



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO**  
**CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E PRODUÇÃO**

**DIEGO GALDEZ COSTA**

**Estudo dos Fatores que Influenciam os  
Diferentes Tipos e Formas de Cavacos durante  
o Processo de Usinagem**

**SÃO LUÍS**

**2017**

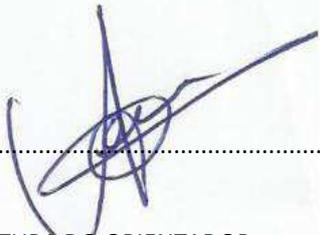
**DIEGO GALDEZ COSTA**

# **Estudo dos Fatores que Influenciam os Diferentes Tipos e Formas de Cavacos durante o Processo de Usinagem**

Monografia de graduação apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Jean Robert P. Rodrigues

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA MONOGRAFIA DEFENDIDA PELO ALUNO DIEGO GALDEZ COSTA, E ORIENTADA PELO PROF. DR. JEAN ROBERT P. RODRIGUES



ASSINATURA DO ORIENTADOR

**SÃO LUÍS**

**2017**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO**

**CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E PRODUÇÃO**

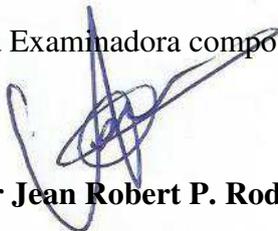
**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**Estudo dos Fatores que Influenciam os  
Diferentes Tipos e Formas de Cavacos durante  
o Processo de Usinagem**

Autor: Diego Galdez Costa

Orientador: Prof. Dr. Jean Robert P. Rodrigues

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Monografia:



**Prof. Dr. Jean Robert P. Rodrigues**

**Universidade Estadual do Maranhão**

**Prof. Kaio Henrique Ferreira Nogueira de Nogueira**

**Universidade Estadual do Maranhão**

**Prof. Washington da Silva Nascimento**

**Universidade Estadual do Maranhão**

São Luís/MA, 15 de dezembro de 2017.

Costa, Diego Galdez.

Estudo dos fatores que influenciam os diferentes tipos e formas de cavaco durante o processo de usinagem / Diego Galdez Costa. – São Luís, 2017.

80f.

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual do Maranhão, 2017.

Orientador: Prof. Dr. Jean Robert Pereira Rodrigues.

1. Usinagem. 2. Cavaco. 3. Quebra cavaco. I. Título.

CDU 621.7

## DEDICATÓRIA

Para meus familiares, amigos e todos aqueles que tornaram este trabalho possível.

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Jean Robert P. Rodrigues pelo apoio e orientação, que foram essenciais para alcançar este objetivo;

À minha mãe por todo o incentivo e apoio.

À minha família e amigos por ficarem ao meu lado e me ajudando da forma que era possível.

## RESUMO

O processo conhecido como Usinagem, tem como objetivo dar a uma peça um determinado formato retirando o excesso de material de acordo com as especificações solicitadas, para atender a necessidade de utilização. A esse material retirado, dá-se o nome de Cavaco. Este trabalho abordará os fatores que influenciam na formação do cavaco através de revisão bibliográfica e mostrando como esses fatores alteram o tipo e forma do cavaco, além de avaliar como eles influenciam no processo de usinagem como um todo. Para tal é necessário focar em pontos importantes como a geometria e material das ferramentas de corte, analisando os melhores materiais de acordo com a peça e o processo. Analisar as condições de corte, avanço, recuo, ver como elas interagem com o sistema e afetam o resultado final, bem como as características do material da peça e como eles são determinantes para a forma do cavaco. Saber como e quando é necessária a utilização de quebra cavacos e fluidos de corte afim de obter um melhor resultado na usinagem de materiais melhorando o resultado e garantindo o máximo de segurança no processo. Conhecer esses fatores e saber como eles influenciam no resultado final contribui para que o processo seja o mais seguro e econômico possível, portanto precisa de atenção e cuidado na escolha.

Palavras-chaves: Usinagem, cavaco, fluidos de corte, quebra-cavaco

## **ABSTRACT**

The process known as Machining, aims to give a piece a certain format by removing excess material according to the specifications requested, to meet the need for use. To this material removed, the name of Cavaco is given. This work will address the factors that influence the formation of the chip through a bibliographic review and showing how these factors alter the type and shape of the chip, and evaluate how they influence the machining process as a whole. To do this, it is necessary to focus on important points such as the geometry and material of the cutting tools, analyzing the best materials according to the part and the process. Analyze the cutting conditions, indent advance, see how they interact as the system and affect the end result. In the material characteristics of the part and how they are determining for the shape of the chip result. Know how and when it is necessary to use chip breaking and cutting fluids in order to obtain a better result in the machining of materials improving the result and ensuring the maximum safety process. Knowing these factors and knowing how they influence the final result contributes to making the process as safe and economical as possible, so you need attention and care in choosing.

Keywords: Machining, chip, cutting fluids, chipbreaker

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 - Classificação dos processos de fabricação .....	19
Figura 2-2: Fresamento tangencial e frontal, concordante e discordante, respectivamente .....	21
Figura 2-3: Fresamento tangencial (a) e frontal (b).....	22
Figura 2-4: Variações do processo de furação.....	23
Figura 2-5: Mecanismo de formação de cavaco no corte ortogonal.....	25
Figura 2-6: Direções dos movimentos de corte, avanço e efetivo no torneamento.....	27
Figura 2-7: Percurso de corte $L_c$ , percurso de avanço $L_f$ e percurso efetivo $L_e$ para o fresamento discordante .....	28
Figura 2-8: Avanço por dente $f_z$ , avanço de corte $f_c$ e avanço efetivo $f_e$ no fresamento discordante.....	30
Figura 2-9: Largura de usinagem $a_p$ , penetração de trabalho $a_e$ e penetração de avanço $a_f$ , no fresamento periférico .....	31
Figura 2-10: Corte ortogonal no torneamento .....	32
Figura 2-11: Exemplos de corte ortogonal .....	33
Figura 2-12: Processo de formação do cavaco .....	35
Figura 2-13: Modelo simplificado para formação de cavaco – corte ortogonal.....	36
Figura 2-14: Formas de cavaco produzidos na usinagem dos metais .....	40
Figura 2-15: Classificação dos padrões de cavacos.....	42
Figura 2-16: Fluxo lateral e inverso do cavaco (a) fotografia; (b) representação esquemática .....	45
Figura 2-17: Direção de fluxo lateral do cavaco .....	46
Figura 2-18: Seção transversal de corte do quebra-cavacos.....	48

Figura 2-19: Representação esquemática dos modos de curvatura do cavaco: (a) vertical; (b) lateral .....	49
Figura 2-20: Diferentes formas de fluxo e curvatura do cavaco: (a) alta curvatura lateral a baixas profundidades de corte; (b) alta curvatura vertical a altas profundidades de corte .....	50
Figura 2-21: Curvatura lateral .....	50
Figura 2-22: Influência da variação da velocidade do cavaco no fluxo lateral .....	51
Figura 2-23: Raio de curvatura vertical do cavaco.....	52
Figura 2-24: Elementos da cunha de corte de uma ferramenta de torneiar .....	54
Figura 2-25: Ângulos de cunha, onde: (a) pastilha positiva com ângulo de folga de .....	54
Figura 2-26: Formato de pastilhas e suas características.....	55
Figura 3-1: Influência do Avanço e Profundidade na forma do cavaco .....	56
Figura 3-2: Exemplo de diagrama de cavacos.....	60
Figura 3-3: Influência da profundidade de corte no raio de curvatura natural do cavaco .....	61
Figura 3-4: Influência do avanço no raio de curvatura natural do cavaco .....	61
Figura 3-5: Influência do ângulo de saída no raio de curvatura natural do cavaco.....	62
Figura 3-6: Influência da velocidade de corte no raio de curvatura natural do cavaco.....	62

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Síntese dos dados de entrada e da investigação dos cavacos gerados .....	57
Tabela 3.2: Formas dos cavacos e condições de corte do aço ABNT 1045 para ferramentas sem revestimento .....	63
Tabela 3.3: Formas dos cavacos e condições de corte do aço ABNT 1045 para ferramentas revestidas .....	64
Tabela 3.4: Formas dos cavacos e condições de corte do ferro fundido nodular para ferramentas sem revestimento .....	65
Tabela 3.5: Formas dos cavacos e condições de corte do ferro fundido nodular para ferramentas revestidas .....	66

**LISTA DE ABREVIATURAS**

CNC	Comando numérico computadorizado
ASM	AMERICAN SOCIETY for METALS
DIN	Deutsches Institut für Normung (norma alemã)
APC	Aresta Postiça de Corte
ISO	International Organization for Standardization
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
HP	potência
TiN	Nitreto de Titânio
VBMT	pastilha de metal duro
MQF	Mínima Quantidade de Fluido

**LISTA DE SÍMBOLOS**

$a_e$	penetração de trabalho
$a_p$	profundidade ou largura de usinagem
$r_\epsilon$	raio de ponta
$F_c$	força de corte
$F_f$	força de avanço
$F_p$	força passiva
$V_c$	velocidade de corte
$V_{cav}$	velocidade de saída do cavaco
$h$	espessura de corte
$h'$	espessura de cavaco
$\gamma_0$	ângulo de saída da ferramenta
$\varphi$	ângulo de cisalhamento
$L_c$	percurso de corte
$L_f$	percurso de avanço
$L_e$	percurso efetivo
$\varphi$	diâmetro da peça ou da ferramenta
$n$	número de rotações por minuto
$V_f$	velocidade de avanço
$f$	avanço
$V_e$	velocidade efetiva de corte
$f_z$	avanço por dente
$z$	número de dentes
$f_c$	avanço de corte
$f_e$	avanço efetivo de corte

$a_f$	penetração da ferramenta
$b$	largura de corte
$R_c$	grau de recalque
$\chi_r$	ângulo de posição da aresta de corte
$\psi_l$	ângulo de fluxo lateral
$\psi_i$	ângulo de fluxo inverso
$k$	constante (material da peça)
$R_l$	curvatura lateral
$R_v$	curvatura vertical
$\lambda_s$	ângulo de inclinação da ferramenta
$h_{eq}$	altura equivalente
$l_{eq}$	percurso equivalente
$S$	aresta principal de corte
$S'$	aresta secundária de corte
$A_\alpha$	superfície principal de folga
$A'_\alpha$	superfície secundária de folga
$A_\gamma$	superfície de saída

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>18</b>
<b>2.1. Usinagem.....</b>	<b>18</b>
2.1.1. Fresamento .....	20
2.2.2. Furação .....	22
2.2.3. Torneamento.....	24
<b>2.2. Grandezas físicas no processo de corte .....</b>	<b>25</b>
2.2.1 Movimentos.....	25
2.1.2. Direções dos movimentos .....	26
2.1.3. Percursos da ferramenta na peça .....	27
2.1.4. Velocidades .....	28
2.1.5. Grandezas de Corte .....	29
<b>2.3. Formação do Cavaco .....</b>	<b>31</b>
2.3.1 Mecanismo de formação do cavaco .....	33
2.3.2. Ângulo de cisalhamento e Grau de recalque .....	36
2.3.3 Tipos de Cavacos .....	37
2.3.4. Formas de cavacos .....	39
<b>2.4. Controle de Cavacos .....</b>	<b>42</b>
2.4.1. Quebra cavacos .....	43
<b>2.5. Fluxo de Cavaco .....</b>	<b>44</b>
2.5.1 Fluxo Lateral do Cavaco .....	45
2.5.2 Fluxo Invertido do Cavaco .....	47
<b>2.6. Curvatura do Cavaco .....</b>	<b>48</b>
2.6.1. Curvatura Lateral do Cavaco.....	50
2.6.2 Curvatura Vertical do Cavaco .....	51
<b>2.7. Ferramentas de Corte.....</b>	<b>53</b>
<b>3. FATORES QUE INFLUENCIAM NA FORMAÇÃO DO CAVACO .....</b>	<b>56</b>
<b>3.1. Influência de fatores específicos na formação do cavaco .....</b>	<b>56</b>
<b>4. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>68</b>
<b>4.1. Considerações finais.....</b>	<b>68</b>

<b>4.2. Sugestões para trabalhos futuros .....</b>	<b>70</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>71</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O processo de Usinagem consiste em transformar a matéria-prima em produto acabado, promovendo deformação plástica na região do corte e removendo material excedente através do movimento relativo de rotação e translação entre uma ou mais ferramentas e a peça (TRENT; WRIGHT, 2000; SHAW, 2005; FERRARESI, 2011; MACHADO *et al*, 2011).

A usinagem dividida em duas categorias de acordo com a energia empregada para remover o material. Na usinagem tradicional (ou convencional) o material é removido por cisalhamento devido à ação de uma ferramenta de corte. Como exemplos de processos tradicionais de usinagem têm-se o torneamento, fresamento, furação, alargamento, rosqueamento, retificação, brochamento, etc. Os processos não tradicionais (ou não convencionais) empregam outras modalidades de energia para remover o material como ultrassom, laser, plasma, fluxo abrasivo, reações químicas ou eletroquímicas, feixe de elétrons, etc. (SANTOS; SALES, 2005)

Cavaco é a denominação dada à porção de material que é removida da peça. Outros processos de fabricação também retiram material da peça como a estampagem, a retificação, entre outros, mas o modo com que o material é retirado da peça apresenta algumas diferenças em relação à usinagem. Como exemplo, na usinagem tem-se ferramentas com geometria e quantidades definidas atuando sobre a peça, enquanto na retificação o número de ferramentas (grãos abrasivos) atuantes é muito grande e as ferramentas não possuem geometria definida. Além disso, eles estão aleatoriamente distribuídos sobre a superfície do rebolo e nesse caso, a retificação é enquadrada como um processo abrasivo, assim como o brunimento e a lapidação. (SANTOS; SALES, 2005)

A base para um melhor entendimento de todos os processos de usinagem está no estudo científico da formação de cavacos. Esse estudo tem proporcionado grandes avanços nos processos de usinagem e contribuído para o aperfeiçoamento das arestas de corte, com quebra-cavacos cada vez mais eficientes, além de novos e mais eficazes materiais para ferramentas e a possibilidade de usinar os mais variados tipos de materiais. Sabe-se que o cavaco é formado em altíssimas velocidades de deformação, seguidas de ruptura do material da peça. (MACHADO *et al*, 2009)

Apesar do cavaco ser parte do material retirado da peça, o seu estudo tem grande importância no resultado do processo, pois se não analisado de forma correta, pode ser prejudicial e atrapalhar o resultado final. Mesmo sendo muito conhecido, o mecanismo de formação do cavaco não é um processo simples, pois as velocidades e as deformações que ocorrem são muito grandes comparadas com aquelas tratadas na teoria da plasticidade (FERRARESI, 1970). Conhecer as variáveis e fatores que influenciam na formação, torna-se de vital importância para que o processo corra bem e para que o resultado pretendido seja alcançado da forma mais rápida e econômica possível.

A formação do cavaco influencia em diversos fatores ligados a usinagem, tais como o desgaste da ferramenta, os esforços de corte, o calor gerado usinagem, penetração do fluido de corte, entre outros. Assim, estão envolvidos com o processo de formação do cavaco aspectos econômicos e de qualidade da peça, a segurança do operador, a utilização adequada de máquina-ferramenta, etc. (DINIZ *et al*, 2006)

Compreender a formação de cavacos é o primeiro passo para um bom controle do cavaco, uma necessidade para usinagem automatizada. Além disso, uma carência no controle do cavaco frequentemente resulta numa superfície usinada rugosa, pobre acuracidade na usinagem e problemas com a remoção de cavacos da zona de usinagem (ASTAKHOV *et al*, 1997).

De acordo com KISHAWY e WILCOX, 2003, entender o mecanismo de formação de cavacos é essencial para alcançar uma melhor percepção dos fundamentos do processo de usinagem. TRENT e WRIGHT (2000) afirmam que os principais problemas práticos e econômicos relacionados com taxa de remoção de material e desempenho da ferramenta, podem ser entendidos através do estudo do comportamento do material de trabalho, da maneira que o cavaco é formado e como este se move sobre a superfície de saída da ferramenta.

O objetivo deste trabalho é apresentar um estudo descrevendo os fatores que influenciam na formação do cavaco. Mostrar quais e como eles interferem nessa formação, como os materiais das peças e das ferramentas, fluidos de corte, as condições de corte, e as alterações que essas variáveis causam no tipos e formas dos cavacos resultantes.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Usinagem

Dá-se o nome de usinagem a operação de fabricação que remove material com uma ferramenta de corte afim de obter uma geometria final em determinada peça. O processo de usinagem moderna, assim como os demais processos produtivos, exige redução nos custos de produção e desenvolvimentos de novas tecnologias que resultem em alta qualidade nos produtos finais. (FRATILA, 2009). Estes processos podem ser classificados como processos de corte (Torneamento, fresamento e furação), processos abrasivos (retificação) e processos não-tradicionais (elétricos, ópticos e químicos). (KALPAKJIAN, 2000)

As operações de usinagem dividem-se em processos de usinagem convencional e não convencional (Figura 2-1). Dentre os processos de usinagem convencionais o torneamento, a furação e o fresamento recebem destaque.

As operações convencionais de usinagem podem ser executadas com ferramentas de geometria definida (remoção de material por deformação plástica) ou com ferramentas sem geometria definida (remoção de material por abrasão). Quando o processo utiliza ferramenta de geometria definida, suas operações podem ser agrupadas em desbaste e acabamento superficial. No desbaste, a principal preocupação é garantir elevada taxa de remoção de material. Já no acabamento, a prioridade é a qualidade final do material desbastado (MACHADO et al., 2011)

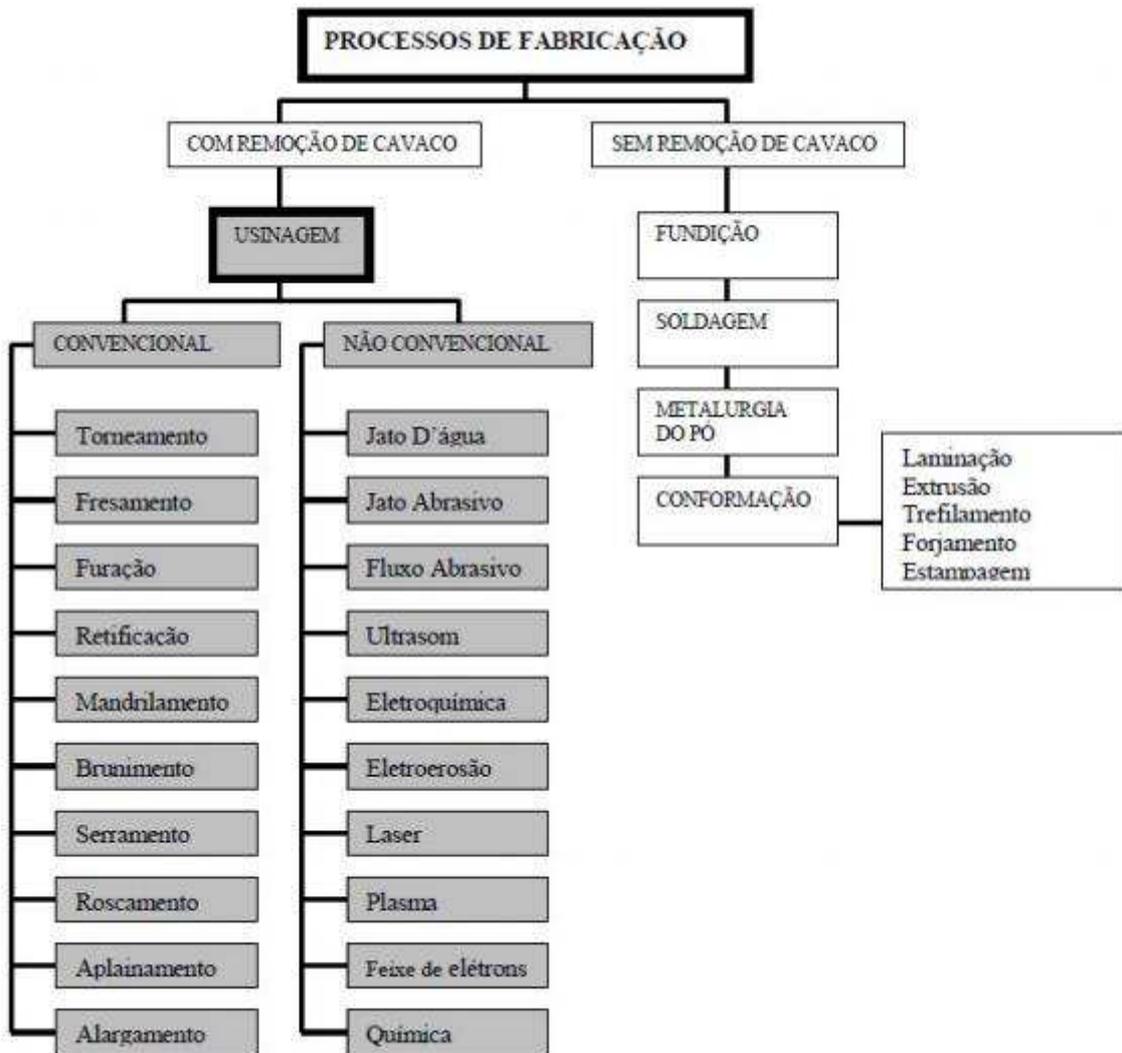


Figura 2-1 - Classificação dos processos de fabricação (MACHADO *et al*, 2011)

O torneamento é um processo de corte, no qual a peça, em geral, executa o movimento rotativo em torno do eixo principal da máquina; e a ferramenta se desloca simultaneamente segundo uma trajetória coplanar. O corte no torneamento inicia-se quando a ferramenta penetra na peça, fazendo com que uma pequena porção do material seja deformada elástica e plasticamente, aumentando as tensões até que ocorra o cisalhamento do material e este escoe sobre a superfície da face da ferramenta, formando o cavaco. (TRENT e WRIGHT, 2000).

