



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

NEILSON AMARAL MARQUES

Estudo do Controle de Cavacos nos Processos de Usinagem

SÃO LUÍS

2018

NEILSON AMARAL MARQUES

Estudo do Controle de Cavacos nos Processos 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

SÃO LUÍS

2018

i

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

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Estudo do Controle dos Cavacos nos Processo de Usinagem

Autor: Neilson Amaral Marques

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. Dr José Roberto Pereira Rodrigues

Universidade Estadual do Maranhão

Prof. Mc Ferdinando Marco Rodrigues Borges

Universidade Estadual do Maranhão

São Luís/MA, 26 de junho de 2018.

Marques, Neilson Amaral.

Estudo do controle de cavacos nos processos de usinagem /
Neilson Amaral Marques. – São Luís, 2018.

61 f.

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica,
Universidade Estadual do Maranhão, 2018.

Orientador: Prof. Dr. Jean Robert Pereira Rodrigues.

1. Usinagem. 2. Controle de cavaco. 3. Cavaco. 4. Metais. I. Título.

DEDICATÓRIA

A Deus por ter conduzido meus passos nesta caminhada. A São José pela intercessão e por ter atendido meus clamores.

À minha mãe, Ana Célia, mulher guerreira, exemplo de amor e dedicação. A meu pai Nivaldo pela condução de nossa família.

À minha avó, Alda, por ter inspirado meus sonhos e à minha família, de modo geral, por depositarem em mim confiança e me apoiarem irrestritamente.

Aos meus irmãos, Nicélia, Nielson e Nielton por acreditarem em mim e me incentivarem a seguir. Ao meu sobrinho e afilhado, Nielton Junior, por ter sido mais um motivo de inspiração para que eu não fraquejasse.

As minhas cunhadas, Ana Karen Barbosa Porto e Thalita Freitas Pereira, pelo apoio e cumplicidade.

Aos meus companheiros de discência, com os quais dividi os cinco anos de academia, compartilhando conhecimento, dificuldades, alegrias e conquistas e demais amigos pela parceria, lealdade e crença de eu alcançaria este resultado.

Aos meus pais de coração, Elky Rossana Bezerra dos Santos e George Carlos Costa Ferreira, ao meu grande amigo-irmão David Elkson dos Santos Ferreira e meu amigo de infância, Endryo Rudyere Frazão Gomes, por todo apoio, força, receptividade e incentivo.

A minha querida amiga Keila Teixeira Souto, quem me incentivou a fazer o curso de Engenharia Mecânica e a minha grande incentivadora Lindalva de Sousa Silva por sempre me lembrar da minha capacidade e do futuro que estou construindo.

Aos meus amigos do ensino médio, Elis Rayane Conceição Rodrigues, Brenda Nascimento dos Santos, Raiane da Paixão Serra, Rayane dos Prazeres Rodrigues, Rayssa Tathila Nunes Pereira Frazão, Renata Brito Lima Macedo, Gerlanne Patrícia Santos Bastos, Thalyson Fernando Nascimento Ribeiro, Raissa Lins Sousa Almeida, Fernanda Nunes e Jairly França, por alicerçarem minha vida em várias áreas, inclusive na formação educacional.

Aos amigos, Marcos Frazão Barbosa, Aline Freitas Cutrim, Bianca Cristina Santana dos Santos, João Lukas da Silva Veras e Marcos Vinicius Vieira por todo apoio, base concreta de amizade e incentivo na concretização desta etapa.

Aos meus professores, de forma especial à Maria Raimunda, Deusa Maria, Concita de Maria Pavão Carvalho, Luis Carlos e Deuzieth de Jesus Dutra e à diretora Concita de Maria Gomes Leite, pela transferência de conhecimento e pela formação durante minha vida estudantil.

Ao meu chefe e amigo, Matias Marinho, pela flexibilidade e compreensão, estendendo os agradecimentos aos meus colegas de trabalho. Ao deputado estadual Roberto Costa por ter sido, por anos, meu incentivador.

