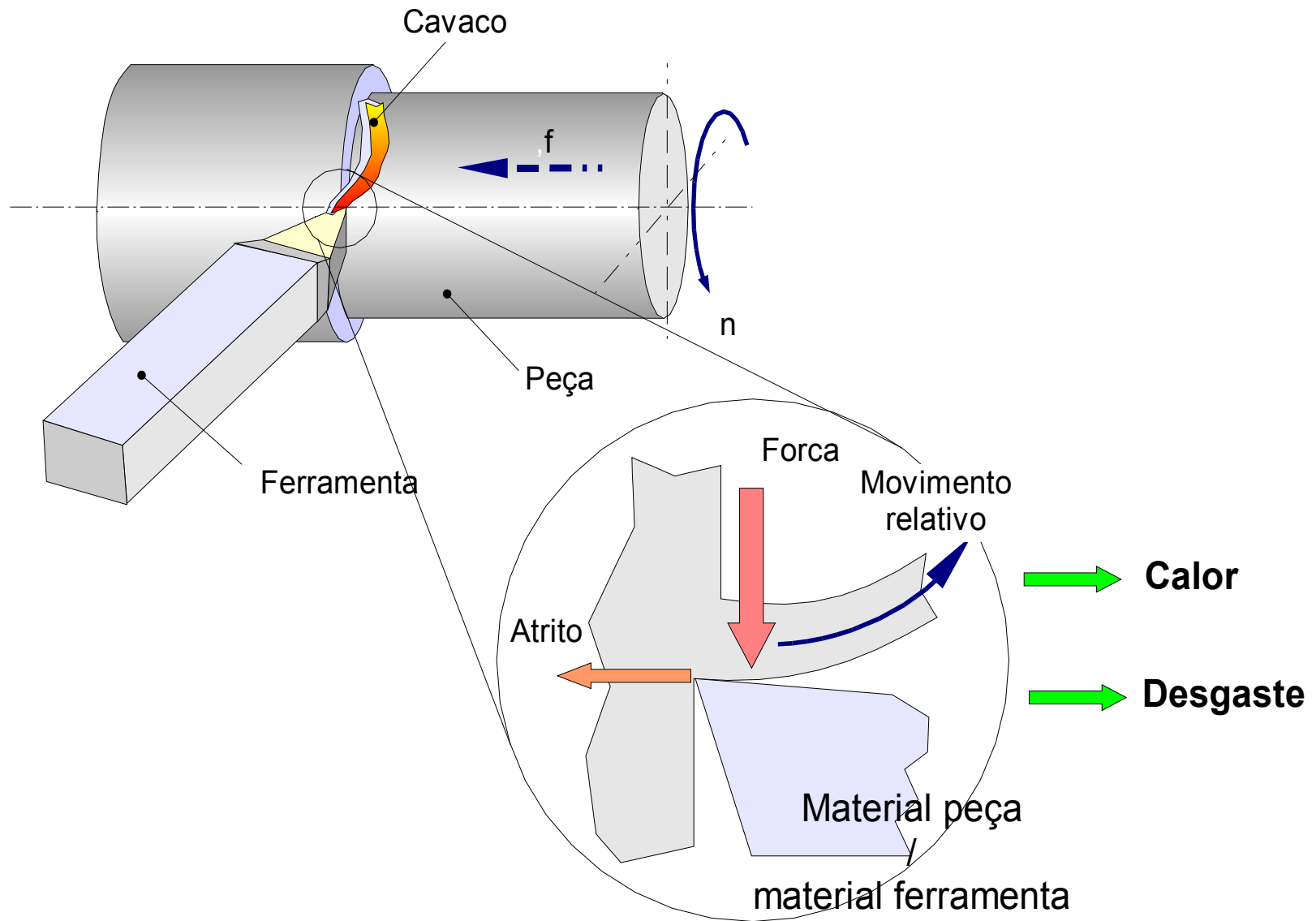


Aula 10

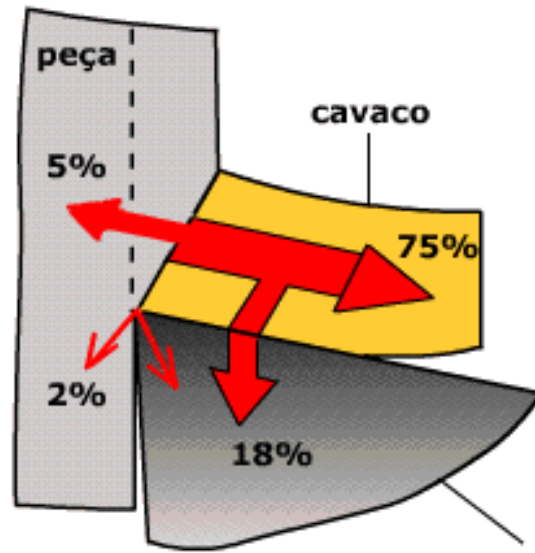
- Forças, pressão específica e potência de corte -**

Conseqüências dos Esforços na Ferramenta



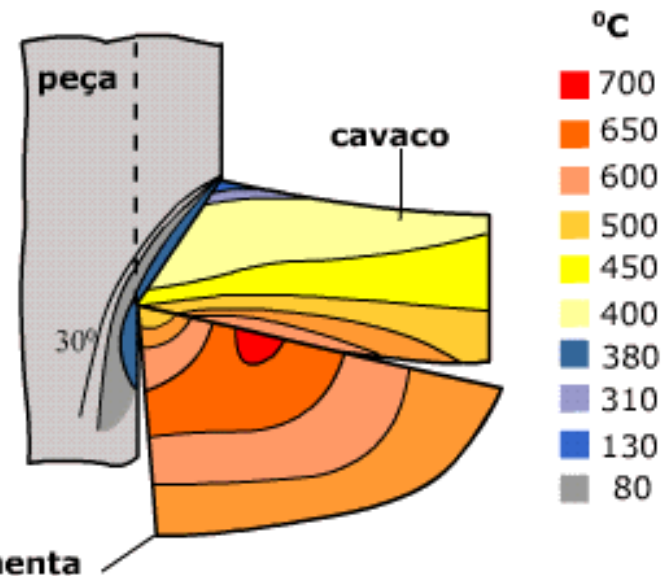
Conseqüências dos esforços na Ferramenta

Geração de Calor



Material: Aço 850N/mm²
Vel.de Corte :60 m/min

Distribuição de Temperaturas



Espess. do cavaco: 0,32 mm
Ferramenta: P 20

Forças de usinagem

Força de usinagem = f {condições de corte (f , v_c , a_p), geometria da ferramenta (χ , γ , λ), desgaste da ferramenta, uso de lubri-refrigerantes, outros}

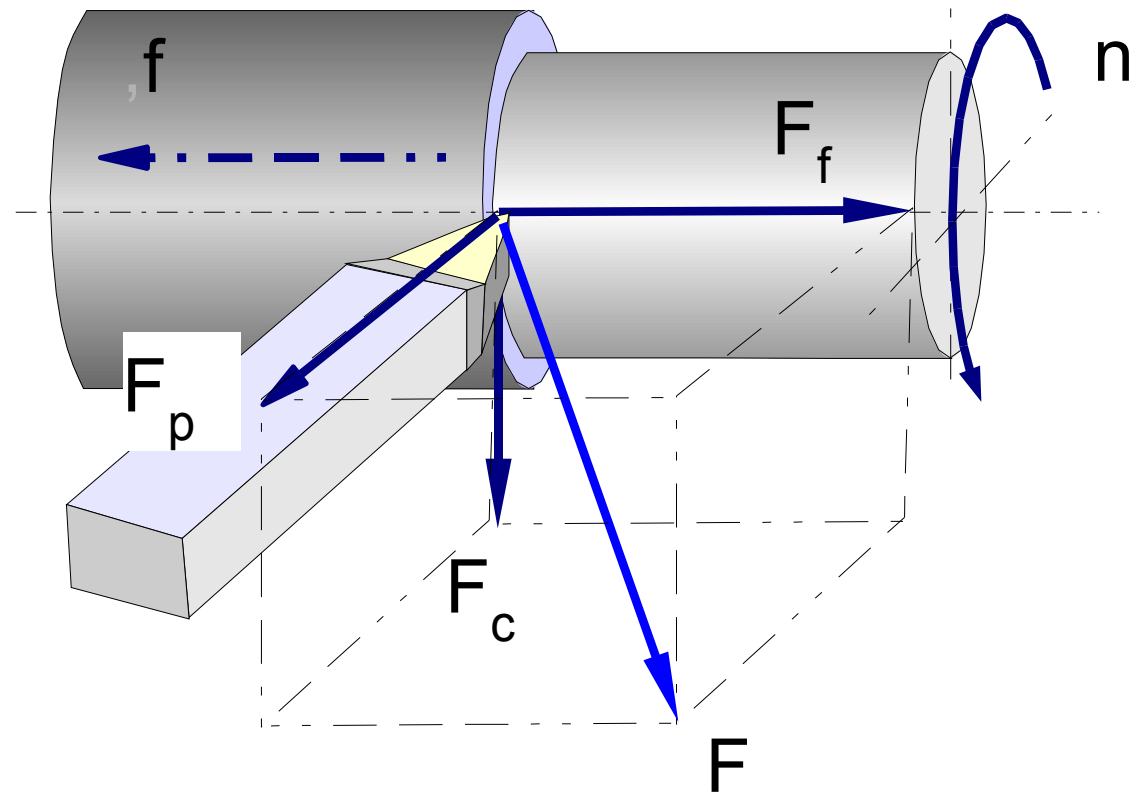
Onde:

F = Força de usinagem

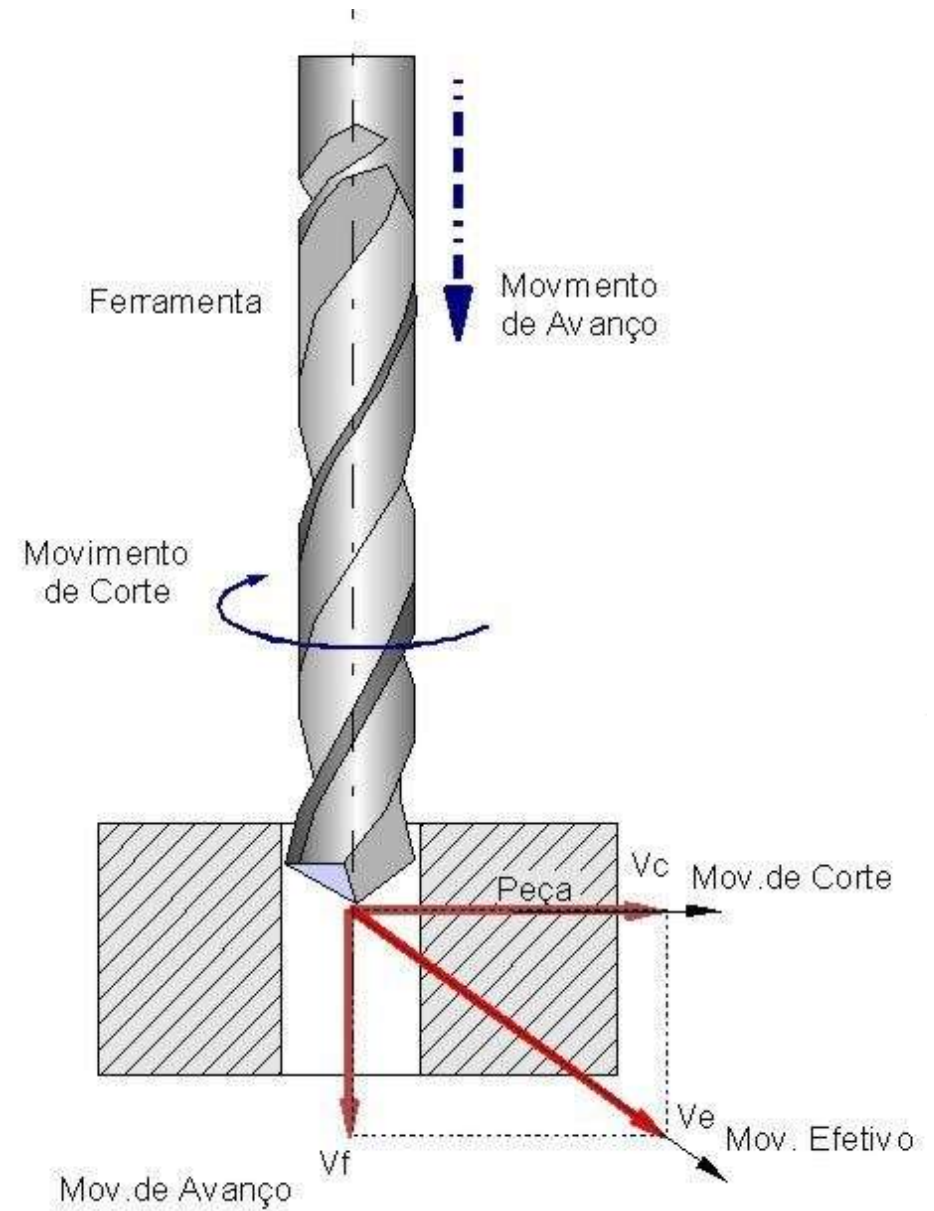
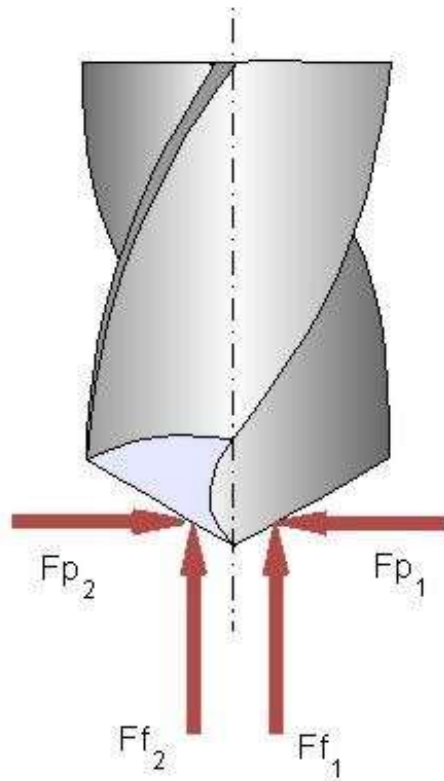
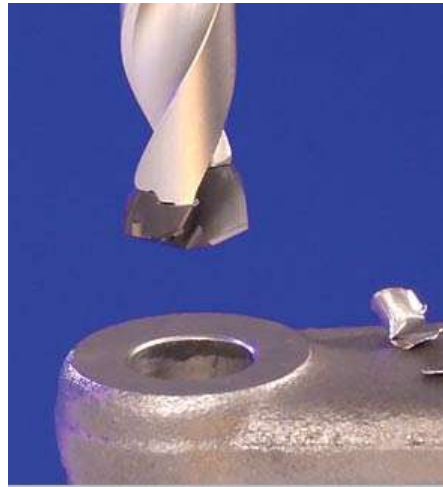
F_c = Força de corte

