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 da máquina. Esta alternância da componente vertical da força de usinagem pode produzir vibrações indesejáveis prejudicando o acabamento superficial e a tolerância dimensional da superfície fresada. Um exemplo de como age a força de corte no plano de trabalho de uma operação de fresamento tangencial é mostrado na Figura 1.4.

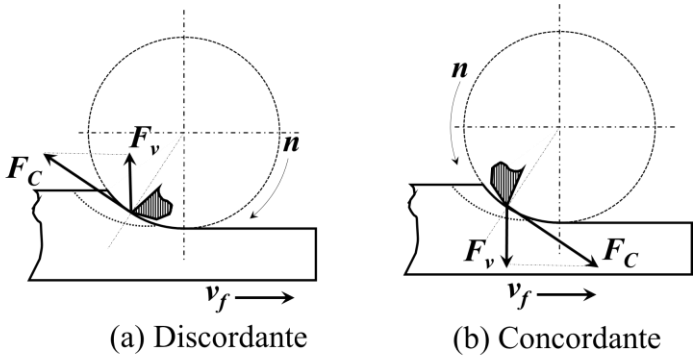


Figura 1.4 – Esquema de forças no plano de trabalho de uma operação de fresamento tangencial.

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 pode se dar em condições desfavoráveis, o que pode diminuir a vida útil da ferramenta, além de originar uma componente vertical maior da força de corte. Outro inconveniente é que a componente horizontal da força de usinagem possui o mesmo sentido da força de avanço da mesa, e é de modulo 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, ou minimizando, esse problema. A utilização de ângulo de saída negativo em pastilhas de metal duro nas fresas cilíndricas tangenciais, como mostra a Figura 1.5, melhora em vários casos o emprego do movimento concordante.

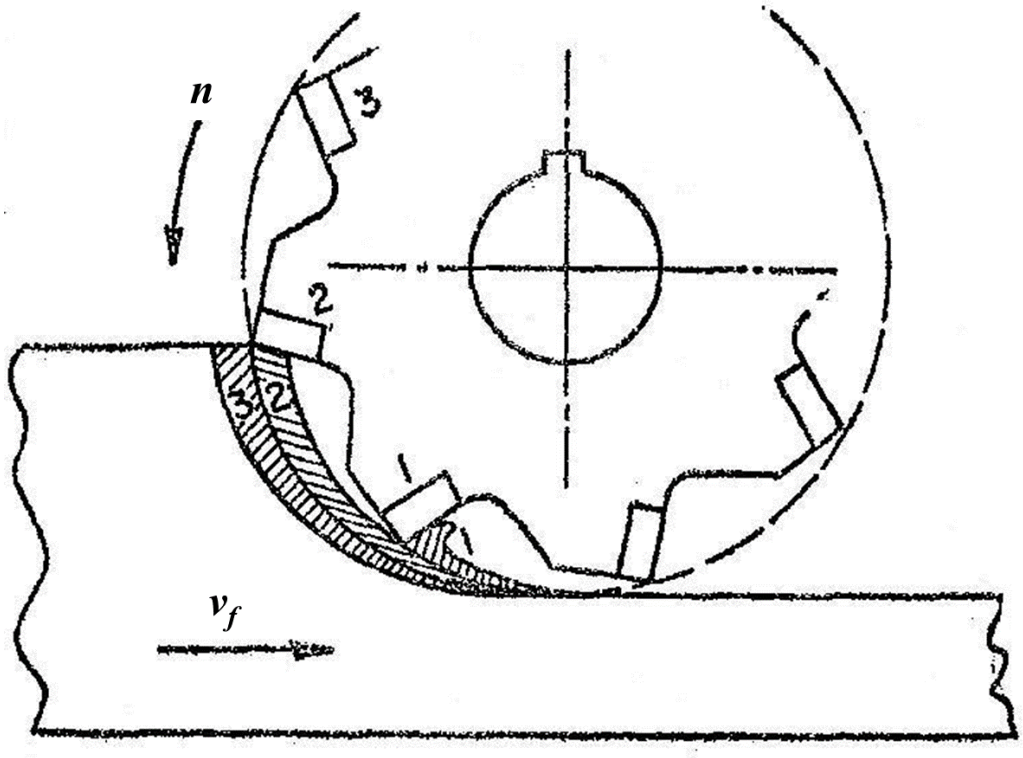
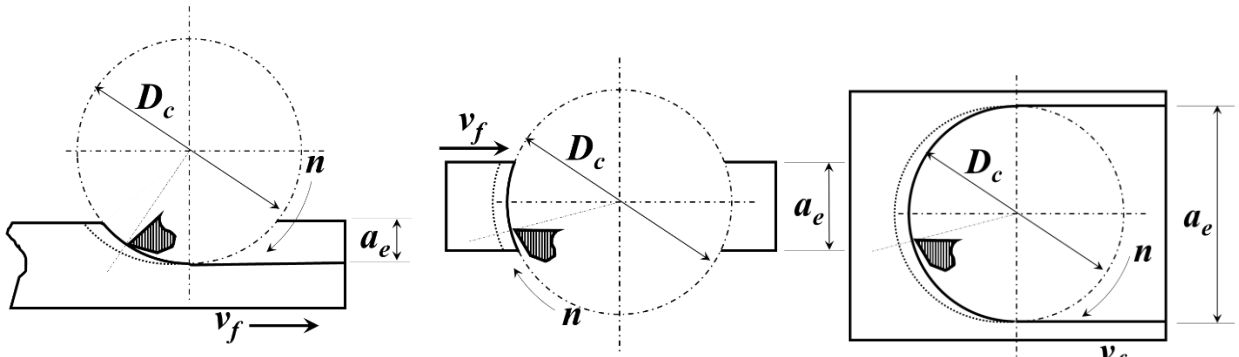