Ao meu amigo, Secretário Nacional de Juventude, Assis Filho, pelo irrestrito apoio e pela contribuição humana e de liderança. Aos amigos da Juventude do MDB e a todos que, na minha trajetória política e fora dela, contribuíram, direta ou indiretamente, com a minha jornada acadêmica.

À minha eterna amiga Marcele Cardoso.

AGRADECIMENTOS

A Deus, sem o qual eu jamais teria concluído esta etapa, por ter me dado sustento e não ter me permitido desistir. Ao meu Santo padroeiro, São José, pela intercessão diante de Deus e por ter atendido sempre aos meus pedidos.

Ao Prof. Jean Robert, pela orientação, desprendimento em ajudar-me e relevante colaboração na execução deste trabalho.

À Universidade Estadual do Maranhão por me possibilitar vislumbrar um horizonte superior e de aprendizagem.

À minha querida amiga, Mariane Lopes, pelo apoio na construção deste trabalho.

RESUMO

O controle da produção de cavacos propicia maior confiança na segurança dos processos em relação às operações automatizadas, porque a disposição dos cavacos é controlada, suave e confiável, visto que a formação de cavacos inadequados pode causar redução no tempo de atividade da máquina, aumento da necessidade de manutenção e consequentes paradas na produção, reduzindo assim a produtividade de uma indústria. O objetivo deste trabalho foi realizar uma revisão de literatura sobre a importância do controle de cavacos nos processos de usinagem, utilizando o método bibliográfico. A formação de cavacos e a expulsão destes do processo são um problema crítico nas operações de usinagem. Conclui-se que o reaproveitamento do cavaco gerado na indústria deve ser amplamente divulgado e implementados na indústria metalúrgica como estratégia de preservação ambiental e redução dos custos produtivos. Conclui-se que as questões de controle de cavaco geralmente são encontradas em aplicações de semi-acabamento, acabamento e profundidade de corte variável, que são a grande maioria das aplicações de torneamento na indústria e a sugestão de realização de trabalho futuro com ênfase nas questões dos impactos ambientais causado pela produção de cavacos.

Palavras-chave: Usinagem, Torneamento, Controle de Cavaco e Tipos de Cavaco.

ABSTRACT

The control of the chip production provides a greater confidence in the safety of the processes in relation to the automated operations, because the disposition of the chips is controlled, smooth and reliable, since the formation of inadequate chips can cause reduction in the time of machine activity, need for maintenance and consequent downtime in production, thus reducing the productivity of an industry. The objective of this work was to perform a literature review on the importance of chip control in the machining processes, using the bibliographic method. Chip formation and ejection from the process is a critical problem in machining operations. It is concluded that the reuse of the chip generated in the industry should be widely disseminated to the metallurgical industry as a strategy of environmental preservation and reduction of production costs. It is concluded that chip control issues are generally found in applications of semi-finishing, finishing and variable depth of cut, which are the great majority of turning applications in the industry and the suggestion of carrying out future work with emphasis on the issues of the environmental impacts caused by the production of chips.

Keywords: Machining, Turning, Control of Chipse and Types of Chips.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Ângulo de fluxo de cavaco. (ADAPTADO DE MARTINS, 2014).....	32
Figura 2.2: Esquema de movimento rotativo usado no processo de usinagem. (ADAPTADO DE STOETERAU, 2015).	35
Figura 2.3: Esquema da formação de cavacos (ADAPTADO DE OLIVEIRA, 2015).....	38
Figura 2.4: Ângulos envolvidos na formação do cavaco. (ADAPTADO DE OLIVEIRA, 2015).....	39
Figura 2.5: Tipos básicos de cavacos. (ADAPTADO DE STOETERAU, 2015).....	40
Figura 2.6: Cavacos de ruptura. (ADAPTADO DE STOETERAU, 2015).	41
Figura 2.7: Representação do Cavaco de Contínuo. (ADAPTADO DE STOETERAU, 2015).	42
Figura 2.8: Cavaco de cisalhamento. (ADAPTADO DE STOETERAU, 2015).	44
Figura 2.9: Classificação dos tipos de cavaco pela forma, segundo a Norma ISO 3685 (ABNT, 1993).....	47
Figura 2.10: Máquina-ferramenta utilizada no processo de usinagem. (ADAPTADO DE STOETERAU, 2015).	48
Figura 2.11: Fatores de influência na forma do cavaco. (ADAPTADO DE MARTINS, (2014).	49
Figura 3.1: Modelos clássicos de formação de cavaco (ADAPTADO DE MARTINS, 2014).	51
Figura 3.2: Compressão do material de trabalho (camada) à frente da face da ferramenta. (ADAPTADO DE BORGES, 2009).	52
Figura 3.3: Ilustração de uma operação de corte de uma peça e formação de cavaco em termos de parâmetros de corte ortogonal. (ADAPTADO DE MARTINS, 2014).....	54