F_f = Força de avanço

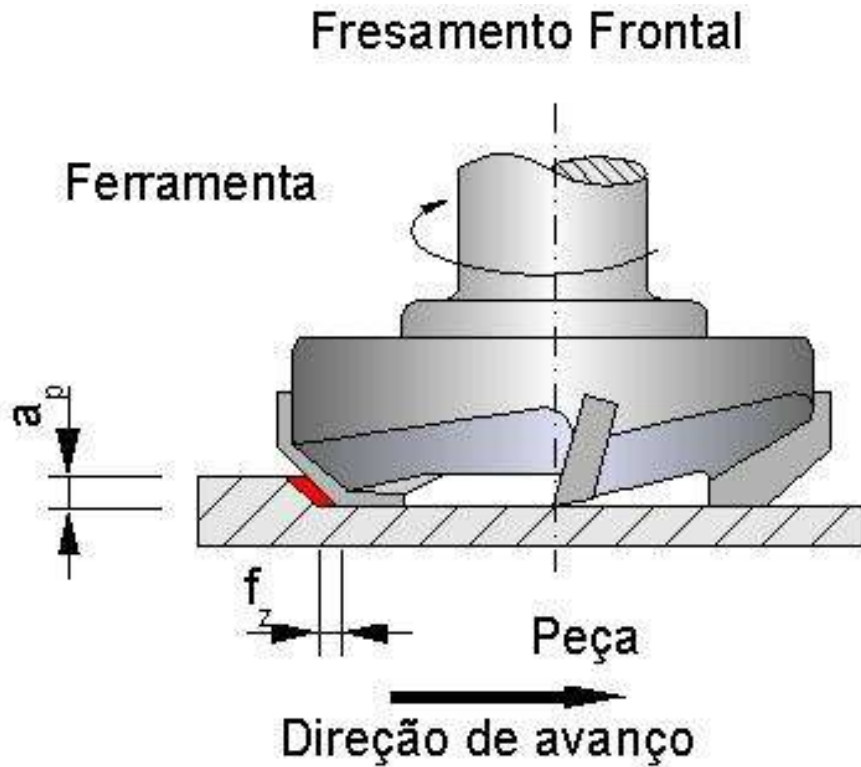
F_p = Força passiva



Forças na furação

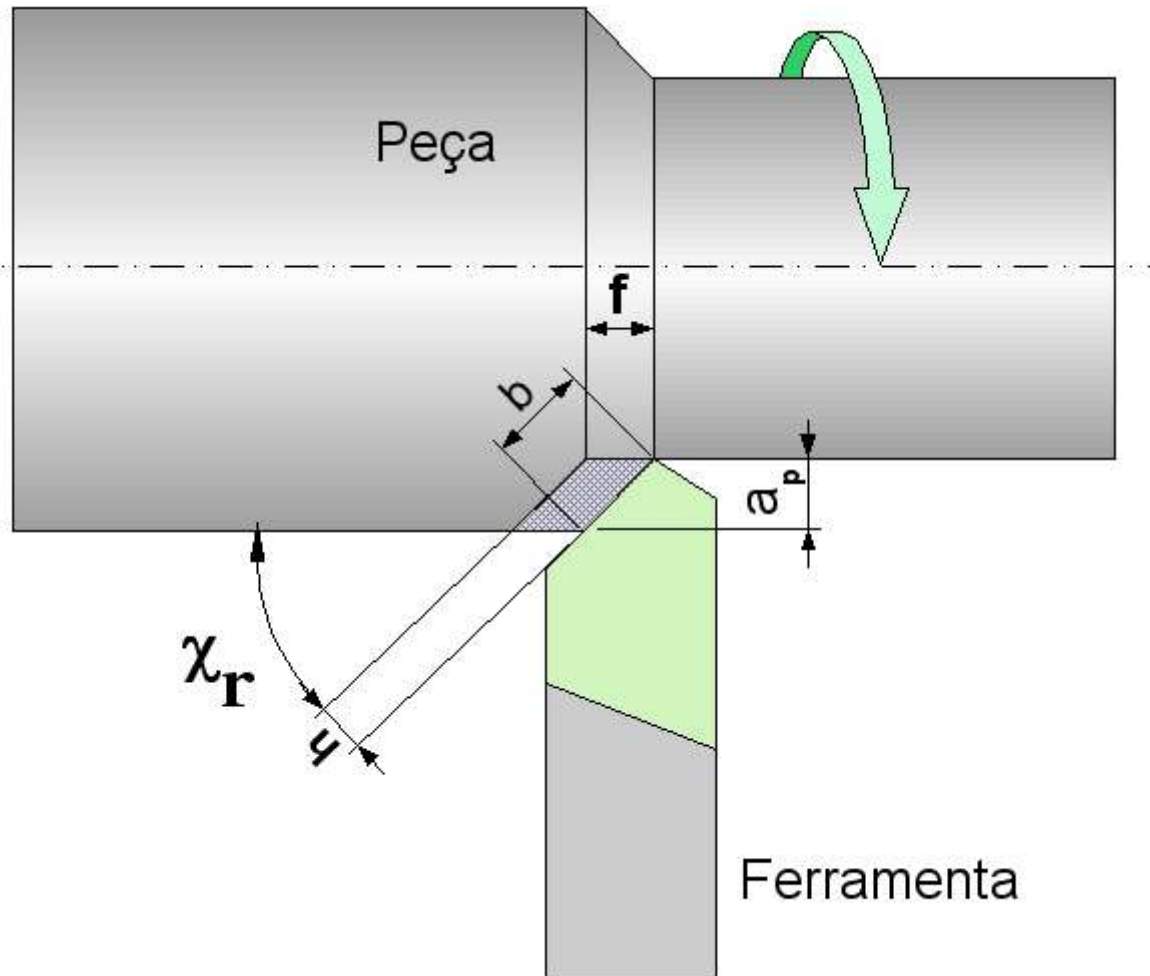


Forças no fresamento



Força e potência de corte

Grandezas do processo de usinagem



Onde:

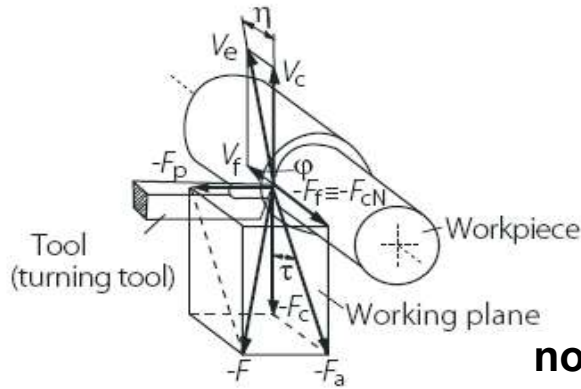
χ_r = ângulo de direção do gume

a_p = Profundidade de corte

f = Avanço

b = largura de usinagem

h = Espessura de usinagem



Força de corte F
Componentes da força de corte F

no plano de trabalho

vertical ao plano de trabalho

Força ativa Fa

Força passiva Fp

Componentes da Força ativa Fa

na direção efetiva

vertical a direção efetiva

Força efetiva Fe

Força efetiva normal FeN

$$F = \sqrt{F_a^2 + F_p^2}$$

na direção de corte

na direção de corte

Força de corte Fc

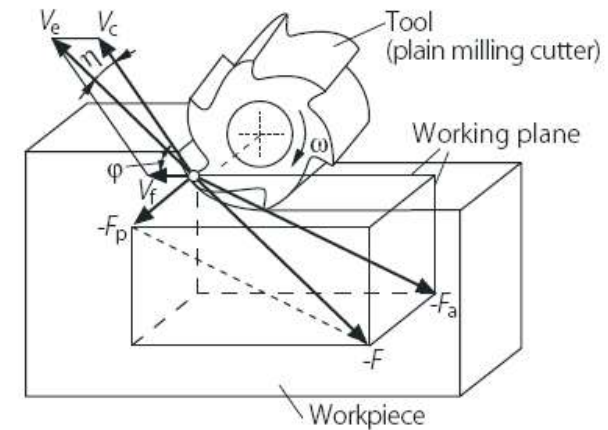
Força de corte normal FcN

vertical a direção do avanço

na direção do avanço

Força de avanço Ff

Força normal Fn



Seção de usinagem - A

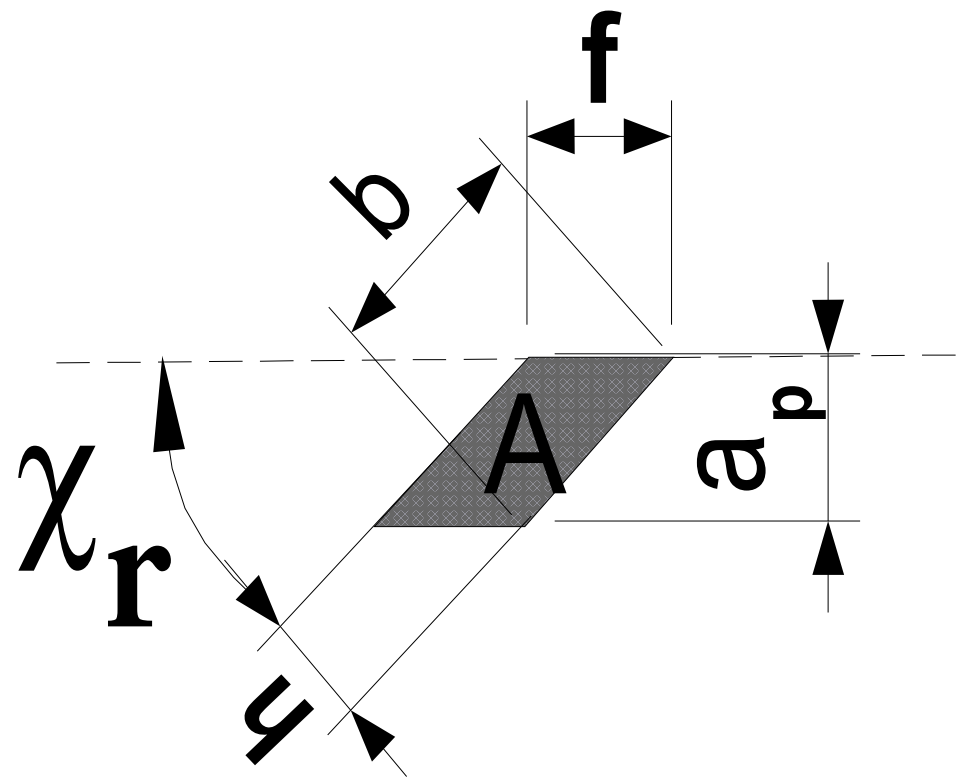
$$F_c = A * K_c$$

$$A = b * h$$

$$A = a_p * f$$

$$b = \frac{a_p}{\sin \chi_r}$$

$$h = f * \sin \chi_r$$



Força de corte e Força específica de corte

Força de corte

- é o principal fator no cálculo da potência necessária a usinagem

Depende principalmente:

- material a ser usinado
 - das condições efetivas de usinagem
 - seção de usinagem
 - do processo
-

Equação Fundamental da Força de Corte

A equação fundamental da força de corte também denominada de equação Kienzle permite relacionar as constantes do processo de usinagem com o material a ser usinado

Conceitualmente esta independe do processo de usinagem

$$F_c = A * K_c$$

$$F_c = a_p * f * K_c$$

$$F_c = b * h * K_c$$

Força específica de corte - K_c

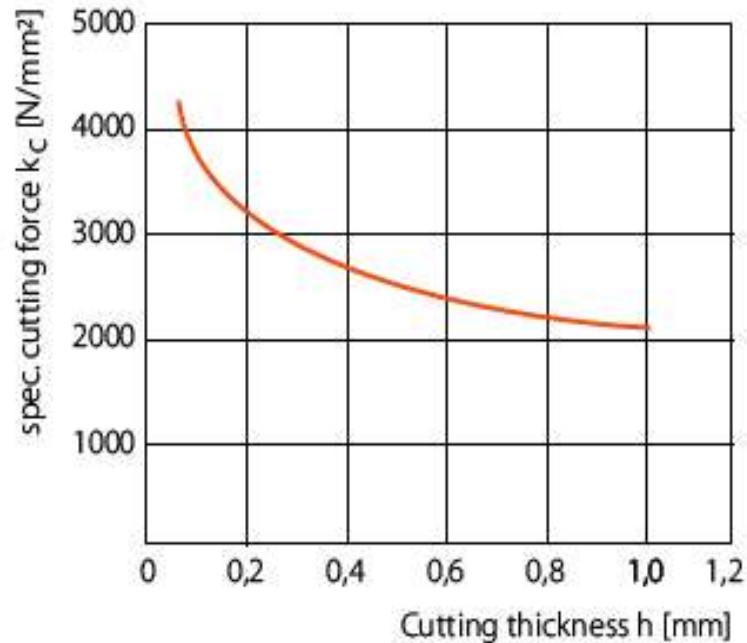
$$K_c = K_{c1.1} b * h^{-mc}$$

Força específica de corte, fatores de influência e considerações

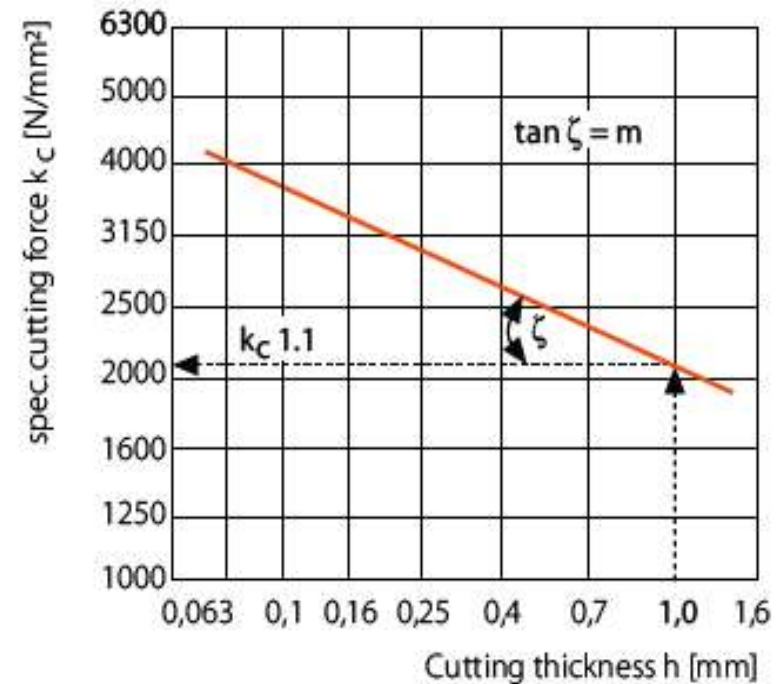
- K_c - fator puramente matemático
- Influenciado basicamente pelo material, em especial a resistência e elementos de liga
- Influenciado pela geometria da ferramenta

$K_{c1.1}$ representa o valor da força específica para um cavaco com área de 1 mm² ($b=1$ mm, $h=1$ mm)

→ Para cada grupo de materiais existe um valor de força específica de corte K_c



Arithmetical representation



Double logarithmic representation

O principal valor da força específica de corte $K_{c1.1}$ e o coeficiente m da tangente do ângulo de inclinação ζ dependem do materia e são dedeterminado por meio de ensaios experimentais

Tabela com valores de K_c e $K_{c1.1}$

Material group	Strength [N/mm ²]	Material		Specific cutting force k_c [N/mm ²] depending on cutting thickness h [mm]												
		Material no.	Material designation according to DIN	$k_{c1.1}$	m	0.05	0.06	0.1	0.16	0.3	0.4	0.5	0.8	1.6	2.5	
1.0	Gen. structural steel	up to 500	1.0037	St 37-2	1.780	0.17	2.962	2.872	2.633	2.431	2.253	2.080	2.003	1.849	1.643	1.523
1.1	Gen. structural steel	500-850	1.0050	St 50-2	1.990	0.26	4.336	4.136	3.621	3.205	2.854	2.525	2.383	2.109	1.761	1.568
			1.0060	St 60-2	2.110	0.17	3.511	3.404	3.121	2.881	2.671	2.466	2.374	2.192	1.948	1.806
			1.0070	St 70-2	2.260	0.30	5.552	5.256	4.509	3.916	3.426	2.975	2.782	2.416	1.963	1.717
2.0	Free cutting steel	up to 850	1.0718	9SMnPb28	1200	0.18	1997	1.844	1.775	1.639	1.473	1.402	1.350	1.246	1.108	1.027
3.0	Unalloyed heat treatable steel	up to 700	1.0402	C 22	1.800	0.16	2.907	2.823	2.602	2.413	2.247	2.084	2.011	1.865	1.670	1.555
			1.0501	C 35	1.516	0.27	3.404	3.240	2.823	2.486	2.204	1.942	1.828	1.610	1.335	1.184
3.1	Unalloyed heat treatable steel	700-850	1.0503	C 45	1.680	0.26	3.661	3.491	3.057	2.705	2.409	2.132	2.012	1.780	1.487	1.324
			1.1191	Ck 45	2.220	0.14	3.377	3.292	3.064	2.869	2.696	2.524	2.446	2.290	2.079	1.953
3.2	Unalloyed heat treatable steel	850-1000	1.1221	Ck 60	2.130	0.18	3.652	3.534	3.224	2.962	2.734	2.512	2.413	2.217	1.957	1.806
4.1	Alloyed heat treatable steel	1000-1200	1.7218	25CrMo4	2.070	0.25	4.378	4.182	3.681	3.273	2.927	2.608	2.462	2.189	1.841	1.646
			1.7225	42CrMo4	2.500	0.26	5.448	5.195	4.549	4.026	3.585	3.173	2.994	2.649	2.212	1.970
5.0	Unalloyed case hardening steel	up to 750	1.0401	C 15	1.820	0.22	3.518	3.380	3.020	2.724	2.469	2.226	2.120	1.912	1.641	1.488
6.0	Alloyed case hardening steel	up to 1000	1.5919	15CrNi6	1.380	0.30	3390	2.944	2.753	2.391	1.980	1.817	1.699	1.476	1.199	1.048
			1.7131	16MnCr5	2.100	0.26	4.576	4.364	3.821	3.382	3.011	2.665	2.515	2.225	1.858	1.655
6.1	Alloyed case hardening steel	over 1000	1.7147	20MnCr5	2.140	0.25	4.526	4.324	3.806	3.384	3.026	2.691	2.545	2.263	1.903	1.702
			1.7262	15CrMo5	2.290	0.17	3.811	3.694	3.387	3.127	2.899	2.676	2.576	2.379	2.114	1.960
7.0	Nitride steel	up to 1000	1.8507	34CrAlMo5	1.740	0.26	3.792	3.616	3.166	2.802	2.495	2.208	2.084	1.844	1.540	1.371
8.0	Tool steel	up to 850	1.1730	C45W	1.680	0.26	3.661	3.491	3.057	2.705	2.409	2.132	2.012	1.780	1.487	1.324
			1.2067	100Cr6	1.410	0.39	4.535	3.776	3.461	2.881	2.255	2.016	1.848	1.538	1.174	986
8.1	Tool steel	850-1100	1.2312	40CrMnMoS8-6	1.800	0.27	4.042	3.847	3.352	2.952	2.617	2.305	2.170	1.912	1.585	1.405
			1.2842	90MnCrV	2.300	0.21	4.315	4.153	3.730	3.380	3.077	2.788	2.660	2.410	2.084	1.897
8.2	Tool steel	over 1100	1.2080	X210Cr12	1.820	0.26	3.966	3.782	3.312	2.931	2.610	2.310	2.179	1.929	1.611	1.434