Este processo é um dos mais utilizados dentro da indústria, por ser de fácil operação e economicamente viável, apresentando expressiva participação na fabricação de peças usinadas (MACHADO *et al*, 2011). Com torneamento é possível realizar:

- Torneamento longitudinal;

- Faceamento;
- Torneamento de perfis;
- Torneamento de roscas;
- Torneamento de geração;
- Torneamento de forma.

A operação de usinagem no presente trabalho foi realizada em um torno de comando numérico computadorizado (CNC). Uma operação convencional utilizando ferramenta de geometria definida.

#### 2.1.1. Fresamento

FERRARESI, RUFFINO e PALLEROSI (1974), mencionam fresamento como a operação de usinagem com formação de cavaco que se caracteriza por: a ferramenta multicortante, dita fresa, é provida de arestas cortantes dispostas simetricamente ao redor de um eixo; a ferramenta é provida de um movimento de rotação ao redor de seu eixo, permitindo assim que cada uma das arestas cortantes (ditos dentes da fresa) retire a parte de material que lhe compete; 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, (raramente o movimento de avanço é feito pela própria ferramenta); o movimento de avanço obriga a peça a passar sob a ferramenta que lhe dá a forma e dimensão desejadas.

A AMERICAN SOCIETY for METALS (ASM) define fresamento como o processo de usinagem no qual o material é removido pelo movimento rotativo da ferramenta multicortante; cada ferramenta remove uma pequena quantidade de metal a cada revolução do eixo árvore. A peça e a ferramenta de corte podem se movimentar em mais de uma direção ao mesmo tempo, assim qualquer superfície pode se usinada. (METALS HANDBOOK, 1989).

Para DINIZ, MARCONDES e COPPINI (2001), o fresamento é a operação de usinagem que se caracteriza por: a ferramenta, chamada fresa, que é provida de arestas cortantes dispostas simetricamente em torno de um eixo; o movimento de corte é proporcionado pela rotação da fresa ao redor do seu eixo; o movimento de avanço é geralmente feito pela própria

peça em usinagem, que está fixada na mesa da máquina, o qual obriga a peça a passar sob a ferramenta em rotação.

Conforme STEMMER (2005), fresamento é um processo de usinagem no qual a remoção de material da peça se realiza de modo intermitente, pelo movimento rotativo da ferramenta que geralmente é multicortante, assim, é possível gerar superfícies das mais variadas formas.

DINIZ, MARCONDES e COPPINI (2001), esclarecem que os principais tipos de fresamento são o tangencial (Figura 2-2 - a e b) e o frontal (Figura 2-2 - c e d), e o corte pode ser concordante ou discordante. O fresamento tangencial realiza grande parte da usinagem na superfície cilíndrica da ferramenta ( $a_p > a_e$ ), e o fresamento frontal age na superfície frontal da ferramenta ( $a_e > a_p$ ), em que  $a_e$  é a penetração de trabalho e  $a_p$  é a profundidade de usinagem. O corte concordante ocorre quando o sentido do movimento de avanço da peça tem o mesmo sentido do movimento de rotação da fresa. Já no corte discordante, o sentido de movimento da peça é ao contrário do movimento de rotação da fresa:

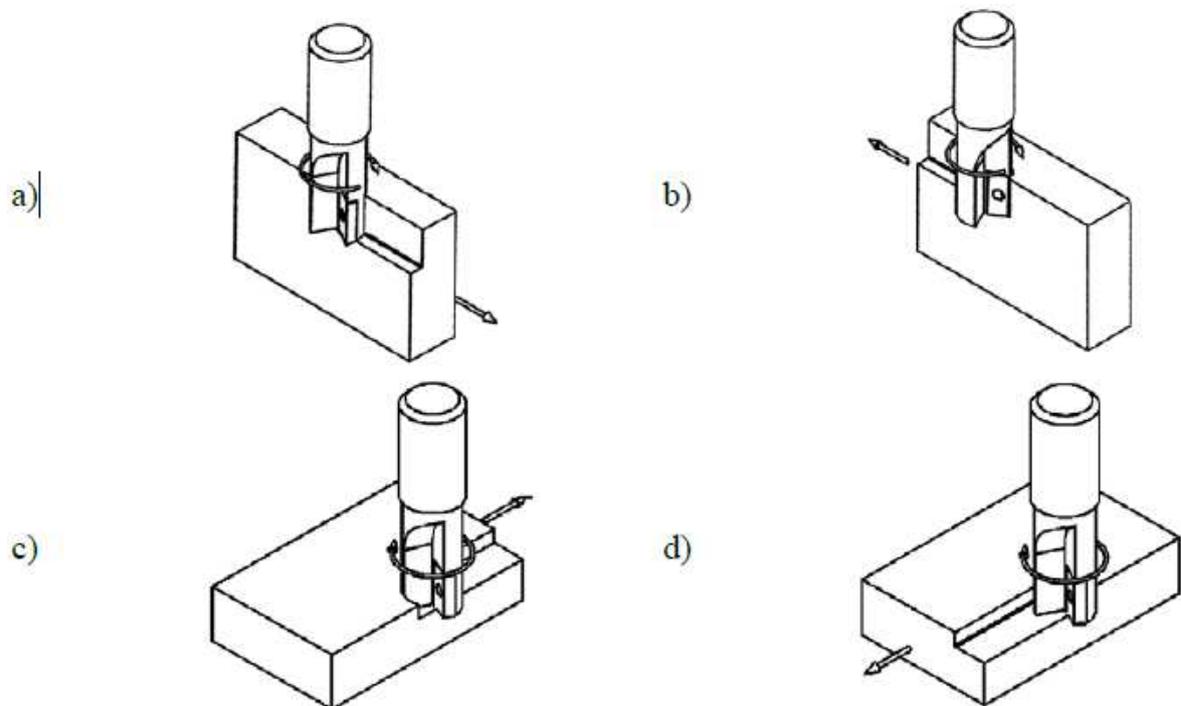


Figura 2-2: Fresamento tangencial e frontal, concordante e discordante, respectivamente. (STEMMER 2005)

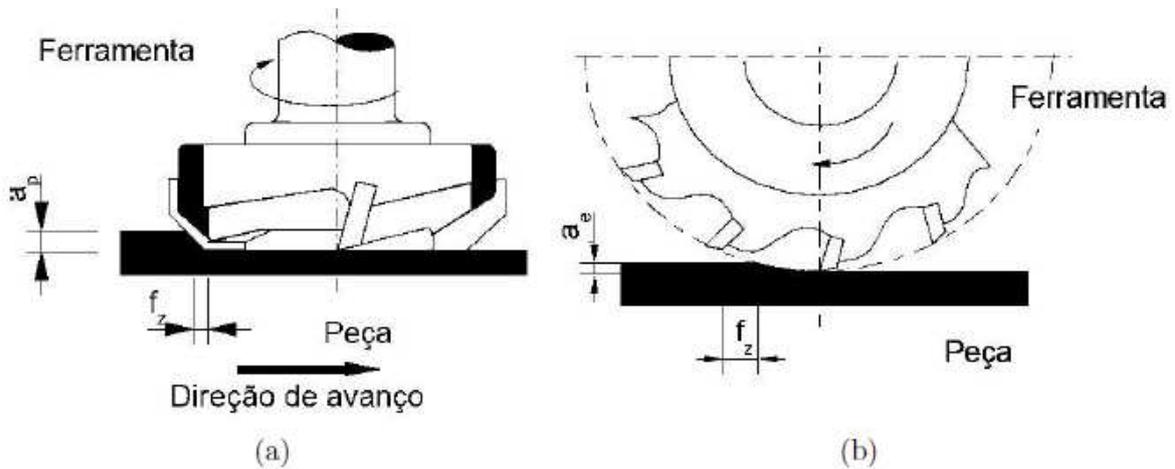


Figura 2-3: Fresamento tangencial (a) e frontal (b) (STEMMER 2005)

### 2.2.2. Furação

Com base na norma alemã DIN 8589, a furação é definida como um processo de usinagem com movimento de corte circular, ou seja, com movimento rotativo principal. A ferramenta possui movimento de avanço apenas na direção do seu eixo de rotação, que mantém a posição em relação à ferramenta e à peça (CASTILLO, 2005). FERRARESI (1977), define furação como: “*um processo mecânico de usinagem, utilizado para a obtenção de um furo, geralmente cilíndrico, numa peça com auxílio de uma ferramenta, geralmente multicortante. Para tanto, a ferramenta ou a peça gira e, simultaneamente, a ferramenta ou a peça se desloca segundo uma trajetória retilínea, coincidente ou paralela com o eixo principal de rotação da máquina. O processo de furação pode subdividir-se em operações de furação em cheio, escareamento, furação escalonada, furação de centros, trepanação, entre outros. A ferramenta destinada a este processo denomina-se broca*”.

HARBER *et al* (2007), comenta que a furação convencional continua sendo um dos processos mais comuns de operação de usinagem na indústria de transformação, sendo que, em alguns países, este tipo de processo representa quase 50% de todas as operações de usinagem. Este processo é usado em conjunto com grande parte dos processos de fabricação a fim de prover elementos de fixação, muitas vezes de importância secundária, ou pré-furo para acabamento através de outros processos de usinagem, como: alargamento, brochamento,

mandrilamento, torneamento interno, retificação interna, entre outros. A importância da operação de furação pode ser avaliada também pelo consumo de ferramentas. Estima-se que o consumo mundial de brocas seja da ordem de 250 milhões de unidades por ano (AMORIM, 2003; VIANA, 2004).

As operações de furação são consideradas, atualmente, as mais difíceis de serem realizadas dentre os processos de usinagem. Isto se dá devido à broca, durante o processo de furação, ter a finalidade de produzir o furo e, ao mesmo tempo, retirar o cavaco o mais rápido possível, de modo a evitar o atrito dos cavacos com as paredes da peça, o que irá conduzir a um aumento nos esforços de corte, podendo levar, conseqüentemente, à quebra da broca. Durante a furação, as brocas também têm a função de deixar penetrar, ou facilitar, a condução do fluido de refrigeração até a região mais próxima da aresta de corte, local este onde há um acréscimo de temperatura devido ao atrito produzido entre a broca e a peça (esse aumento de temperatura colabora para o aumento do desgaste, diminuindo, assim, a vida útil da broca) (PENG *et al*, 2007, STEMMER, 2001; WANG e ZHANG, 2008). A Figura 2-4 mostra alguns tipos de processo de furação.

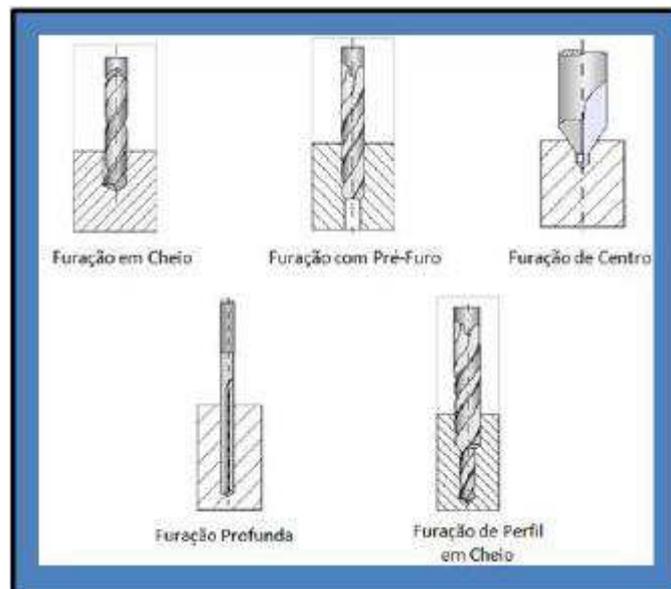


Figura 2-4: Variações do processo de furação. (STOETERAU, 2007).

### 2.2.3. Torneamento

O torneamento, segundo FERRARESI (1977), é um processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies de revolução com o auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes. O processo permite que seja realizada uma série de operações. Torneamento cilíndrico externo e interno, torneamento cônico externo e interno, faceamento, perfilamento são alguns exemplos (MACHADO *et al*, 2009).

No corte ortogonal, em processo de torneamento, a aresta de corte é uma reta normal à direção de corte e à direção de avanço, de maneira que a formação do cavaco pode ser considerada um fenômeno bidimensional, e que ocorre em um plano normal à aresta cortante, ou seja, no plano de trabalho (MACHADO *et al*, 2009).

O corte semi-ortogonal é semelhante ao corte ortogonal, entretanto, a aresta de corte não tem a largura total da peça, e possui uma parte composta pelo raio de ponta da ferramenta,  $r_\epsilon$  (CHILDS *et al*, 2000). Assim, como a aresta de corte não é totalmente reta, o cavaco não possui a velocidade de saída perpendicular à aresta de corte. No entanto, se o raio de ponta da ferramenta for muito menor do que a largura de corte  $b$ ,  $r_\epsilon < b$  o corte semi-ortogonal é aproximadamente igual ao ortogonal (CHILDS *et al*, 2000; BARBOSA, 2014). Esse tipo de corte possui uma importância em ensaios experimentais de usinagem devido à sua maior facilidade de obtenção em relação ao corte ortogonal.

No corte oblíquo, a aresta de corte está orientada em um ângulo de inclinação,  $\lambda_s$ , de tal forma que, além das forças de corte,  $F_c$ , e de avanço,  $F_f$ , surge uma terceira força adicional, na direção radial, chamada de força passiva,  $F_p$  (ALTINTAS, 2012). Esse tipo de corte é muito comum no processo de torneamento em aplicações de industriais.

A Figura 2-5 mostra uma representação do mecanismo de formação do cavaco no corte ortogonal. De acordo com o modelo, o material definido pela seção  $klmn$  se desloca em uma velocidade ( $V_c$ ), em direção à cunha de corte da ferramenta. Ao atingir a região de cisalhamento primária, indicada na figura pela linha tracejada  $OD$ , o material sofre uma deformação plástica intensa, se rompe e forma a seção  $pqrs$  enquanto entra em contato com a superfície de saída da ferramenta na direção  $OB$ , formando o cavaco. A região representada pelo segmento  $OB$  da figura forma o plano de cisalhamento secundário (TRENT e WRIGHT, 2000; MACHADO *et*

al, 2009).  $V_c$  = velocidade de corte;  $V_{cav}$  = velocidade de saída do cavaco;  $h$  = espessura de corte;  $h'$  = espessura do cavaco;  $\gamma_0$  = ângulo de saída da ferramenta;  $\Phi$  = ângulo de cisalhamento.

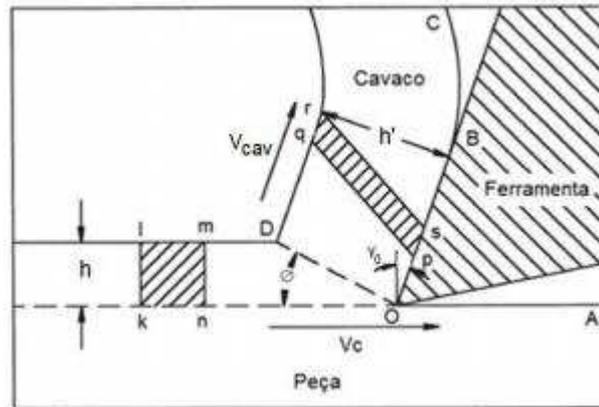


Figura 2-5: Mecanismo de formação de cavaco no corte ortogonal (TRENT e WRIGHT 2000).

O corte ortogonal, no qual o processo de formação de cavaco é considerado um fenômeno bidimensional, introduz algumas simplificações no processo de corte que facilitam o estudo do fenômeno, e cujas conclusões podem ser aplicáveis ao corte tridimensional (FERRARESI, 1977; SHAW, 2005; BARBOSA, 2014).

## 2.2. Grandezas físicas no processo de corte

Segundo SANTOS e SALES (2005) usinagem é o processo de fabricação em que a transformação da matéria-prima em produto se dá pela remoção de material em forma de cavacos. A remoção do cavaco só é possível devido a uma série de movimentos relativos entre a ferramenta e a peça.

### 2.2.1 Movimentos

Segundo MACHADO *et al* (2009) os movimentos nas operações de usinagem são movimentos relativos entre a peça e a aresta cortante e a peça considerada estacionária. Podem-se distinguir dois tipos de movimentos: os que causam diretamente a saída de cavaco e os que

não tomam parte diretamente na sua retirada. As definições referem-se a um ponto genérico da aresta de corte.

Os movimentos que tomam parte direta na formação de cavaco são:

-Movimento de corte: movimento entre a peça e a ferramenta que, sem o movimento de avanço, origina uma única retirada de cavaco;

-Movimento de avanço: movimento que, associado ao movimento de corte, promove a retirada contínua de cavaco;

-Movimento efetivo: movimento resultante dos movimentos de corte e avanço.

Os movimentos que não tomam parte direta na formação do cavaco são:

-Movimento de aproximação: movimento entre a peça e a ferramenta com o qual a ferramenta se aproxima da peça, antes do início da usinagem.

-Movimento de ajuste: movimento entre a peça e a ferramenta com o qual é determinada a espessura de material da peça a ser retirada (ajuste da profundidade de corte).

-Movimento de correção: movimento para compensar o desgaste da ferramenta.

-Movimento de recuo: movimento com o qual a ferramenta é afastada da peça após a usinagem.

### 2.1.2. Direções dos movimentos

Segundo SANTOS e SALES (2005), devem-se distinguir as direções dos movimentos que causam diretamente a retirada de cavaco:

-Direção de corte: instantânea do movimento de corte.

-Direção de avanço: instantânea do movimento de avanço.

-Direção efetiva: instantânea do movimento efetivo de corte.

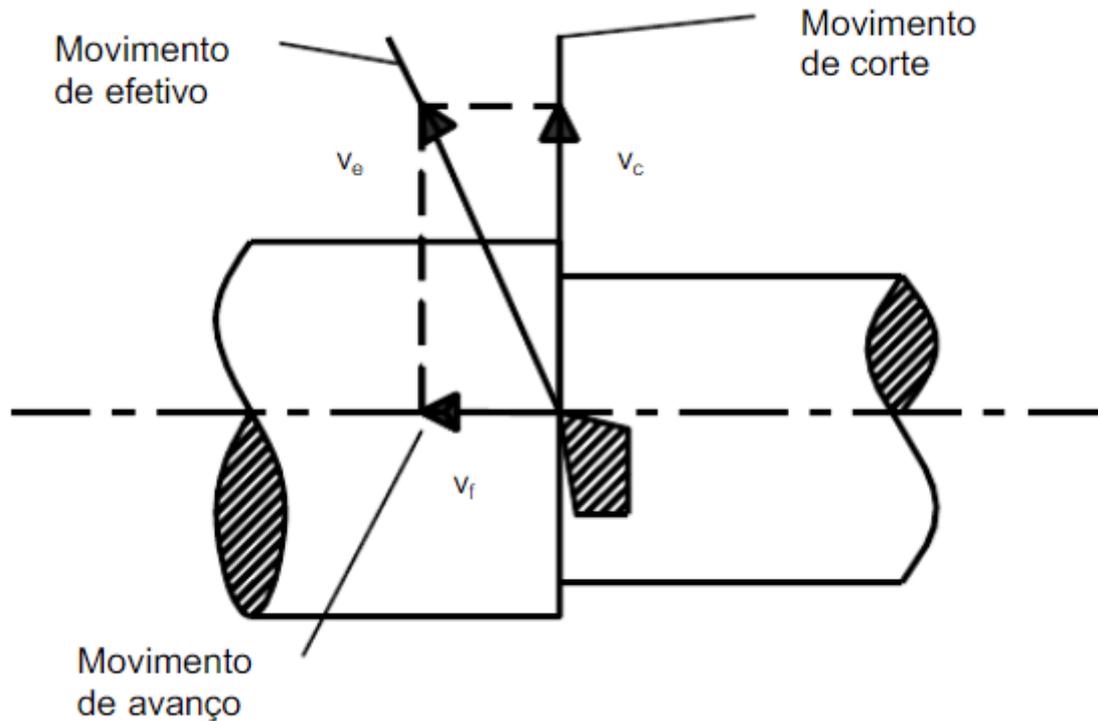


Figura 2-6: Direções dos movimentos de corte, avanço e efetivo no torneamento. (SANTOS e SALES, 2005).

