Aula Nº 3 – Mecanismo de Formação do Cavaco

objetivo do estudo (foco no cavaco): propiciar os fundamentos para a determinação (estimação) das forças, da rugosidade da superfície usinada e compreender o fenômeno da deterioração das ferramentas.

Classificação dos cavacos: tipos e formas

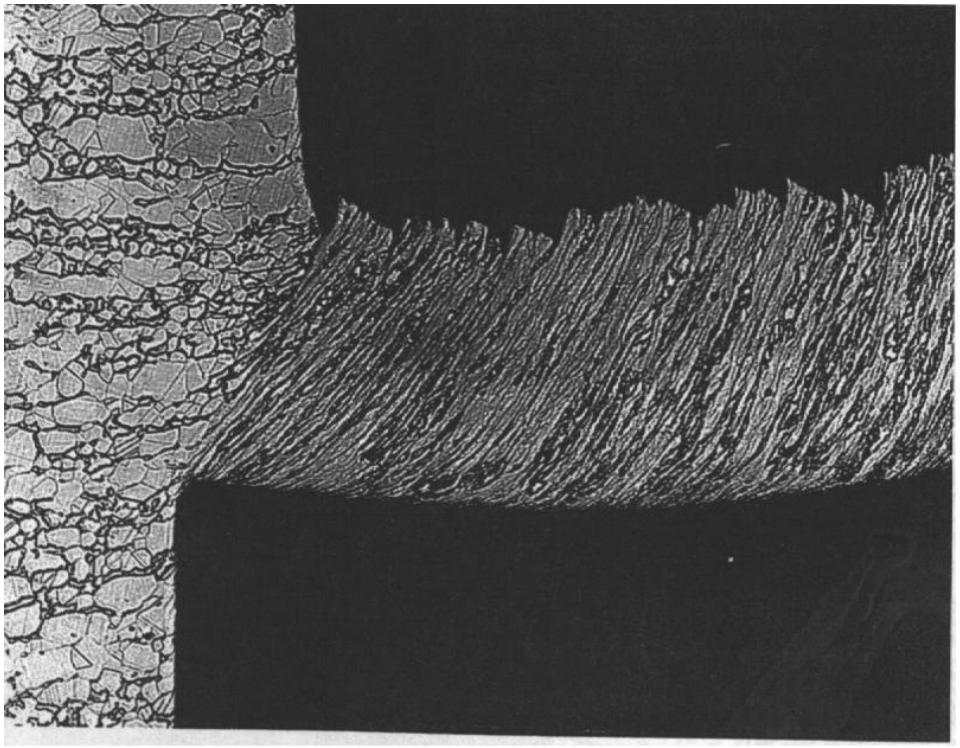
TIPOS (Trent & Wright):

- Contínuo
- Ruptura (descontínuo)
- Contínuo com aresta postiça
- Segmentado

FORMAS (Ferraresi, 1977):

- Fita
- Helicoidal
- Espiral
- Lascas

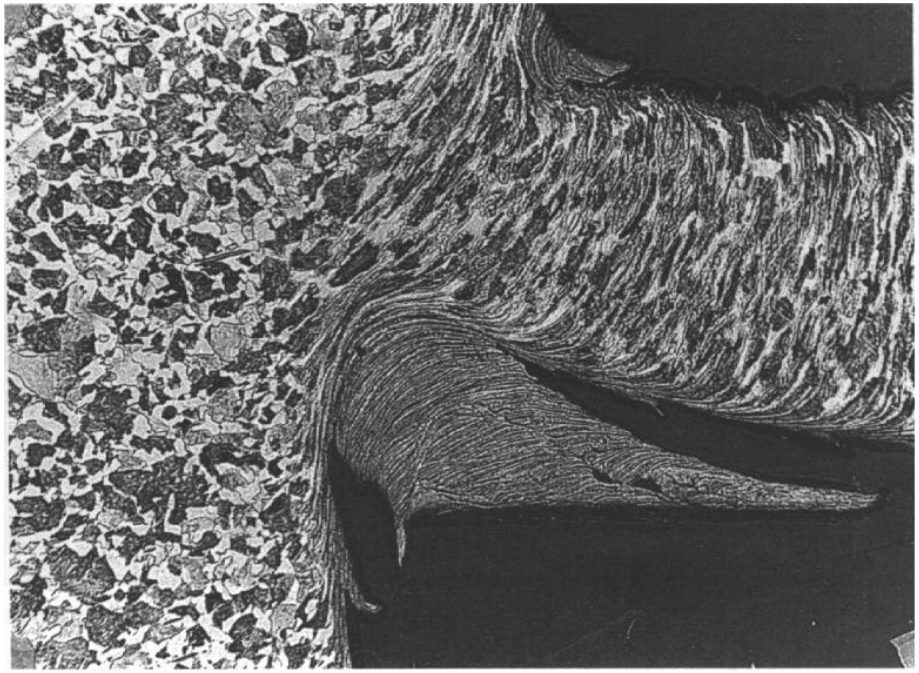
Cavaco contínuo



Cavaco contínuo
Fonte: Trent

Ocorre na usinagem de materiais com estrutura mais homogênea, tais como os aços de baixo e médio carbono; as ligas de alumínio (alto Al); ligas de magnésio (alto Mg). A velocidade de corte deve ser alta o suficiente para evitar a formação da aresta postiça.

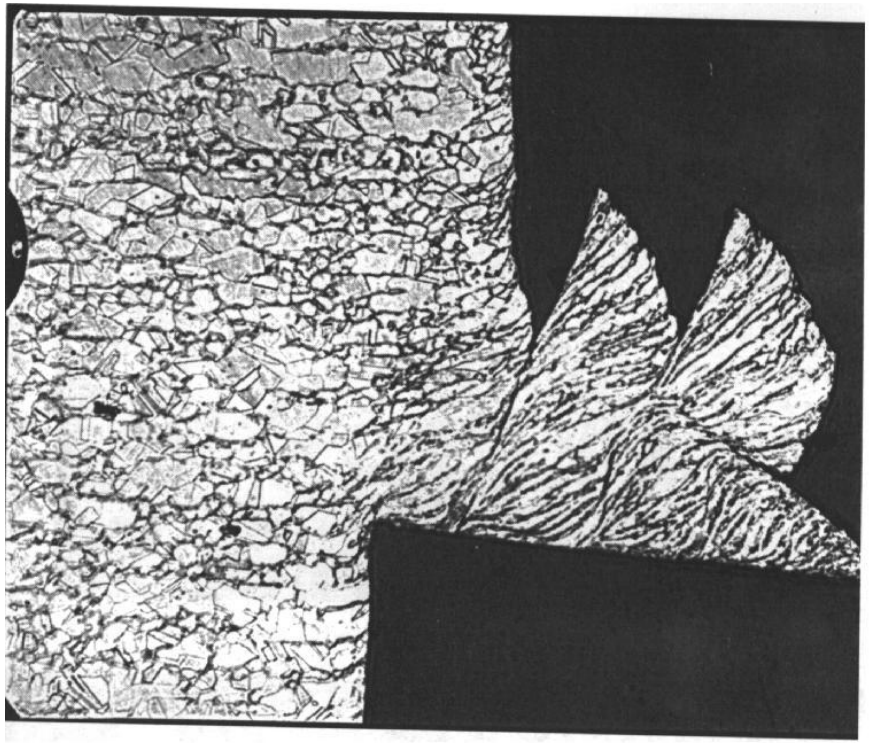
Cavaco contínuo com aresta postiça



Cavaco contínuo com formação de aresta postiça
Fonte: Trent

É um cavaco contínuo, mas obtido pela aresta postiça (material da peça soldado na superfície de saída) . Ocorre, principalmente, em baixas velocidades de corte.