Figura 1.5 – Fresamento concordante com pastilhas de metal duro com ângulo de saída negativo.

No fresamento com fresas frontais o cavaco também se apresenta em forma de vírgula e também há variação da espessura de usinagem, $\boldsymbol{h}$. Há 3 possibilidades diferentes de interação entre o cortador (fresa) e a peça, dependendo da penetração de trabalho, $\boldsymbol{a_e}$, e da posição da peça em relação ao centro do cortador, conforme mostrado na Figura 1.6.



(a) $\boldsymbol{a_e < D_c}$ e fora de centro (b) $\boldsymbol{a_e < D_c}$ e no centro (c) $\boldsymbol{a_e = D_c}$

Figura 1.6 – Exemplos de 3 situações diferentes que ocorrem no fresamento frontal

A formação do cavaco na operação de fresamento obedece ao mesmo mecanismo descrito em outros textos. 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 de corte, $\boldsymbol{h}$, variável ao longo do percurso de

interação da aresta com a peça. Cada dente da fresa retira cavaco em forma de vírgula, conforme Figuras 1.4 a 1.6 mostram. A forma exata da trajetória descrita pela aresta de corte sobre a peça é uma composição entre o movimento circular (rotação da fresa) e linear de translação (avanço). Como a velocidade de avanço é, em geral, muito menor do que a de rotação, pode-se aproximar duas trajetórias consecutivas de dois dentes por duas circunferências de diâmetro igual ao do cortador e deslocadas pelo valor do avanço por dente, f_z, conforme a Figura 1.7