### 2.1.3. Percursos da ferramenta na peça

Percurso de Corte  $L_c$ : é o espaço percorrido pelo ponto de referência da aresta cortante sobre a peça, segundo a direção de corte.

Percurso de Avanço  $L_f$ : é o espaço percorrido pelo ponto de referência da aresta cortante sobre a peça, segundo a direção de avanço. Nos casos em que haja movimento de avanço principal e avanço lateral, devem-se distinguir as componentes do percurso de avanço.

Percurso Efetivo  $L_e$ : é o espaço percorrido pelo ponto de referência da aresta cortante sobre a peça, segundo a direção efetiva do corte

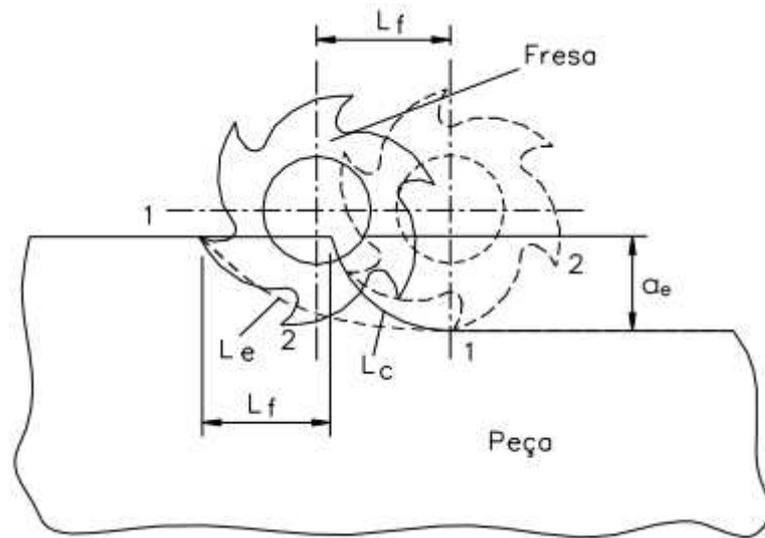


Figura 2-7: Percurso de corte  $L_c$ , percurso de avanço  $L_f$  e percurso efetivo  $L_e$  para o fresamento discordante. (MACHADO *et al*, 2009)

#### 2.1.4. Velocidades

Velocidade de Corte ( $V_c$ ): é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e sentido de corte. Para processos com movimentos de rotação, a velocidade de corte é calculada pela equação:

$$V_c = \frac{\pi \cdot \varphi \cdot n}{1000} \quad (2.1)$$

onde,

$\varphi$  = diâmetro da peça ou da ferramenta em mm;

$n$  = número de rotações por minuto.

Velocidade de Avanço ( $V_f$ ): velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e sentido de avanço. É dada por:

$$V_f = f \cdot n \quad (2.2)$$

Onde,

$f$  = avanço em mm/volta;

$n$  = número de rotações por minuto.

Velocidade Efetiva de Corte ( $V_e$ ): velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e o sentido efetivo do corte. É calculada vetorialmente como se segue:

$$V_e = V_c + V_f \quad (2.3)$$

Além destas podemos ter também as velocidades de aproximação, de ajuste, de correção e de recuo.

#### 2.1.5. Grandezas de Corte

São as grandezas que devem ser ajustadas na máquina direta ou indiretamente.

**Avanço ( $f$ ):** é o percurso de avanço em cada volta (mm/volta) ou em cada curso da ferramenta (mm/golpe).

No caso de ferramentas que possuem mais de um dente, como no caso do fresamento, distingue-se o avanço por dente  $f_z$ , (Figura 2-8). O avanço por dente é o percurso de avanço de cada dente, medido na direção do avanço da ferramenta, e corresponde à geração de duas superfícies em usinagem consecutivas. Vale a relação:

$$f = f_z \cdot z \quad (2.4)$$

onde,

$z$  = número de dentes.

O avanço por dente pode ainda ser decomposto no avanço de corte  $f_c$  e avanço efetivo de corte  $f_e$ , mostrados na Figura 2-8.

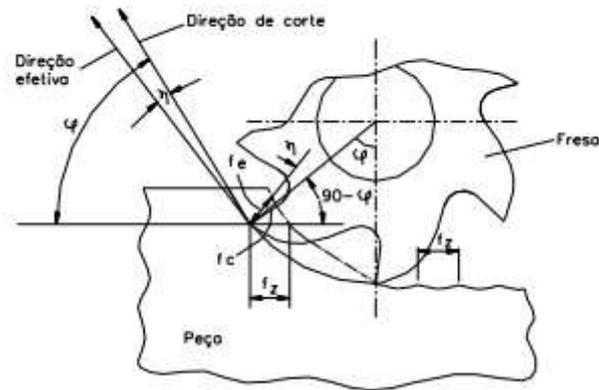


Figura 2-8: Avanço por dente  $f_z$ , avanço de corte  $f_c$  e avanço efetivo  $f_e$  no fresamento discordante. (MACHADO *et al*, 2009)

**Avanço de Corte ( $f_c$ ):** é a distância entre duas superfícies consecutivas em usinagem medida na direção perpendicular à direção de corte no plano de trabalho.

$$f_c = f_z \cdot \text{sen}\phi \quad (2.5)$$

**Avanço Efetivo de Corte ( $f_e$ ):** é a distância entre duas superfícies consecutivas em usinagem medida na direção perpendicular à direção efetiva de corte no plano de trabalho.

$$f_e = f_z \cdot \text{sen}(\phi - \eta) \quad (2.6)$$

**Profundidade ou Largura de Usinagem (ou de corte) ( $a_p$ ):** é a profundidade ou largura de penetração da ferramenta na peça, medida numa direção perpendicular ao plano de trabalho.

**Penetração de Trabalho ( $a_e$ ):** é de importância predominante no fresamento e na retificação. É a penetração da ferramenta em relação à peça, medida no plano de trabalho e numa direção perpendicular à direção de avanço, Figura 2-9.

**Penetração de Avanço ( $a_f$ ):** grandeza de penetração da ferramenta, medida no plano de trabalho e na direção de avanço.

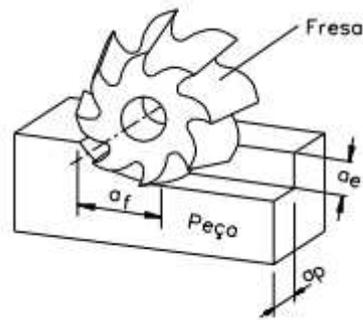


Figura 2-9: Largura de usinagem  $a_p$ , penetração de trabalho  $a_e$  e penetração de avanço  $a_f$ , no fresamento periférico. (MACHADO *et al*, 2009)

### 2.3. Formação do Cavaco

TRENT e WRIGHT (2000), mencionam que as condições utilizadas no primeiro estágio dos experimentos para obter informações sobre o processo de formação de cavacos são conhecidas como corte ortogonal. No corte ortogonal, a aresta de corte da ferramenta é reta e normal à direção de corte e de avanço da ferramenta. De maneira que a formação do cavaco pode ser considerada como um fenômeno bidimensional, o qual se realiza num plano normal à aresta cortante, ou seja, no Plano de Trabalho. A Figura 2-10 ilustra um exemplo de corte ortogonal no torneamento.

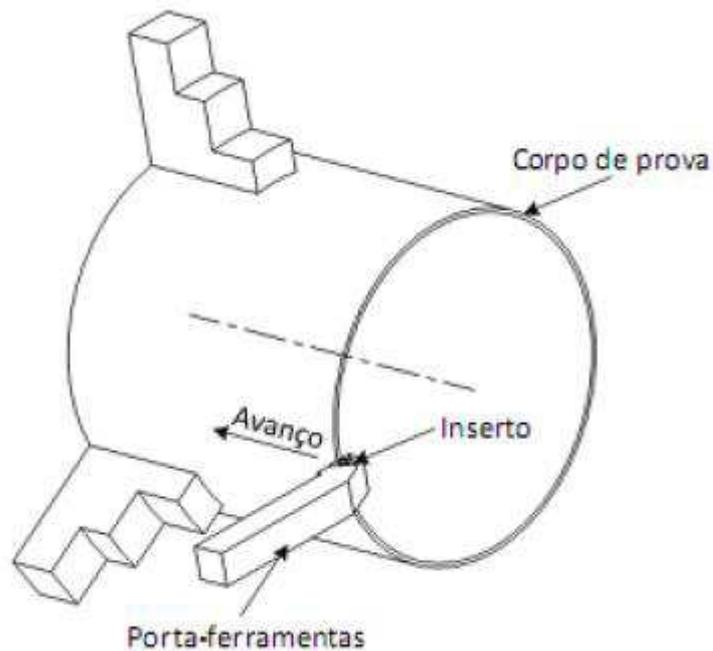


Figura 2-10: Corte ortogonal no torneamento (IQBAL *et al*, 2009).

Outras considerações acerca do corte ortogonal são admitidas para permitir um tratamento matemático simplificado.

- Os cavacos formados são contínuos, não havendo a formação de aresta postiça de corte (APC);
- Não há contato entre a superfície de folga da ferramenta e a superfície usinada;
- A espessura de corte ( $h$ ), igual ao avanço ( $f$ ), é suficientemente pequena em relação à largura de corte ( $b$ );
- A largura da aresta de corte é maior que a largura de corte ( $b$ );
- A largura de corte ( $b$ ) equivale à largura do cavaco.

Tais características podem ser analisadas na figura 2-11:

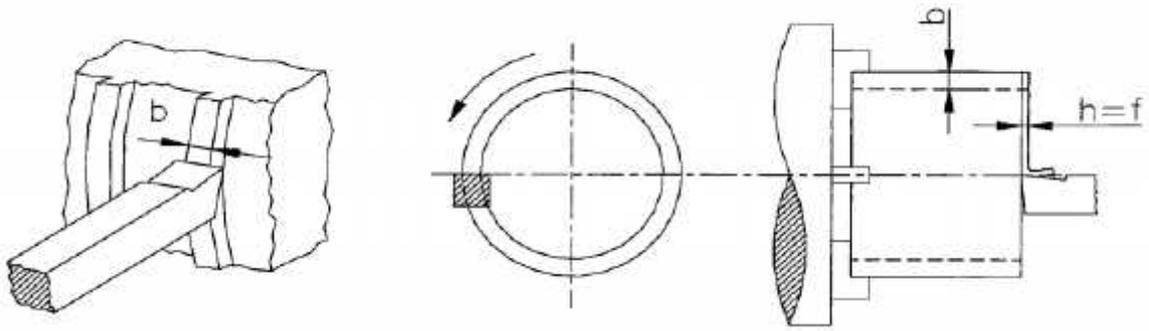


Figura 2-11: Exemplos de corte ortogonal (FERRARESI, 1977).

### 2.3.1 Mecanismo de formação do cavaco

A chave para um melhor entendimento de todos os processos de usinagem está no estudo científico da formação de cavacos. Esse estudo tem proporcionado grandes avanços nos processos de usinagem e contribuído para o aperfeiçoamento da ferramenta de corte em relação às suas arestas e superfícies, além de novos e mais eficazes materiais para ferramentas, possibilitando a usinagem dos mais variados tipos de materiais (MACHADO *et al*, 2009).

Saber como o cavaco se forma, tipo (formato) tamanho e como exatamente, tem uma importância ainda maior em processos que apresentem um volume reduzido para armazenamento de cavaco (furação e fresamento por exemplo), devido ao pequeno espaço disponível para trabalho e o grande volume de cavaco gerado. As principais influências sobre a formação do cavaco são as condições de corte e a geometria da ferramenta. O cavaco pode ser um elemento muito importante apesar dos profissionais que trabalham com fabricação não darem a atenção necessária ao mesmo. O comum é que o cavaco só é observado de fato quando tem influência negativa no produto final, seja por dificuldade de armazenamento ou descarte. É óbvio que o mais importante é o produto final e não o material retirado do mesmo. Porém é fato que o estudo do cavaco pode ajudar a otimizar o processo.

O processo de formação de cavaco é um ciclo e a última etapa desse ciclo é o movimento do cavaco sobre a face da ferramenta. Essa etapa tem influência sobre todo o processo, especialmente nas taxas de desgaste da ferramenta, no mecanismo de formação de cavaco, na temperatura de corte e na força de usinagem, sendo necessário entender como acontece este movimento. O estudo da interface cavaco-ferramenta é uma tarefa difícil devido às altas

velocidades envolvidas na saída do cavaco e dimensões reduzidas da superfície de saída da ferramenta.

O cisalhamento dos metais nas operações de usinagem ocorre quando o material é submetido a deformações elásticas e plásticas (em alguns casos nos materiais frágeis apenas elásticas), até sofrer ruptura, normalmente por cisalhamento, ao longo do plano denominado de “plano de cisalhamento” (ou zona primária de cisalhamento).

O processo de formação do cavaco pode ser dividido esquematicamente em quatro partes:

- Deformação elástica (recalque);
- Deformação plástica;
- Ruptura (parcial ou completa) e
- Escorregamento do cavaco sobre a superfície de saída da ferramenta.

A formação do cavaco em condições normais de trabalho com ferramentas de metal duro ou aço rápido é um fenômeno periódico mesmo quando da formação do cavaco contínuo. Com o auxílio da Figura 2-12 pode-se entender melhor a formação do cavaco e cada uma de suas quatro etapas.

**Recalque Inicial:** A cunha cortante da ferramenta penetra em uma pequena porção do material. Uma pequena fração do material é pressionada contra a superfície de saída da ferramenta, ação da ferramenta recalca o volume  $klmn$  e o metal começa a sofrer deformações elásticas, ver Figura 2-12 (a).

**Deformação e Ruptura:** O material pressionado sofre primeiramente deformação elástica e em seguida deformação plástica, que aumenta até provocar ruptura. Dependendo da natureza dúctil ou frágil do material a ruptura irá ocorrer por uma combinação de tensões cisalhantes, compressivas e trativas. Prosseguindo, o material da peça atinge o limite de escoamento e se deforma plasticamente. As deformações plásticas prosseguem e as tensões se elevam e ultrapassam o limite de resistência do material, promovendo a sua ruptura.

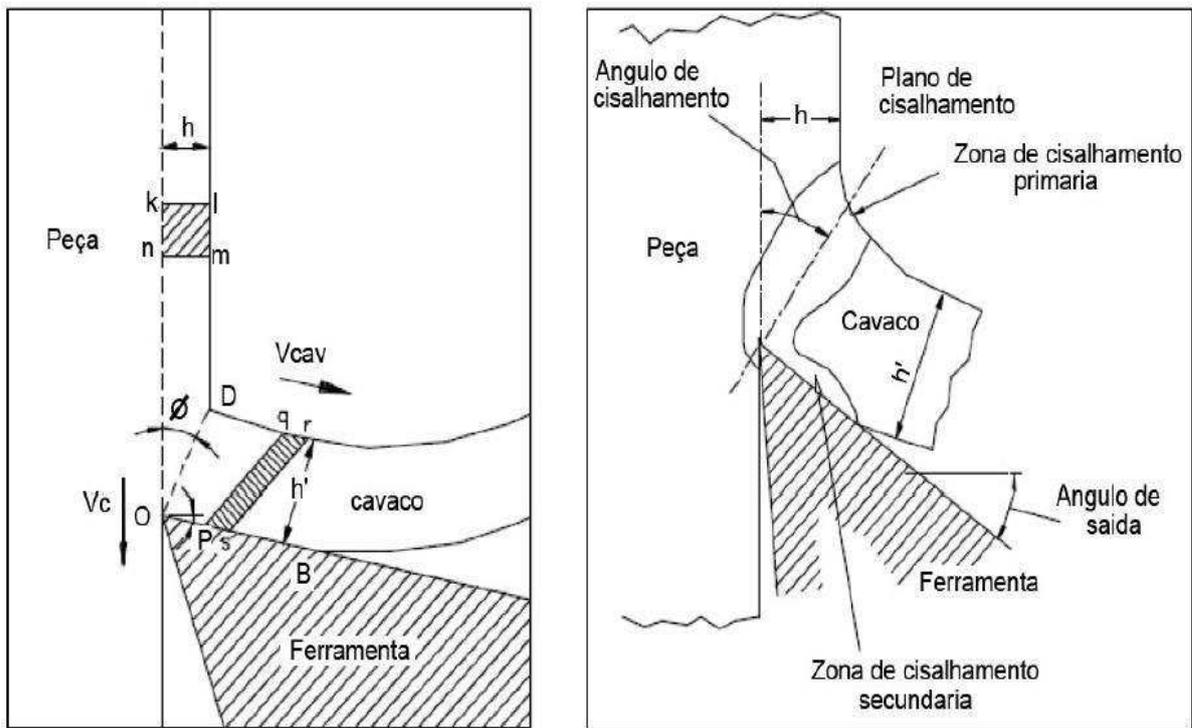


Figura 2-12: Processo de formação do cavaco. (TRENT, 1991).

- Deslizamento das lamelas: à medida que a ferramenta avança haverá ruptura parcial ou completa na região de cisalhamento. A ruptura é determinada pela formação e propagação de trincas na região de deformação. A formação de cavaco contínuo ou descontínuo dependerá das propriedades do material e de parâmetros de corte (principalmente avanço e velocidade).

- Saída de cavaco: o cavaco, porção de material deformado e rompido, desliza sobre a superfície de saída da ferramenta, devido ao movimento relativo entre a ferramenta e a peça.

Os primeiros estudos científicos para formação de cavaco utilizaram de simplificações. O “corte ortogonal” (Figura 2-13) foi o primeiro modelo de plano simplificado. Nesta simplificação, a aresta de corte é uma reta normal à direção de corte e à direção de avanço, de maneira que a formação de cavaco ocorre em um plano normal à aresta de corte (plano de trabalho) (BOOTHROYD, 1981).

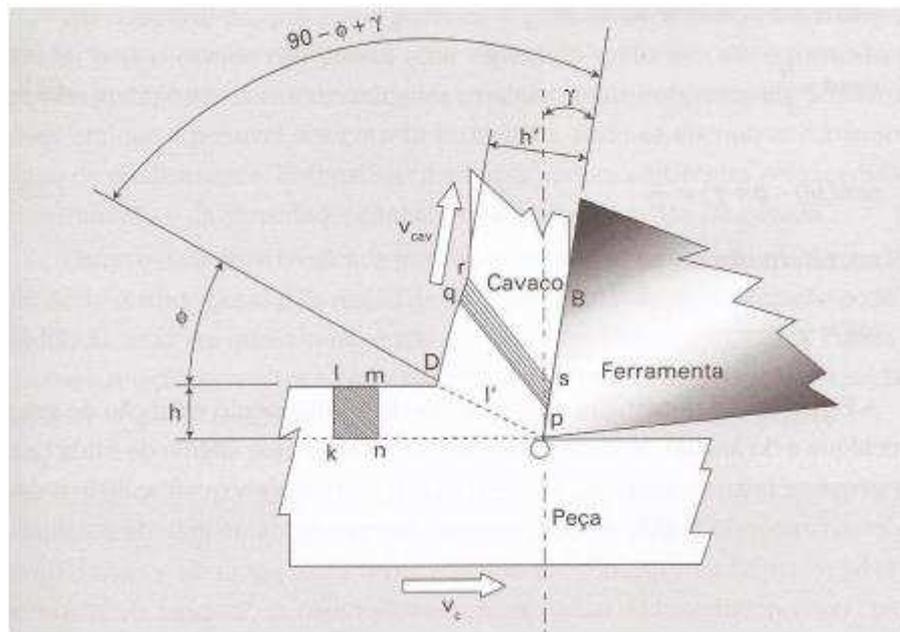


Figura 2-13: Modelo simplificado para formação de cavaco – corte ortogonal (MACHADO *et al*, 2011).

### 2.3.2. Ângulo de cisalhamento e Grau de recalque

ABRÃO e SILVA (2009) utilizando simplificações para o modelo bidimensional da formação de cavacos, foi possível estabelecer planos e relações geométricas importantes para o equacionamento matemático do fenômeno. É notável em experimentos de corte ortogonal que a espessura do cavaco ( $h'$ ) é maior que a espessura de corte ( $h$ ). Logo, o comprimento do cavaco é mais curto que o comprimento de corte  $e$ , de maneira análoga, a velocidade do cavaco ( $V_{cav}$ ) é menor que a velocidade de corte ( $V_c$ ). Baseado nessa relação pode-se definir o grau de recalque como:

$$R_c = \frac{h'}{h} \quad (2.7)$$

Considerando o ângulo de saída ortogonal da ferramenta ( $\gamma_0$ ) e o grau de recalque  $R_c$ , é possível obter o ângulo de cisalhamento.

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{\cos \gamma}{R_c - \operatorname{sen} \gamma} \quad (2.8)$$

O grau de recalque determina a quantidade de deformação sofrida pelo cavaco na zona de cisalhamento primária. Além disso, pode ser relacionado com o raio de curvatura que governa o cavaco. Altos valores de  $R_c$  e, conseqüentemente, baixos valores de  $\phi$  se referem à alta quantidade de deformação ocorrida no processo.