Table 2.10: Guide values for specific cutting force k_c

Tabela com valores de Kc e Kc1.1

Material group	Strength [N/mm ²]	Material		Specific cutting force kc [N/mm ²] depending on cutting thickness h [mm]												
		Material no.	Material designation according to DIN	kc1.1	m	0.05	0.06	0.1	0.16	0.3	0.4	0.5	0.8	1.6	2.5	
12.0	Spring steel	up to 1500	1.5023	38Si7	1.800	0.27	4.042	3.847	3.352	2.952	2.617	2.305	2.170	1.912	1.585	1.405
			1.8159	50CrV4	2.220	0.26	4.925	4.697	4.113	3.639	3.241	2.868	2.706	2.395	2.000	1.781
13.0	Stainless steel, sulphured	up to 700	1.4104	X14CrMpS17	1.820	0.26	3.966	3.782	3.312	2.931	2.610	2.310	2.179	1.929	1.611	1.434
13.1	Stainless steel, austenitic	up to 700	1.4301	X5CrNi18 10	2.350	0.21	4.408	4.243	3.811	3.453	3.144	2.849	2.718	2.463	2.129	1.939
			1.4401	X5CrNiMo17 122	2.600	0.19	4.594	4.437	4.027	3.683	3.383	3.094	2.966	2.713	2.378	2.185
13.2	Stainless steel, austenitic	up to 850	1.4034	X46Cr13	1.820	0.26	3.966	3.782	3.312	2.931	2.610	2.310	2.179	1.929	1.611	1.434
13.3	Stainless steel, martensitic / ferritic	up to 1100	1.4028	X30Cr13	1.820	0.26	3.966	3.782	3.312	2.931	2.610	2.310	2.179	1.929	1.611	1.434
			2.4631	NiCr20TiAl	2.088	0.29	4.978	4.721	4.071	3.553	3.121	2.724	2.553	2.228	1.822	1.601
15.0	Cast iron (GG) (lamellar graphite)	up to 180 HB	0.6020	GG 20	1.020	0.25	2.157	2.061	1.814	1.613	1.442	1.283	1.213	1.079	907	811
15.1	Cast iron (GG) (lamellar graphite)	over 180 HB	0.6040	GG 40	1.470	0.26	3.203	3.055	2.675	2.367	2.108	1.865	1.760	1.558	1.301	1.158
15.2	Cast iron (GGG, GT) (spheroidal graphite, malleable cast iron)	as of 180 HB	0.7040	GGG-40	1.005	0.25	2.125	2.031	1.787	1.589	1.421	1.264	1.195	1.063	894	799
			0.8040	GTW-40	2.060	0.19	3.640	3.516	3.191	2.918	2.681	2.452	2.350	2.149	1.884	1.731
15.3	Cast iron (GGG, GT) (spheroidal graphite, malleable cast iron)	as of 260 HB	0.7080	GGG-80	1.132	0.44	4.230	3.904	3.118	2.535	2.083	1.694	1.536	1.249	921	756
			0.8165	GTS-65	1.180	0.24	2.422	2.318	2.051	1.832	1.646	1.470	1.394	1.245	1.054	947
16.1	Ti, Ti alloys	850-1200	3.7164	TiAl6V4	1.370	0.21	2.570	2.378	2.222	2.013	1.764	1.661	1.585	1.436	1.241	1.130
17.0	Al, Al alloys	up to 530	3.3535	AlMg3	780	0.23	1.554	1.490	1.325	1.189	1.073	963	915	821	700	632
			3.1325	AlCuMg1	780	0.23	1.554	1.490	1.325	1.189	1.073	963	915	821	700	632
17.1	Cast alumin. alloys Si<10%	up to 600	3.2381	G-AlSi10Mg	830	0.23	1.653	1.585	1.410	1.265	1.142	1.025	973	874	745	672
17.2	Cast alumin. alloys Si>10%	up to 600	3.2581	G-AlSi12	830	0.23	1.653	1.585	1.410	1.265	1.142	1.025	973	874	745	672
19.1	Brass, short-chipping	up to 600	2.0380	CuZn39Pb2	780	0.18	1.337	1.294	1.181	1.085	1.001	920	884	812	717	661
19.3	Bronze, short-chipping	up to 600	2.1090	CuSn7ZnPb	640	0.25	1.353	1.293	1.138	1.012	905	805	761	677	569	509

Tabela com valores de K_c e $K_{c1.1}$

Material group		Strength [N/mm ²]	Material		Specific cutting force k_c [N/mm ²] depending on cutting thickness h [mm]											
			Material no.	Material designation according to DIN	$k_{c1.1}$	m	0.05	0.06	0.1	0.16	0.3	0.4	0.5	0.8	1.6	2.5
1.0	Gen. structural steel	up to 500	1.0037	St 37-2	1.780	0.17	2.962	2.872	2.633	2.431	2.253	2.080	2.003	1.849	1.643	1.523
1.1	Gen. structural steel	500-850	1.0050	St 50-2	1.990	0.26	4.336	4.136	3.621	3.205	2.854	2.525	2.383	2.109	1.761	1.568
			1.0060	St 60-2	2.110	0.17	3.511	3.404	3.121	2.881	2.671	2.466	2.374	2.192	1.948	1.806
			1.0070	St 70-2	2.260	0.30	5.552	5.256	4.509	3.916	3.426	2.975	2.782	2.416	1.963	1.717
2.0	Free cutting steel	up to 850	1.0718	95MnPb28	1.200	0.18	1.997	1.844	1.775	1.639	1.473	1.402	1.350	1.246	1.108	1.027
3.0	Unalloyed heat treatable steel	up to 700	1.0402	C 22	1.800	0.16	2.907	2.823	2.602	2.413	2.247	2.084	2.011	1.865	1.670	1.555
			1.0501	C 35	1.516	0.27	3.404	3.240	2.823	2.486	2.204	1.942	1.828	1.610	1.335	1.184
3.1	Unalloyed heat treatable steel	700-850	1.0503	C 45	1.680	0.26	3.661	3.491	3.057	2.705	2.409	2.132	2.012	1.780	1.487	1.324
			1.1191	Ck 45	2.220	0.14	3.377	3.292	3.064	2.869	2.696	2.524	2.446	2.290	2.079	1.953
3.2	Unalloyed heat treatable steel	850-1000	1.1221	Ck 60	2.130	0.18	3.652	3.534	3.224	2.962	2.734	2.512	2.413	2.217	1.957	1.806
4.1	Alloyed heat treatable steel	1000-1200	1.7218	25CrMo4	2.070	0.25	4.378	4.182	3.681	3.273	2.927	2.603	2.462	2.189	1.841	1.646
			1.7225	42CrMo4	2.500	0.26	5.448	5.195	4.549	4.026	3.585	3.173	2.994	2.649	2.212	1.970
5.0	Unalloyed case hardening steel	up to 750	1.0401	C 15	1.820	0.22	3.518	3.380	3.020	2.724	2.469	2.226	2.120	1.912	1.641	1.488
6.0	Alloyed case hardening steel	up to 1000	1.5919	15CrNi6	1.380	0.30	3.390	2.944	2.753	2.391	1.980	1.817	1.699	1.476	1.199	1.048
			1.7131	16MnCr5	2.100	0.26	4.576	4.364	3.821	3.382	3.011	2.665	2.515	2.225	1.858	1.655
6.1	Alloyed case hardening steel	over 1000	1.7147	20MnCr5	2.140	0.25	4.526	4.324	3.806	3.384	3.026	2.691	2.545	2.263	1.903	1.702
			1.7262	15CrMo5	2.290	0.17	3.811	3.694	3.387	3.127	2.899	2.676	2.576	2.379	2.114	1.960
7.0	Nitride steel	up to 1000	1.8507	34CrAlMo5	1.740	0.26	3.792	3.616	3.166	2.802	2.495	2.208	2.084	1.844	1.540	1.371
8.0	Tool steel	up to 850	1.1730	C45W	1.680	0.26	3.661	3.491	3.057	2.705	2.409	2.132	2.012	1.780	1.487	1.324
			1.2067	100Cr6	1.410	0.39	4.535	3.776	3.461	2.881	2.255	2.016	1.848	1.538	1.174	986
8.1	Tool steel	850-1100	1.2312	40CrMnMoS8-6	1.800	0.27	4.042	3.847	3.352	2.952	2.617	2.305	2.170	1.912	1.585	1.405
			1.2842	90MnCrV	2.300	0.21	4.315	4.153	3.730	3.380	3.077	2.788	2.660	2.410	2.084	1.897
8.2	Tool steel	over 1100	1.2080	X210Cr12	1.820	0.26	3.966	3.782	3.312	2.931	2.610	2.310	2.179	1.929	1.611	1.434