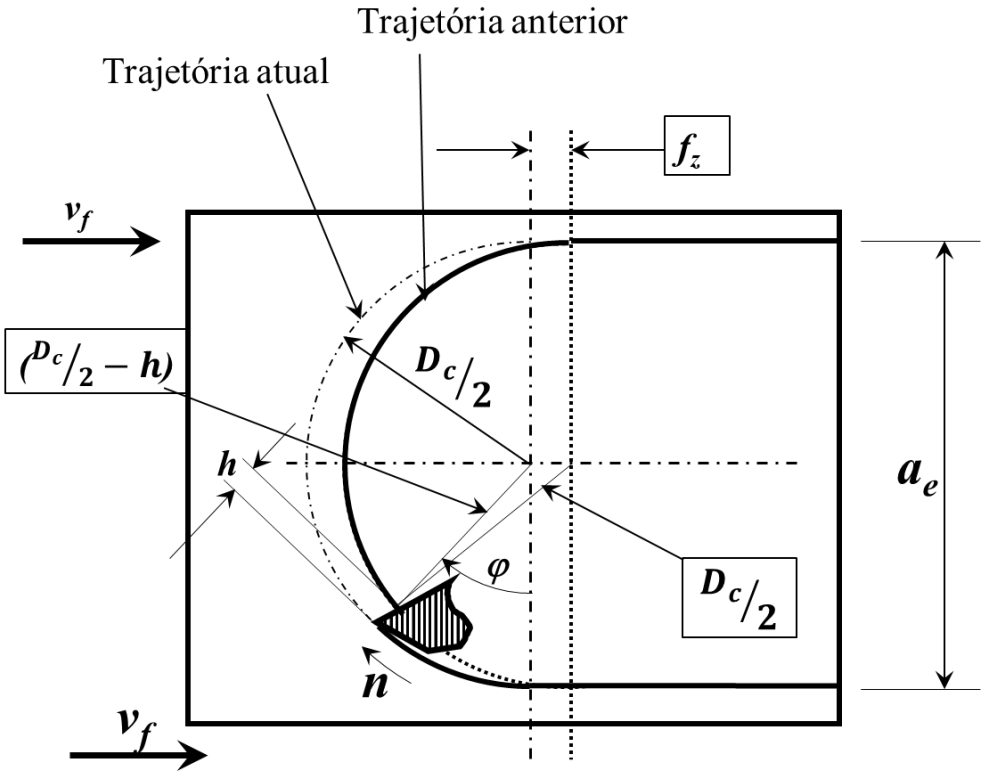


Figura 1.7 – Esquema aproximado das trajetórias descritas por dois dentes consecutivos no fresamento.

Para que se calcule o valor da espessura de corte, h, em função do ângulo de giro da aresta, pode-se escrever, usando a lei dos cossenos:

$$\left(D_c/2\right)^2 = (f_z)^2 + \left(D_c/2 - h\right)^2 - 2.f_z.\left(D_c/2\right).cos(90 + \varphi) \quad (1.1)$$

ou seja,

$$\left(D_c/2\right)^2 = (f_z)^2 + \left(D_c/2\right)^2 - 2.\left(D_c/2\right).h + h^2 + 2.f_z.\left(D_c/2\right).sen(\varphi)$$

$$0 = (f_z)^2 - 2.D_c/2\,.h + h^2 + 2.f_z.D_c/2\,.sen(\varphi)$$

Se os valores de f_z e h forem muito pequenos a ponto de podermos desprezar seus quadrados o valor de h pode ser calculado como aproximadamente:

$$h \cong f_z.sen(\varphi) \quad (1.2)$$

Para todas as operações de fresamento pode-se definir um ângulo de contato, representado por φ, no qual se dá a interação entre a aresta de corte e a peça, conforme a Figura 1.8.

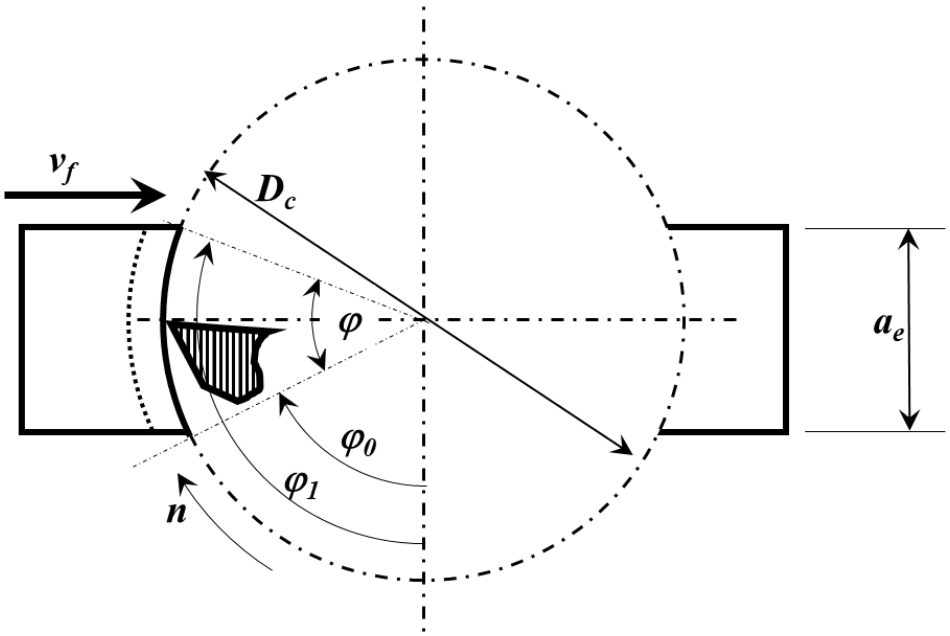


Figura 1.8 – Esquema de interação entre o cortador (fresa) e a peça.