SADIK e LINDSTRÖM (1995) concluíram que o grau de recalque é uma função do comprimento de contato entre o cavaco e a ferramenta. Além disso, concluíram também que com o aumento da velocidade de corte, que acarreta no decréscimo no comprimento de contato entre o cavaco e a ferramenta, há um decréscimo no fator de recalque.

### 2.3.3 Tipos de Cavacos

a) Cavaco contínuo: é caracterizado por seu grande comprimento, independente da forma. Ocorre normalmente na usinagem de metais dúcteis, sob pequenos e médios avanços, com altas velocidades de corte (geralmente acima de 60 m/min) e grandes ângulos de saída da ferramenta. É formado quando o material é recalcado ao chegar à aresta de corte, sem que ocorra o rompimento deste, deslizando, assim, pela superfície de saída da ferramenta, ou seja, formando lamelas justapostas numa disposição contínua sendo que a distinção das lamelas não é nítida. É notável que o processo de corte nestas condições seja um processo em estado estável. (BOOTHROYD e KNIGHT, 1989). De acordo com MACHADO *et al* (2009) na formação de cavacos contínuos, o material inicia uma fratura na zona de cisalhamento primária com grandes deformações e permanece homogêneo, sem fragmentação. Entre as possíveis ações adotadas para promover a ruptura completa do cavaco destaca-se a utilização de insertos com quebra-cavacos que tem a função de provocar a fratura cíclica do cavaco.

b) Cavaco parcialmente contínuo: também conhecido como cavaco de cisalhamento, ocorre principalmente quando a trinca, ao propagar-se pelo plano de cisalhamento, provoca a ruptura total do cavaco, que, em seguida, é soldado devido à pressão e temperatura. O resultado final é um cavaco que se apresenta constituído de lamelas justapostas bem distintas. Este cavaco

se forma quando há uma diminuição da resistência do material no plano de cisalhamento. (MACHADO *et al*, 2009)

c) Cavaco descontínuo: este tipo de cavaco é muito comum na usinagem de metais frágeis, como o ferro fundido cinzento. Este cavaco ocorre também na usinagem de alguns metais menos frágeis a baixas velocidades de corte, grandes avanços e com ângulo de saída baixo, nulo ou negativo. O cavaco apresenta-se constituído de fragmentos que são arrancados da peça usinada, ou seja, há uma ruptura completa do material em grupos lamelares (na região de cisalhamento) que permanecem separados. (BOOTHROYD e KNIGHT, 1989)

d) Cavaco segmentado: Os cavacos segmentados são caracterizados por grandes deformações continuadas em estreitas bandas entre segmentos com muito pouca, ou quase nenhuma deformação no interior destes segmentos. É um processo totalmente diferente daquele verificado na formação do cavaco contínuo. COOK e SHAW *et al* (1954) explicaram qualitativamente as características de segmentação dos cavacos. Em seus modelos, a taxa de diminuição na resistência do material, devido ao aumento local da temperatura (devido às deformações plásticas) iguala ou excede a taxa de aumento da resistência devido ao encruamento, no plano de cisalhamento primário. Isto é peculiar a certos materiais com pobres propriedades térmicas, como o titânio e suas ligas. O cisalhamento para formar o cavaco começa a ocorrer em um plano de cisalhamento primário particular, quando as tensões impostas pelo movimento da ferramenta contra a peça excedem o limite do escoamento do material. A energia associada com esta deformação é convertida em calor imediatamente, e devido as pobres propriedades térmicas do material, altas temperaturas são desenvolvidas, localmente. Isto vai provocar o amolecimento localizado do material, portanto as deformações continuam na mesma faixa (plano) de material, ao invés de se mudarem para novo plano de material adjacente, à medida que o material se movimenta, como ocorre na formação dos cavacos contínuos (SHAW, 1967). Com o prosseguimento da deformação, existe uma rotação no plano de cisalhamento, que começa a se afastar da ponta da ferramenta e se movimenta por sobre a superfície de saída. Esta rotação vai prosseguindo até que o aumento de força devido a esta rotação excede a força necessária para deformar plasticamente material mais frio, em outro plano mais favorável.

O cavaco contínuo (a), além de oferecer risco ao operador, pode emaranhar-se ao redor da peça ou ferramenta, dificultando a operação e a lubri-refrigeração tornando a superfície usinada menos atrativa. Além disso, há o alto coeficiente volumétrico do cavaco contínuo em relação aos outros tipos.

O cavaco parcialmente contínuo (b), também pode apresentar problemas, como a geração de vibrações, que podem acarretar danos como ondulações na superfície usinada, desgaste excessivo da ferramenta, e até mesmo efeitos nocivos como desbalanceamento rotativo nos principais mancais do torno.

A ocorrência do cavaco contínuo pode ser evitada, ou ao menos minimizada adotando-se alterações nos parâmetros de corte, dentre as quais:

- Diminuição do ângulo de saída e de inclinação da ferramenta utilizando quase sempre valores negativos;
- Maximizar o avanço e a profundidade de corte;
- Diminuição da velocidade de corte;
- Uso de quebra cavaco.

A partir das opções acima, a mais comumente adotada em processos cujos parâmetros de corte propiciem a formação do cavaco contínuo, é o uso de quebra-cavacos na superfície de saída da ferramenta, pois, além de proporcionar uma solução simples e rápida para o problema, o uso de quebra-cavaco dispensa a necessidade de alterações nos parâmetros de usinagem.

#### 2.3.4. Formas de cavacos

Quanto à forma, os cavacos são classificados como:

- Cavaco em fita.
- Cavaco helicoidal.
- Cavaco espiral.
- Cavaco em lascas ou pedaços.

Segundo a norma ISO 3685, as formas de cavaco podem ser classificadas, conforme a Figura 2-14.

1- Cavaco em fita	2- Cavaco tubular	3- Cavaco espiral	4- Cavaco hel. tipo arruela	5- Cavaco hel. cônico	6- Cavaco em arco	7- Cavaco fragmentado	8- Cavaco tipo agulha
1-1- Longo	2-1- Longo	3-1- Plano	4-1- Longo	5-1- Longo	6-1- Conect.		
1-2- Curto	2-2- Curto	3-2- Cônico	4-2- Curto	5-2- Curto	6-2- Solto		
1-3- Emaranhado	2-3- Emaranhado		4-3- Emaranhado	5-3- Emaranhado			

Figura 2-14: Formas de cavaco produzidos na usinagem dos metais (ISO, 1993 apud MACHADO *et al*, 2009).

A forma do cavaco pode representar um sério obstáculo ao alcance de maior produtividade. Sua correta classificação irá contribuir para o aumento da produtividade através da seleção adequada da ferramenta e dos parâmetros de corte (SADIK e LINDSTRÖM, 1995; BOOTHROYD e KNIGHT, 1989; KIM e KWEUN, 1997). JAWAHIR e LUTTERVELT (1993) afirmam que o controle de cavacos envolve a produção de cavacos que podem ser facilmente extraídos da zona de trabalho e podem ser dispostos de forma eficiente.

O cavaco em fita normalmente é evitado por apresentar diversos riscos à segurança do operador, ocupar muito espaço, dificultar a lubri-refrigeração, causar danos à superfície da peça e a ferramenta. Normalmente é preferida a forma helicoidal devido à conveniência desta forma de cavaco se soltar para fora do sistema peça-ferramenta evitando assim danos maiores. O cavaco em lascas normalmente é preferido quando há pouco espaço disponível, ou quando o cavaco deve ser removido devido à ação do fluido lubri-refrigerante. (FERRARESI, 1977)

Quando durante a usinagem ocorrer uma forma de cavaco prejudicial ao processo pode-se conseguir uma mudança em seu formato sob diferentes maneiras, como por exemplo:

- Alterando as condições de usinagem;
- Dando uma forma particular à superfície de saída da ferramenta;
- Colocando elementos adicionais na superfície de saída.

Toda via o processo de modificações nas condições de usinagem com o intuito de se obter uma forma adequada de cavaco devem ser evitadas tanto quanto possível, uma vez que a velocidade de corte e o avanço devem ser determinados de acordo com as condições econômicas de usinagem.

GRZEISK e KWIATKOWSKA (1996) e MESQUITA *et al* (1996) classificaram as formas dos cavacos em aceitáveis, como sendo aqueles que não influenciam na operação de usinagem e, em inaceitáveis, como sendo aqueles que emaranham em torno da ferramenta e da peça de trabalho, originando perigo ao operador, prejudicando o acabamento superficial, conduzindo a quebra inesperada da ferramenta e aumentando o volume aparente de material a ser removido da área de corte.

CHOI e LEE (2001) e KIM e KWEUN (1997) classificaram os cavacos quanto à forma em controlados e não controlados, sendo os últimos aqueles que emaranham na peça danificando a superfície usinada. KIM *et al* (2009), classificaram as formas dos cavacos em estáveis, usáveis e não estáveis, sendo os estáveis como um subconjunto dos usáveis e os últimos as formas indesejadas. A figura 2-15 ilustra os padrões de cavacos classificados pela INFOS *apud* KIM *et al.* (2009).

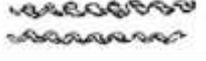
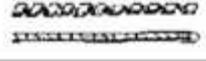
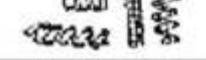
1		cavaco em fita	instáveis
2		cavaco emaranhado	
3		cavaco saca-rolhas	
4		cavaco helicoidal	estáveis
5		cavaco tubular longo	
6		cavaco tubular curto	usáveis
7		cavaco espiral tubular	
8		cavaco espiral	estáveis
9		cavaco vírgula longo	
10		cavaco vírgula curto	usáveis

Figura 2-15: Classificação dos padrões de cavacos (INFOS apud KIM *et al.*, 2009).

De acordo com ZHOU (2001), após sua formação, o cavaco se curva naturalmente ou através do contato com obstáculos. Se a tensão do cavaco excede a tensão de fratura do material, o cavaco irá se quebrar. O fluxo, a curvatura e a quebra do cavaco são os três principais mecanismos de pesquisa no que tange o controle dos cavacos.

#### 2.4. Controle de Cavacos

Na usinagem de materiais para fabricação de peças, as principais preocupações estão voltadas para a qualidade das peças produzidas, isto é, acabamento superficial e tolerâncias obtidas, e na produtividade com baixo custo. A produtividade sempre está relacionada com a taxa de desgaste das ferramentas de corte que é função do processo, das condições de corte, do uso ou não de fluídos de corte, entre outros fatores. Isto levou os principais pesquisadores da área de usinagem, a concentrarem seus trabalhos em assuntos relacionados com o mecanismo

de formação dos cavacos, forças e temperaturas de usinagem, mecanismos de desgaste das ferramentas de corte, integridade superficial, e muito pouca pesquisa se dedica ao estudo do controle do cavaco. Por esse motivo, são raros os artigos encontrados na literatura, que discutem o assunto de maneira abrangente. Entretanto, no corte contínuo (principalmente no torneamento) de materiais dúcteis a altas velocidades, o controle do cavaco pode se tornar imperativo e o fator mais importante numa linha de produção. (SHAW, 1986)

A baixas velocidades de corte os cavacos, geralmente, apresentam boa curvatura natural, portanto fogem da forma de cavacos longos, e não apresentam maiores problemas. Com a introdução da nova geração de ferramentas de corte, com maiores resistências ao desgaste, permitiu-se um aumento nas velocidades de corte de tal maneira, que os cavacos longos produzidos exigiram um controle rigoroso de sua formação. Isto se torna mais crítico ainda, com a crescente utilização de máquinas CNC, onde a ausência da interferência do homem não permite a produção de tais formas de cavacos. (MACHADO, 1990)

A necessidade de se desvencilhar de cavacos longos e prejudiciais forçou o aparecimento de medidas estratégicas para promover a quebra destes, mecanicamente. Sem dúvidas, o método mais popular é a utilização de quebra-cavacos postiços ou integrais (dando-se uma forma especial à superfície de saída da ferramenta). Ambos os casos promovem uma curvatura maior nos cavacos para quebrá-lo por flexão, quando estes encontrarem um obstáculo. Os obstáculos podem ser a própria peça, a ferramenta ou o porta-ferramenta. (SALES, 1995).

#### 2.4.1. Quebra cavacos

MAITY e DAS (1998), afirmam que cavacos longos se enrolam em torno da ferramenta e podem causar sérios riscos à superfície da peça, ao operador e às operações da máquina-ferramenta. Para superar esta dificuldade, um número de pesquisadores tem investigado o controle efetivo do fluxo do cavaco e a quebra do mesmo. A curvatura do cavaco pode ser controlada pelo uso de um obstáculo ao longo da direção de fluxo do cavaco, comumente conhecido como quebra-cavacos.

Existem numerosas tentativas de apresentar ferramentas com quebra-cavacos adequados para formar o cavaco com uma curvatura “forçada” e assim, facilitar a subsequente quebra do mesmo por ação mecânica (RAHMAN *et al*, 1995).

O quebra-cavaco consiste em uma modificação geométrica da superfície de saída do inserto de corte para controlar ou quebrar o cavaco podendo ser tanto uma cratera integral ou um anteparo postição ou integral (BOOTHROYD e KNIGHT, 1989). A principal função do mesmo é prover uma obstrução adjacente a aresta de corte que irá direcionar o cavaco de forma que este venha entrar em contato com a superfície não usinada da peça ou com a superfície de folga da ferramenta. O momento torçor resultante irá então, quebrar o cavaco (ARSECULARATNE, 2004).

KIM *et al* (2009), comenta que o quebra-cavaco é usado para aumentar o processo de fratura do cavaco resultando em controle eficiente dos mesmos e, conseqüentemente, em aumento da produtividade. Ele pode também diminuir a resistência de corte, aumentar a vida da ferramenta e melhorar a condição final da superfície usinada. O quebra-cavaco opera para promover a completa fratura do cavaco através da redução do raio de curvatura do cavaco.

## 2.5. Fluxo de Cavaco

A abordagem mais comum no desenvolvimento de modelos de corte para usinagem com quebra-cavacos é a pesquisa e entendimento da absoluta direção de fluxo do cavaco, já que a curvatura e o subsequente processo de quebra do cavaco dependem muito da natureza do fluxo do cavaco e sua direção (JAWAHIR e LUTTERVELT, 1993).

Em uma ferramenta com quebra-cavacos do tipo cratera o fluxo do cavaco pode ser estudado analisando a combinação do fluxo lateral e do fluxo inverso. O fluxo lateral é definido pelo ângulo de fluxo lateral ( $\psi_l$ ) e fluxo inverso pelo ângulo de fluxo inverso ( $\psi_i$ ). Segundo EE *et al* (2003), sob as mesmas condições de corte e geometria da ferramenta, uma mudança na geometria do quebra-cavacos irá inevitavelmente resultar em diferentes padrões de fluxo do cavaco. De forma similar, uma mudança nas condições de corte e na geometria da ferramenta para uma particular configuração de quebra-cavacos também irá mudar o padrão de fluxo do cavaco.

A Figura 2-16 ilustra esquematicamente os vetores indicativos das direções de fluxo lateral e inverso, bem como os ângulos de fluxo lateral ( $\psi_l$ ) e inverso ( $\psi_i$ ), juntamente com uma foto do cavaco fluindo na superfície de saída da ferramenta apresentando um misto entre o fluxo lateral e inverso.

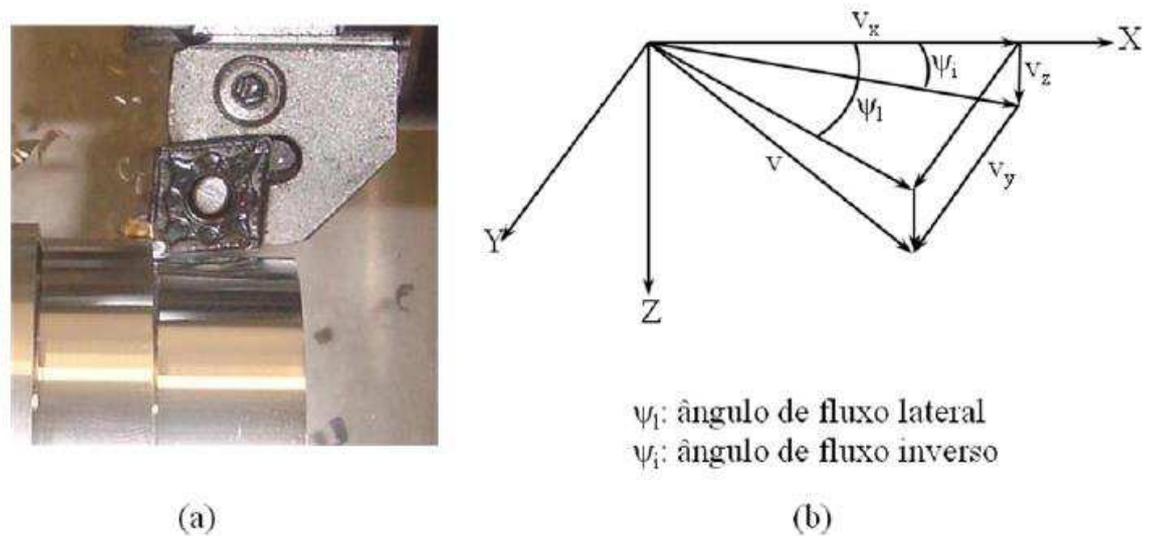


Figura 2-16: Fluxo lateral e inverso do cavaco (a) fotografia; (b) representação esquemática (JAWAHIR *et al*, 1995)

### 2.5.1 Fluxo Lateral do Cavaco

Existem alguns modelos para estimar o ângulo de fluxo lateral do cavaco ( $\psi_l$ ). O modelo de Colwell será aqui utilizado por sua simplicidade e maior garantia de precisão prática (SEAH *et al*, 1996; CHOI e LEE, 2001). Neste modelo, a direção de fluxo lateral é assumida perpendicular à linha de Colwell, que consiste na linha que une os pontos extremos da aresta ativa de corte. A Figura 2-17 ilustra o modelo de Colwell.

O ângulo de fluxo lateral é calculado por relações geométricas entre a geometria da ferramenta e as condições de corte, sendo função do raio de ponta ( $r_\epsilon$ ), profundidade de corte ( $a_p$ ), avanço ( $f$ ) e do ângulo de posição da aresta de corte ( $\chi_r$ ). O ângulo de fluxo lateral é definido segundo a relação entre a profundidade de corte e o raio de ponta da ferramenta. A Equação 2.3 é aplicada a situações quando  $a_p$  é menor que  $r_\epsilon (1 - \cos \chi_r)$ , tal qual ilustra a Figura 2.17(a), enquanto a Equação 2.4 aplica-se quando  $a_p$  é maior ou igual a  $r_\epsilon (1 - \cos \chi_r)$ , de acordo com a Figura 2.17(b).

$$\psi_1 = \tan \left( \frac{\sqrt{2 \cdot r_\epsilon \cdot a_p - a_p^2 + f/2}}{a_p} \right); \frac{a_p}{r_\epsilon} < (1 - \cos \chi_R) \quad (2.9)$$

$$\psi_1 = \tan \left( \frac{\sqrt{a_p / \tan \chi_R + r_\epsilon \cdot \tan(\chi_R/2) + f/2}}{a_p} \right); \frac{a_p}{r_\epsilon} \geq (1 - \cos \chi_R) \quad (2.10)$$

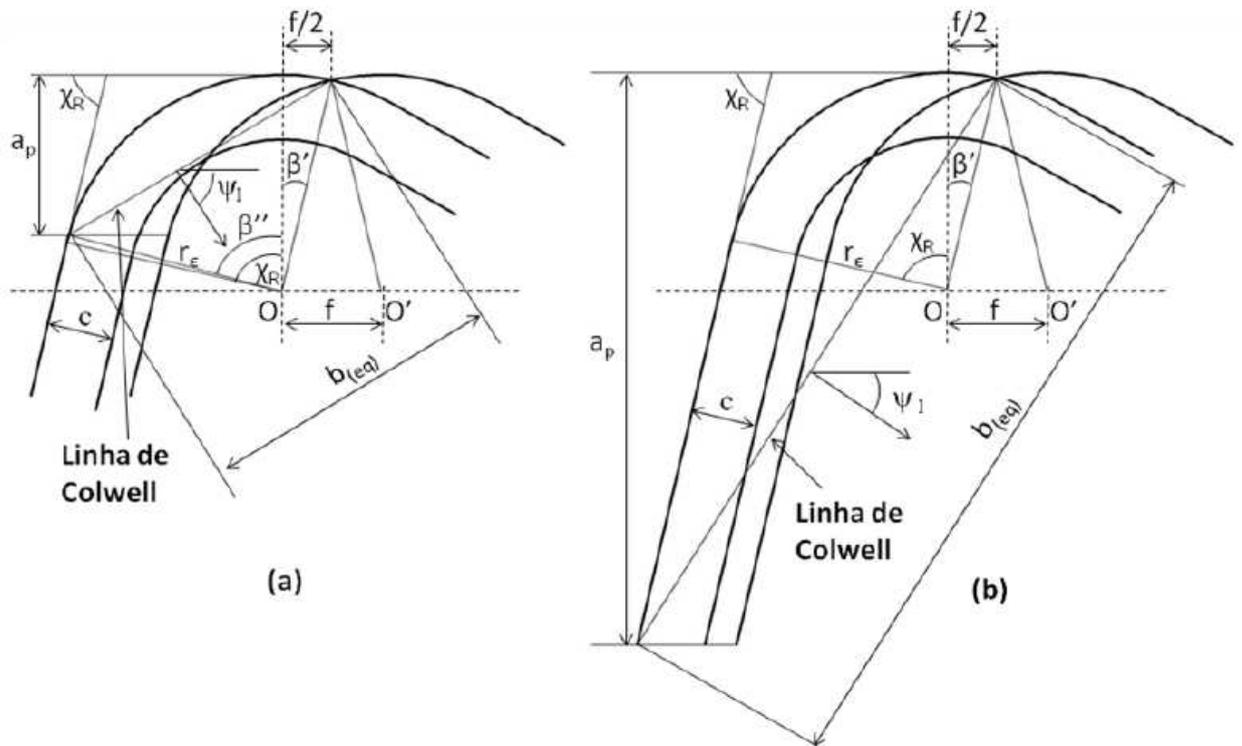


Figura 2-17: Direção de fluxo lateral do cavaco (SEAH *et al*, 1996)

Como podemos notar na Figura 2-17, na usinagem prática a direção de fluxo lateral às vezes não é perpendicular a aresta principal de corte. Esta direção nem sempre é uma linha reta devido ao efeito do raio de ponta. Para efeitos de modelagem do corte oblíquo, os parâmetros influentes no fluxo do cavaco devem ser redefinidos na direção de fluxo lateral. Ou seja, a direção de fluxo lateral é considerada como sendo a direção de medição dos parâmetros equivalentes, como sugerido por SEAH *et al* (1996).