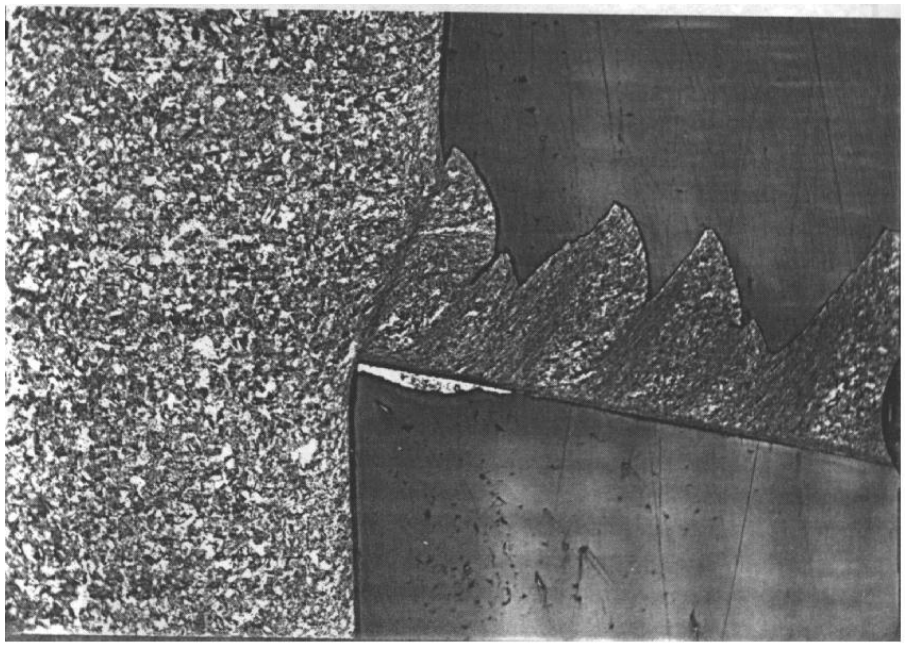
Cavaco descontínuo (ruptura)



Cavaco descontínuo
Fonte: Trent

Ocorre na usinagem de materiais com estrutura heterogênea, tais como os ferros fundidos e algumas ligas de cobre (latão e bronze) e em todos os materiais compósitos.

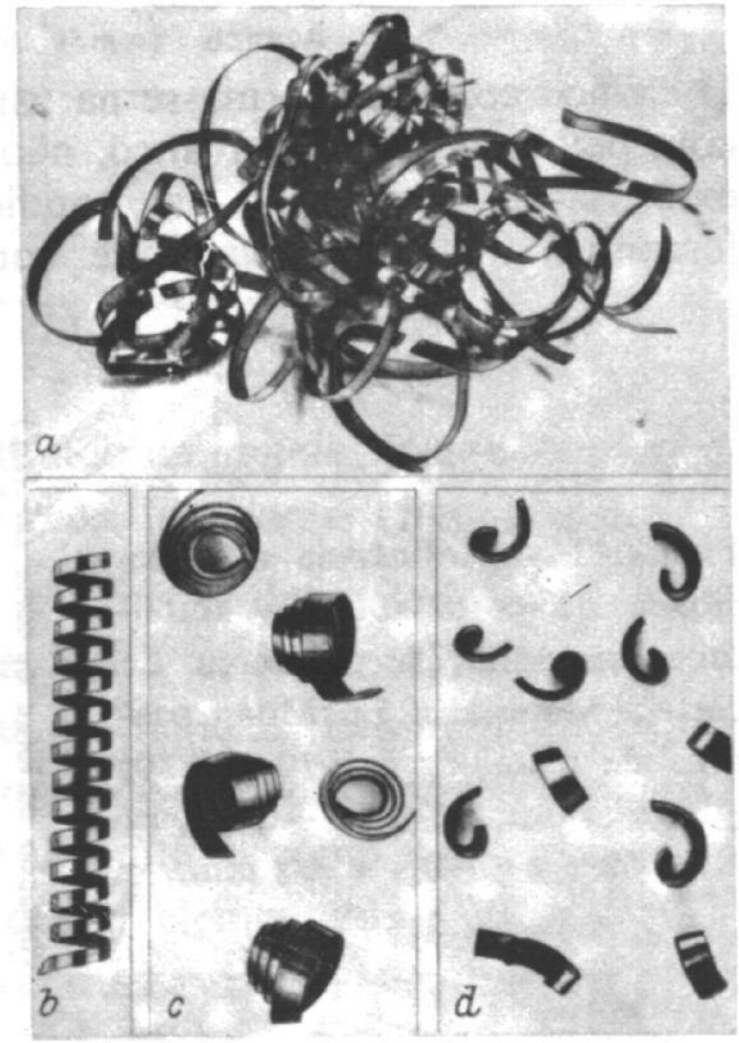
Cavaco segmentado



Cavaco Segmentado
Fonte: Trent

Ocorre na usinagem de aços endurecidos, aços inoxidáveis; ligas de titânio e ligas de níquel.

Formas principais

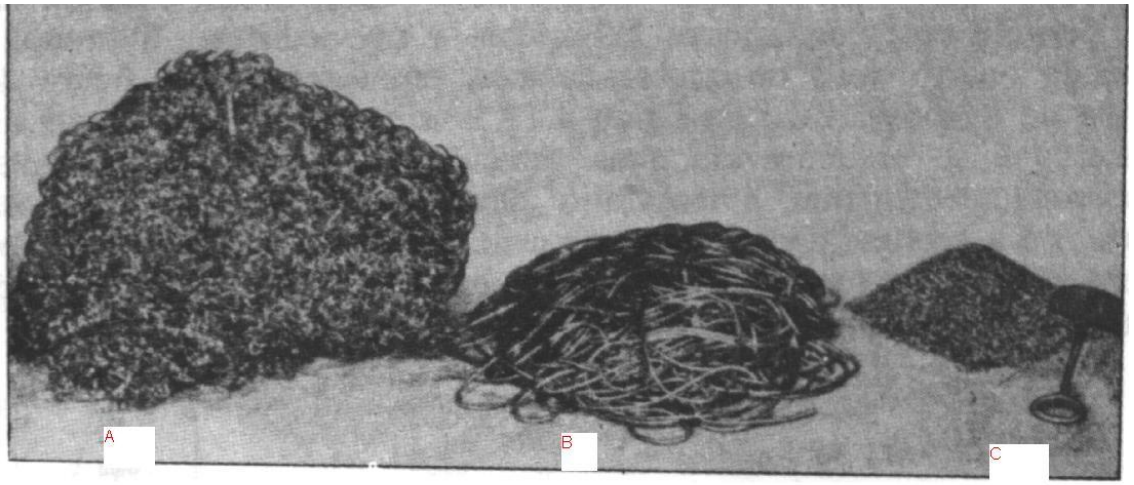


Formas principais de cavaco
a - fita b - helicoidal c- espiral d - lascas

Fonte: Ferraresi

Uma classificação mais detalhada pode ser encontrada na norma ISO 3685 – **Tool Life Testing with Single Point Tools**

CONTROLANDO A FORMA DO CAVACO



Formas diferentes de cavaco produzem volumes diferentes
a - fita b - helicoidal c lascas

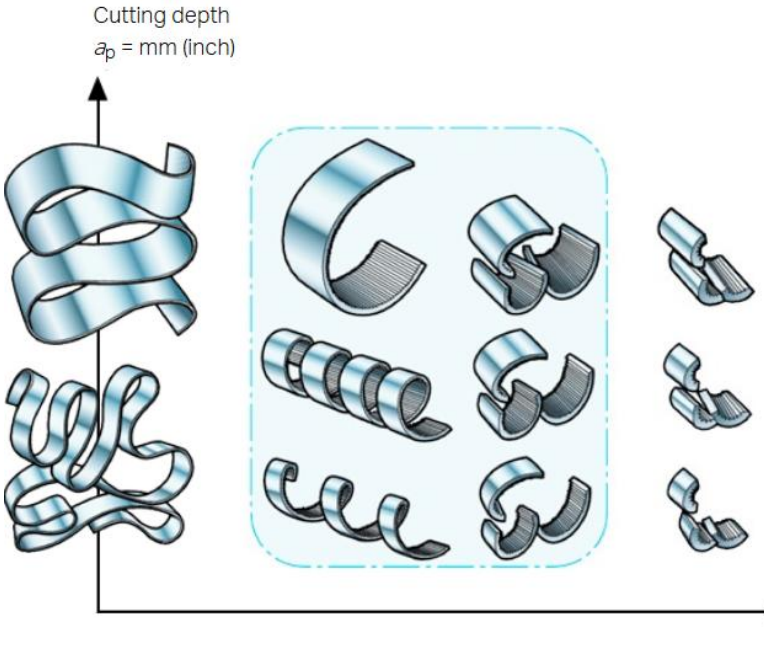
Fonte: Ferraresi

OBJETIVOS:

- Aumentar a segurança humana
- Aumentar a segurança operacional (ferramentas, peças e máquina)
- Reduzir o custo da operação