Pode-se ainda definir os ângulos inicial e final de contato, como sendo φ_0 e φ_1. Para o fresamento frontal com $a_e < D_c$, e no centro (Figura 1.8):

$$\varphi_0 = cos^{-1}\left(a_e/D_c\right) \quad (1.3)$$

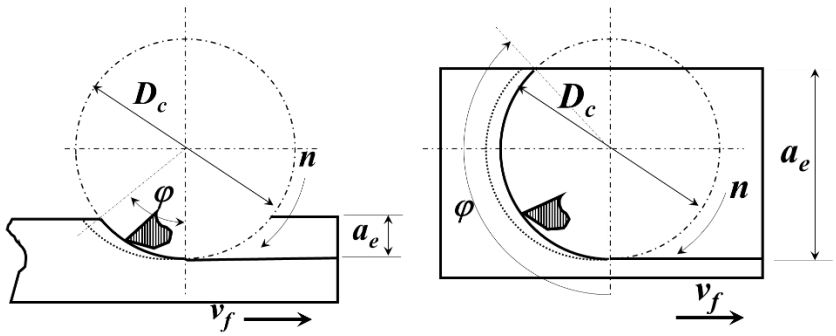
$$\varphi_1 = sen^{-1}\left(a_e/D_c\right) + \pi/2 \quad (1.4)$$

Para o fresamento frontal $\varphi_0 = 0$ e φ será dado por:

$$\varphi = cos^{-1}\left(1 - 2a_e/D_c\right) \quad \text{quando } a_e \leq (D_c/2) \quad (1.5)$$

$$\varphi = sen^{-1}\left(2a_e/D_c - 1\right) + \pi/2 \quad \text{quando } \left(D_c/2\right) < a_e < D_c \quad (1.6)$$

conforme a Figura 1.9.



(a) $a_e \leq D_c/2$ (b) $D_c/2 < a_e < D_c$

Figura 1.9 Esquema de interação do cortador (fresa) com a peça para fresamento frontal.

No fresamento frontal quando $a_e = D_c$, (Figura 1.7) $\varphi = 180°$. Por último, no fresamento tangencial, $\varphi_0 = 0$ e φ é dado por:

$$\varphi = cos^{-1}\left(1 - {}^{2a_e}/_{D_c}\right) \quad (1.7)$$

Assumindo-se que $a_e \leq \left({}^{D_c}/_{2}\right)$, o que será sempre verdadeiro.

Muitas vezes interessa saber a espessura máxima de corte, h_{max}, o qual depende da penetração de usinagem, a_e, como segue:

Se $a_e \geq {}^{D_c}/_{2}$ ou fresamento frontal central $\quad h_{max} = f_z \quad (1.8)$

Se $a_e < {}^{D_c}/_{2}$ $\quad h_{max} = f_z sen(\varphi_1) \quad (1.9)$

A espessura média de usinagem, h_m, para operações tangenciais, pode ser dada, aproximadamente, por:

$$h_m \cong \frac{1}{(\varphi_1 - \varphi_0)} \int_{\varphi_0}^{\varphi_1} f_z sen\varphi d\varphi \quad (1.10)$$

O que resulta em:

$$h_m = f_z \frac{(cos\varphi_0 - cos\varphi_1)}{\varphi_1 - \varphi_0} \quad (1.11)$$

Nas operações frontais, quando o ângulo de posição, χ, é diferente de 90° esse valor pode ser alterado, conforme esquematizado na Figura 1.10.

