



SEM 0534 Processos de Fabricação Mecânica

Professor:

Renato Goulart Jasinevicius

Processos de Fabricação Mecânica



Aula 5 Forças de corte

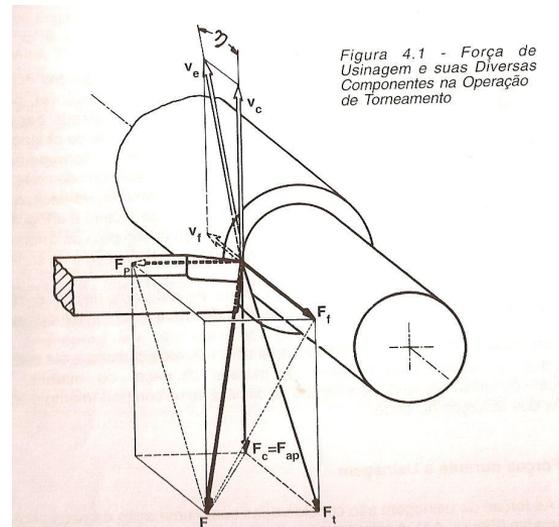
FORÇAS E POTÊNCIAS DE CORTE

- **Força de usinagem F_u** – é a força total que atua sobre uma cunha cortante durante a usinagem

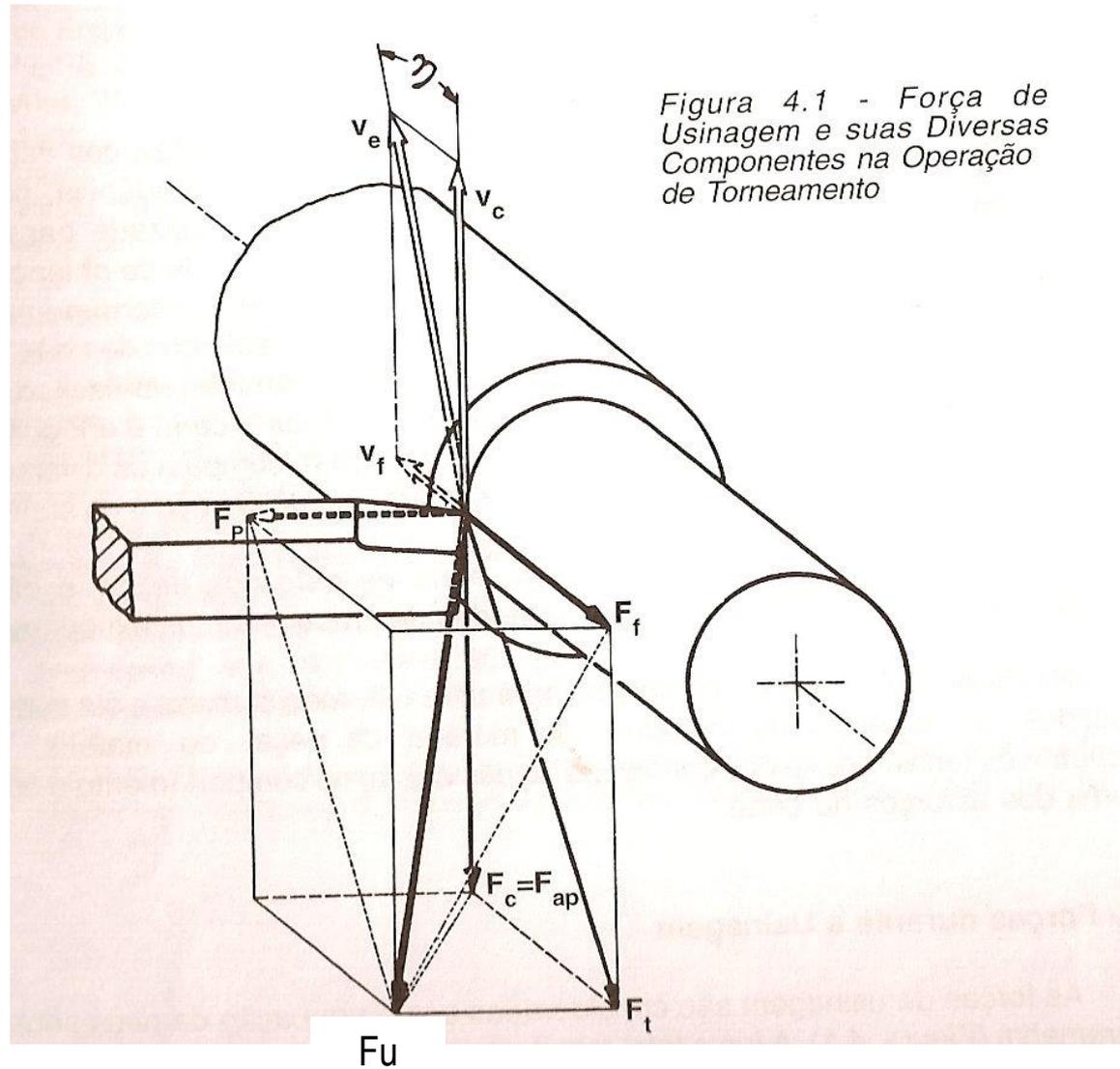
Componentes da força de usinagem estão contidas :

No plano de trabalho;

No plano efetivo de referência.