### 2.5.2 Fluxo Invertido do Cavaco

O fluxo inverso do cavaco é um resultado da restrição do comprimento de contato natural pelo corte da superfície de saída da ferramenta – formando uma ferramenta de contato restrito (BALAJI, *et al*, 2006). Ele determina o fluxo do cavaco para dentro da cratera (EE *et al*, 2003). Segundo SEAH *et al* (1996), o ângulo de fluxo inverso ( $\psi_i$ ) e a largura da cratera ( $l_c$ ), definem o raio de curvatura do cavaco tendo um papel importante no processo de quebra do cavaco. RAHMAN *et al* (1995) afirmam que esse ângulo é um parâmetro essencial por ser uma ponte para ligar o fluxo e a curvatura do cavaco.

Os parâmetros com maior influência no ângulo de fluxo inverso do cavaco ( $\psi_i$ ) são a razão entre o avanço ( $f$ ) e o comprimento de contato restrito ( $c$ ), os ângulos de saída primário ( $\gamma_1$ ) e secundário ( $\gamma_0$ ) e o material da peça. Este ângulo possui um limite superior e um limite inferior sendo estes limites iguais aos do ângulo de saída primário ( $\gamma_1$ ) e secundário ( $\gamma_0$ ) respectivamente. Usando o conceito de parâmetros equivalentes, tem-se a Inequação 2.11. A Figura 2.18 ilustra a seção transversal do quebra-cavacos e o ângulo de fluxo inverso do cavaco.

$$\gamma_1 \leq \psi_{i(eq)} \leq \gamma_0(eq) \quad (2.11)$$

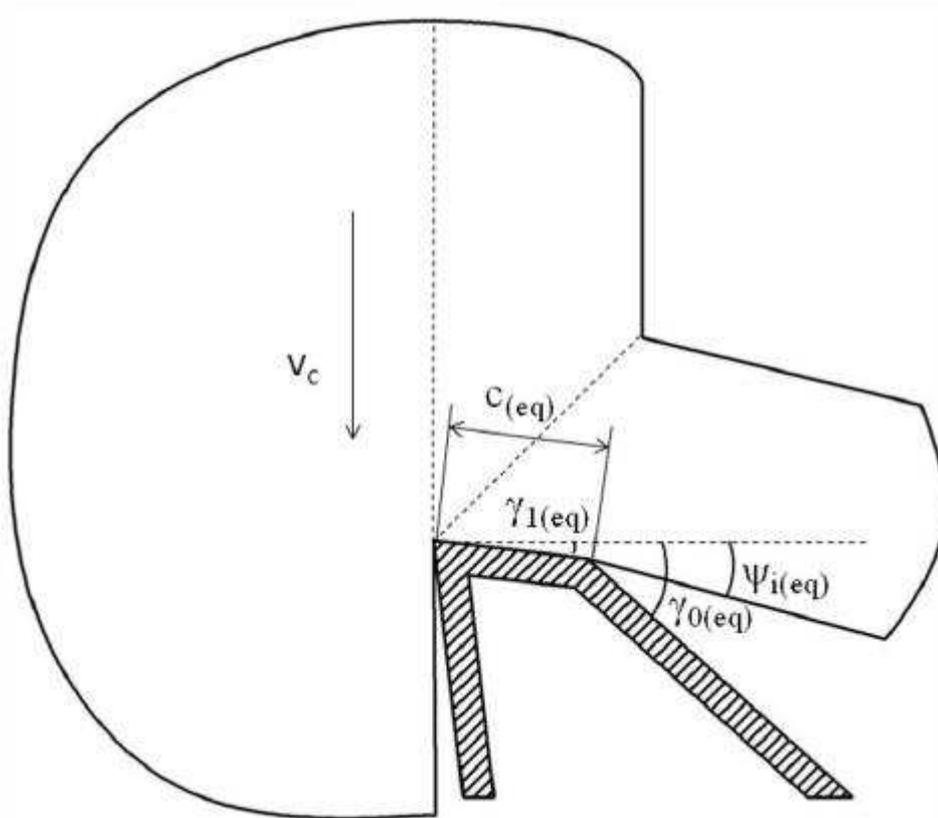


Figura 2-18: Seção transversal de corte do quebra-cavacos (CHOI e LEE, 2001)

O ângulo de fluxo inverso equivalente ( $\psi_{i(eq)}$ ) é conhecido como sendo uma função da razão entre o avanço e o comprimento da superfície de contato restrito ( $f/c$ ) e os ângulos de saída primário e secundário. SEAH *et al.* (1996) afirmam que este ângulo aumenta com o aumento da razão  $f/c$  a uma taxa decrescente. Partindo deste ponto, CHOI e LEE (2001) propuseram a Equação abaixo. Onde  $k$  é uma constante de acordo com o material da peça.

$$\psi_i = \gamma_0 - (\gamma_0 - \gamma_1) \exp\left(-k \left(\frac{h_{eq}}{l_{eq}}\right)\right) \quad (2.5)$$

## 2.6. Curvatura do Cavaco

Na usinagem com insertos com superfície de saída lisa, o cavaco se curva quando alcança o seu comprimento de contato natural com a ferramenta, de forma a perder neste ponto

contato com a ferramenta. Na usinagem com insertos com quebra-cavacos, devido ao efeito do contato restrito, o cavaco flui para dentro da cratera e então, pela ação de obstrução da parede da cratera, este é curvado para fora da cratera, adquirindo curvatura. (JAWAHIR e LUTTERVELT, 1993)

A curvatura do cavaco em ferramentas com quebra-cavacos pode ser decomposta em curvatura lateral e curvatura vertical. A curvatura lateral é caracterizada pela medida da curvatura do cavaco no fluxo lateral, podendo ser medida pelo raio de curvatura lateral ( $R_l$ ). Já a curvatura vertical, consiste na curvatura na direção vertical do cavaco, sendo encontrada de forma isolada no corte ortogonal e medida pelo raio de curvatura vertical ( $R_v$ ). A Figura 2-19 ilustra a diferença entre tais curvaturas.

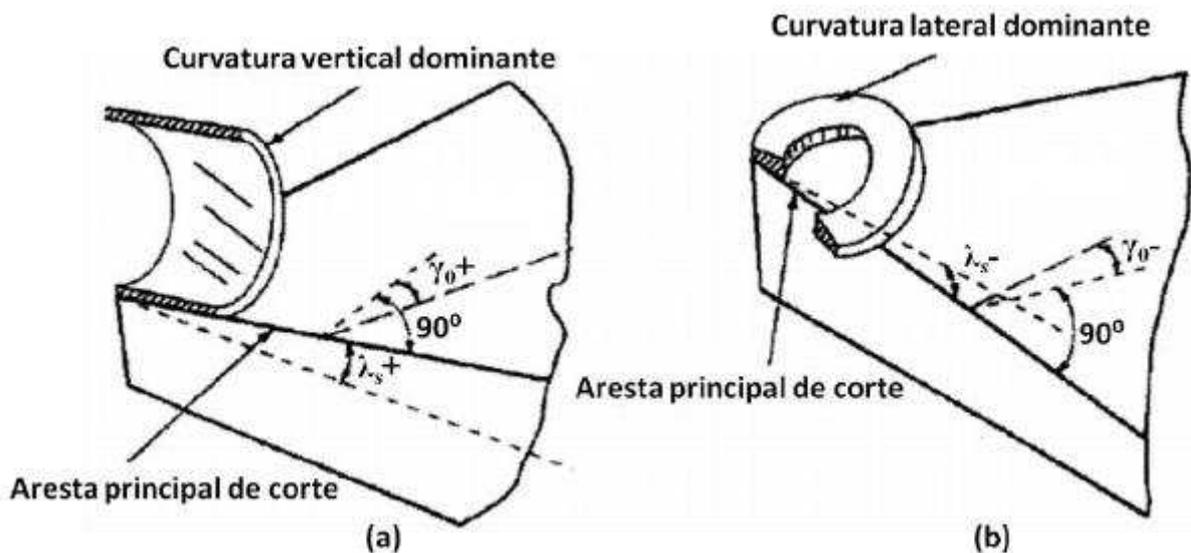


Figura 2-19: Representação esquemática dos modos de curvatura do cavaco: (a) vertical; (b) lateral (GHOSH *et al*, 1996 apud BALAJI *et al*, 2006)

A Figura 2-20 ilustra esquematicamente o fluxo do cavaco para um inserto com quebra-cavacos cratera, para duas diferentes condições de corte envolvendo baixos valores de avanço ( $f$ ). Para uma pequena profundidade de corte ( $a_p$ ), devido ao valor elevado do ângulo de fluxo lateral, o cavaco é desviado lateralmente pela parede do quebra-cavacos, resultando em curvatura quase puramente lateral. Já para profundidades de corte maiores, o cavaco é obstruído pelo quebra-cavacos e desenvolve um modo de curvatura misto entre lateral e vertical.

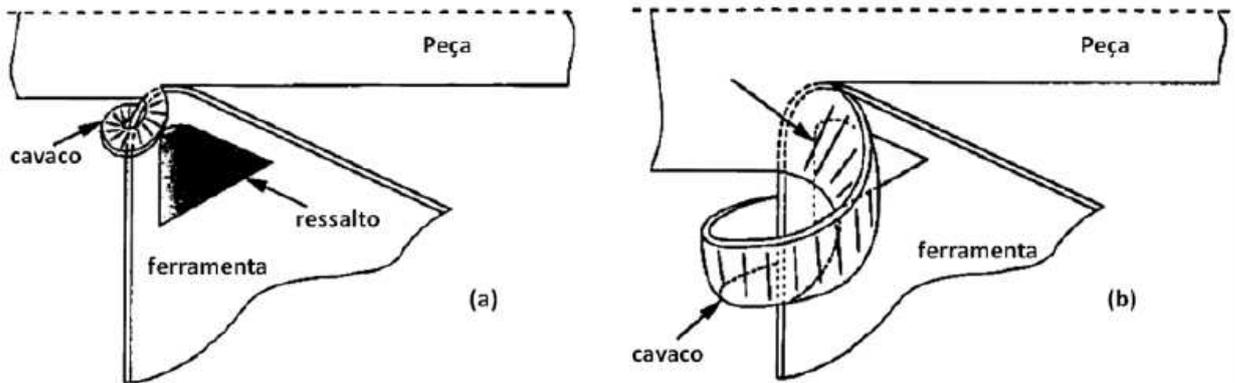


Figura 2-20: Diferentes formas de fluxo e curvatura do cavaco: (a) alta curvatura lateral a baixas profundidades de corte; (b) alta curvatura vertical a altas profundidades de corte (GHOSH *et al*, 1994 apud EE *et al*, 2003)

### 2.6.1. Curvatura Lateral do Cavaco

Segundo LUTTERVELT (1976) *apud* JAWAHIR e LUTTERVELT (1993) os fatores que influenciam na curvatura lateral do cavaco são: (a) a aresta de corte não é reta; (b) a direção do movimento de corte não é linear; (c) a aresta de corte não é perpendicular ao movimento de corte; e (d) o grau de recalque varia ao longo da largura do cavaco. A Figura 2-21, a seguir, demonstra de forma esquemática o raio de curvatura lateral do cavaco ( $R_l$ ).

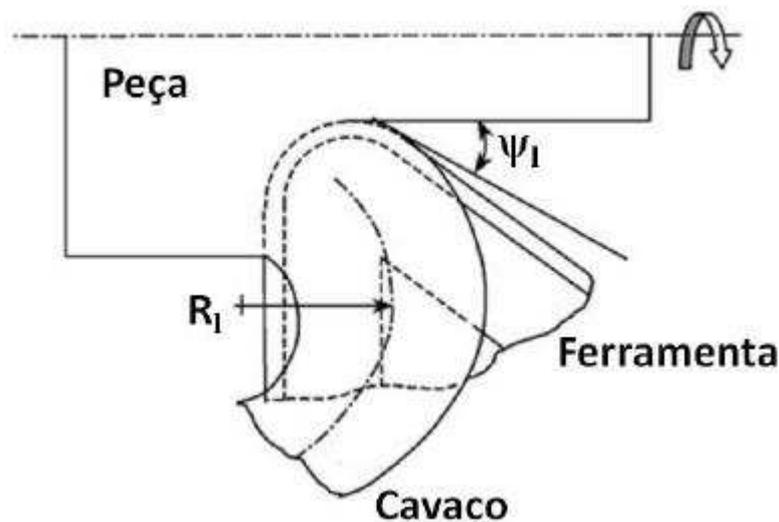


Figura 2-21: Curvatura lateral (EE *et al*, 2003)

Os mesmos fatores citados acima influenciam na velocidade do cavaco ( $v_{cav}$ ), de forma que esta não seja constante ao da largura do cavaco. Deste modo, essa variação faz com que o mesmo assuma uma curvatura no sentido da diminuição da velocidade do cavaco, tal qual ilustra a Figura 2-22.

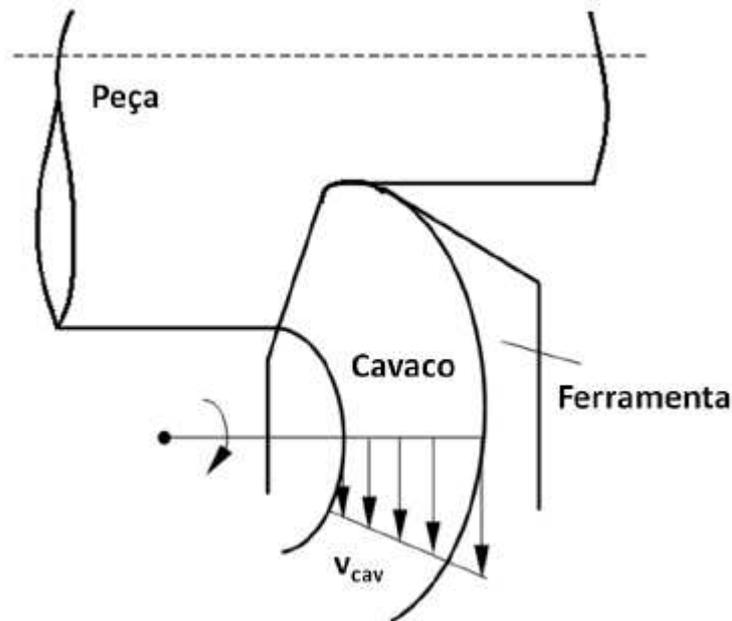


Figura 2-22: Influência da variação da velocidade do cavaco no fluxo lateral (ZHOU, 2001)

De acordo com JAWAHIR e LUTTERVELT (1993) o raio de curvatura lateral do cavaco ( $R_l$ ) pode ser assumido como independente da geometria do quebra-cavacos. Devido à falta de modelos teóricos para estimar o raio de curvatura lateral do cavaco, pode-se considerar que o aumento do ângulo de fluxo lateral ( $\psi_l$ ) acarreta um decréscimo no raio de curvatura lateral. Conseqüentemente,  $R_l$  aumenta com o aumento de  $a_p$  e diminui com o decréscimo de  $f$ .

### 2.6.2 Curvatura Vertical do Cavaco

Em se tratando da curvatura do cavaco, grande parte das pesquisas tem focado na curvatura vertical, devido em partes ao grande número de trabalhos realizados em corte ortogonal (BALAJI, *et al*, 2006). De acordo com SEAH *et al* (1995), o ângulo de fluxo inverso

do cavaco combinado com a geometria apropriada do quebra-cavacos, inevitavelmente conduz à curvatura do cavaco.

Alguns modelos têm estudado a curvatura sob o conceito de parâmetros equivalentes (SEAH *et al*, 1995; RAHMAN *et al*, 1995; CHOI e LEE, 2001). Deste modo, os modelos para o cálculo do Raio de curvatura vertical definidos para o corte ortogonal têm sido reformulados. A Figura 2-23 demonstra esquematicamente o Raio de curvatura vertical do cavaco segundo a direção de fluxo equivalente.

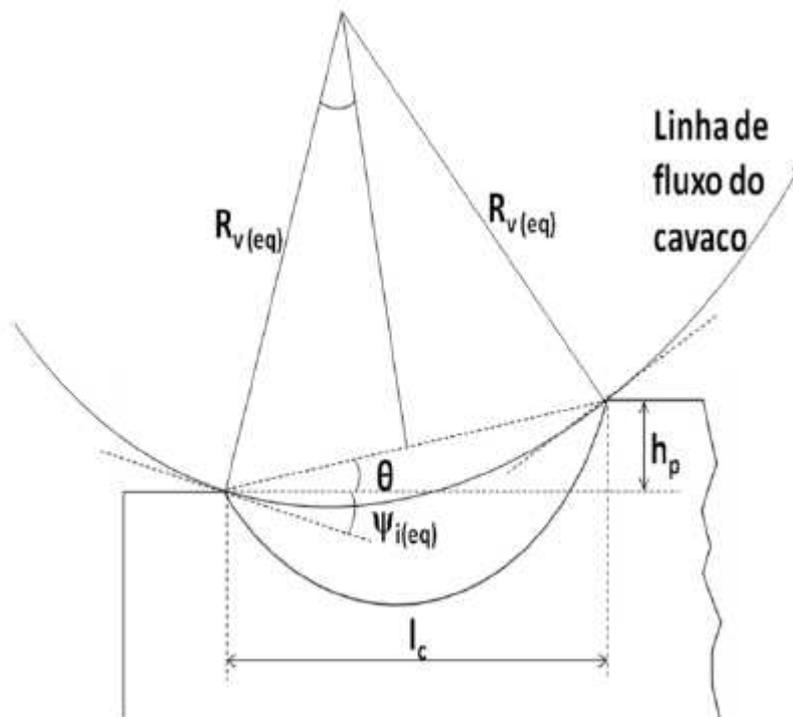


Figura 2-23: Raio de curvatura vertical do cavaco (CHOI e LEE, 2001)

A Equação 2.12 relaciona o Raio de Curvatura vertical equivalente do cavaco ( $R_{v(eq)}$ ) com os parâmetros do quebra-cavacos e o ângulo de fluxo inverso do cavaco, como pode ser inferido da Figura 2-23.

$$R_{v(eq)} = \frac{l_{c(eq)} \sec \theta}{2 \sin(\psi_{i(eq)} + \theta)}; \quad \left( \theta = \operatorname{tg}^{-1} \frac{h_p}{l_c} \right) \quad (2.12)$$

## 2.7. Ferramentas de Corte

As características de saída do cavaco, força de corte, desgaste da ferramenta, qualidade da superfície, entre outras, são diretamente influenciadas pela geometria da ferramenta de corte. Isto significa que se deve conhecer a definição de uma ferramenta de corte, suas partes, ângulos, tipos de materiais para sua fabricação, com o objetivo de obter um resultado satisfatório durante a usinagem. A norma ISO 3002-1 (2013) define os termos empregados nos sistemas de referências e nos ângulos da parte de corte das ferramentas válidos para todos os processos de usinagem.

Cada geometria de pastilha é desenvolvida para abranger uma área de aplicação composta por faixas de avanço e profundidade de corte recomendada (SANDVIK COROMANT, 2014).

A geometria de uma ferramenta é definida utilizando diferentes planos, ângulos, superfícies, arestas e movimentos. Este trabalho se restringe a revisar os principais elementos que definem a geometria de uma ferramenta e sua influência no processo de torneamento.