Figura 3.4: Influência da geometria da ferramenta de corte na formação do tipo de cavaco. (ADAPTADO DE MARTINS, 2014).	55
Figura 3.5: Geometria da ferramenta de tornear. (ADAPTADO DE STOETERAU, 2015). ..	56
Figura 3.6: Classificação de cavacos quanto a forma favorável de formação. (ADAPTADO DE FRANCARO, 2015).	57
Figura 3.7: Métodos de quebra de cavaco. (ADAPTADO DE BORGES, 2009).	58
Figura 3.8: Denominações para a formação do cavaco. (ADAPTADO DE FRANCARO, 2015).	60
Figura 3.9: Principais funções atribuídas ao fluido de corte nos processos de usinagem. (ADAPTADO DE STOETERAU, 2015).	62
Figura 3.10: Movimentos de corte inerentes aos processos de usinagem para retirada de cavacos de peça de trabalho. (ADAPTADO DE STOETERAU, 2015).	64
Figura 3.11: Propriedades dos materiais de ferramentas. (ADAPTADO DE STOETERAU, 2015).	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Condições mais favoráveis para formação de cavacos contínuos e os benefícios de sua formação para o processo. (BARBOSA, 2009; BORGES, 2009; CASTILLO, 2015).	43
Tabela 2.2: Comparativo entre processos de formação de cavaco. (BARBOSA, 2009; BORGES, 2009; CASTILLO, 2015).....	45
Tabela 3.1: Classificação dos processos de usinagem conforme tipo de ferramenta utilizada para retirada do material da peça. (STOETERAU, 2015).....	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

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_ϵ	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
γ_0	ângulo de saída da ferramenta
φ	ângulo de cisalhamento
L_c	percurso de corte
L_f	percurso de avanço
L_e	percurso efetivo
φ	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
χ_r	ângulo de posição da aresta de corte
ψ_l	ângulo de fluxo lateral
ψ_i	ângulo de fluxo inverso
k	constante (material da peça)
R_l	curvatura lateral
R_v	curvatura vertical
λ_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_α	superfície principal de folga
A'_α	superfície secundária de folga
A_γ	superfície de saída

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	28
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
2.1. Processos de usinagem	31
2.1.1. Torneamento	34
2.1.2. Fresamento	36
2.1.3 Furação	37
2.2. Mecanismo de formação do cavaco	38
2.2.1. Tipos de cavaco	40
2.2.2. Formas de cavacos	46
2.2.3. Grau de recalque	50
3. FATORES DE INFLUÊNCIA NA FORMAÇÃO DO CAVACO	51
3.1. Geometria da Ferramenta de corte	53
3.2. Quebra Cavaco	56
3.3. Material da peça	61
3.4. Fluidos de corte	62
3.5. Condições de corte	63
3.6. Material da ferramenta	64
3.7. Usinagem	66
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	68
4.1. Considerações finais	68
4.2. Sugestões para trabalhos futuros	69
5. REFERÊNCIAS	70

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 é 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 tiram 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 de o 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.

Diante do exposto, surgiu a seguinte questão problema: como a análise dos mecanismos de formação, métodos de remoção e fatores de influência na formação de cavacos pode auxiliar as indústrias metalúrgicas na redução de seus custos e otimização da produção?