FORÇAS E POTÊNCIAS DE CORTE



FORÇAS E POTÊNCIAS DE CORTE

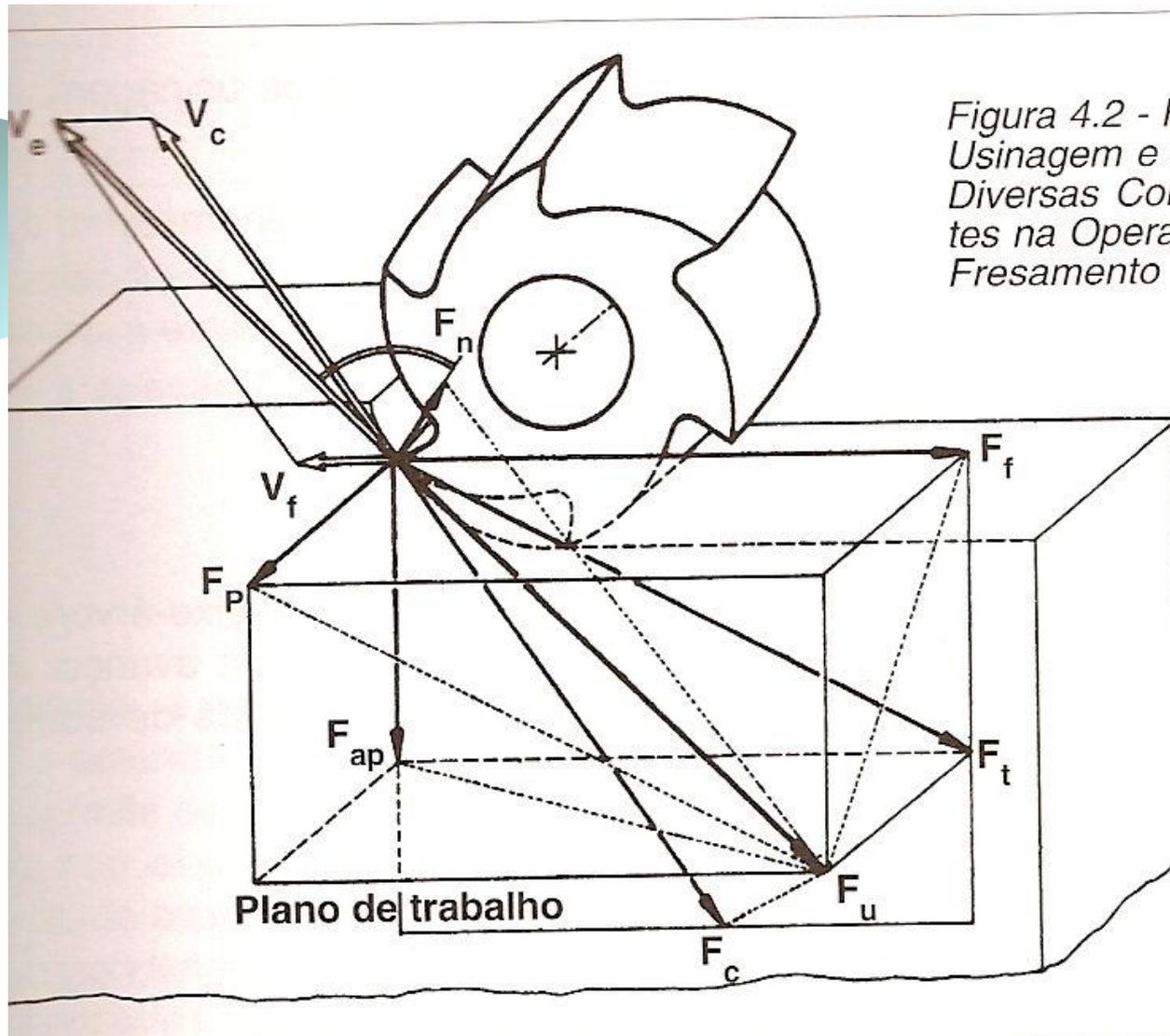
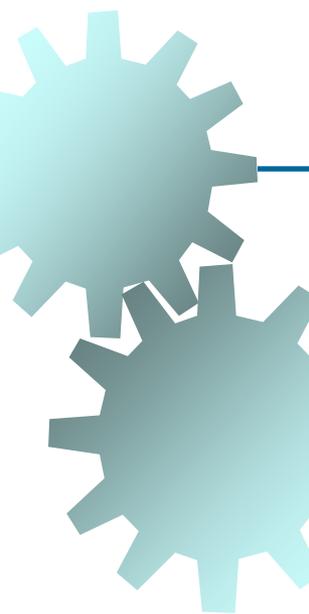


Figura 4.2 - Força de Usinagem e suas Diversas Componentes na Operação de Fresamento



Forças de Usinagem

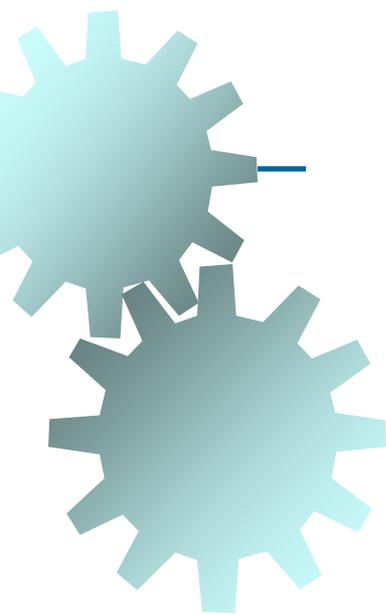
A força de usinagem (F_u) é decomposta em uma componente que está no plano de trabalho:

Força ativa (F_t): *é a projeção da força de usinagem F_u sobre o plano de trabalho.*

E

em uma componente perpendicular ao plano de trabalho chamada de Força passiva ou força de profundidade:

Força passiva (F_p): *é a projeção da força de usinagem F_u sobre a direção perpendicular a direção de avanço, situada no plano de trabalho.*



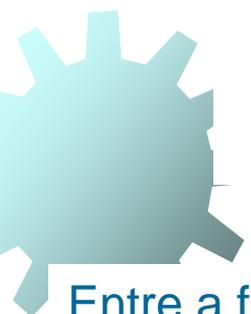
Forças de Usinagem

As componentes da Força Ativa contribuem para a potência de usinagem, pois estão no plano de trabalho:

Força de corte (F_c): *é a projeção da força de usinagem F_u sobre a direção do corte (dada pela velocidade de corte).*

Força de avanço (F_f): *é a projeção da força de usinagem F_u sobre a direção do avanço.*

Força de apoio (F_{ap}): *é a projeção da força de usinagem F_u sobre a direção perpendicular a direção de avanço, situada no plano de trabalho.*



Forças de Usinagem

Entre a força ativa F_t , a força de apoio F_{ap} e a força de avanço F_f vale a relação

$$F_t = \sqrt{F_{ap}^2 + F_f^2} \quad (1)$$

Logo,

$$F_{ap} = \sqrt{F_t^2 - F_f^2} \quad (2)$$



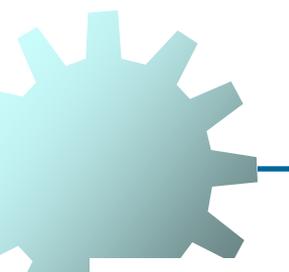
Forças de Usinagem

Para ângulo φ^* da direção do avanço = 90° $F_{ap} = F_c$

$$F_t = \sqrt{F_c^2 + F_f^2} \quad (3)$$

$$F_c = \sqrt{F_t^2 - F_f^2} \quad (4)$$

* ÂNGULO ENTRE A DIREÇÃO DE CORTE E DIREÇÃO DE AVANÇO



Forças de Usinagem

Força efetiva de corte F_e : *é a projeção da força de usinagem F_u sobre a direção efetiva de corte.*