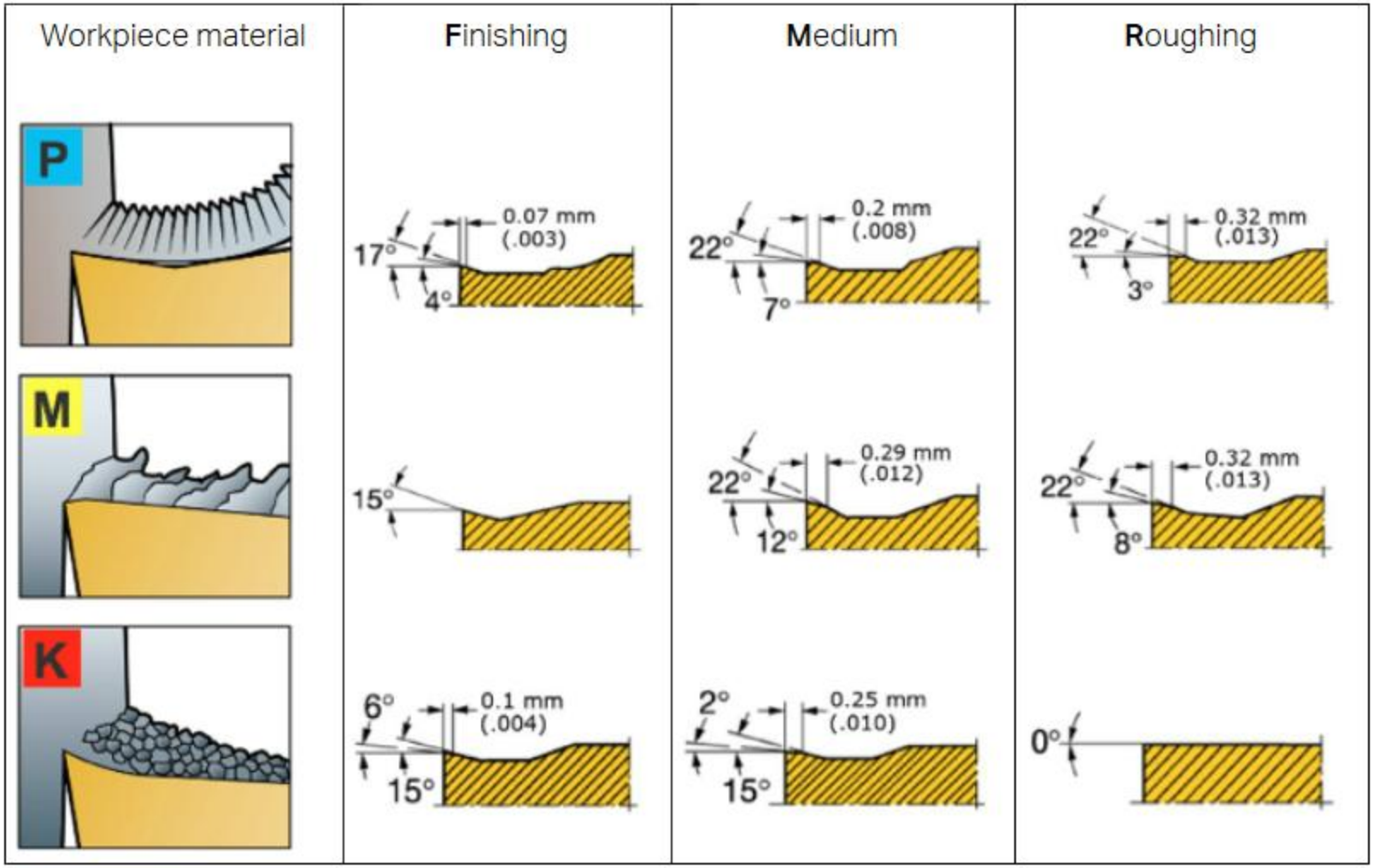
Controlando a forma do cavaco pela variação das condições de corte

Exemplo 1 : operações de faceamento do UHMWPE



Exemplo 2 : Influência da profundidade de corte (ap) e do avanço (f) sobre a forma do cavaco.
Fonte: Sandvik

Controlando a forma do cavaco com uso do quebra-cavaco



Fonte: Sandvik – Training handbool

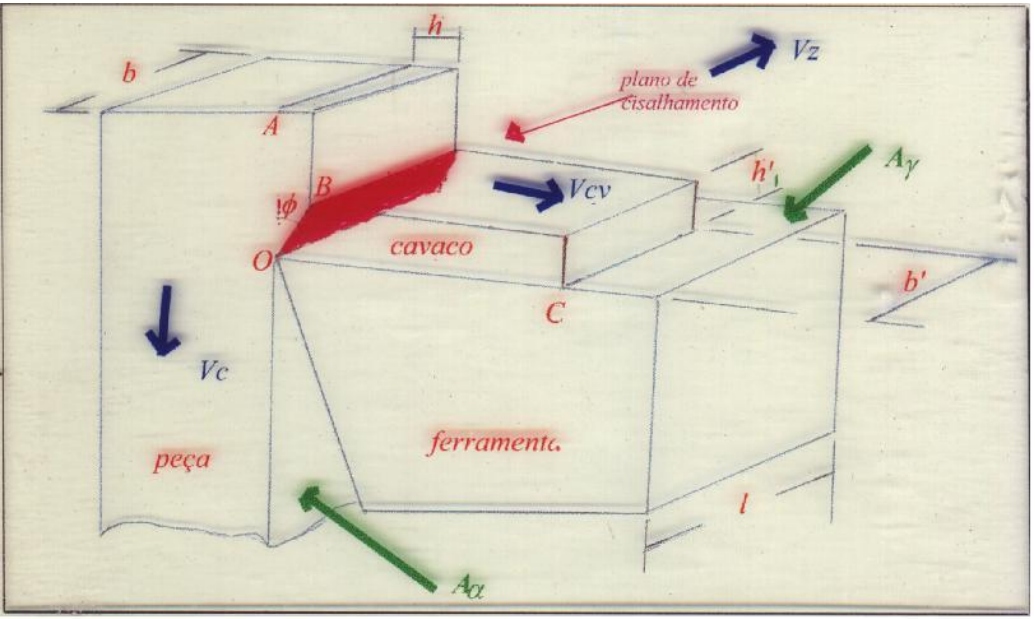
Mecânica da Formação do cavaco (filmes)

Existem vários filmes que ilustram a formação de cavacos do ponto de vista microscópico, o que possibilita avaliar seus diferentes tipos.

Filmes recomendados:
1 – filme da empresa Balzers com evidências da formação da aresta postiça - https://www.youtube.com/watch?v=uwh3ouvzSLk

2 – vários filmes feitos pelo Prof. Joseph Datsko em baixas velocidades de corte para diferentes materiais.
https://www.youtube.com/watch?v=2fDJ1Wk-y04

Mecânica da Formação do cavaco (corte ortogonal)



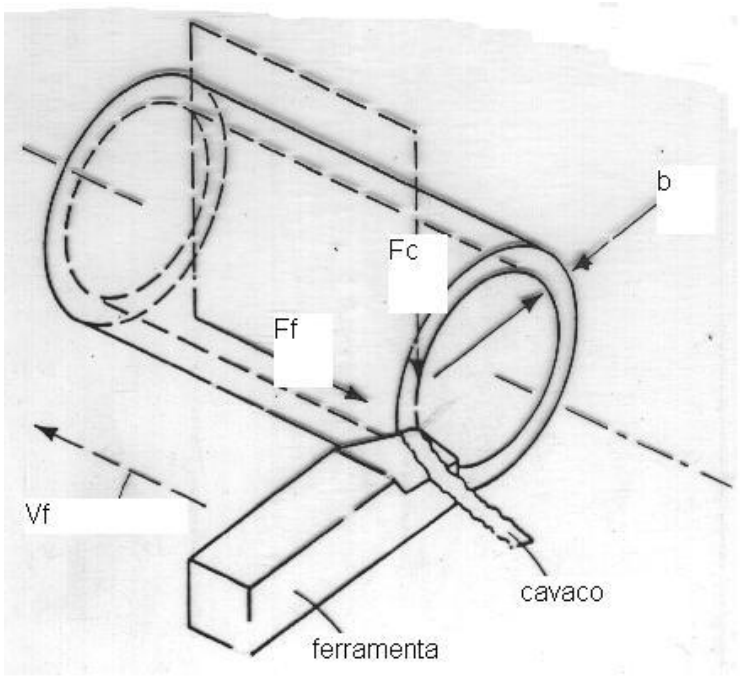
Grandezas no corte ortogonal

Objetivo: Simplificar o entendimento do processo de formação de cavaco, a partir da suposição de um "**estado plano de tensão**"