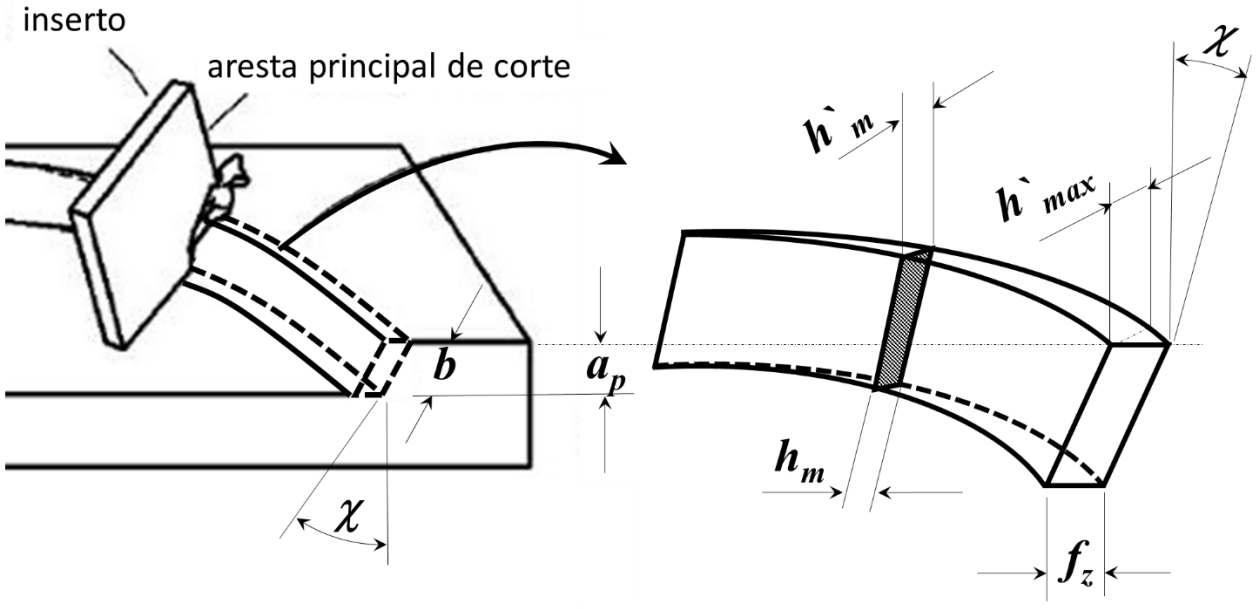


Figura 1.10 – Esquema de fresamento frontal quando o ângulo de posição é diferente de 90°.

Neste caso particular, os valores das espessuras média e máxima do cavaco, medidas no plano de trabalho são chamadas de $h`_m$ e $h`_{max}$, respectivamente, como na Figura 1.10, e podem ser calculadas usando as seguintes equações:

$$h_m = f_z \frac{(cos\varphi_0 - cos\varphi_1)}{\varphi_1 - \varphi_0} sen\chi \quad (1.12)$$

Se $a_e \geq {D_c}/{2}$ ou fresamento frontal central $\quad h_{max} = f_z . sen\chi \quad (1.13)$

Se $a_e < {D_c}/{2}$ $\quad h_{max} = f_z . sen(\varphi_1) . sen\chi \quad (1.14)$

A área da secção transversal do cavaco também varia ao longo da interação da aresta com a peça. Os valores médios podem ser calculados como segue:

$$S_m = h_m . b = h_m . \frac{a_p}{sen\chi} \quad \text{para fresamento frontal} \quad (1.15)$$

$$S_m = h_m . a_p \quad \text{para fresamento tangencial} \quad (1.16)$$

onde b é a largura de corte, medida como mostrado na Figura 1.10, a qual pode ser calculada em função da profundidade de usinagem. Os valores máximos podem ser calculados substituindo-se a espessura média pela máxima, usando as Equações (1.15) e (1.16).

A quantidade de material removido na forma de cavaco por uma fresa, em minutos, tem seu volume dado por:

$$Q = a_p . a_e . v_f \quad (1.15)$$

Multiplicando-se a secção transversal média do cavaco, S_m (mm^2), pela velocidade de corte, v_c (m/min), também se obtém o volume do cavaco removido, conforme:

$$Q = 1000 . v_c . S_m \quad (1.16)$$

Substituindo-se Q pela Equação (1.15) vem:

$$a_p . a_e . v_f = 1000 . v_c . S_m \quad (1.17)$$

de onde:

$$S_m = (a_p . a_e . v_f)/1000 . v_c$$

ou sabendo-se que $v_f = f_z . Z . n$ e $v_c = \pi . D . n/1000$, tem-se :

$$S_m = (a_p . a_e . f_z . Z . n)/[1000 . (\pi . D . n/1000)]$$

$$S_m = (a_p . a_e . f_z . Z)/\pi . D \quad (1.18)$$

2. FORÇAS E POTENCIAS DE CORTE

A componente da força de usinagem na direção de corte, F_c, normal à seção do cavaco é dada por:

$$F_c = k_s . b . h_m^{(1-mc)} \qquad (2.1)$$

onde b= Largura de corte.

k_s = Pressão específica de corte para fresamento.