Força Passiva ou de profundidade (F_p): *é a projeção da força de usinagem F_u sobre a direção efetiva de corte.
(não contribui para Potência)*

$$F_p = \sqrt{F_f^2 - F_t^2} \quad (5)$$

Substituindo F_t pelo seu valor dado na eq. 1 temos

$$F_p = \sqrt{F_u^2 - (F_{ap}^2 + F_f^2)} \quad (6)$$

Somente nos casos de $\varphi = 90^\circ$ (p.e., torneamento) vale a relação



Forças de Usinagem

Somente nos casos de $\varphi = 90^\circ$ (p.e., torneamento) vale a relação

$$F_p = \sqrt{F_u^2 - (F_c^2 + F_f^2)} \quad (7)$$

Força de compressão F_n : *é a projeção da força de usinagem F_u sobre uma direção perpendicular à superfície principal de corte.*

* *Importância do estudo do comportamento das forças passivas está relacionada a resposta elástica do material da peça e da ferramenta durante o corte e isso pode implicar na dificuldade de obtenção de tolerâncias de forma e dimensão apertadas*



Forças de Usinagem

A força de usinagem depende de diversos Fatores:

- **Material da peça**
- **Área da seção de corte**
- **Espessura de corte h**
- **Geometria da ferramenta e ângulo de posição**
- **Estado de afiação da ferramenta**
- **Material da ferramenta**
- **Lubrificação**
- **Velocidade de corte**

Influência da Geometria nas Forças de corte

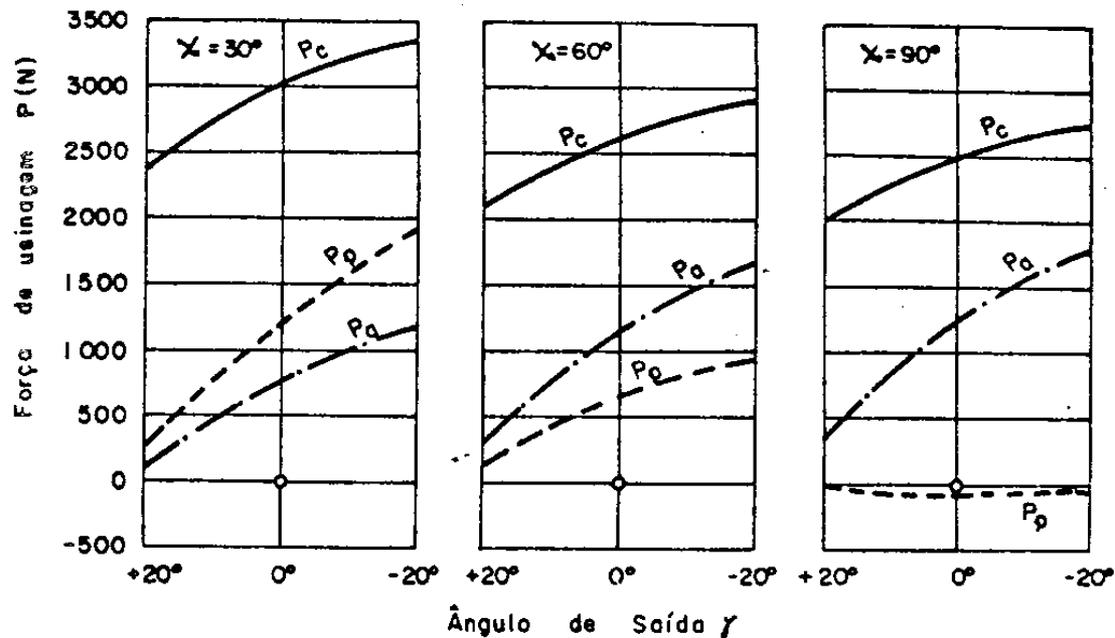


Fig. 7 - Variação das componentes da força de usinagem em função do ângulo de posição χ e de saída γ da ferramenta, segundo Vieregge [1]. ($\lambda = 0^\circ$, $\epsilon = 80^\circ$, $a.p = 1 \text{ mm}^2$, aço 50 NiCr13).



Potência de Corte

Potência de Corte P_c é o produto da força de corte com a velocidade de corte v (Figura)

Para F_c e v em mm/min tem-se

$$P_c = \frac{F_c \cdot V_c}{60 \cdot 75} \quad (\text{CV- cavalo vapor}) \quad (8)$$

Potência de avanço P_a é o produto da força de avanço com a velocidade de avanço v_a (Figura)

$$P_a = \frac{F_a \cdot V_f}{1000 \cdot 60 \cdot 75} \quad (\text{CV}) \quad (9)$$



Potência de Corte

Potência efetiva de corte P_e : é o produto da força efetiva de corte F_e pela velocidade efetiva de corte v_e (Figura). É portanto igual à soma das potências de corte e avanço

$$P_e = P_c + P_a \quad (10)$$

Para F_e em kgf* e v_e em m/min tem-se

$$P_e = \frac{F_e \cdot v_e}{60 \cdot 75} \quad (\text{CV}) \quad (11)$$

Potência de Corte

Relação entre a potência de corte e de avanço (de 8 e 9)

$$\frac{P_c}{P_a} = 1000 \cdot \frac{F_c \cdot v}{F_a \cdot va} \quad (12)$$

Torneamento: *Para operação de torneamento resulta :*

$$\frac{P_c}{P_a} = \frac{F_c}{F_a} \cdot \frac{\pi \cdot d \cdot n}{f \cdot n} \quad (13)$$

Onde:

d = diâmetro da peça, em mm

f = avanço, em mm/volta

n = rotação, em r.p.m.

Potência de Corte

Aproximadamente tem-se no torneamento $F_c \cong 4.5 F_a$ e tomando-se por exemplo $d = 50 \text{ mm}$ e $f = 1 \text{ mm/volta}$ resulta

$$\frac{P_c}{P_a} \cong 4,5 \cdot \frac{\pi \cdot 50}{1} \cong 770 \quad (14)$$

Observação:

Forças são calculadas em daN

1 CV ~ 0,746 kw

Potência de Corte

Fresamento: Na operação de fresamento com fresas cilíndricas tangenciais temos aproximadamente as relações médias

$$F_a \cong 1.2 F_c$$

$$v_a \cong 5 v$$

Substituindo em (12) tem-se

$$\frac{P_c}{P_a} \cong 1000 \cdot \frac{1}{1,2} \cdot \frac{1}{5} \cong 170 \quad (15)$$

Potência de Corte

Potência fornecida pelo motor

$$P_m = \frac{P_c}{\eta} \quad (16)$$

onde η é o rendimento da máquina operatriz, igual a 60 a 80%.