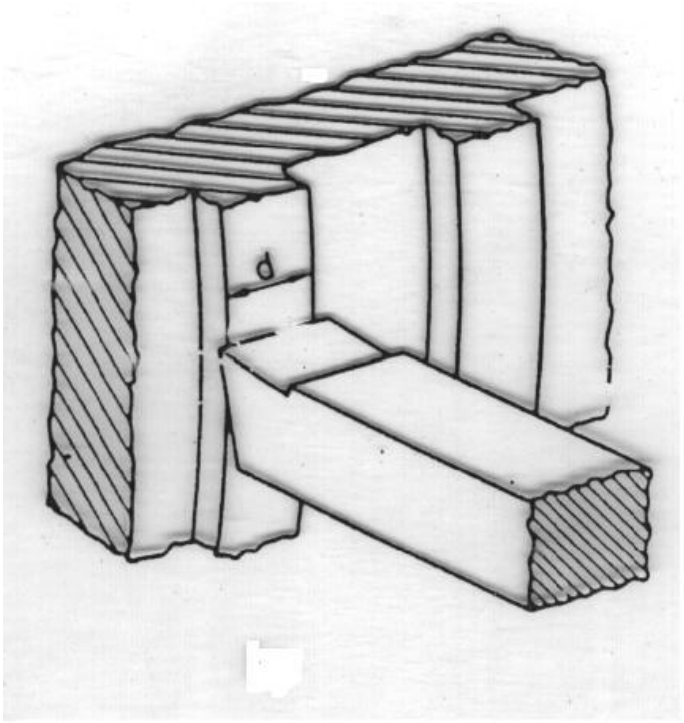
Condições:

- A largura da ferramenta (l) deve ser superior à largura de corte (b)
- Não deve haver deformação lateral do cavaco (b = b`)
- Não deve haver contato entre a peça e a superfície de folga (apenas contato na aresta)
- O cavaco formado deve ser contínuo para garantir um formação "estacionária" de cavaco

Mecânica da Formação do cavaco (exemplos de corte ortogonal)

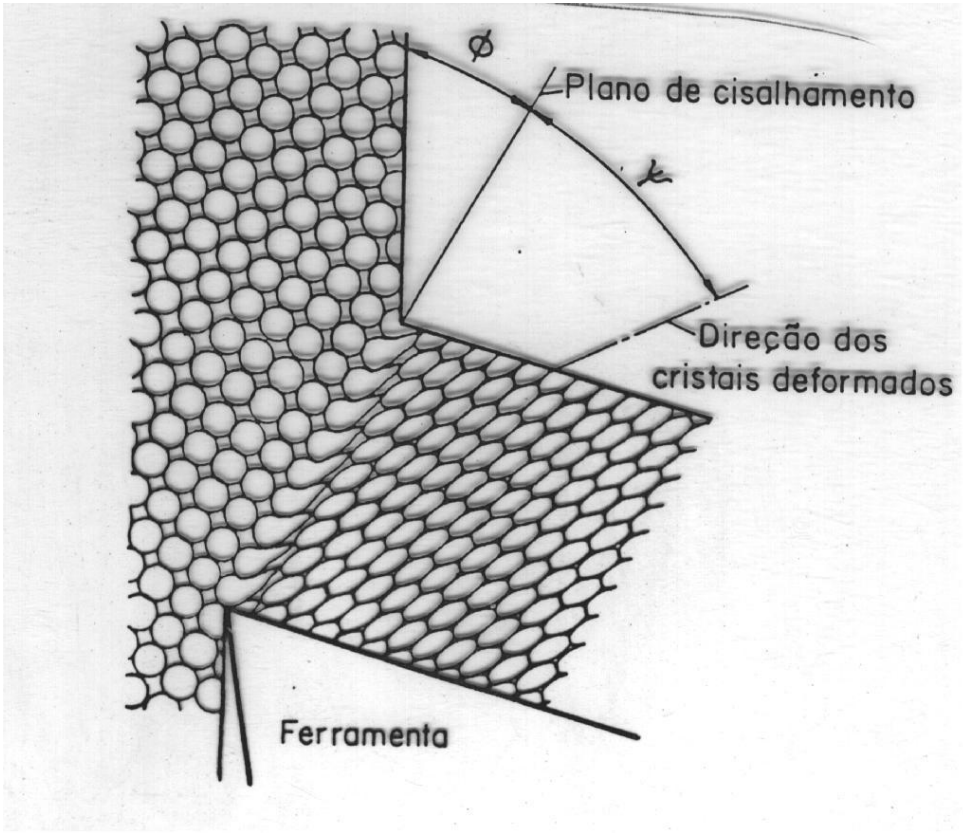


Corte Ortogonal
Fonte:



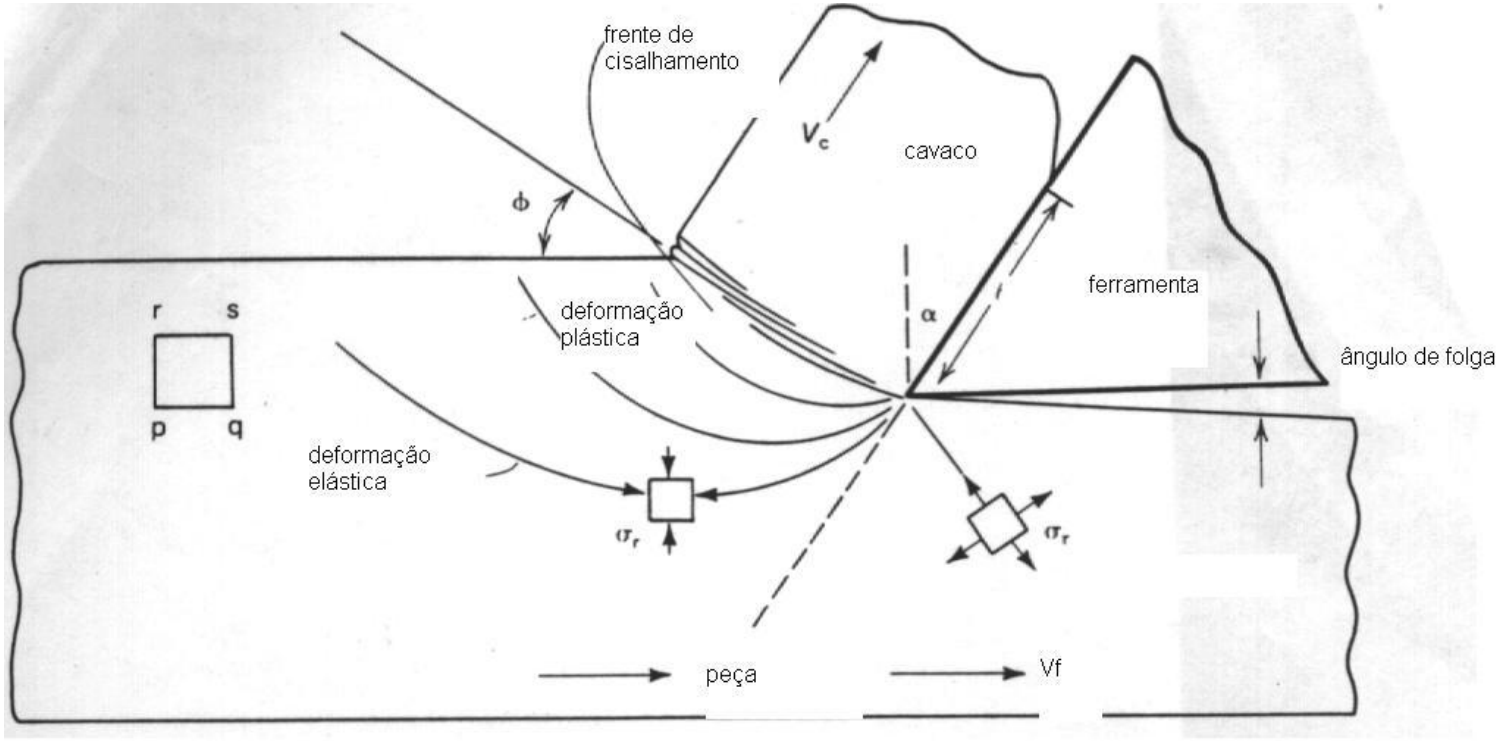
Corte Ortogonal - aplainamento
Fonte:

Corte ortogonal (tensões e deformações)



Corte Ortogonal - Cristais deformados
Fonte: Ferraresi

Corte ortogonal (tensões e deformações)



Desenvolvimento da frente de cisalhamento
Fonte: Black J. T. - in Metals Handbook - Vol 16

Diagrama de forças – **plano de cisalhamento**

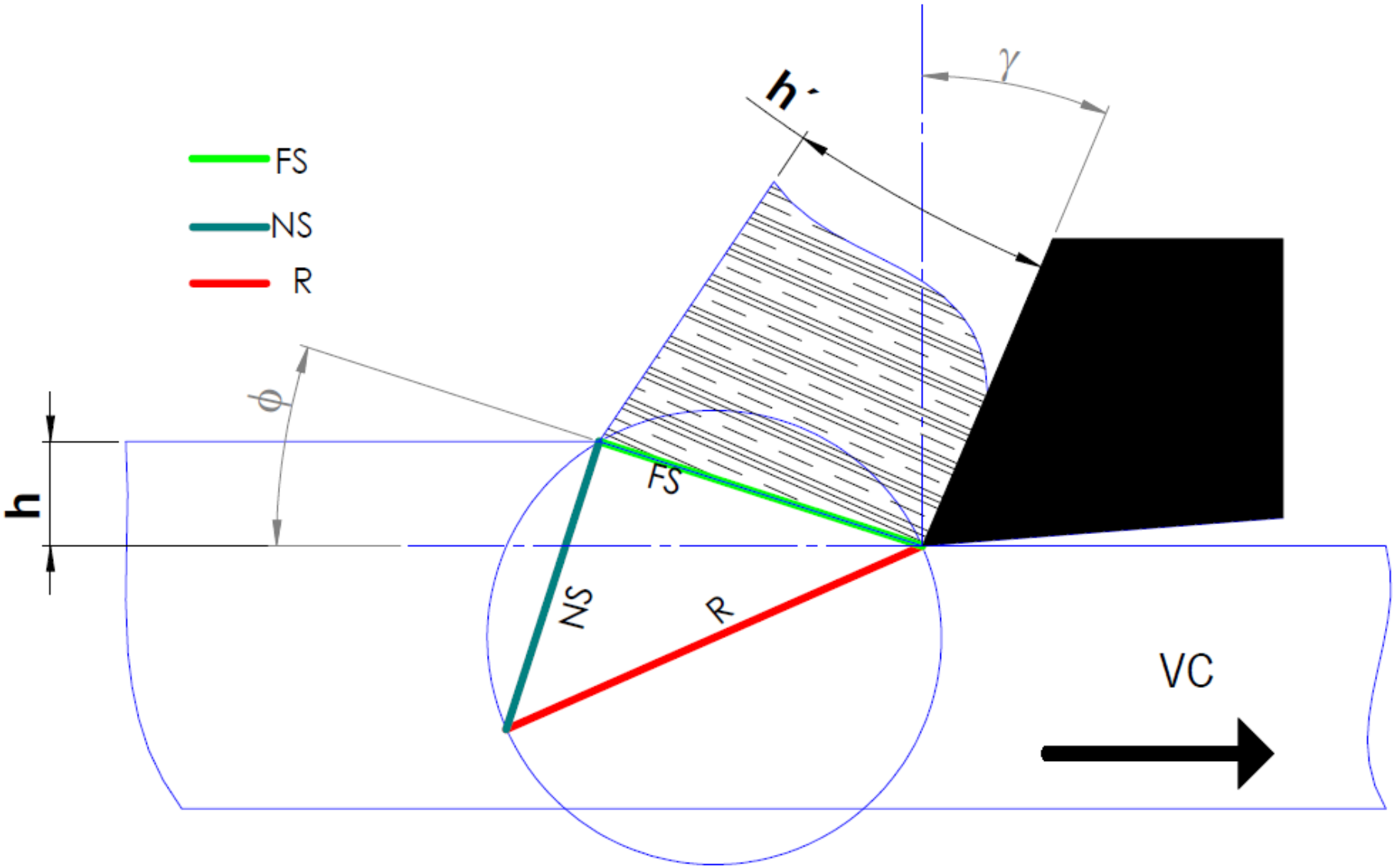


Diagrama de forças – **superfície de saída (deslizamento do cavaco)**

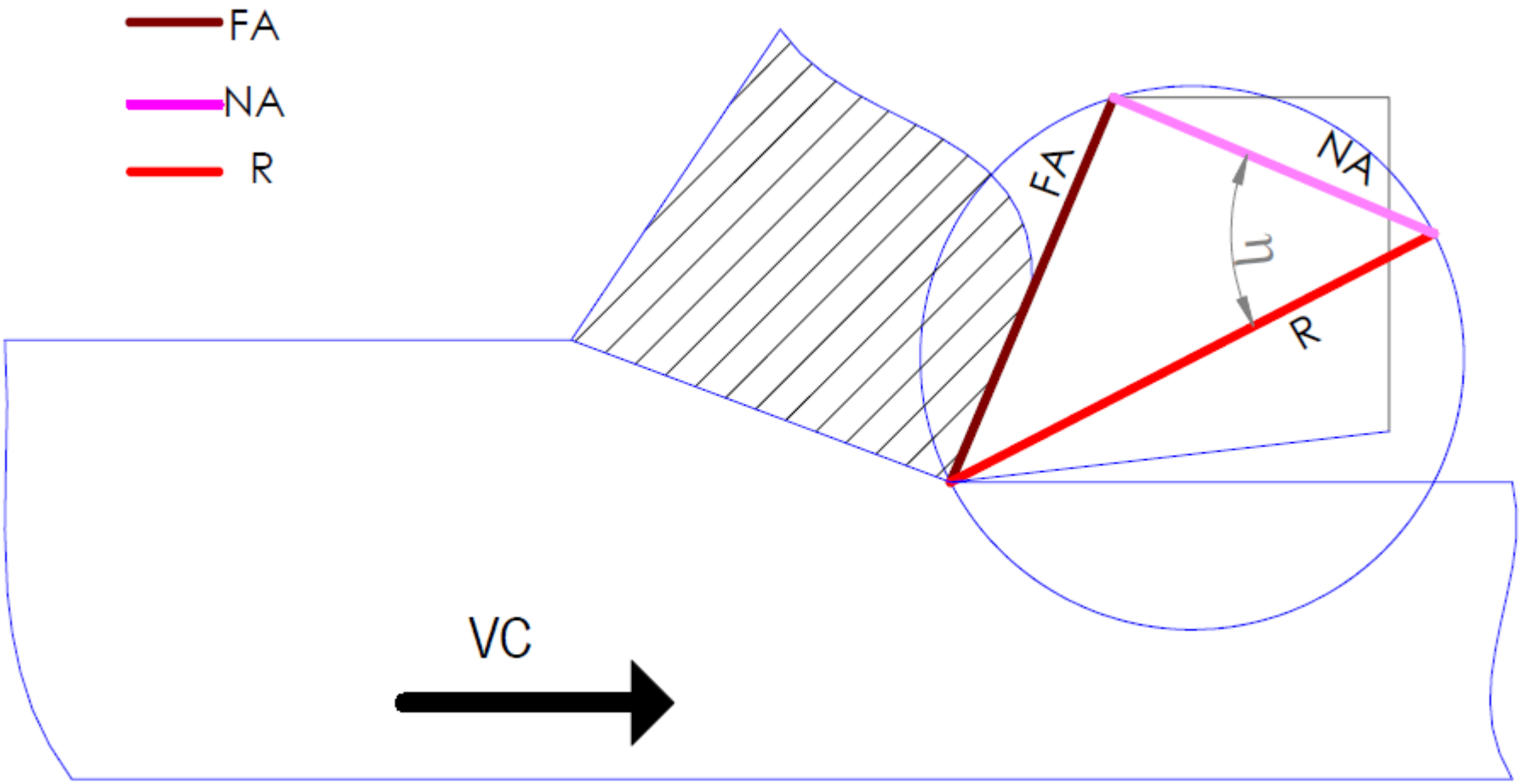
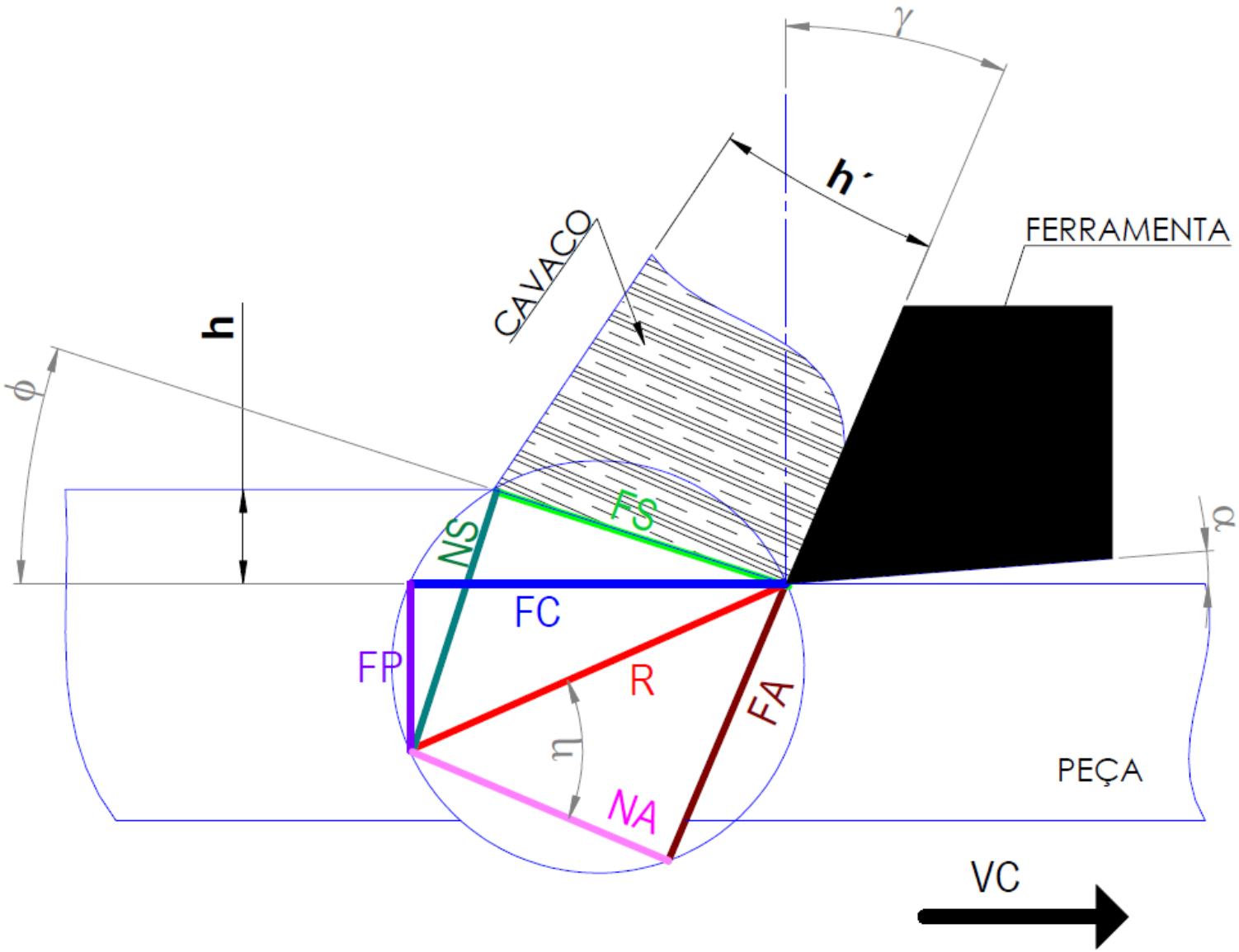