Table 2.10 Guide values for specific cutting force k_c

Fatores de correção para K_c e $K_{c1.1}$

No caso de desvios das condições de usinagem dadas, são necessários fatores de correção

Aplicadas quando:

- correção do ângulo efetivo de corte - K_r
- correção da velocidade de corte - K_v
- correção do material do material da ferramenta K_{Sch}
- correção do desgaste - K_{Ver}

$$F_c = b * h * K_c * K_r * K_v * K_{Sch} * K_{Ver}$$

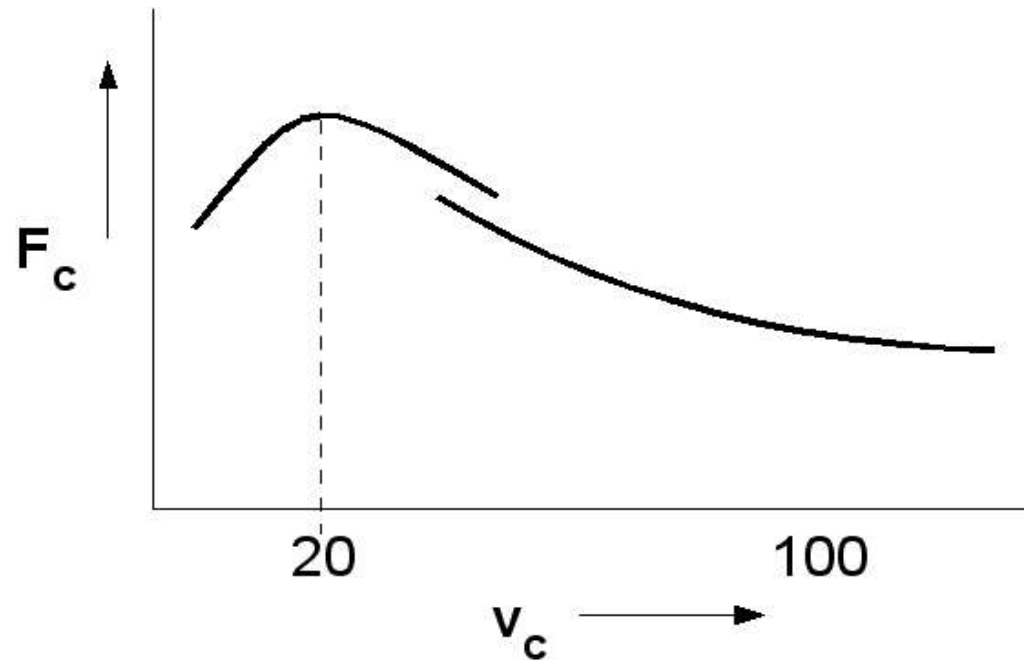
Fatores de correção para K_c e $K_{c1.1}$

$$F_c = b * h * K_c * K_\gamma * K_V * K_{Sch} * K_{Ver}$$

	Cálculo e faixa de valores para as variáveis	Observações
K_γ	$K_g = 1 - \frac{\gamma - \gamma_k}{66,7^\circ}$	γ actual effective cutting angle γ_k for steel processing: 6° for cast metal processing: 2°
K_V	at $v_c > 80$ m/min negligible	Carbide
	1.15	HSS cutters
K_{Sch}	1	Carbide
	0.95 ... 0.9	Ceramics
K_{Ver}	1	Tool at working sharpness
	1.3 ... 1.5	Worn tool

Fatores de influência na força de corte e força específica de corte

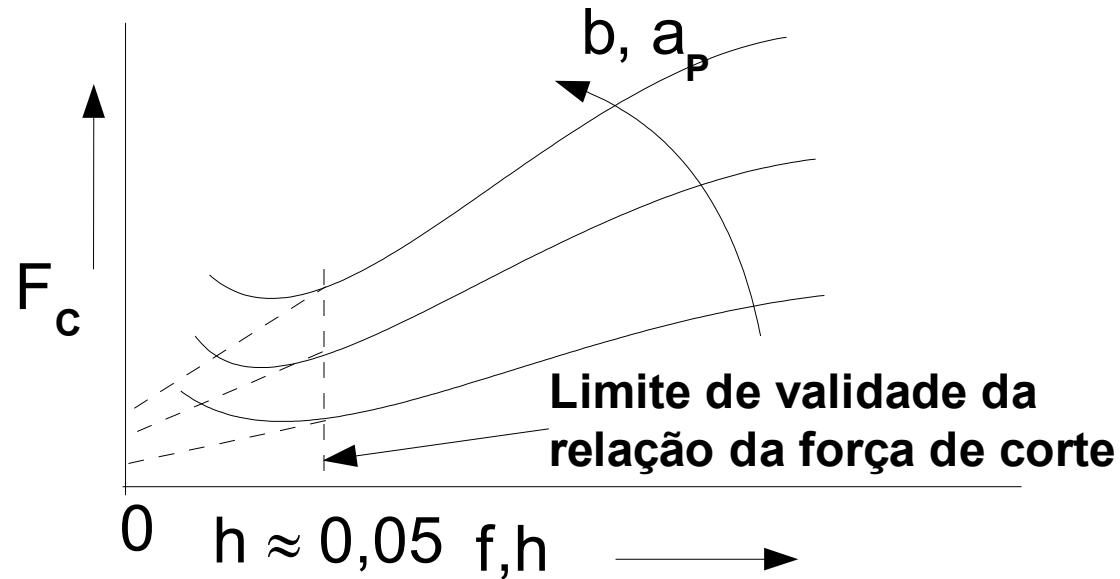
→ Velocidade de corte



- Na ordem de 100 m/min a força de corte sofre decréscimos mínimos com o aumento da velocidade de corte. Na faixa abaixo de 100 m/min o aumento da força de corte depende principalmente das características do material

Fatores de influência na força de corte e força específica de corte

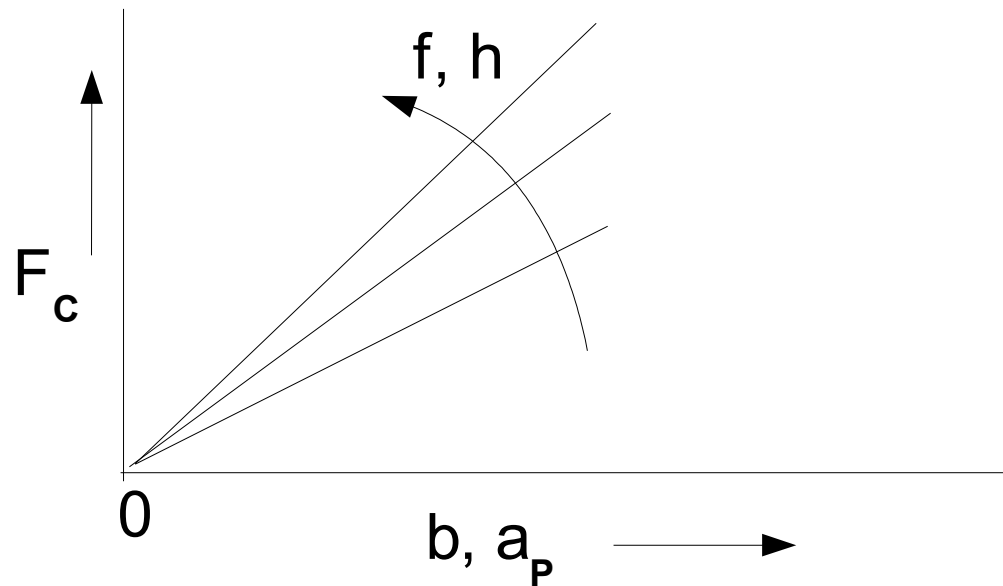
→ Avanço



- O avanço e/ou a espessura de corte h exercem a uma das principais influências sobre a força de corte