- *No caso de haver um motor para cada movimento, o cálculo parcelado das potências fornecidas pelos motores pode ser realizado com um rendimento maior.*



CÁLCULO DA PRESSÃO ESPECÍFICA DE CORTE

Existem diversos métodos para estimar a pressão específica de corte

Taylor:

$$k_s = \frac{88}{f^{0.25} \cdot ap^{0.07}} \quad \text{para FoFo cinzento}$$

$$k_s = \frac{138}{f^{0.25} \cdot ap^{0.07}} \quad \text{para FoFo branco}$$

$$k_s = \frac{200}{f^{0.07}} \quad \text{para aço doce}$$

CÁLCULO DA PRESSÃO ESPECÍFICA DE CORTE

ASME

$$k_s = \frac{C_a}{f^n}$$

onde

C_a = constante do material

f = avanço

$n = 0.2$ para aço e 0.3 para ferro fundido

Tabela V.3 p. 176-177 (aço rápido-18% W, 4% Cr, 1% V) . Para $\chi = 60^\circ$ $\gamma = 80^\circ$ e $\alpha = 60^\circ$.

CÁLCULO DA PRESSÃO ESPECÍFICA DE CORTE

AWF (*Ausschuss für Wirtschaftliche Fertigung*)
Associação de Produção econômica - Alemanha

$$k_s = \frac{C_w}{f^{0.477}}$$

onde

C_w = constante do material

f = avanço

Tabela V.3 para $\chi = 45^\circ$

CÁLCULO DA PRESSÃO ESPECÍFICA DE CORTE

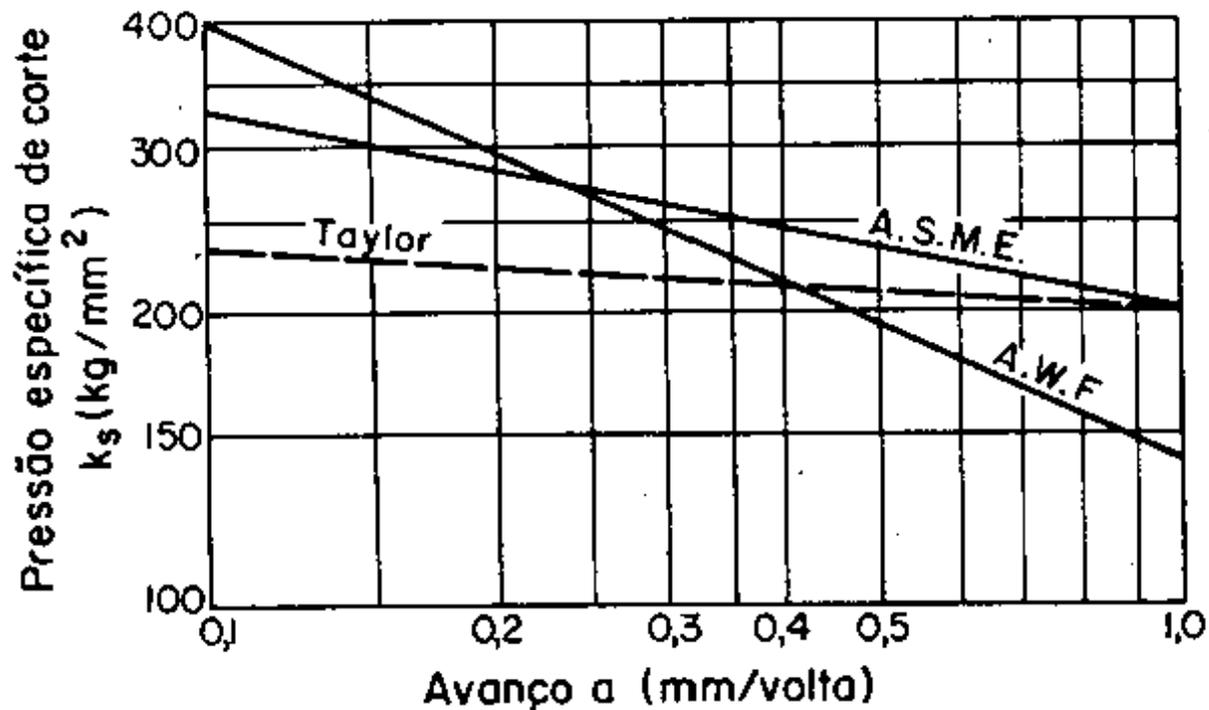


FIG. 5.26 — Representação em escala dilogarítmica de k_s em função do avanço, segundo diferentes pesquisadores.

CÁLCULO DA PRESSÃO ESPECÍFICA DE CORTE

KORNENBERG:

$$k_s = \frac{C}{f^{ps} \cdot ap^{qs}} = \frac{C_{ks} \cdot \left(\frac{G}{5}\right)^{gs}}{s^{fs}}$$

G = ap/f = índice de esbeltez

s= área da seção de corte

C, Cks, ps, qs, gs e fs são constantes que dependem do material da peça e da ferramenta

Gráficos 5.27 (p.180), 5.28(p.181), 5.29 (p.181) e 5.30 (p.182)

FERRARESI - fornecem os valores de Cks, F1 e F2 para aços e ferros fundidos

CÁLCULO DA PRESSÃO ESPECÍFICA DE CORTE

KORNENBERG

Gráficos 5.27 (p.180), 5.28(p.181), 5.29 (p.181) e 5.30 (p.182) FERRARESI - fornecem os valores de Cks, F1 e F2

SEGUNDO AS SEGUINTE FÓRMULAS:

AÇO

FoFo

$$F_1 = s^{(1-fs)} \quad F_1 = s^{(0.803)} \quad F_1 = s^{0.863}$$

$$F_2 = \left(\frac{G}{5}\right)^{gs} \quad F_2 = \left(\frac{G}{5}\right)^{0.160} \quad F_2 = \left(\frac{G}{5}\right)^{0.120}$$