Diagrama de forças – **círculo de Merchant**



RELAÇÕES IMPORTANTES

Grau de recalque: $R_c = \frac{h}{h'}$

Ângulo de cisalhamento: $\emptyset = \tan^{-1}\left(\frac{R_c \cos\gamma}{1 - R_c \sin\gamma}\right)$

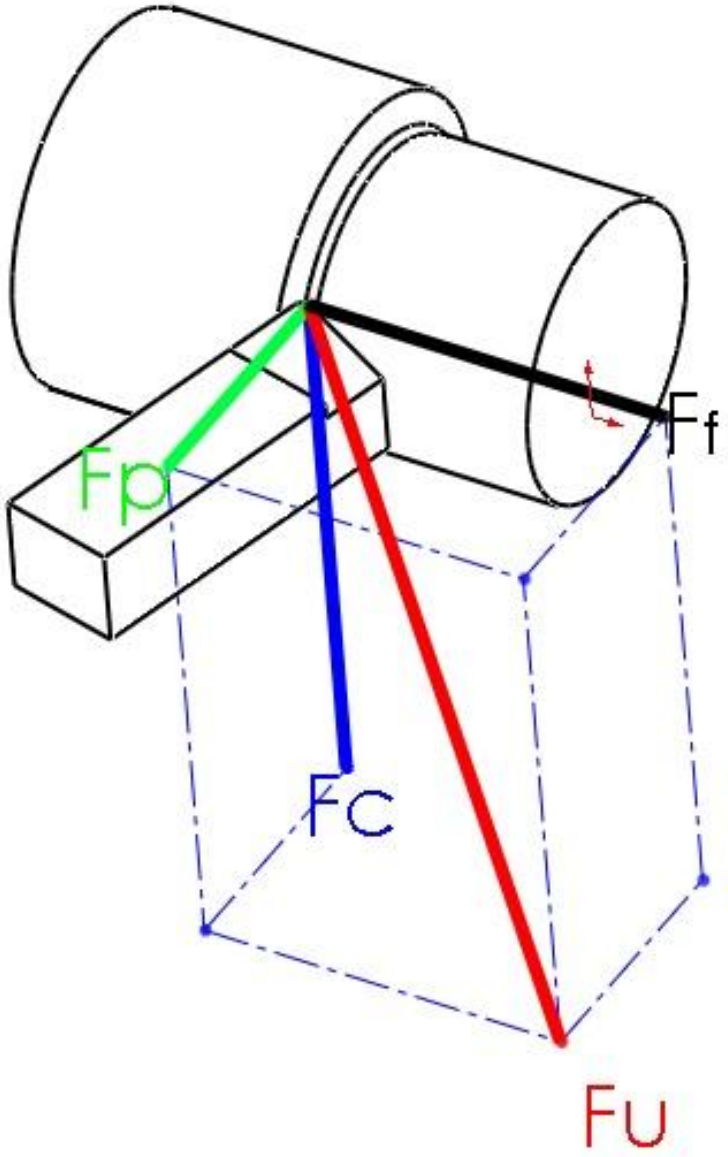
Equação de Lee-Shaffer : $\emptyset = \frac{\pi}{4} + \gamma - \eta$

Energia específica de corte (μc)

Energia necessária para remoção de uma unidade cúbica de material (J/mm^3)

Material	Specific Energy*	
	W-s/mm^3	hp-min/in^3
Aluminum alloys	0.4-1.1	0.15-0.4
Cast irons	1.6-5.5	0.6-2.0
Copper alloys	1.4-3.3	0.5-1.2
High-temperature alloys	3.3-8.5	1.2-3.1
Magnesium alloys	0.4-0.6	0.15-0.2
Nickel alloys	4.9-6.8	1.8-2.5
Refractory alloys	3.8-9.6	1.1-3.5
Stainless steels	3.0-5.2	1.1-1.9
Steels	2.7-9.3	1.0-3.4
Titanium alloys	3.0-4.1	1.1-1.5

Corte oblíquo - Diagrama de forças



F_U = Força de usinagem
F_c = Força de corte
F_f = Força de avanço
F_p = Força passiva

Potências de corte e avanço

Todas as forças no plano de trabalho contribuem para a potência da usinagem !!