A superfície de saída é a superfície da cunha de corte sobre a qual o cavaco se move. Já a superfície de folga entende-se a superfície que determina a folga entre a ferramenta e a superfície em usinagem principal, formando entre ambos o ângulo de folga. A cunha é formada pelas superfícies de saída e de folga. Por meio de movimento relativo peça-ferramenta e a ação da cunha de corte formam-se os cavacos. A interseção das superfícies de saída e de folga define a aresta de corte ou de cunha. (MACHADO *et al*, 2011)

A aresta de corte e a superfície de folga são distinguidas como primárias e secundárias, de acordo com a figura 2-24 (MACHADO *et al*, 2011).

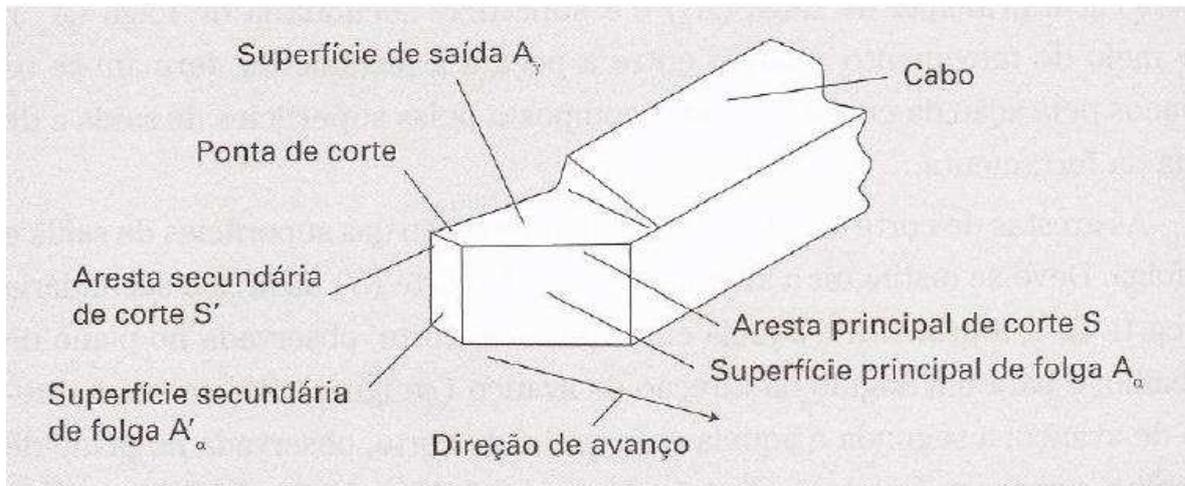


Figura 2-24: Elementos da cunha de corte de uma ferramenta de torção (MACHADO *et al*, 2011).

Uma característica de grande importância na pastilha e seu ângulo de cunha. Uma pastilha negativa possui um ângulo de cunha de  $90^\circ$ , e a positiva possui um ângulo menor que  $90^\circ$  (figura 2-25). A pastilha negativa precisa ser inclinada no porta-ferramenta, de forma a promover um ângulo de folga tangencial à peça. A pastilha positiva, proporciona baixas forças de corte é a primeira escolha para torneamento interno e externo de peças delgadas. Já as pastilhas negativas, com alta resistência de aresta, são ideais para condições de corte pesado. (SANDVIK COROMANT, 2014)

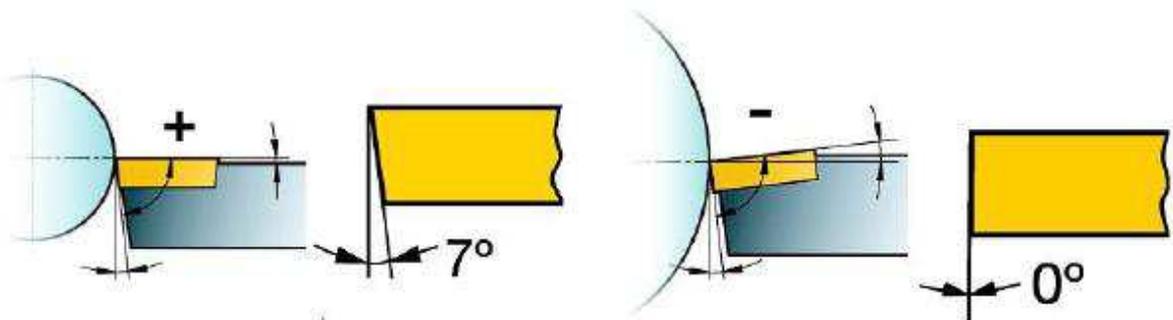


Figura 2-25: Ângulos de cunha, onde: (a) pastilha positiva com ângulo de folga de  $7^\circ$ ; (b) pastilha negativa sem ângulo de folga (SANDVIK COROMANT, 2014).

Devemos levar em consideração também o formato da pastilha (figura 2-26), que precisa ser selecionado de acordo com a operação a ser realizada, material usinado e parâmetros

de corte. O maior ângulo de ponta possível deve ser selecionado para propiciar resistência e confiabilidade à pastilha. Um ângulo de ponta pequeno é mais fraco e tem menor contato com a aresta de corte, o que pode tornar a pastilha mais sensível aos efeitos térmicos, entretanto proporciona menor vibração e menores forças de corte.

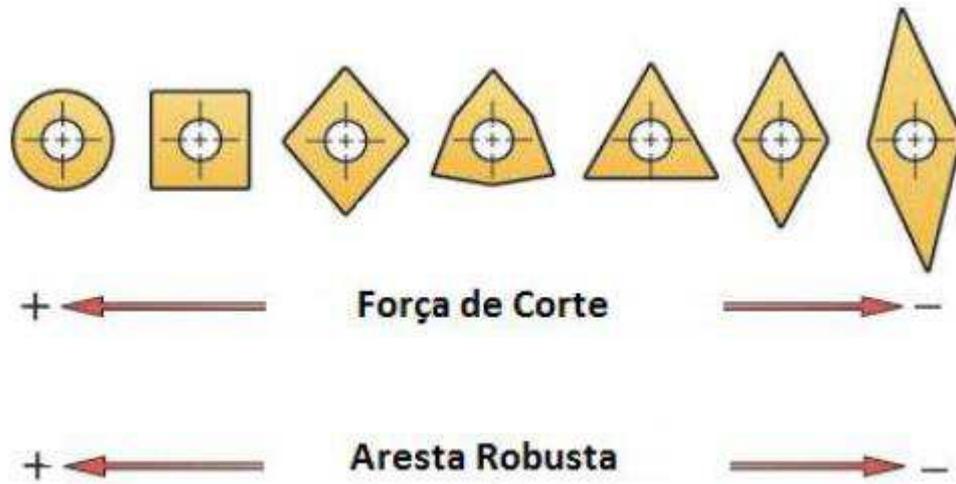


Figura 2-26: Formato de pastilhas e suas características (SANDVIK COROMANT, 2014)

### 3. FATORES QUE INFLUENCIAM NA FORMAÇÃO DO CAVACO

#### 3.1. Influência de fatores específicos na formação do cavaco

A forma do cavaco está diretamente ligada à plasticidade do material, à configuração geométrica do corte (peça e ferramenta) e às condições de corte. Em geral a forma do cavaco é afetada pelo avanço e pela velocidade de corte. Um aumento da velocidade de corte ou a redução do avanço tendem a mover a forma do cavaco à esquerda da Figura 3-1 e produzir cavacos em fitas, sendo que o avanço é o parâmetro que mais influencia na forma do cavaco. A profundidade de corte tem uma influência em proporção menor que o avanço na forma do cavaco (MACHADO *et. al.* 2011).

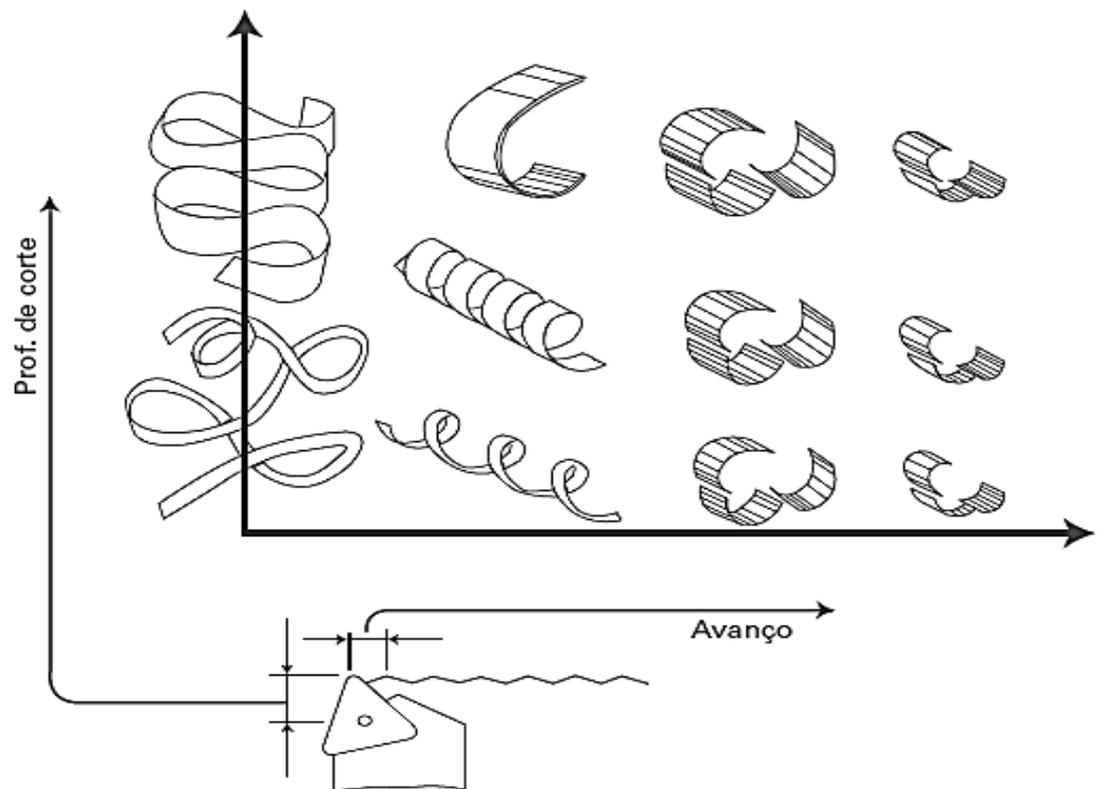


Figura 3-1: Influência do Avanço e Profundidade na forma do cavaco (MACHADO *et al.*, 2011)

SOUZA *et al* (2006) realizaram um ensaio cujo material do corpo-de-prova empregado nos testes foi o aço ABNT 1045, com diâmetro inicial de 35,8 mm e comprimento de corte de

300 mm. A peça foi fixada em placa universal de três castanhas, com contra-ponta na outra extremidade para proporcionar maior estabilidade durante a usinagem. Os ensaios foram conduzidos a seco em um torno universal, marca NARDINI, modelo MASCOTE, de 3,5 HP de potência. Empregou-se ferramentas de metal duro losangular VBMT 160408 C25 NC320, com revestimento de TiN, raio de ponta  $r_e = 0,8$  mm, ângulo de posição  $\kappa_r = 72,5^\circ$ , ângulo de folga  $\alpha = 5^\circ$ , ângulo de saída  $\gamma = 0^\circ$ . Os parâmetros de corte utilizados foram avanço  $f = 0,094$  e  $0,19$  mm/rot, profundidade de usinagem  $a_p = 0,5$  e  $1,0$  mm e velocidade de corte  $v_c = 86, 117$  e  $134$  m/min. A Tabela 3.1 mostra em detalhes os parâmetros de corte e a classificação dos cavacos obtidos.

Ensaio	Parâmetros de Corte			Classificação do Cavaco			
	$v_c$ [m/min]	$a_p$ [mm]	$f$ [mm/rot]	Tipo	Forma	Cor	
1	86	0,5	0,094	contínuo	helicoidal	amarelo	
2			0,190	contínuo	helicoidal	amarelo	
3		1,0	0,190	contínuo	helicoidal	azul	
				ruptura	lascas		
4			0,094	ruptura	lascas	azul e cobre	
5	134	0,5	0,094	contínuo	fita	azul escuro e cobre	
					helicoidal		
6				0,190	contínuo	helicoidal	azul e cobre
7				0,190	contínuo	helicoidal	azul e cobre
8	1,0	0,094	contínuo		fita	azul claro	
					helicoidal		
9	117	0,5	0,297	contínuo	helicoidal	azul escuro	
10			0,449	contínuo	helicoidal	amarelo dourado	

Tabela 3.1: Síntese dos dados de entrada e da investigação dos cavacos gerados. (SOUZA *et al*, 2006)

SOUZA *et al* (2006) analisando os resultados obtidos, notaram que todos os parâmetros de corte utilizados como variáveis de entrada no experimento causaram influência na formação de cavaco. Pode-se dizer, em geral, que os resultados apresentaram boa concordância com os apresentados na literatura. O aumento da velocidade de corte fez com que a porção de material

da peça removida na forma de cavaco sofresse maiores taxas de cisalhamento, alterando em alguns casos a forma do cavaco de helicoidal para fita. Além disso, o efeito mais pronunciado refere-se à coloração do cavaco, indicando que maiores taxas de cisalhamento geram mais temperatura e calor na interface cavaco-ferramenta. O tipo de cavaco permaneceu tipicamente contínuo, exceção feita aos ensaios 3 e 4 conduzidos em baixa velocidade de corte e maior profundidade de usinagem. O aumento da profundidade de usinagem pôde ser também mais associado à mudança na forma do cavaco, em lascas para menor  $v_c$  e em fita para a maior  $v_c$ . Já o aumento do avanço propiciou a formação de cavacos helicoidais, exceto em parte para o ensaio 3. Este resultado, de certa forma, pode ser confirmado analisando-se os ensaios 9 e 10, em que foram empregados grandes avanços, de até metade do raio de ponta do inserto.

Na usinagem de materiais dúcteis e homogêneos, não havendo interferências externas relacionadas a vibrações ou variações nas condições de atrito na superfície de saída da ferramenta, utilizando de velocidades de corte superiores a 60 m/min é formado cavaco contínuo. (FERRARESI, 2015)

Ao usinar materiais com certa ductilidade, a baixa velocidade de corte, pequenos ângulos de saída e grandes avanços, temos como resultado cavacos do tipo descontínuo. No entanto ao usinar materiais de baixa condutividade térmica, ou em materiais com condutividade térmica relativamente elevada, desde que usinados em velocidades de corte elevadas comparadas a velocidade do fluxo de calor do material, são obtidos cavacos do tipo segmentado. (SANTOS, SALES, 2007)

Ao utilizar grandes avanços, velocidades de corte superiores a 100 m/min e pequenos ângulos de saída, ou se tratando de materiais frágeis ou de estrutura heterogênea, tais como ferro fundido ou latão, forma-se cavaco de cisalhamento. (FERRARESI, 2015).

No fresamento tangencial, com a espessura de corte variando de zero a número máximo ou de um número máximo a zero, o cavaco resultante tem a forma de virgula. Já no fresamento utilizando fresa duplo-positiva, os cavacos formados são mais finos e tem forma helicoidal. E fresa positivo-negativa combinação de ângulos de saída negativos e ângulo de inclinação positivo também gera cavaco do tipo helicoidal. Ao adicionar Sulfeto de Manganês ao aço, tem-se uma usinabilidade favorecida pois formam um cavaco do tipo quebradiço e atuam como uma espécie de lubrificante, impedindo a adesão do cavaco a ferramenta. (DINIZ, 2013)

Na usinagem de ligas de chumbo, níquel-prata e os bronzes ao fosforo produzem cavacos longos. (TRENT, 1991)

Ligas de Titânio geram cavacos de tipo segmentado e muito fino, causando altíssimas temperaturas na ponta da ferramenta. Ao usinar aços temos como resultado cavaco do tipo contínuo e longo, apresentando um alto ponto de fusão, desenvolve altas temperaturas na superfície da ferramenta e tem alto ponto de compressão.

Ao usinar o cobre e suas ligas temos diferentes resultados de acordo com a usinagem:

- Fácil: o cavaco será do tipo quebradiço;
- Moderada: O cavaco apresenta a forma de espiral ou hélice.
- Difícil: Os cavacos formados serão contínuos e longos.

Na usinagem do Alumínio e suas ligas tem como resultado cavacos contínuos, mas com a adição de metais insolúveis de baixo ponto de fusão (chumbo, estanho e bismuto) o cavaco formado é quebradiço. Magnésio e suas ligas obtém-se cavacos quebradiços, mesmo empregando altas velocidades de corte. (KIRK, 1977)

No corte ortogonal o cavaco formado é do tipo contínuo, sem a presença de aresta postiça de corte. (SANTOS, SALES, 2007)

Segundo ZHOU (2001) e FANG (1998), há valores limites das condições de corte, avanço ( $f$ ) e profundidade de corte ( $a_p$ ), acima dos quais o quebra-cavaco promoverá a fratura periódica dos cavacos com sucesso, gerando cavacos curtos. Ou seja, há um valor mínimo do avanço ( $f_{\min}$ ) e um valor mínimo da profundidade de corte ( $a_{p\min}$ ) que constituem os limites para a quebra do cavaco. O cavaco sempre irá quebrar quando a profundidade de corte é maior que a profundidade de corte mínima e o avanço é maior que o avanço mínimo. Caso contrário o cavaco não irá se quebrar. Estes limites podem ser observados em um diagrama de cavacos, tal qual o da Figura 3-2.

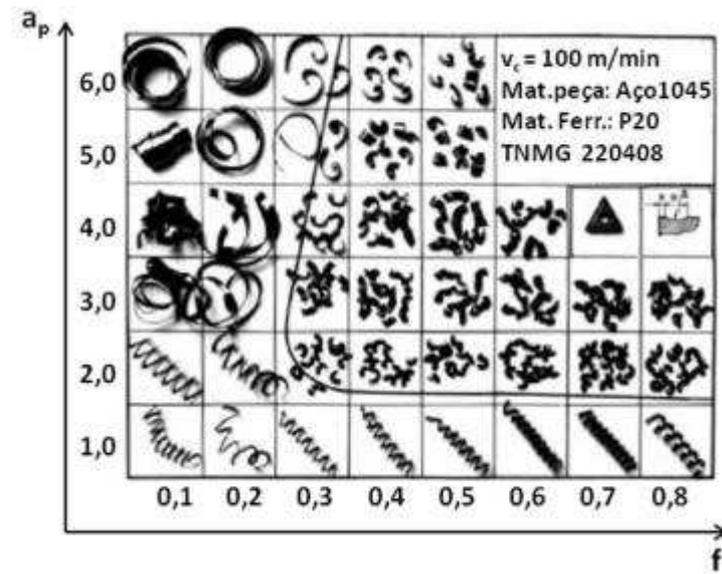


Figura 3-2: Exemplo de diagrama de cavacos (WANG *et al*, 2007)

SALES (1995), relacionando o raio de curvatura natural do cavaco,  $r_c$ , com a velocidade, profundidade de corte, avanço e ângulo de saída da ferramenta, filmou a usinagem do aço ABNT 1020, no corte ortogonal no processo de torneamento em mais de 500 ensaios e por meio de um “software” de análise de imagens, mediu  $r_c$ . Os resultados foram representados por um polinômio de grau três que melhor se ajustou aos pontos distribuídos, com erro calculado de 14.75%. As Figura 3-3, 3-4, 3-5 e 3-6 apresentam os gráficos obtidos, mostrando a influência individual de cada parâmetro estudado em  $r_c$ .

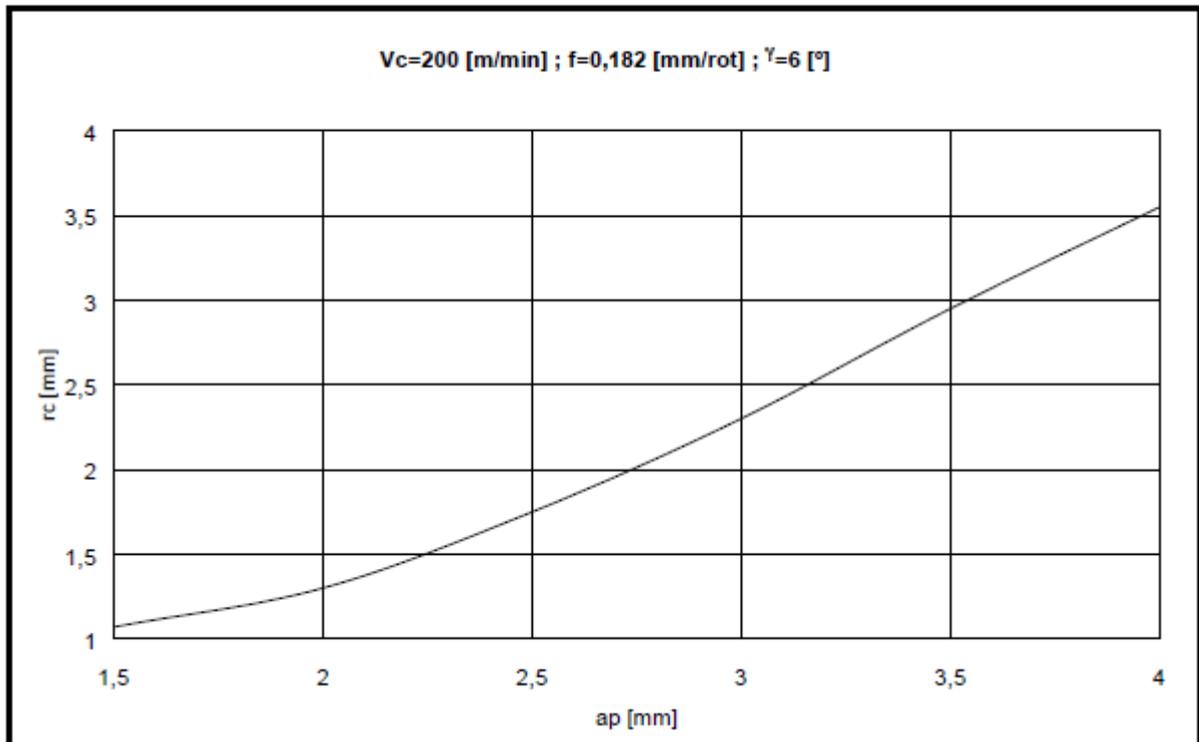


Figura 3-3: Influência da profundidade de corte no raio de curvatura natural do cavaco (SALES, 1995).