CÁLCULO DA PRESSÃO ESPECÍFICA DE CORTE

180

FUNDAMENTOS DA USINAGEM DOS METAIS

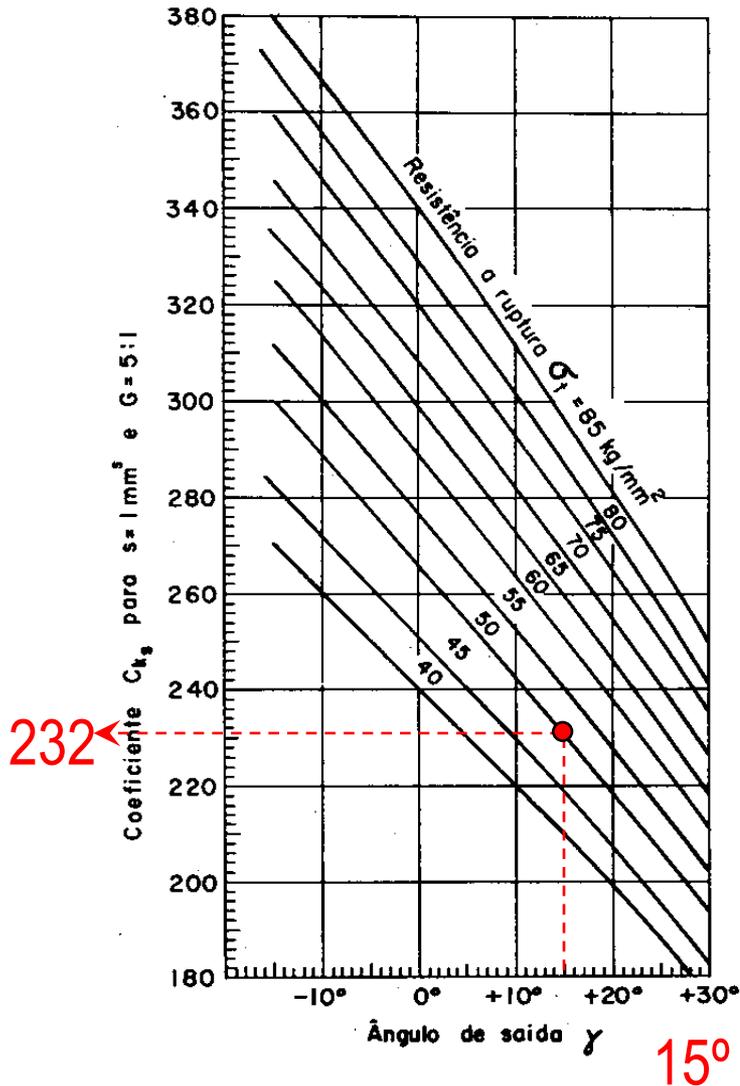


FIG. 5.27 — Coeficiente C_k da fórmula de KRONENBERG em função do ângulo de saída para aços [15]. Secção de corte 1 mm^2 ; índice de esbeltez $G = 5$.

CÁLCULO DA PRESSÃO ESPECÍFICA DE CORTE

FÔRÇAS E POTÊNCIAS DE USINAGEM

181

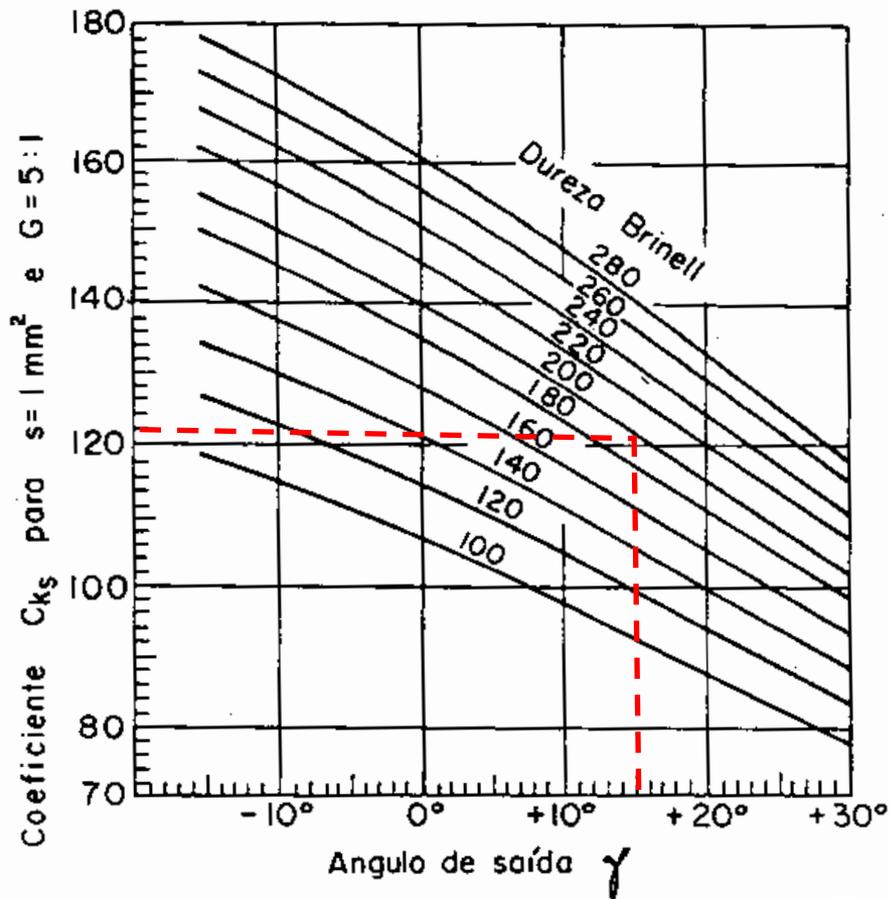
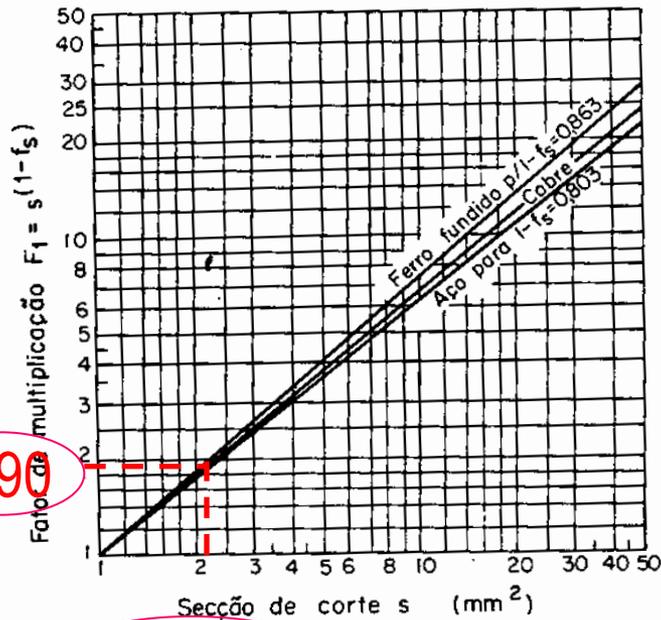


FIG. 5.28 — Coeficiente C_{ks} da fórmula de KRONENBERG em função do ângulo de saída para ferro fundido [15]. Secção de corte 1mm^2 ; índice de esbeltez $G = 5$.