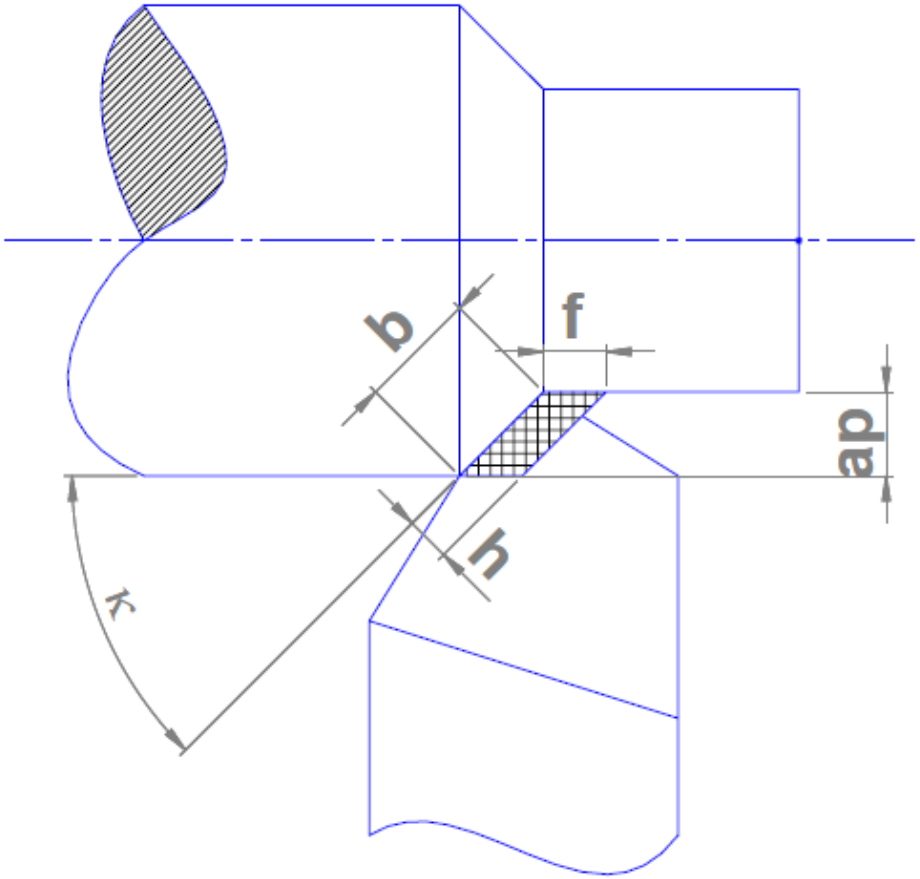
Potência de corte (P_C) = $F_C V_C$

Potência de avanço (P_F) = $F_F V_F$

Sabendo-se que a velocidade de avanço (V_F) é muito baixa quando comparada à velocidade de corte (V_C).

A potência de usinagem (P_U) = P_C

Seção de corte (S)



Espessura de corte (h)	$h = f\,\mathrm{sen}(k)$
Largura de corte (b)	$b = \frac{a_p}{sen(k)}$
Área de corte (s)	$S = bh$

k = ângulo de posição ::: f = avanço ::: a_p = profundidade de corte

Equação de Kienzle para a força de corte no torneamento obliquo

Retomando o conceito de energia (μ_c)e potência(p_s) específicas

$\mu_c = \frac{U}{V}$	(1)
$p_s = \frac{P_c}{Q}$	(2)

Sabendo-se a potência de corte (P_C) é o produto entre a força de corte (F_C) e a velocidade de corte (V_C):

$P_C = F_C V_C$	(3)

E a taxa de remoção (Q) pode ser dada pelo produto entre a velocidade de corte (V_C) e a área da seção de corte (S):

$Q = V_C s$	(4)

Equação de Kienzle ...

Substituindo (3) e (4) em (2), temos:

$p_s = \frac{F_C}{S}$	(5)

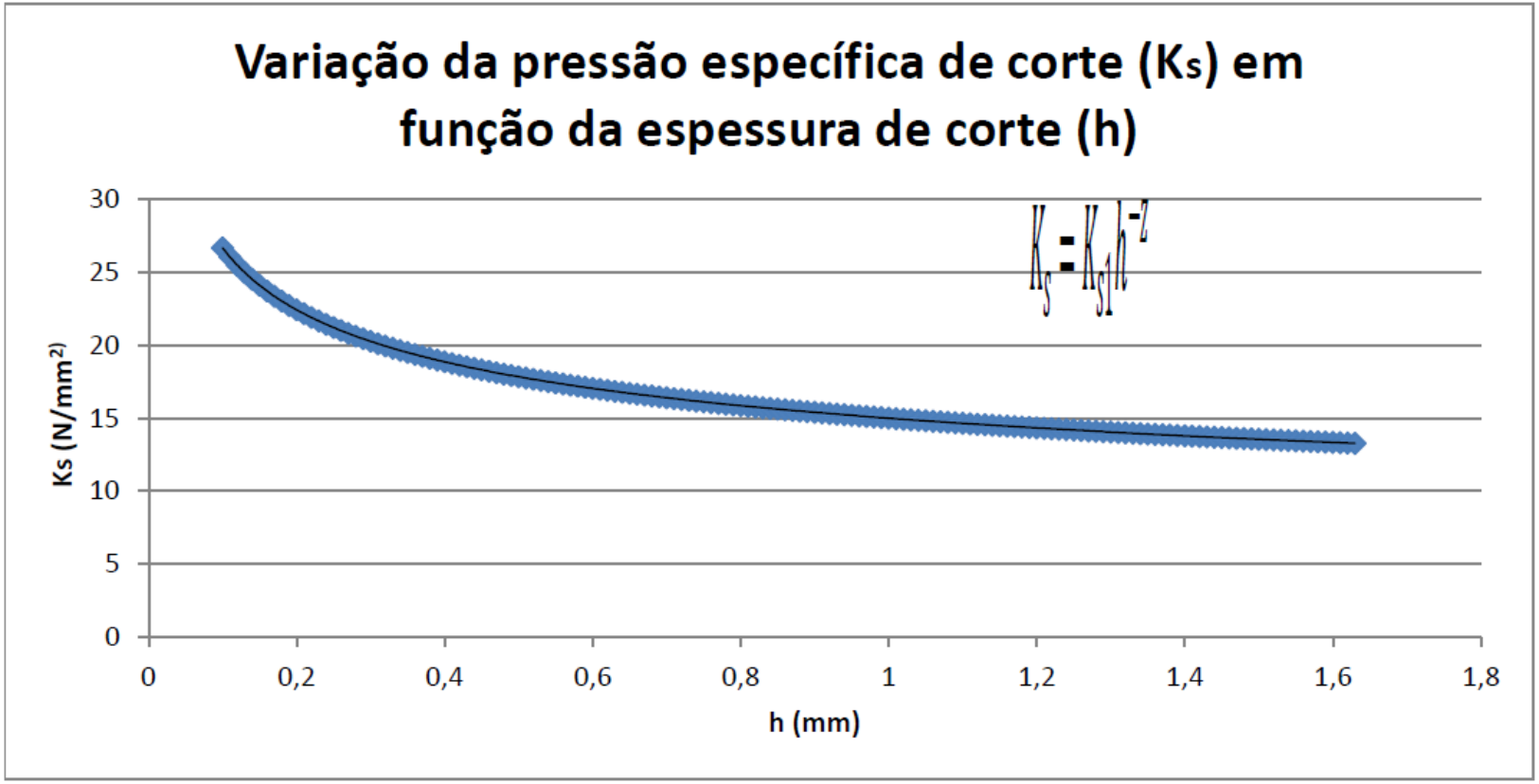
Sabendo que a área da seção de corte pode ser dada pelo produto entre a largura de corte (b) e a seção de corte (h) e renomeando os por Ks, para ajuste de simbologia e terminologia, a equação da força de corte pode ser dada pela equação 6:

$F_c = K_s bh$	(6)

Onde K_s é a pressão (tensão) específica de corte.

A partir da experimentação realizada, foi observado que o valor da pressão específica de corte varia com a espessura de corte (h), tal como mostrado na figura a seguir.

Equação de Kienzle ...