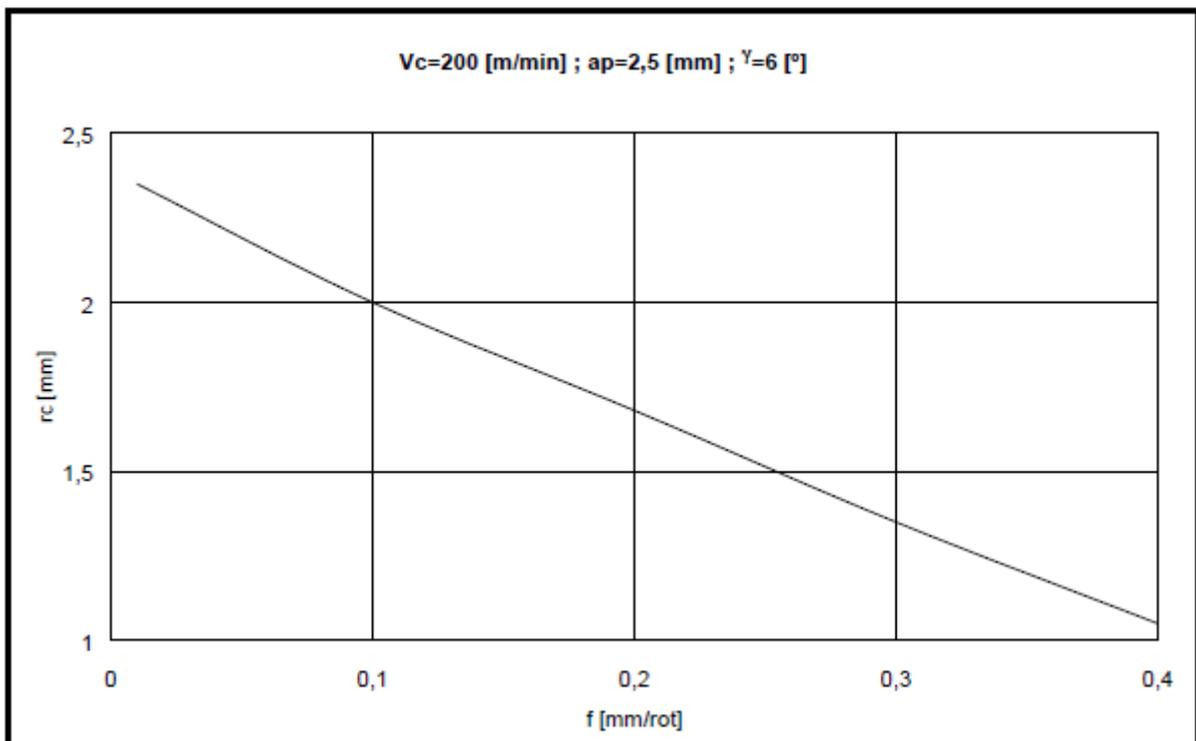


Figura 3-4: Influência do avanço no raio de curvatura natural do cavaco (SALES, 1995).

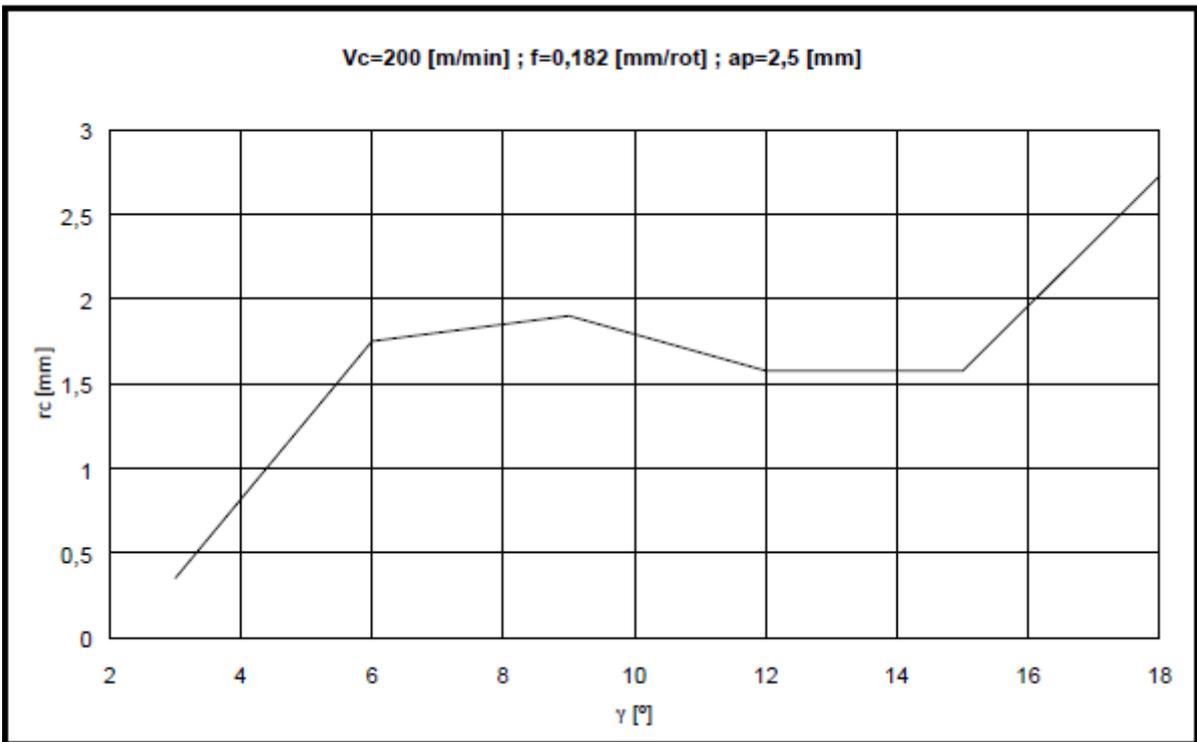


Figura 3-5: Influência do ângulo de saída no raio de curvatura natural do cavaco (SALES, 1995).

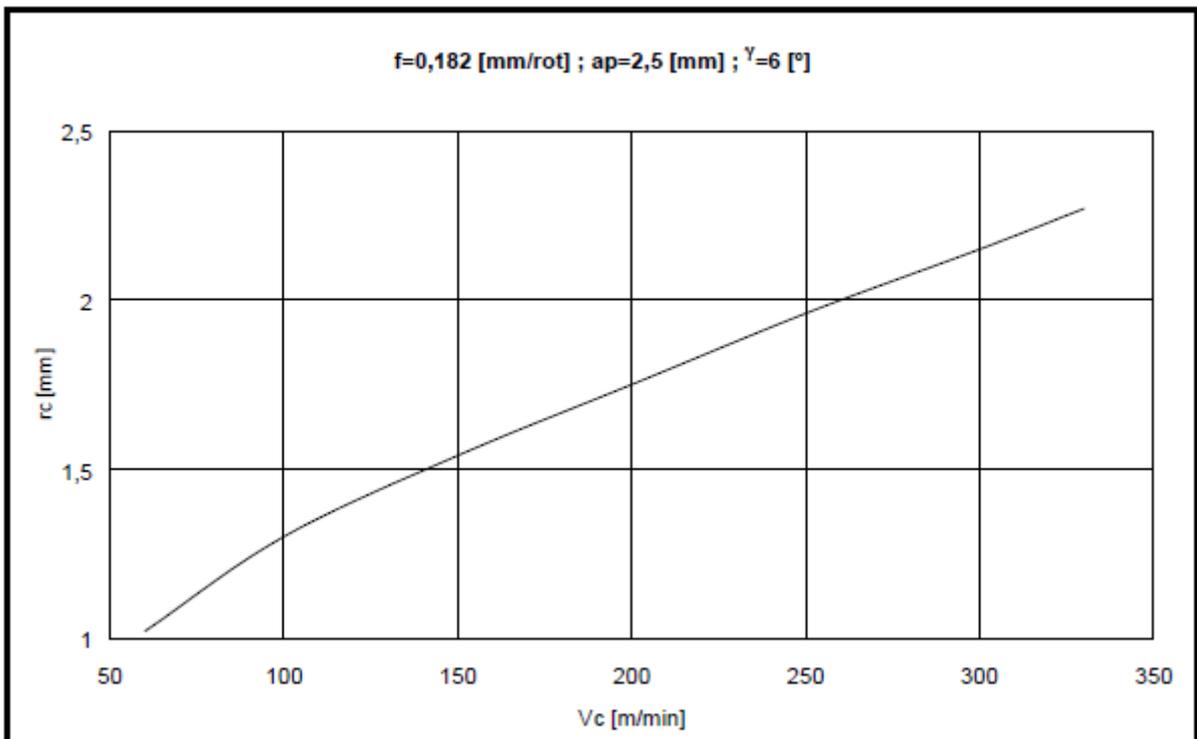


Figura 3-6: Influência da velocidade de corte no raio de curvatura natural do cavaco (SALES, 1995).

Observa-se que o raio de curvatura natural do cavaco aumenta com os aumentos da profundidade de corte, do ângulo de saída da ferramenta e da velocidade de corte, dificultando a quebra do cavaco, diminuindo com o aumento do avanço, facilitando a quebra do cavaco. O comportamento dessas variáveis era esperado, exceto o efeito da profundidade de corte. Normalmente, o aumento da profundidade de corte tende a tornar o cavaco mais quebradiço (reduzindo  $r_c$ ). (SALES, 1995)

SILVA (2008), realizou exame visual das amostras dos cavacos colhidos nos ensaios com torneamento cilíndrico externo do aço ABNT 1045 e a segunda com ferro fundido nodular ambos com ferramentas de metal duro, com e sem revestimento e os resultados serão apresentados nas tabelas abaixo.

<b>Fluído</b>	<b>Avanço (mm/rot)</b>	<b>Vc (m/min)</b>	<b>Forma</b>
Seco	0,138	30	Arco solto
Seco	0,138	100	Arco solto
Seco	0,138	200	Helicoidal arruela longo
Seco	0,149	30	Arco solto
Seco	0,149	100	Arco solto e Fita emaranhado
Seco	0,149	200	Helicoidal arruela emaranhado
Seco	0,204	30	Arco solto e Tubular curto
Seco	0,204	100	Arco solto e Hel. Arruela emar.
Seco	0,204	200	Helicoidal arruela longo
MQF	0,138	30	Espiral cônico
MQF	0,138	100	Helicoidal arruela longo
MQF	0,138	200	Helicoidal arruela emaranhado
MQF	0,149	30	Espiral cônico
MQF	0,149	100	Helicoidal arruela longo
MQF	0,149	200	Helicoidal arruela emaranhado
MQF	0,204	30	Espiral cônico
MQF	0,204	100	Helicoidal arruela longo
MQF	0,204	200	Helicoidal arruela longo
Gotejado	0,138	30	Tubular curto
Gotejado	0,138	100	Helicoidal arruela emaranhado
Gotejado	0,138	200	Helicoidal arruela longo
Gotejado	0,149	30	Tubular curto
Gotejado	0,149	100	Helicoidal arruela longo
Gotejado	0,149	200	Helicoidal arruela longo
Gotejado	0,204	30	Helicoidal arruela curto
Gotejado	0,204	100	Helicoidal arruela longo
Gotejado	0,204	200	Helicoidal arruela longo

Tabela 3.2: Formas dos cavacos e condições de corte do aço ABNT 1045 para ferramentas sem revestimento. (SILVA, 2008)

<b>Fluído</b>	<b>Avanço (mm/rot)</b>	<b>Vc (m/min)</b>	<b>Forma</b>
Seco	0,138	30	Helicoidal arruela longo
Seco	0,138	100	Helicoidal arruela longo
Seco	0,138	200	Helicoidal arruela emaranhado
Seco	0,149	30	Helicoidal arruela longo
Seco	0,149	100	Helicoidal arruela emaranhado
Seco	0,149	200	Helicoidal arruela emaranhado
Seco	0,204	30	Helicoidal arruela emaranhado
Seco	0,204	100	Helicoidal arruela longo
Seco	0,204	200	Helicoidal arruela longo
MQF	0,138	30	Espiral cônico
MQF	0,138	100	Helicoidal arruela longo
MQF	0,138	200	Helicoidal arruela longo
MQF	0,149	30	Espiral cônico
MQF	0,149	100	Helicoidal arruela longo
MQF	0,149	200	Helicoidal arruela longo
MQF	0,204	30	Tubular curto
MQF	0,204	100	Helicoidal arruela longo
MQF	0,204	200	Helicoidal arruela longo
Gotejado	0,138	30	Tubular curto
Gotejado	0,138	100	Helicoidal arruela longo
Gotejado	0,138	200	Helicoidal arruela emaranhado
Gotejado	0,149	30	Tubular curto
Gotejado	0,149	100	Helicoidal arruela longo
Gotejado	0,149	200	Helicoidal arruela emaranhado
Gotejado	0,204	30	Arco solto
Gotejado	0,204	100	Fita emaranhado
Gotejado	0,204	200	Helicoidal arruela longo

Tabela 3.3: Formas dos cavacos e condições de corte do aço ABNT 1045 para ferramentas revestidas. (SILVA, 2008)

<b>Fluído</b>	<b>Avanço (mm/rot)</b>	<b>Vc (m/min)</b>	<b>Forma</b>
Seco	0,138	30	Espiral cônico
Seco	0,138	100	Tubular curto
Seco	0,138	200	Tubular curto
Seco	0,149	30	Espiral cônico
Seco	0,149	100	Tubular curto
Seco	0,149	200	Tubular curto
Seco	0,204	30	Espiral cônico
Seco	0,204	100	Tubular curto
Seco	0,204	200	Espiral cônico
MQF	0,138	30	Espiral cônico
MQF	0,138	100	Espiral cônico
MQF	0,138	200	Espiral cônico
MQF	0,149	30	Espiral cônico
MQF	0,149	100	Espiral cônico
MQF	0,149	200	Espiral cônico
MQF	0,204	30	Espiral cônico
MQF	0,204	100	Espiral cônico
MQF	0,204	200	Espiral cônico
Gotejado	0,138	30	Espiral cônico
Gotejado	0,138	100	Tubular curto
Gotejado	0,138	200	Tubular curto
Gotejado	0,149	30	Espiral cônico
Gotejado	0,149	100	Tubular curto
Gotejado	0,149	200	Tubular curto
Gotejado	0,204	30	Espiral plano
Gotejado	0,204	100	Espiral cônico
Gotejado	0,204	200	Espiral cônico

Tabela 3.4: Formas dos cavacos e condições de corte do ferro fundido nodular para ferramentas sem revestimento. (SILVA, 2008)

<b>Fluído</b>	<b>Avanço (mm/rot)</b>	<b>Vc (m/min)</b>	<b>Forma</b>
Seco	0,138	30	Espiral cônico
Seco	0,138	100	Tubular curto
Seco	0,138	200	Tubular curto
Seco	0,149	30	Espiral cônico
Seco	0,149	100	Tubular curto
Seco	0,149	200	Tubular curto
Seco	0,204	30	Espiral cônico
Seco	0,204	100	Tubular curto
Seco	0,204	200	Tubular curto
MQF	0,138	30	Espiral cônico
MQF	0,138	100	Tubular curto
MQF	0,138	200	Tubular curto
MQF	0,149	30	Espiral cônico
MQF	0,149	100	Tubular curto
MQF	0,149	200	Tubular curto
MQF	0,204	30	Espiral cônico
MQF	0,204	100	Espiral cônico
MQF	0,204	200	Espiral cônico
Gotejado	0,138	30	Espiral plano
Gotejado	0,138	100	Tubular curto
Gotejado	0,138	200	Espiral cônico
Gotejado	0,149	30	Espiral cônico
Gotejado	0,149	100	Espiral cônico
Gotejado	0,149	200	Espiral cônico
Gotejado	0,204	30	Espiral cônico
Gotejado	0,204	100	Espiral cônico
Gotejado	0,204	200	Espiral cônico

Tabela 3.5: Formas dos cavacos e condições de corte do ferro fundido nodular para ferramentas revestidas. (SILVA, 2008)

SILVA (2008) notou que, embora no aço ABNT 1045 a forma do cavaco tenha sido predominantemente de cavacos helicoidais longos, em algumas situações ele passou de helicoidal para espiral ou tubular e de longo para curto. Percebe-se que com a utilização de fluído de corte, para ferramenta sem revestimento, predomina a forma helicoidal.

Quando se utiliza a ferramenta revestida, com exceção de seis condições de corte, os cavacos são helicoidais. Isto mostra que a forma do cavaco está relacionada com a interface cavaco ferramenta, região onde o fluído e o revestimento tem efeito.

Observando-se a tabelas 3.2 e 3.3, verifica-se que, com a utilização de ferramenta sem revestimento temos um aumento razoável na quantidade de cavacos curtos, se comparado a mesma ferramenta com revestimento. Nota-se também nas tabelas 3.2 e 3.3 que esta leve modificação ocorreu principalmente com a diminuição dos avanços e das velocidades. O fluído

não teve uma influência significativa, pois para uma mesma condição variando-se alguns parâmetros de corte ocorria a alteração na forma do cavaco. Os cavacos helicoidais e longos predominaram na maioria dos ensaios, com ênfase nas velocidades de 100 m/min e 200 m/min e os avanços de 0,149 mm/rot e 0,204 mm/rot.

Na usinagem do ferro fundido nodular com ferramenta de metal duro sem revestimento os cavacos se apresentaram mais curtos na forma espiral e pode-se destacar a presença de algumas formas tubulares para as velocidades de 100 m/min e 200 m/min e avanços de 0,138 m/rot, 0,149 m/rot e 0,204 m/rot. O mesmo aconteceu na usinagem do ferro fundido nodular com ferramenta de metal duro revestida, cavacos curtos predominaram na forma de espiral e a forma tubular se apresentou nas velocidades de 100 m/min e 200 m/min e avanços 0,138 m/rot, 0,149 m/rot e 0,204 m/rot nas condições a seco e com MQF. Na usinagem com fluído gotejado houve um predomínio de cavacos na forma espiral cônica para todos os avanços propostos. Este material não forma cavaco longo, devido a sua natureza mais frágil. O cavaco tende a enrolar em forma espiral e logo se quebra.

## 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

### 4.1. Considerações finais

A formação de cavacos é parte importante do processo de Usinagem. O cavaco tem variadas tamanhos e formas que variam de acordo com alguns fatores. As condições de corte, o material da peça usinada, a geometria e material da ferramenta, fluidos de corte e a utilização de quebra-cavacos. Conhecer esses fatores e saber como eles influenciam no resultado final contribui para que o processo seja o mais seguro e econômico possível, portanto precisa de atenção e cuidado na escolha.

Fatores como material da ferramenta e parâmetros de corte tem maior influência no tipo específico de cavacos que será formado, enquanto outros fatores como o fluido de corte e quebra cavacos são utilizados para correção e melhoria do processo, afim de obter determinado resultado que seja mais adequado ao processo.

A forma do cavaco está diretamente ligada à plasticidade do material, à configuração geométrica do corte (peça e ferramenta) e às condições de corte. A forma do cavaco é afetada pelo avanço e pela velocidade de corte. A profundidade de corte tem uma influência em proporção menor que o avanço na forma do cavaco.

O cavaco sempre irá quebrar quando a profundidade de corte é maior que a profundidade de corte mínima e o avanço é maior que o avanço mínimo. Caso contrário o cavaco não irá se quebrar.

Na usinagem de metais dúcteis, sob pequenos e médios avanços, com altas velocidades de corte (geralmente acima de 60 m/min) e grandes ângulos de saída da ferramenta são formados cavacos contínuos

O cavaco descontínuo ocorre na usinagem de materiais frágeis como o ferro fundido cinzento ou também na usinagem de alguns metais menos frágeis a baixas velocidades de corte, grandes avanços e com ângulo de saída baixo, nulo ou negativo, e materiais com certa ductilidade, a baixa velocidade de corte, pequenos ângulos de saída e grandes avanços

O aumento da profundidade de usinagem pôde ser também mais associado à mudança na forma do cavaco, em lascas para menor  $v_c$  e em fita para a maior  $v_c$ . Já o aumento do avanço propiciou a formação de cavacos helicoidais

Cavaco em fita e longos devem ser evitados porque se acumulam ocupando grande espaço e atrapalhando o processo. Cavacos em lascas e curtos são melhores pois tem facilidade de descarte e não representam perigo para o operador ou para a operação.