CÁLCULO DA PRESSÃO ESPECÍFICA DE CORTE



2,24

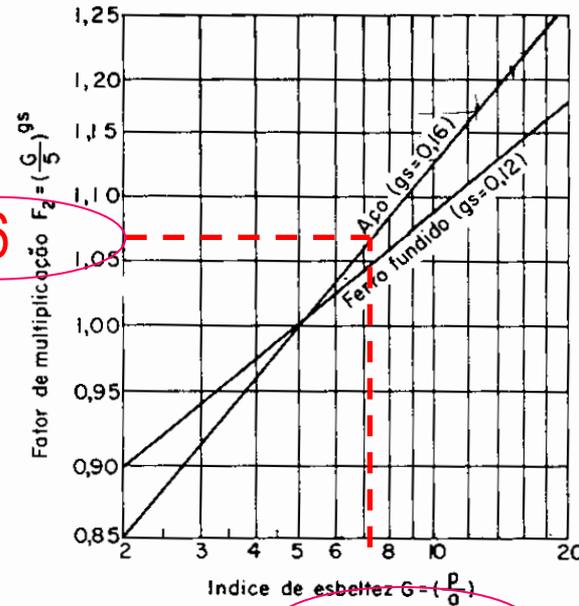
Fator de correção
F1

p.181 Ferraresi

FIG. 5.29 — Fator de multiplicação F_1 para determinação de P_c , para secção de corte diferente de 1mm^2 , segundo KRONENBERG [15].

Fator de correção
F2

p.182 Ferraresi



1,06

7,14

FIG. 5.30 — Fator de multiplicação F_2 para a determinação de P_c , para diferentes relações p/a , segundo KRONENBERG.

CÁLCULO DA PRESSÃO ESPECÍFICA DE CORTE



Kienzle

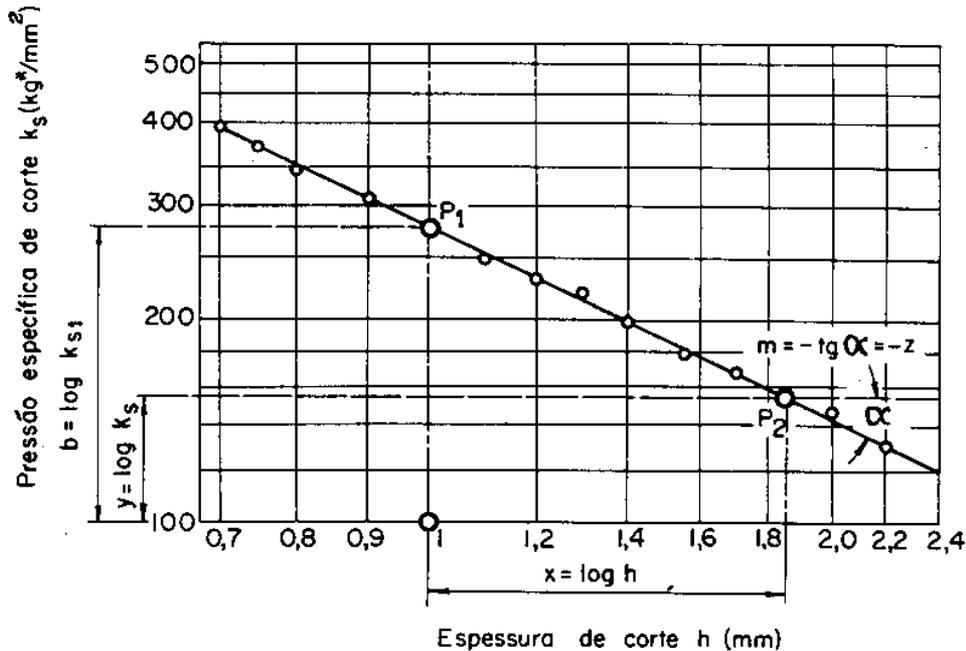
$$K_s = \frac{K_{s1}}{h^z}$$

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

A Tabela V4 apresenta os valores de k_{s1} e $1-z$ dos materiais ensaiados por Kienzle.

CÁLCULO DA PRESSÃO ESPECÍFICA DE CORTE

Kienzle



$$\text{Log } K_s = \text{log } K_{s1} - z \text{ log } h$$

Logo:

$$K_s = \frac{K_{s1}}{h^z}$$

FIG. 5.33 — Representação em papel dilogarítmico da pressão específica de corte k_s em função de h .