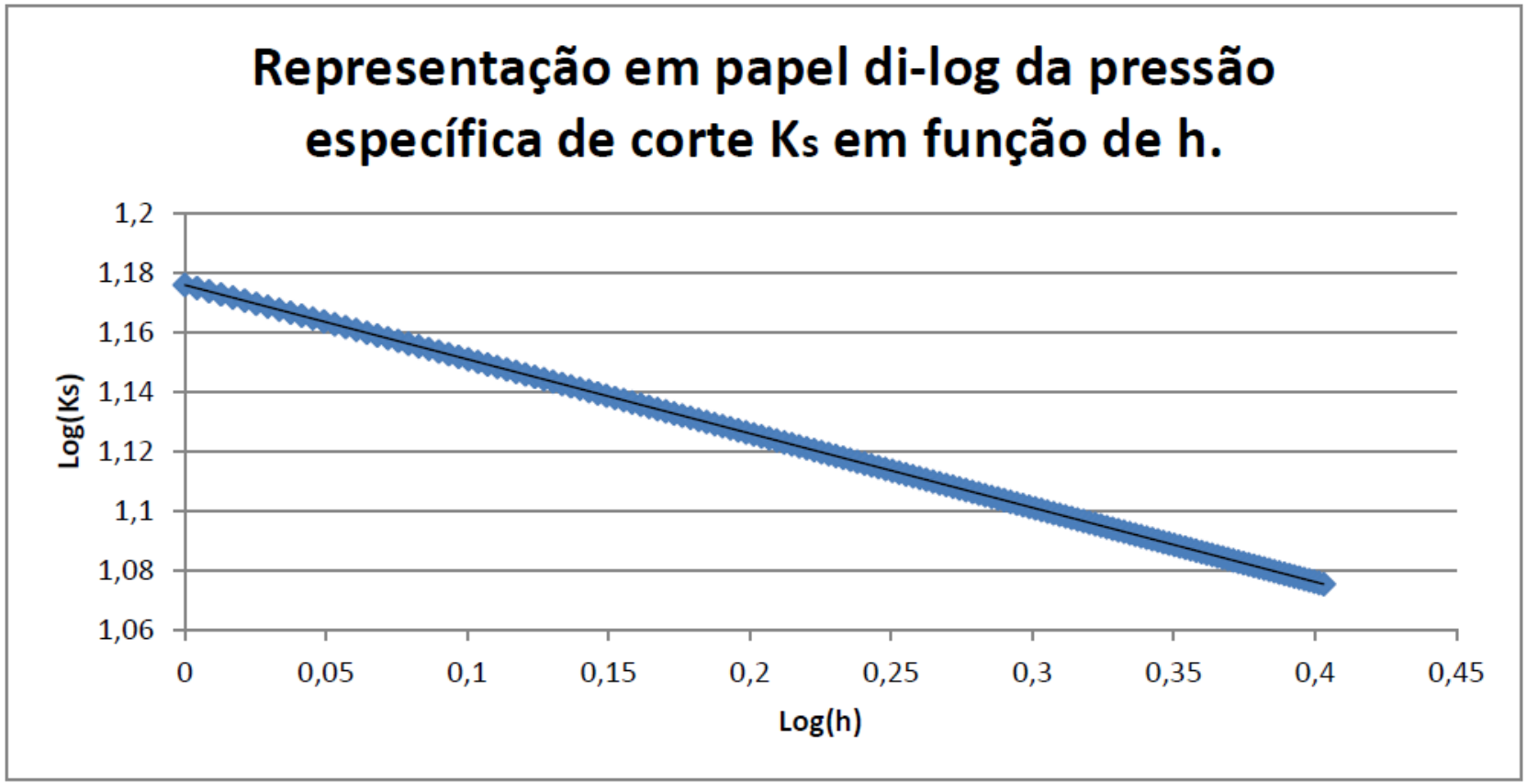


A relação entre Ks e h pode ser expressa por uma função de potência, tal como definido pela equação 7.

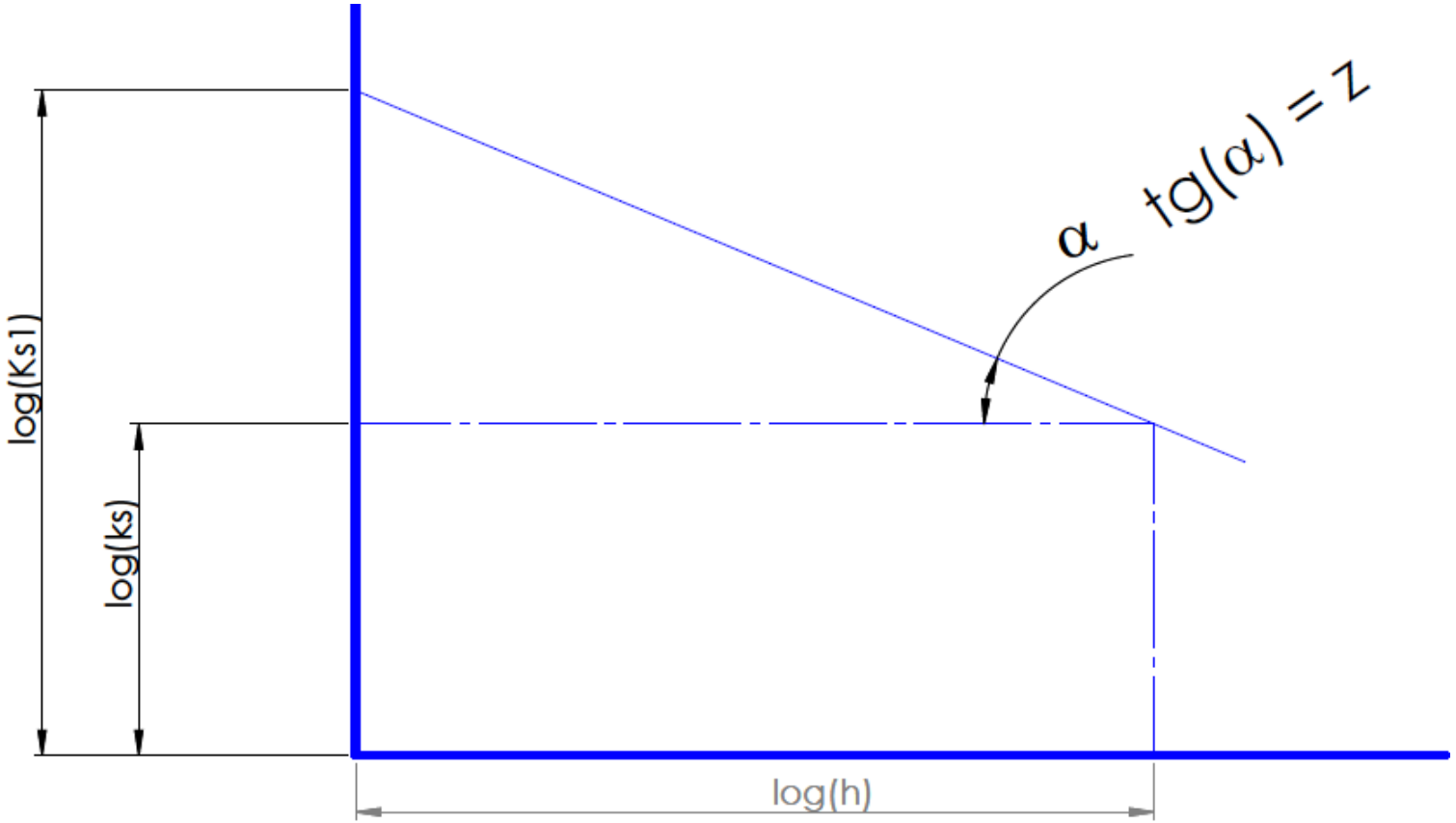
$K_s = K_{s1} h^{-z}$	(7)

Equação de Kienzle ...

A equação 7 pode ser obtida a partir da linearização da curva KsXh, simplesmente representando essas grandezas em gráfico Log-Log (di-log). Considerando apenas os valores positivos de log(h), a sua forma final é dada pela figura abaixo. Neste caso, K_{S1} é o valor da pressão especifica para a espessura de corte = 1.



Equação de Kienzle ...



$z = \frac{(\log(K_{s1}) - \log(K_s))}{\log(h)}$	$z\log(h) = \log\left(\frac{K_{s1}}{K_s}\right)$
$\log(h^z) = \log\left(\frac{K_{s1}}{K_s}\right)$	$h^z = \frac{K_{s1}}{K_s}$
$K_s = K_{s1}h^{-z}$	

Equação de Kienzle (forma final)

Substituindo (7) em (6), temos a equação de Kienzle na sua forma final:

$$F_c = K_{s1} b h^{(1-z)} \quad (8)$$

O valor da força de corte pode ser corrigido em função da variação do ângulo de saída (**g**), tal como indicado pela equação 9.

$$F_c = (1 - 0{,}01\gamma) K_{s1} b h^{(1-z)} \quad (9)$$

Os valores de K_{S1} podem ser obtidos, para vários materiais de peças, nos catálogos dos fabricantes de ferramentas de corte. Além disso, a equação de Kienzle pode ser adaptada para estimação das forças nos processos de furação e fresamento.