$(1\text{-}mc)$ = Expoente da equação de Kienzle.

Os valores de k_s e de $(1\text{-}mc)$ podem ser obtidos por meio de tabelas compiladas em experimentação medindo as forças de corte em operações de fresamento de diversos materiais em combinações com ferramentas de materiais e geometria específica.

A força de usinagem no fresamento tem característica tridimensional na maioria das operações, como mostrado na Figura 2.2.

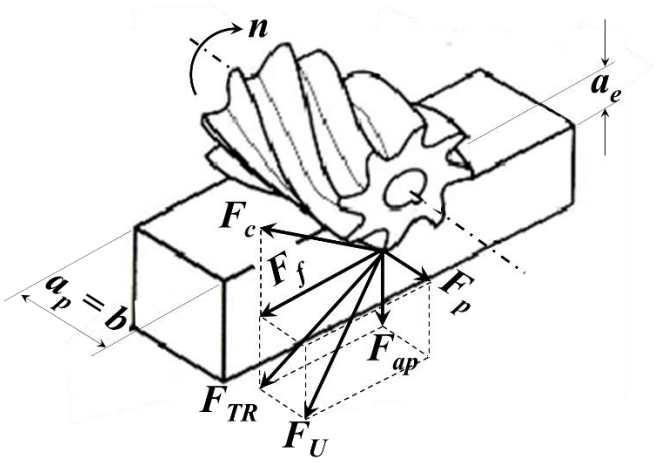


Figura 2.2 – Aspecto mais geral da força de usinagem em fresamento.

Como pode-se observar a força de corte, F_c, ou força principal de corte, é a projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, na direção de corte, dada pela velocidade de corte. Pelo fato da força de usinagem ter direção variável durante a interação da aresta com a peça a cada passada, todas as suas componentes, incluindo a força de avanço, F_f, também sofre, variações ao longo do tempo. Assim, a força de avanço, não é normalmente calculada, como se faz com a de corte, pois em dado momento da rotação da aresta, F_c estará na direção de avanço e pode-se assumir que terá, pelo menos este valor neste ponto. Por exemplo, no contato inicial da aresta no fresamento tangencial

discordante, ou no fresamento frontal quando $a_e > D_c$. Nos casos de fresamento frontal com $a_e < D_c$, a força de avanço poderá ser menor do que F_c e seu valor dependerá da geometria de engajamento do cortador com a peça.

2.2 - Calculo da potência de corte em base ao volume de cavaco removido

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

$$V = b.a_e.a_d.n.Z = b.a_e.v_f \qquad [mm^3/min] \qquad (2.2)$$

Chamando-se V' o volume de cavaco removido (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, tem-se:

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

onde P_c é a potência de corte necessária para remover um volume V de cavaco por minuto. As Tabelas no Apêndice II apresentam os valores de V' segundo várias fontes.

A potência a ser necessária para o motor de acionamento da fresadora será:

$$P_m = \frac{P_c}{\eta_t}$$

onde η_t é o rendimento mecânico total da transmissão, cujos valores em função da potência do motor de acionamento são mostrados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Rendimento mecânico total de transmissão 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

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 normalmente empregados, segundo recomendações das próprias referências. Por isso, quando se tratar de operações de usinagem que utilizem avanços por dente muito diferentes daqueles referenciados nas tabelas, calcular a potência do corte pelo método da pressão especifica é o mais seguro.

3. SELEÇÃO DA VELOCIDADE DE CORTE E DO AVANÇO

Uma vez 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, principalmente aquelas apresentadas por fabricantes de ferramentas de corte, proporcionam uma orientação quanto aos valores a serem adotados, servindo de base para um eficiente planejamento da operação de fresamento. Obviamente, os valores finais a serem adotados deverão ser verificados na prática, avaliando-se o comportamento do par ferramenta-peça na usinagem. As Tabelas 3.1 e 3.2 apresentam valores normalmente indicados para uma primeira aproximação das condições de usinagem, e não devem ser entendidos como valores definitivos. Devido ao constante aperfeiçoamento e evolução das

máquinas-ferramentas e usinabilidade dos diversos materiais da peça, os valores recomendados nestas tabelas são conservadores.