Fatores de influência na força de corte e força específica de corte

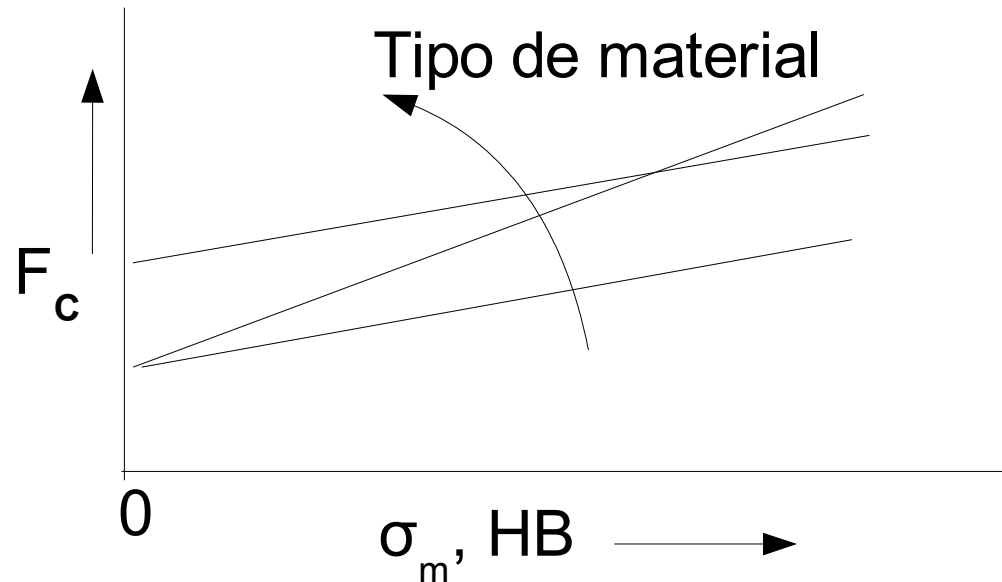
→ Profundidade de corte - a_p



- com o aumento da profundidade de corte a força de corte aumenta proporcionalmente. Dependendo do avanço selecionado o coeficiente angular da linha se alterando a inclinação da mesma

Fatores de influência na força de corte e força específica de corte

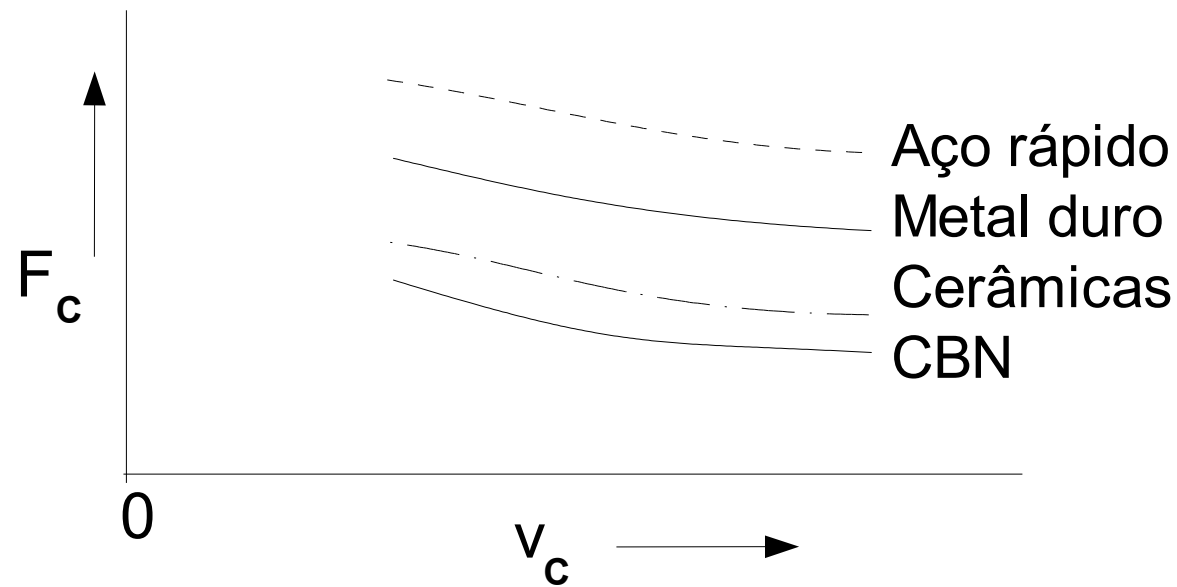
→ Material



- Quando diferentes tipos de materiais são usinados com parâmetros constantes as forças de corte resultantes são diferentes, e dependem das propriedades dos materiais. Como aproximação inicial pode-se assumir que com o aumento da tensão de ruptura ou a dureza a força de corte aumenta.

Fatores de influência na força de corte e força específica de corte

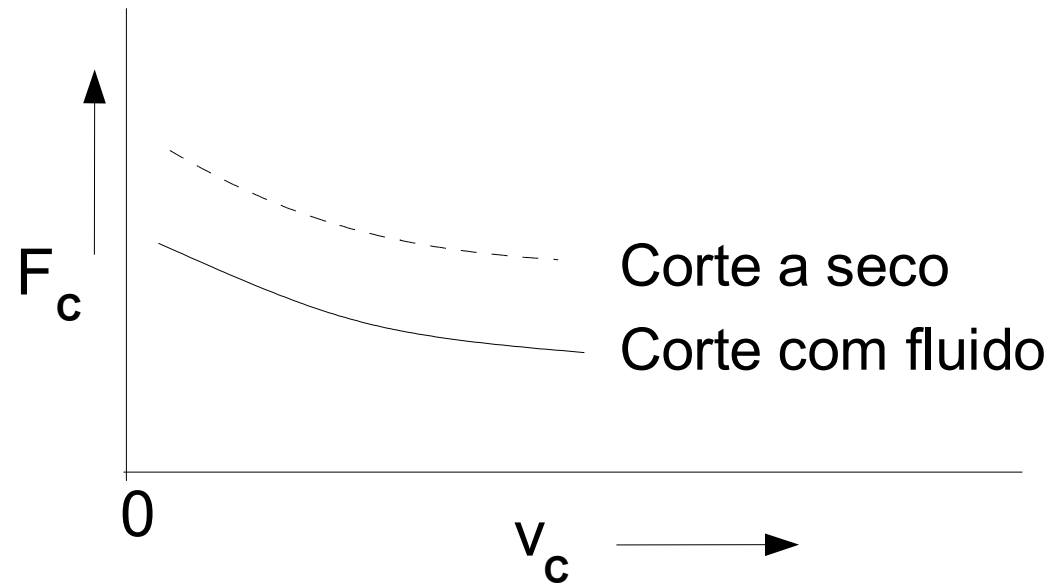
→ Material da ferramenta



- A escolha do material da ferramenta adequado é um dos fatores decisivos que influenciam na forças de corte.
- As condições acima se aplicam a materiais ferrosos