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

CÁLCULO DA PRESSÃO ESPECÍFICA DE CORTE

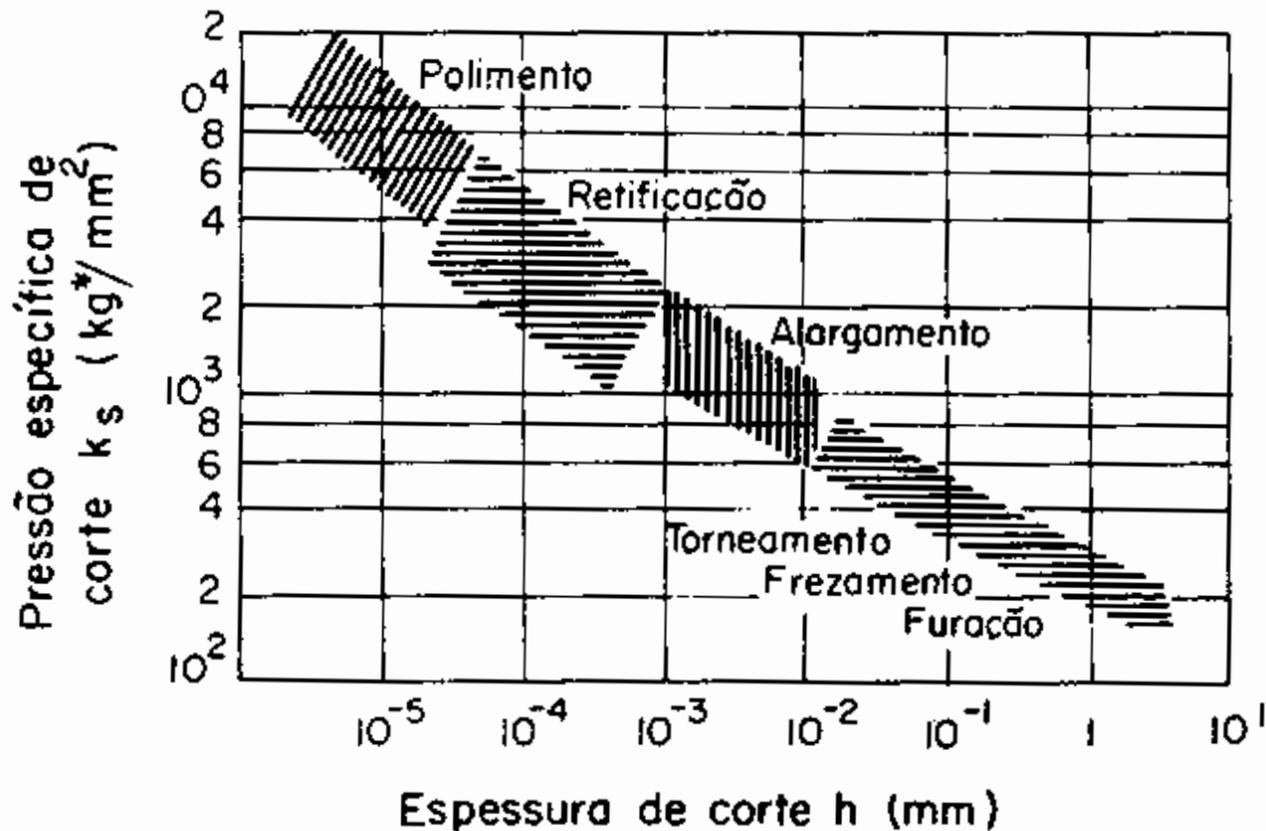


FIG. 5.31 — Variação da pressão específica de corte k_s com a espessura de corte h para diferentes operações de usinagem [3].

CÁLCULO DA PRESSÃO ESPECÍFICA DE CORTE

Kienzle

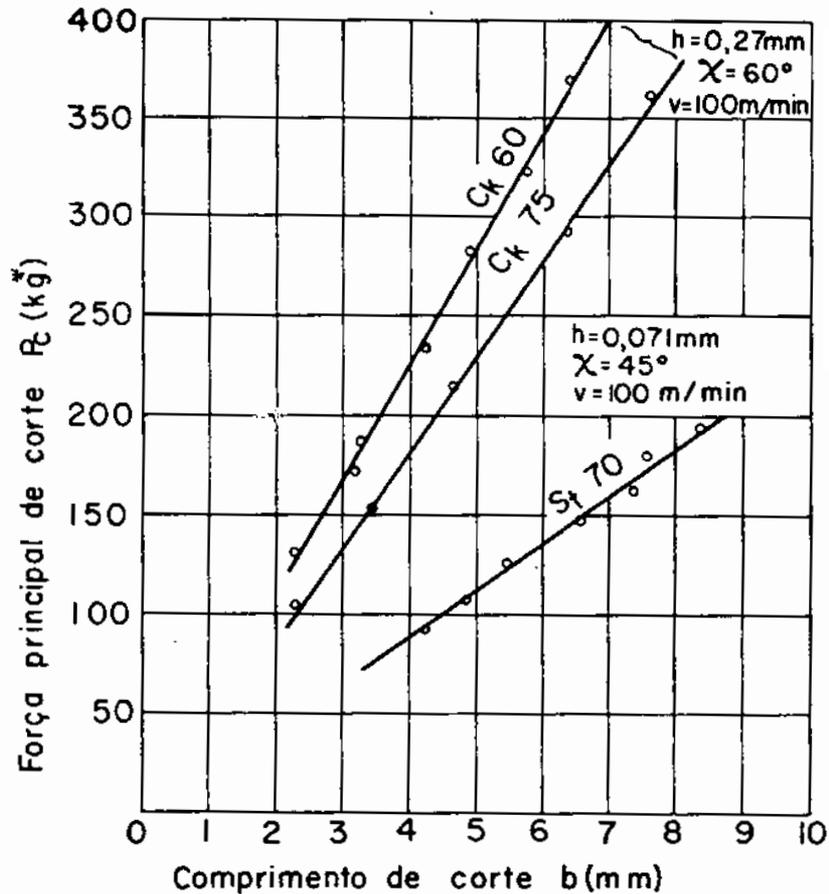


FIG. 5.34 — Fôrça principal de corte P_c em função do comprimento de corte b para diferentes pares ferramenta-peça.

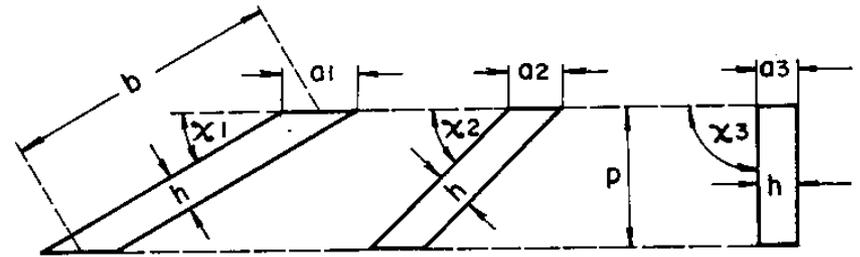


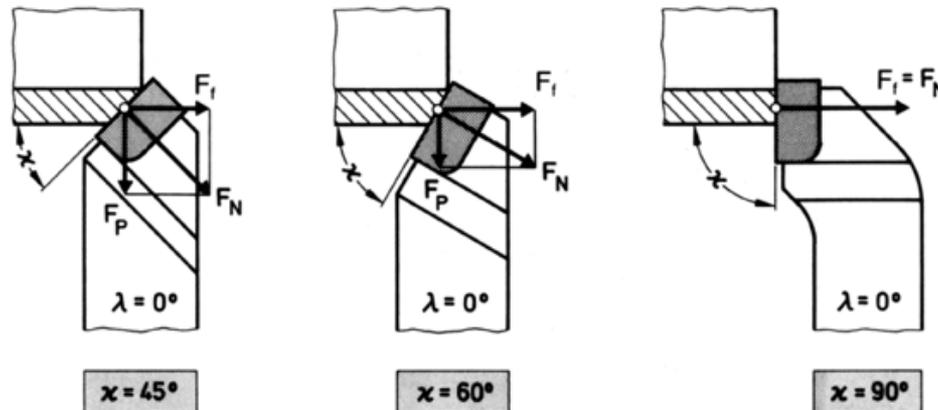
FIG. 5.35 — Seções de corte com iguais espessuras de corte h .