Tabela 3.1 – Valores recomendados de avanço por dente f_z para fresamento

MATERIAL	Resistência σt [kg*/mm²] ou dureza HB	Tangenciais		Tang. Frontais		Disco		Topo c/ haste		Forma		Frontais (com insertos)	
		AR	MD	AR	MD	AR	MD	AR	MD	AR	MD	AR	MD
Aço Carbono	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	0,10 – 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	0,10 – 0,25
	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	0,08 – 0,20
	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 – 0,20
Aço Liga	–	0,08	0,15	0,10	0,22	0,05	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02	0,10 – 0,12	0,10 – 0,20
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	0,10 – 0,30
FoFo	< 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	0,10 – 0,35
Cinzento	> 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	0,10 – 0,30
Ferro nodular	–	0,20	0,20	0,20	0,22	0,07	0,07	0,05	0,05	0,05	0,04	– –	– –
FoFo 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	0,15 – 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	0,10 – 0,25
Latão		0,20	0,25	0,20	0,30	0,07	0,07	0,05	0,05	0,04	0,04	0,10 – 0,25	0,10 – 0,30
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	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	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 3.2 – Valores recomendados de velocidade de corte v_c para fresamento

MATERIAL	Resistência σ_t [kg*/mm²] ou dureza HB	Fresas de topo (para facear)		Demais tipos de fresas	
		AR	MD	AR	MD
Aço Carbono	< 50	21 - 30	90 - 200	17 - 24	100 - 150
	50 - 70	20 - 28	80 - 160	16 - 24	80 - 120
	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

CÓDIGO:

AR - AÇO RÁPIDO

MD - METAL DURO

OBSERVAÇÃO:

- Quando existir crosta de fundição e laminação ou outros defeitos superficiais a velocidade de corte deve ser reduzida.

Bibliografia

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 enginerrs 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 engeneering 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 Engeniero 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 Leistungsbedarfbei der apanendem Formung: Das Industrieblat, Stutagart , 87-94, 1970

15 – SCHWERD, f. : Spanende Werknengmaschinen; spinger – Verlag, 1958

APÊNDICE I – VALORES RECOMENDADOS PARA A PRESSÃO ESPECIFICA DE CORTE, k_s, PARA OPERAÇÕES DE FRESAMENTO.

Materiais	HB	k_s (N/mm^2)	*(1-mc)*
Aço sem liga 0,10-0,25%C	125	1500	0,75
Aço sem liga 0,25-0,55%C	150	1600	0,75
Aço sem liga 0,55-0,80%C	170	1700	0,75
Aço sem liga mais de 0,80%C	210	1800	0,75
	300	2000	0,75
Aço baixa liga não-temperados	175	1700	0,75
Aço baixa liga Temperados	275	2000	0,75
	350	2300	0,75
Aço alta liga Recozidos	200	1500	0,75
Aços-ferramenta endurecidos	200	2150	0,75
	300	2900	0,75
	380	3100	0,75
Ferros Fundidos sem liga	150	1400	0,75
Ferros Fundidos baixa liga (elementos de liga $\leq$ 5%)	200	1600	0,75
Ferros Fundidos alta liga (elementos de liga >5%)	200	1950	0,75
Aços inoxidáveis não-endurecidos	200	1800	0,79
Aços inoxidáveis ferr./mart.	330	2800	0,79
Endurecidos	330	2300	0,79
Aços inoxidáveis austeniticos não-endurecidos	200	2000	0,79
Aços inoxidáveis endurecidos	330	2800	0,79
Autênticos-Ferríticos não soldáveis C $\geq$ 0,05%C	230	2000	0,79
(Duplex) Soldáveis <0,05%C	260	2400	0,79
Aços inoxidáveis-Fundidos Não-endurecidos	200	1700	0,75
	330	2500	0,75
Ferr./mart. endurecidos	330	2100	0,75
Austeniticos não endurecidos	200	1800	0,75
Austeniticos endurecidos	330	2500	0,75
Autênticos-Ferríticos não soldáveis $\geq$ 0,05%C	230	1800	0,75
(Duplex) Soldáveis <0,05%C	260	2200	0,75
Super ligas resistente ao calor a base de ferro recozidas ou	200	2400	0,75
tratadas em solução e envelhecidas	280	2500	0,75
Super ligas resistente ao calor a base de níquel recosidas ou	250	2650	0,75
tratadas em solução e envelhecidas	350	2900	0,75
Super ligas resistente ao calor fundidas e/ou envelhecidas	320	3000	0,75
Super ligas resistente ao calor a base de cobalto recosidas ou tratadas em solução	200	2700	0,75
Super ligas resistente ao calor a base de cobalto tratadas em soluções e envelhecidas	300	3000	0,75
Super ligas resistente ao calor a base de cobalto fundidas ou fundidas e envelhecidas	320	3100	0,75
Titânio comercial puro (99,5% Ti)		3000	0,77
Ligas e Titânio α, ligas α e $\alpha+\beta$ recozidas	400	1400	0,77
Ligas de titânio $\alpha+\beta$ em condições envelhecidas,	950	1400	0,77
Ligas de titânio ligas β recosidas e envelhecidas	1050	1400	0,77
Ferros fundidos maleáveis ferríticos (cavacos curtos)	130	800	0,72
Ferros fundidos maleáveis perlíticos (cavacos longos)	250	900	0,72
Ferros fundidos cinzento baixa resistência a tração	180	900	0,72
Ferros fundidos cinzento alta resistência a tração	245	1100	0,72
Ferros fundidos ferríticos	160	900	0,72