Fatores de influência na força de corte e força específica de corte

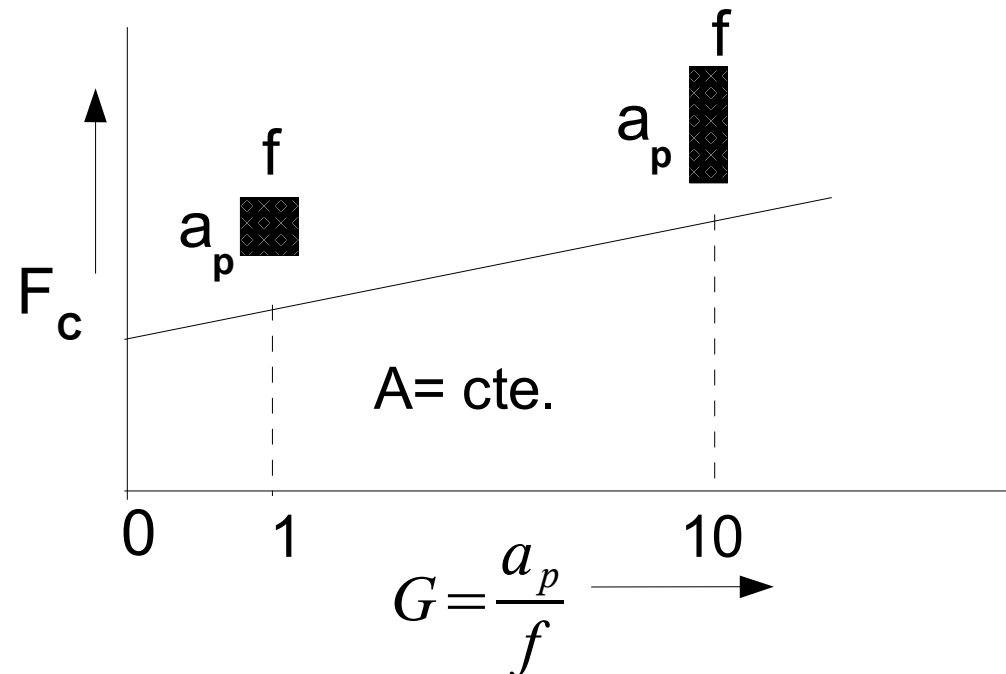
→ Fluido de corte



- O uso de fluidos de corte (lubrificantes ou refrigerantes) pode reduzir as forças de corte quando comparado com a usinagem a seco.

Fatores de influência na força de corte e força específica de corte

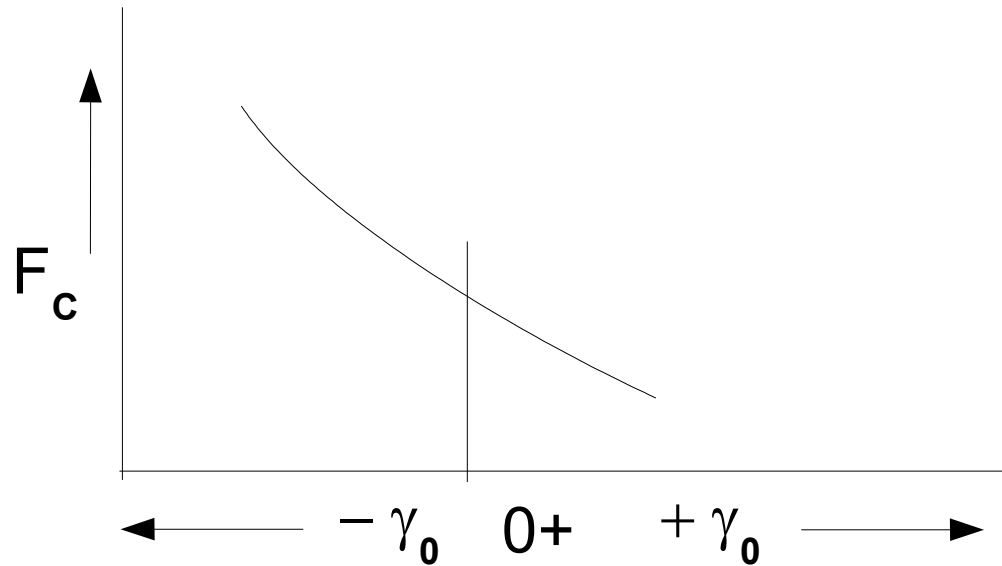
→ Relação de corte G



- De forma geral uma relação G entre 2 e 10 para desbaste e de G entre 10 e 20 para acabamento.
- A influência da relação de corte não tão forte quanto a influência do avanço ou da profundidade de corte
- Uma baixa relação é mais favorável com relação as forças. Já uma relação G maior é mais favorável em termos de maior vida da ferramenta

Fatores de influência na força de corte e força específica de corte

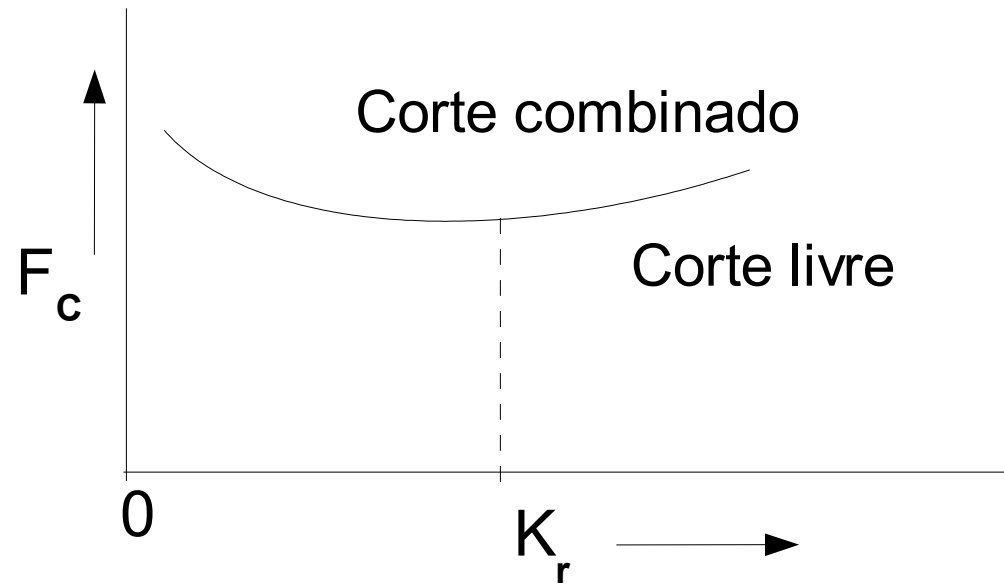
→ Ângulo de saída efetivo



-

Fatores de influência na força de corte e força específica de corte

→ Ângulo de direção



- O ângulo de direção tem pouca influência nas forças de corte

Torque e Potência

A potência de corte P_c é o mais importante fator para selecionar uma máquina ferramenta

$$P = \frac{F \cdot v}{60000}$$

onde:

P - potência [kW]

F - força [N] (Equation 2.10)

v - velocidade [m/min]

Se o torque e a velocidade são utilizados para determinar a potência temos:

$$P = \frac{M_d \cdot n}{9554}$$

onde:

P - potência [kW]

M_d - torque [N/m] (Equation 2.11)

n - velocidade [rpm]

Torque e Potência

A potência diretamente necessária na ferramenta é determinada por:

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{60000}$$

onde:

P_c - potência de corte [kW]

F_c - força de corte [N]

v_c - velocidade de corte [m/min]

A potência de avanço é calculada por:

$$P_f = F_f \cdot v_f$$

P_f - potência avanço [kW]

F_f - força de avanço [N]

v_f - Velocidade de avanço [mm/min]

Torque e Potência

A potência efetiva

$$P_e = P_c + P_f$$

onde:

P_e - potência efetiva [kW]

P_c - potência de corte [kW]

P_f - potência avanço [kW]

A potência do motor é calculada por:

$$P_a = \frac{P_c}{\eta}$$

P_a - potência do motor [kW]

P_c - potência de corte [kW]

η - eficiência elétrica do motor [mm/min]

Taxa de remoção de material

A Taxa de remoção de material Q mede a produtividade em termos da quantidade de material removido pela máquina-ferramenta em período específico de tempo ou volume específico de material removido

$$Q = A \cdot v_c$$

Q – Volume removido no tempo [cm^3/min]

A – seção de usinagem [mm^2]

v_c - velocidade de corte [m/min]

Taxa de remoção de material

Volume específico do cavaco

$$Q_c = \frac{Q}{P_c} = \frac{A \cdot v_c}{F_c \cdot v_c} = \frac{1}{k_c}$$

Q_c – Volume específico de cavaco [$\text{cm}^3/\text{KW min}$]

P_c - potência de corte [kW]

A – seção de usinagem [mm^2]

F_c - força de corte [N]

v_c - velocidade de corte [m/min]

k_c – Força específica de corte [N/mm^2]