Assim, a presente pesquisa se justifica, pela necessidade de estudo sobre o efeito do avanço tecnológico e de processos como fatores a serem considerados na formação de

cavacos, no melhor aproveitamento dos materiais, no menor desgaste da ferramenta de corte e na redução do desperdício de matéria prima, além do menor impacto de paradas nos processos de fabricação em decorrência de perda de fio de corte das ferramentas ou mesmo quebra destas, associados à retirada de cavacos, à interferência na ferramenta e à lubrificação do contato entre a ferramenta e o cavaco que prejudicam o desempenho da usinagem. Ademais, é importante ver a usinagem, bem como todas as operações de fabricação, como um sistema que consiste na peça trabalhada, na ferramenta e na máquina, o que envolve os resíduos destas interações.

Para auxiliar a responder à questão problema, foi definido como objetivo geral deste Trabalho de Conclusão de Curso realizar uma revisão de literatura sobre a importância do controle de cavacos nos processos de usinagem. Como objetivos específicos foram delimitados: descrever os processos de usinagem e as novas tecnologias aplicadas nas indústrias; caracterizar os métodos especiais para promover a quebra de cavacos; destacar as especificidades do mecanismo de formação do cavaco; e relacionar a classificação dos fatores de influência na formação do cavaco.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os processos de fabricação podem ser classificados em três categorias, processos de união, formação e remoção de materiais. Processo de usinagem é um processo de remoção de material. Convencionalmente, o conceito de usinagem é descrito como removendo metal por forçar mecanicamente uma aresta de corte através de uma peça de trabalho. Ele inclui processos como torneamento, fresagem, perfuração, que são todas as operações de formação de cavacos (WEINGAERTNER; SCHROETER, 1991). Para entender o mecanismo de formação de cavaco foi elaborado um roteiro com informações basilares, cujos tópicos que são descritos a seguir.

2.1. Processos de usinagem

De acordo com AGOSTINHO, VILELLA e BUTTON (2004) as operações de usinagem são os métodos de fabricação mais versáteis, mais comuns e reconhecidos como os processos de fabricação mais utilizados do mundo. Eles afirmam que praticamente todo o conjunto mecânico é submetido a algum tipo de operação de usinagem em uma fase inicial, intermediária ou final, dado que esses processos oferecem um alto padrão de acabamento, com flexibilidade e qualidade. Desta forma, implica afirmar que a formação de cavacos é a operação de produção de resíduo mais comum dentre os processos de fabricação de peças metálicas.

BARBOSA (2015) destaca que o corte de metal na usinagem é um processo no qual uma fina camada de metal, o cavaco, é removida da superfície de um corpo pela ação de uma ferramenta em forma de cunha. Os processos de corte de metais estão presentes em grandes indústrias que fabricam produtos com componentes de grande porte, por exemplo, indústria automotiva, indústria aeroespacial, indústria de eletrodomésticos, dentre outras, e também em indústrias de alta tecnologia onde peças pequenas são usinadas com tolerâncias de alta precisão.

MACHADO e colaboradores (2011) afirmam que a usinagem é um processo de

remoção gradual do excesso de material dos espaços em bruto pré-formados sob a forma de cavacos. Para todos os tipos de usinagem, incluindo moagem, acabamento, lapidação, furação, torneamento ou fresagem, o fenômeno da formação de cavacos é semelhante no ponto em que a ferramenta atende a necessidade do trabalho. A usinagem é o termo amplo usado para denominar o processo de moldagem pela remoção de material da peça que resulta em cavacos.

Depois que o material é removido da peça de trabalho, ele flui para fora sob a forma de cavacos. Depois de fluir, o cavaco se encaixa naturalmente ou através do contato com obstáculos. Se a tensão do material exceder a tensão de ruptura do material, o cavaco quebrará. O fluxo de cavacos, a curvatura dos cavacos e a quebra destes são três áreas principais de pesquisa de controle de cavacos (ARENAS, 2007).