Ferros fundidos nodulares e perlíticos	250	1350	0,72
Aços temperados e revenidos	59HRC	4200	0,75
Ferros fundidos e coquilhados fundidos ou fundidos e envelhecidos	400	2200	0,72
Ligas de alumínio forjadas ou forjadas e tratadas a frio, não envelhecidas	60	400	0,75
Ligas de alumínio forjadas ou forjadas e envelhecidas	100	650	0,75
Ligas de alumínio fundidas, não envelhecidas	75	600	0,75
Ligas de alumínio fundidas ou fundidas e envelhecidas	90	700	0,75
Alumínio Al >99%	30	350	0,75
Ligas de alumínio fundidas,13-15% Si	130	700	0,75
Ligas de alumínio fundidas,16-22% Si	130	700	0,75
Ligas de cobre com mais de 1%Pb	110	550	075
Latão bronze, com chumbo, $\leq$1%Pb	90	550	0,75
Bronze, e cobre sem chumbo	100	1350	0,75

APÊNDICE II – VALORES RECOMENDADOS PARA O VOLUME DE MATERIAL REMOVIDO POR MINUTOS POR POTÊNCIA EM FRESAMENTO

OL ENGINEERS HANDBOOK	V' $\left\lvert\frac{10^3.mm^3}{HP.min}\right\rvert$	KEARNEY & TRECKER	V' $\left\lvert\frac{10^3.mm^3}{HP.min}\right\rvert$	CINCINNATI MILLING	V' $\left\lvert\frac{10^3.mm^3}{HP.min}\right\rvert$
nio e Magnésio	41,0-65,5	Alumínio	37,4	Alumínio fundido	32,8
e e latão, mole	27,9-41,0	Latão, mole	32,8	Magnésio	41,0
e e latão, médio	16,4-22,9	Bronze, duro	22,9	Latão	29,5
e e latão, duro	9,8-16,4	Bronze, muito duro	10,6	Ferro fundido	20,5
fundido, mole	24,6	FoFo, mole	22,1	Ferro Fundido mal.	20,5
fundido, médio	13,1-16,4	FoFo, duro	13,9	Aço 100 HB	13,1
fundido, duro	9,8-13,1	FoFo, coquilhado	10,6	Aço 150 HB	11,5
mal. e Aço Tref. SAE 6140	14,7	FoFo, maleável	14,7	Aço 200 HB	0,6
ref. SAE 1112, 1120 e 1315	16,4	Aço, mole	13,9	Aço 250 HB	2,8
dos e aços liga SAE 3120, 2320 e 2345, c/150-300HB	10,3-14,3	Aço, médio	10,6	Aço 300 HB	9,0
liga 300-400 HB	8,2	Aço, duro	7,9	Aço 400 HB	8,2
nox. de corte livre AISI 416	18,0				
nox. austenítico de corte AISI 303	13,6				
nox. austenítico, AISI 304	11,8				
monel	9,0				
, recozido	13,8				
erramenta	8,3				
l	8,6				
lo	12,3				