CÁLCULO DA PRESSÃO ESPECÍFICA DE CORTE

Aço 1045: $k_{s1} = 205 \text{ kgf/mm}^2$, $1-z = 0,899$

($a_p = 2,5 \text{ mm}$, $f = 0,5 \text{ mm/rev}$)

Ângulo de posição χ	seno (χ)	h (mm)	h^{1-z}	b (mm)	Área de corte (mm^2)	F_c (N)
10	0,174	0,087	0,111	14,368	1,25	3280
15	0,259	0,129	0,159	9,652	1,25	3150
30	0,500	0,250	0,288	5,000	1,25	2941
45	0,707	0,354	0,393	3,536	1,25	2841
90	1,000	0,500	0,536	2,500	1,25	2748



CÁLCULO DA PRESSÃO ESPECÍFICA DE CORTE

As condições de ensaio foram as seguintes:

- Velocidade de corte variando de 90 a 125 m/min
- Espessura de corte variando de 0.1 a 1.4 mm (extrapolação permissível até $h = 0.05$ mm e $h = 2.5$ mm)
- Ferramenta de MD sem fluido de corte

Geometria da ferramenta	$\alpha(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$	$\gamma(^{\circ})$	$\lambda(^{\circ})$	$\varepsilon(^{\circ})$	$\chi(^{\circ})$	r (mm)
Usinagem de aço	5	79	6	-4	90	45	1
Usinagem de ferro fundido	5	83	2	-4	90	45	1

Ferramenta afiada (para ferramentas com desgaste, no fim da vida, considerar um aumento de k_{s1} até 30%)

CÁLCULO DA PRESSÃO ESPECÍFICA DE CORTE

TABELA V.4

Constante específica de corte k_{s1} e coeficiente 1-z da fórmula de Kienzle para o torneamento de diferentes materiais [17]¹

Material ²	σ_t (kg/mm ²)	1-z	k_{s2}	k_{s1} ³
St 50.11	52	0,74	199	190
St 60.11	62	0,83	211	200
St 70.11	72	0,70	226	215
Ck 45	67	0,86	222	215
Ck 60	77	0,82	213	205
16 MnCr 5	77	0,74	210	200
18 CrNi 6	63	0,70	226	215
42 CrMo 4	73	0,74	250	240
34 CrMo 4	60	0,79	224	215
50 Cr V4	60	0,74	222	215
55 NiCrMo V6 ⁴	94	0,76	174	165
55 NiCrMo V6 ⁵	HB = 352	0,76	192	185
EC Mc 80	59	0,83	229	220
Meehanite A	36	0,74	127	115
Ferro fundido duro	HR _c = 46	0,81	206	185
GG 26	HB = 200	0,74	116	105

- 1 Para as condições de ensaio vide pág. 186.
- 2 Para conversão dos materiais da DIN em materiais especificados pela ASA ou ABNT, consultar o apêndice.
- 3 Valores 5 a 10% mais baixos para o caso de ferramentas com chanfro ($\gamma_c = 6^\circ$ e $\gamma = 12^\circ$), segundo H. Haidt [18]
- 4 Recozido.
- 5 Revenido.



Exemplo Numérico:

Pretende-se tornear um eixo de aço ABNT 1035, de diâmetro 100 mm, profundidade de usinagem $a_p = 4$ mm, avanço $f = 0,56$ mm/rev, rotação $n = 320$ rpm. Para tanto empregou-se uma ferramenta de metal duro P20 de características geométricas $\chi = 60^\circ$, $\alpha = 6^\circ$, $\gamma = 15^\circ$, $\lambda = 0^\circ$, $r = 0,5$ mm.

Calcular a força e a potência de corte segundo:

a) ASME, b) AWF, c) Kronenberg e d) Kienzle

TABELA V.3

Valores das constantes das fórmulas da pressão específica de corte segundo a ASME e AWF (equações 5.24 e 5.25)¹

Material	Dureza Brinell	C _a ²	C _w ³
Aços de construção			
SAE 1020 e 1025 ou St 37.11 e 42.11	127	182	120
SAE X 1020 — EF ⁴	156	190	—
SAE 1035 ou St 50.11	174	201	140
SAE 1045 ou St 60.11	187	215	145
SAE 1050 — LQ	201	224	—
SAE 1060 ou St 70.11	217	245	150
SAE 1095 ou St 85	280	280	160
Aços de corte fácil			
SAE 1112 — LQ, B	130	104	—
SAE 1112 — EF, B	167	125	—
SAE X 1112 — EF	183	125	—
Aços manganês			
SAE X 1315 — LQ	120	108	—
SAE X 1315 — EF	161	105	—
SAE T 1340 — LQ	217	240	—
Aços níquel			
SAE 2315 — N	192	182	—
SAE 2330 — EF	223	202	—
SAE 2340 — N	223	202	—
SAE 2512 — N	—	182	—
Aços cromo-níquel			
SAE 3115 — N	128	132	—
SAE 3115 — EF	163	138	—
SAE 3130 — EF	210	197	—
SAE 3140 — T	285	228	—
SAE 3140 — R	207	178	—
SAE 3240 — R	170	145	—
Aços molibdênio			
SAE 4340 — T	400	310	—
SAE 4340 — R	302	233	—
SAE 4310	415	304	—
SAE 4615 — EF	212	182	—
SAE 4815 — N	187	175	—
SAE 4640 — N	248	197	—
Aços cromo			
SAE 5120 — N	149	155	—
SAE 5135 — R	207	172	—
SAE 52100 — R	187	185	—

TABELA V.3

Valores das constantes das fórmulas da pressão específica de corte segundo a ASME e AWF (equações 5.24 e 5.25) (continuação)

Material	Dureza Brinell	C _a ²	C _w ³
Aços cromo vanádio mang.			
SAE 6115 — N	170	182	—
SAE 6140 — R	187	240	—
Aços liga alemães			
Aço Liga 70/85	—	—	160
Aço Liga 100/140 e inox.	—	—	180
Aço Liga 140/180	—	—	195
Ferro fundido			
Fofo mole	126	60	—
Fofo médio	181	122	—
Fofo duro	241	142	—
Ge 12.91 e 14.91	—	—	64
Ge 18.91 e 26.91	200-250	—	94
Fofo esferoidal	—	127	—
Fofo esferoidal (trat.)	—	114	—
Fofo acicular	263	142	—
Fofo ligado	250-400	—	110
Aço fundido			
Aço fundido mole	—	—	110
Aço fundido médio	—	—	120
Não-ferrosos			
Latão	—	—	54
Cobre	—	—	72
Alumínio puro	—	—	36
Liga magnésio	—	—	20
Liga AL c/ Si	5	—	46
Al fundido	5	—	46
Plásticos			
Borracha dura, Ebonite	—	—	15,5
Bakelite, Pertinax	—	—	16,2

1 Para a equivalência de materiais consultar o apêndice.

2 Ferramenta de aço rápido (18% W, 4% Cr, 1% V) com ângulos (segundo a ASA B 5.22 — 1950): *back rake* 8°, *relief* 6°, *side rake* 14°, *end cutting-edge angle* 6°, *side-cutting-edge angle* 30°, *nose radius* ¼".

3 Ferramenta com ângulo de posição $\alpha = 45^\circ$.

4 EF = estirado a frio, LQ = laminado a quente, B = produzido em forno Bessemer, N = normalizado, R = recozido.

5 Tensão de ruptura 30 a 42 kg/mm².