#### **4.2. Sugestões para trabalhos futuros**

- **Estudo das temperaturas de corte e sua influência no processo de Usinagem**
  
- **Estudo dos tipos de quebra-cavacos**

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABELE, E.; DORR, J. (2002) Ferramentas de corte protegidas contra a defasagem tecnológica, *Máquina e Metais*, Ago, pp. 38-53.
- ABNT, NBR 6162, “Movimentos e Relações Geométricas na Usinagem dos Metais - Terminologia”, 1989.
- ADDHOUM, M.; BROUSSAUD, D. “Interaction of Ceramic Cutting Tools with Nickel-Based Alloys”, *Material Science and Engineering*, vol. A109, 1989, pp. 379-387.c
- ALTINTAS, Y. *Manufacturing and automation: Metal cutting mechanics, machine tools vibration and CNC design*. New York: Cambridge University Press, 2 ed., 2012, 366p.
- AMERICAN SOCIETY FOR METALS. *ASM Handbook. Properties and selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys*. 10 ed, v.1, 2005. 1618p.
- AMORIM, H., 2003, “Apostila de processos de fabricação por usinagem – Furação – 1ª Parte”, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, 15 p
- ARSECULARATNE, J.A. Prediction of tool life for restricted contact and grooved tools based on equivalent feed. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. v. 44, p. 1271-1282, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 6163 – Conceitos da Técnica de Usinagem: Geometria da Cunha Cortante: Terminologia, São Paulo, 1980.
- BALAJI, A. K.; SREERAM, G.; JAWAHIR, I. S.; LENP, E. The Effects of Cutting Tool Thermal Conductivity on Tool-Chip Contact Length and Cyclic Chip Formation in Machining with Grooved Tools. *Annals of the CIRP*. v. 48, p. 33-38, 1999.
- BALAJI, A.K.; GHOSH, R.; FANG, X.D.; STEVENSON, R.; JAWAHIR, I.S. Performance-based predictive models and optimization methods for turning operations and applications: part 2 - assessment of chip forms/chip breakability. *Journal of Manufacturing Processes*. v.8, p. 247 - 257, 2006.
- BARADIE, M. A. El. Cutting fluids: part I. Characterisation. *Journal of Materials Processing Technology*. Dublin. Ireland, n°. 56. 1996. p. 786-797.

BARBOSA, P.A. Estudo do comportamento mecânico na usinagem de aços inoxidáveis. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo, 2014.

BOOTHROYD, G. (1981) Fundamentals of metals machining and machine tools. Editora International student, 5º edição. Nova York: Mc Graw Hill.

BOOTHROYD, G.; KNIGHT, W. A. Fundamentals of machining and machine tools. 2nd edition – New York: Marcel Dekker, 1989.

BYERS, J.P. Metalworking Fluids, 2º edition. Taylor & Francis Group. Society of Tribologists and Lubrication Engineering, p. 480. 2006

CASTILLO, W. J. G., 2005, “Furação profunda de ferro fundido cinzento GG25 com brocas de metal-duro com canais”, Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Eng. Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina-UFSC, 134 p.

CHAGAS, G. M. P.; BARBOSA, P. A.; BARBOSA, C. A.; MACHADO, I. F. Thermal analysis of the chip formation in austenitic stainless steel. Procedia CIRP 8. 6p. 2013.

CHAWLA, B. S. An analysis of strain in chip breaking using slip-line field theory with adhesion friction at chip/tool interface. 2005. Tese de doutorado – National institute of technology, Rourkela (India).

CHETAN; GHOSH, Sudarsan; RAO, P. Venkateswara. Application of sustainable techniques in metal cutting for enhanced machinability: a review. Journal Of Cleaner Production. Department Of Mechanical Engineering, Indian Institute Of Technology Delhi, HauzKhas 110016, India, p. 17-34. mar. 2015.

CHIAVERINI, V. (1990) Aços e ferros fundidos. 6ª ed., São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 576 pgs.

CHILDS, T.H.C., MAEKAWA, K., OBIKAWA, T., YAMANE, Y. Metal machining. New York: John Wiley & Sons, 2000. 408p.

CHOI, J. P. e LEE, S. J. Efficient chip breaker design by predicting the chip breaking performance. Journal of Advanced Manufacture Technology. v. 17, pg. 489-497, 2001.

CLARK, I. E., Sem, P. K. (1998) Advances in the development of ultrahard cutting tool material. Industrial Diamond Review, n.2, p. 40-44.

COOK, N.H. "Chip Formation in Machining Titanium", Proc. Symp. on Mach Grinding Titanium, Watertown Arsenal, Watertown 72, Massachussets, 31st March 1953, pp. 1-7.

COSTA, D. D. (1993) Análise dos parâmetros de torneamento de aços endurecidos. Dissertação de mestrado. Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, Campinas, 110 p.

DE GARMO, E. P. et al Material and processes in manufacturing. 7. ed. Nova York: Macmillan Publishing Company, 1988.

DHARMAREDDY, K; MERRAMA, P; VENKATARAMAIAH, P. Analysis on Influence of Feed Rate and Tool Geometry on Cutting Forces in Turning Using Taguchi Method and Fuzzy Logic. Elsevier, Procedia Materials Science 5, 1672 -1701, Índia, 2014.

DINIZ, A. E.; COPPINI, N.L; MARCONDES, F. C. Tecnologia de Usinagem dos Materiais pg 47 2006

DINIZ, A. S.; Marcondes, F. C.; Coppini, N. L. (2008) Tecnologia da usinagem dos materiais. 5ª ed, São Paulo: Artliber Editora Ltda.

EE, K.C.; BALAJI, A.K.; JAWAHIR, I.S. Progressive tool-wear mechanisms and their effects on chip-curl/chip-form in machining with grooved tools: an extended application of the equivalent toolface (ET) model. Wear. v. 255, p. 1404– 1413, 2003.

FANG, N. Influence of the geometrical parameters of the chip groove on chip breaking performance using new-style chip formers. Journal of Materials Processing Technology. v. 74, pg. 268-275, 1998.

FANG, X.D. and JAWAHIR, I.S., "An Expert System Based on a Fuzzy Mathematical Model for Chip Breakability Assessments in Automated Machining", proceedings of the 2nd Int. ASME Conf., Atlanta, USA, Vol. IV, March 1990, pp 31 -37.

FANG, X.D. and JAWAHIR, I.S., "The Effects of Progressive Tool Wear and Tool Restricted Contact on Chip Breakability in Machining", Wear, Vol. 160, 1993, pp 243 -252

FERRARESI, D. Fundamentos da Usinagem dos Materiais. São Paulo: Blücher, 1977.

FERRARESI, D. Fundamentos da Usinagem dos Metais, 12ªed. São Paulo; Edgard Blucher, 2006. 751p..

FERRARESI, D.; RUFFINO, R. T; PALLEROSI, C. A.(1974). Usinagem dos metais: processo de fresamento. 3 ed. São Paulo: ABM.

FOGO, Fabiane Capraro. Avaliação e critérios de eficiência nos processos de tratamento de fluido de corte por Eletroflotação. 2008. 117 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

FRATILA, D. Evaluation of near-dry machining effects on gear milling process efficiency. *Journal of Cleaner Production*, v. 17, p. 839 – 845, 2009.

GALLARDO, M. E.; GODOY, J. M. M.; VERGARA, J. D.; OVIEDO, O. P.; QUISPE, M. Y.; RAMIREZ, L. H. Bill Mundy Theory, Effective Rake Angle Cutting Tools in Copper Alloys, *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniaria*, 199 - 203, Chile, 2007.

GRZESIK, W. e KWIATKOWSKA, E. An energy approach to chip-breaking when machining with grooved tool inserts. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. v. 37, p. 569– 577, 1997.

HUANG, C. (2006) Microstructure and mechanical properties of nano-scale Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> toughened Ti(C,N) matrix cermet tool material. *Materials Science Forum*, v. 532-533, p. 37-40.

IGNÁCIO, E. A. Caracterização da legislação ambiental brasileira voltada para a utilização de fluídos de corte na indústria metal-mecânica. Florianópolis, 1998. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção - Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 3685: Tool - life testing with single-point turning tools, 1993. 48p. "intersection determination", vol. 18, p 666-678.

ISCAR LTD. (2001) Conceitos básicos de usinagem. Disponível em: [www.iscardobrasil.com.br/](http://www.iscardobrasil.com.br/), acesso em 20 de junho de 2017.

ISO 3002-1 (2013) Grandezas básicas em usinagem e retificação Parte 1: Geometria da parte cortante das ferramentas de corte — Termos gerais, sistemas de referência, ângulos da ferramenta e de trabalho e quebra-cavacos. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, pp. 70.

ISO 513 (2004) International Organization for Standardization, —Classification and application of hard cutting materials for metal removal with defined cutting edges - Designation of the main groups and groups of application.

JAWAHIR, I. S.; LUTTERVELT, C. A. V. Recent Developments in Chip Control Research and Applications. *Annals of the CIRP*. v. 42, p. 659-693, 1993.

JAWAHIR, I.S.; GHOSH, R.; FANG, X.D.; LI, P.X. An investigation of the effects of chip flow on tool-wear in machining with complex grooved tools. *Wear*. v. 184, pg. 145-154, 1995.

KALPAKJIAN, S. Schmid, S. R. *Manufacturing Engineering and Technology*. USA. Prentice Hall. 4ª edição 2000.

KATTAN, I. A.; CURRIE, K. R. Developing new trends of cutting tool geometry, *Journal of Materials Processing Technology*, n. 61. p.231–237, 1996.

KIM, H. G.; SIM J. H.; KWEON, H. J. Performance evaluation of chip breaker utilizing neural network. *Journal of Materials Processing Technology*. v. 209, pg. 647-656, 2009.

KIM, J.-D.; KWEUN, O. B. A chip-breaking system for mild steel in turning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. v. 37, p. 607 – 617, 1997.

KIRK, D.C. “Cutting Aerospace Material (Nickel, Cobalt and Titanium-Based Alloys)”, *Proc. Conf. Tools and Dies for Industry*, Metals Society, London, England, 1976/1977, pp. 77-98.

KLOCKE, F. *Manufacturing Processes 1: Cutting*. Londres: Editora Springer, 2011. 517 p.

KOYEE, R. D.; EISSELER, R.; SCHMAUDER, S. Application of Taguchi coupled fuzzy multi attribute decision making (FMADM) for optimizing surface quality in turning austenitic and duplex stainless steel. *Measurement*. Vol. 58, p. 375-386, 2014.

LIM, C. Y. H., Lau, P. P. T., Lim, S. C. (2001) Work material and the effectiveness of coated tools. *Surface and coatings technology*, v. 146-147, pp 298-304.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. *Teoria da Usinagem dos Metais*. Editora Edgard Blücher: São Paulo, 2009.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. *Teoria da Usinagem dos Materiais*. 2 ed. São Paulo: Blucher, 2011.

MACHADO, A. R.; SILVA, M. B., *Usinagem dos metais*. 4. Ed. Editora da Universidade Federal de Uberlândia, 1999.

MACHADO, A. R.; SILVA, M. B.; COELHO, R. T.; ABRÃO, A. M.; Teoria da Usinagem dos Metais, 3ª ed. São Paulo; Edgard Blucher, 2015.

MACHADO, A.R. “Machining of Ti6Al4V and Inconel 901 with a High Pressure Coolant System”, PhD Thesis, University of Warwick, England, 1990, 288 pgs.

MAITY, K. P. e DAS, N. S. A slip-line solution to metal machining using a cutting tool with a step-type chip-breaker. Journal of Materials Processing Technology. v. 79, p. 217 - 223, 1998.

MARCELINO, Luciana Isabel de Oliveira. FLUIDO DE CORTE MINERAL EMULSIONÁVEL: FLUIDO DE CORTE MINERAL EMULSIONÁVEL. 2013. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós - Graduação Engenharia de Materiais, Engenharia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

MASON, F. (2003) Os conceitos que guiam a indústria no desenvolvimento de pastilhas indexáveis. Máquinas e Metais, pp. 134-143, Dez

MESQUITA, R. M. D.; SOARES, F. A. M.; MARQUES, M. J. M. B. An experimental study of the effect of cutting speed on chip breaking. Journal of Materials Processing Technology. v. 56, pg. 313-320, 1996.

METALS HANDBOOK. Machining, vol. 16. ASM, 1989.

MILLS, B. and REDFORD, A.H. “Machinability of Engineering Materials”, Applied Science Publishers, U.K., 1983, 174 pgs, ISBN -0-85334-183-4.

MOTTA, F.; MACHADO, A. R. Fluidos de corte: tipos, funções, seleção, métodos de aplicação e manutenção. Revista Máquinas e Metais, São Paulo, p.44-56, set. 1995.

NASCIMENTO, Claudia Espanholo Universidade de São Carlos, Estudo da distribuição de temperatura na região de formação de cavaco usando o método dos elementos finitos

NASCIMENTO, G.; ABRÃO, A. M. Influência da geometria da ferramenta de corte na usinabilidade do aço ABNT 1045. Congresso Nacional de Engenharia Mecânica – CONEM,1., Natal –RN, 2000.

NAVES, V. T. G. Usinagem do aço inoxidável austenítico ABNT 316 UF com aplicação de fluido de corte a alta pressão. 2013. 181 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, 2013

OLIVEIRA, J. F. G.; ALVES, S. M. Adequação ambiental dos processos de usinagem utilizando Produção mais Limpa como estratégia de gestão ambiental. *Produção*, v. 17, n. 1, p. 129 – 138, 2007.

PAULINO, W.S.; SALES, W.F.; EZUGWU, E.O. e MACHADO, A.R.; “Determinação da Eficiência de Quebra-cavacos com as Principais Condições de Corte”; XIV COBEM, Bauru, São Paulo, Brasil, 1997.

PENG, Y., ZHANG, W., HE, F., XIONG, D., 2008, “Drill flank measurement and flank/flute

PIZZI, R.; SALES, W. F.; ABRÃO, A. M. e MACHADO, A. R. (1997), “Fresamento de Aços Inoxidáveis Austeníticos ABNT 316”, COBEM - Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Bauru, SP, Brasil.

RAHMAN, M.; SEAH, K. H. W.; LI, X. P.; ZHANG, X. D. a three-dimensional model of chip flow, chip curl and chip breaking under the concept of equivalent parameters.

*International Journal of Machine Tools and Manufacture*. v. 35, p. 1015 – 1031, 1995.

RAHMAN, M.; SEAH, K. H. W.; LI, X. P.; ZHANG, X. D. a three-dimensional model of chip flow, chip curl and chip breaking under the concept of equivalent parameters.

*International Journal of Machine Tools and Manufacture*. v. 35, p. 1015 – 1031, 1995.

RODRIGUES, A. R. Estudo da geometria de arestas de corte aplicadas em usinagem com altas velocidades de corte. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, SP, 2005.

RUNGE, Peter R. F.; DUARTE, Gilson N. Lubrificantes nas indústrias. 1. ed. São Paulo : triboconcept. 1989.

SADIK, M. I.; LINDSTRÖM, B. A simple concept to achieve a rational chip form.

SADIK, M. I.; LINDSTRÖM, B. A simple concept to achieve a rational chip form. *Journal of Materials Processing Technology*. v. 54, pg. 12-16, 1995.

SALES, W.F.; “Relação Experimental Entre o Raio de Curvatura Natural do Cavaco e os Principais Parâmetros de Usinagem”; Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia - UFU, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil, 1995.

SALES, W.F.; “Relação Experimental Entre o Raio de Curvatura Natural do Cavaco e os Principais Parâmetros de Usinagem”; Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia -UFU, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil, 1995.

SANDVIK COROMANT (2014). Manual técnico de Usinagem. Disponível em: [www.sandvik.coromant.com.br](http://www.sandvik.coromant.com.br). Acesso em: 19 de junho de 2017. *Journal of Materials Processing Technology*. v. 54, pg. 12-16, 1995.

SANDVIK, C. *Modern metal cutting: a practical handbook*. Suécia: Sandvik Coromant, Technical Editorial Dept., 1994.

SANTOS, D. J.; COSTA, E.S.; *Processos de usinagem*. Apostila. Divinópolis. Centro Federal de Educação Tecnológica (CEFET), 2006.

SANTOS, S.C.; SALES W.F.; *Fundamentos da Usinagem dos Materiais*. Apostila: Belo Horizonte: Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC), 2004

SCHULZ, H.; EMRICH, A.K.; FINZER, T.; DÖRR, J. (2000) Quais são e para que servem os revestimentos. *Máquinas e Metais*, pp. 38-45, Set.

SEAH, K. H. W.; RAHMAN, M.; LI, X. P.; ZHANG, X. D. A three-dimensional model of chip flow, chip curl and chip breaking for oblique cutting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. v. 36, p. 1385 – 1400, 1996.

SHAW, M.C. “*Metal Cutting Principles*”, Oxford Scientific Publications, USA, 1986, 594 pgs, ISBN -0-19-859002-4.

SHAW, M.C. “*The Assessment of Machinability*”, ISI Special Report, London, 1967, pp. 1-9.

SHAW, M.C. *Metal Cutting Principles*. New York: Oxford University Press, 2005. 594 p.

SHAW, M.C.; DIRK, S.O.; SMITH, P.A.; COOK, N.H.; LOEWEN, E.G. and YANG, C.T. “*Machining Titanium*”, MIT Report, Massachusetts Institute of Technology, 1954.

SILVA, Marco Aurélio. *Investigação experimental da formação do cavaco na usinagem do aço ABNT 1045 e do ferro fundido nodular*. 2008. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia 2008.

SMITH, G.T., “*Advanced Machining -The Handbook of Cutting Technology*”, IFS Publications, 1989, ISBN 1-85423-022-6

SOUZA, Franco Luiz Castilho de; RODRIGUES, Alessandro Roger; YAMAKAMI, Wyser José; PAULO, Rafael Gustavo da Rocha . 2006. AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE FORMAÇÃO DE CAVACO NO TORNEAMENTO DO AÇO ABNT 1045. Engenharia Mecânica - Departamento de Engenharia Mecânica - Faculdade de Engenharia - Campus Ilha Solteira, MG. 2006.

STEMMER, C. E. Ferramentas de Corte I. 4ª Edição. Editora da UFSC. 1995.

STEMMER, C. E., 2001., “Ferramentas de corte I”., 5ª Edição, Florianópolis: Editora da UFSC, 249 p.

STEMMER, C.E. (2005) Ferramentas de Corte I. 6ª edição, Florianópolis: Editora UFSC.

STOETERAU, R. L. “Processos de usinagem”. Disponível em:

[www.lmp.ufsc.br/disciplinas/emc5240/Aula-17-U-2007-1-furacao.pdf](http://www.lmp.ufsc.br/disciplinas/emc5240/Aula-17-U-2007-1-furacao.pdf) - acessado em 28 de junho de 2017.

TAKATSUTO, M. “Chip Disposal System in Intermittently Decelerated Feed”, Bull. Japan Soc. of Prec. Engg., vol. 22, no2, June 1988, pp. 109-114.

TELES, J. M. (2007) Torneamento de ferro fundido nodular ferritizado com nóbio utilizando ferramentas de metal duro. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá. Itajubá,(MG) pp.106.

TRENT, E. M., Metal cutting. 3. ed. Oxford, Butterworth – Heinemann, 1991.

TRENT, E. M., WRIGHT, P.K. Metal Cutting. 4 ed. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2000, 446 - 464 p.

TRENT, E.M. “Metal Cutting”, 2nd Edition, Butterworths, 1984, ISBN 0-408-10856-8.

VIANA, H., 2004, “Desempenho de brocas de HSS revestidas na furção de ligas de Al-Si”., Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Eng. Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia - UFU, 143 p.

WANG, J., ZHANG, Q., 2008, “A study of high-performance plane rake faced twist drills. Part 1: Geometrical analysis and experimental investigation”, International Journal of Machine Tools e Manufacture, Vol. 48, p 1276-1286.

WEINGAERTNER, W.L., SCHROEDER, R.B. (2002) Tecnologia da Usinagem com Ferramentas de Corte de Geometria Definida – Parte I. Tradução do livro

—Fertigungsverfahren – Drehen, Bohren, Fräsen de Wilfried König e Fritz Klocke, Florianópolis.

YEN, Y. C.; JAIN, A.;ALTAN, T. A finite element analisys of orthogonal machining using different tool edge geometries. Journal of Materials Processing Technology, v. 146, p72 –81, 2004.

YUHARA, D. A. (2000) Aplacação de revestimento PVD em ferramenta de corte. Brasimet Com Ind. S. A. In: <http://www.brasimet.com.br/artigos>.

ZHOU, L. Machining chip-breaking prediction with grooved inserts in steel turning. 2001. Tese de doutorado - Worcester Polytechnic Institute, Worcester (EUA).