Para pesquisa de controle de cavacos, duas questões devem ser apresentadas: como um cavaco se forma e se move no espaço? E como um cavaco quebra? Os modos de quebra de cavacos dependem da natureza do fluxo de cavacos e da sua direção. Compreender o mecanismo de fluxo de cavacos é importante para controle deste resíduo produtivo (CASTILLO, 2015).

O fluxo de cavaco é determinado por muitos fatores e geralmente é descrito com o ângulo de fluxo do cavaco ψ . O ângulo de fluxo do cavaco é o ângulo entre a direção do fluxo do cavaco na ferramenta de corte e a linha normal da aresta de corte (Figura 2.1).

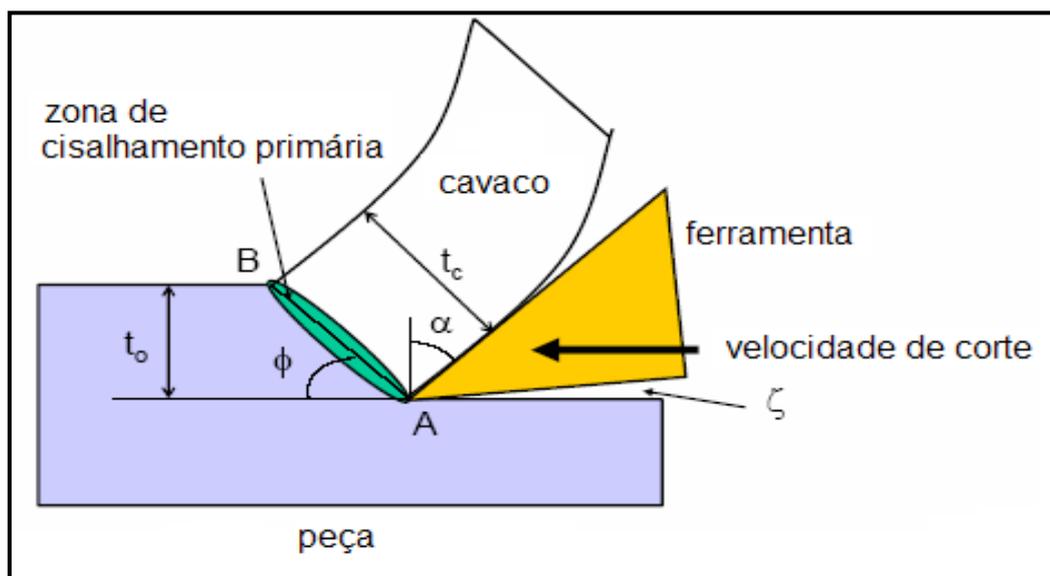


Figura 2.1: Ângulo de fluxo de cavaco. (ADAPTADO DE MARTINS, 2014).

Muito trabalho foi feito na pesquisa de ângulo de fluxo de cavacos durante as últimas décadas, e existem muitos métodos para calcular o ângulo de fluxo de cavaco. A investigação do fluxo de cavacos começou com a modelagem sobre as ferramentas de plano de ancinho. O fluxo de cavaco é apenas uma parte do movimento espacial do cavaco. Para entender o mecanismo de movimento de cavaco, é necessário estudar a onda de enxertos (MARTINS, 2014).

Nas últimas décadas, foram desenvolvidos processos de usinagem totalmente novos, como usinagem ultrassônica, processos térmicos de remoção de metal, processos eletroquímicos de remoção de material, processos de usinagem a laser, etc., que são muito diferentes dos processos de usinagem convencionais (BARBOSA, 2015).

A automação dos processos de fabricação determinou que fosse necessário maior controle na formação de cavaco, torna-se uma questão essencial nas operações de usinagem para realizar os processos de fabricação eficiente e suave (CIMM, 2014). Com o desenvolvimento de operações automatizadas de usinagem, a necessidade de controle do processo de formação de cavacos aumentou significativamente, sendo essa capacidade de controle também importante no processo de usinagem das peças reconcondicionadas (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

STEMMER (2011) afirma que a importância da usinagem é tal que, é o processo mais comum usado para produzir componentes com dimensões geométricas especificadas e uma qualidade determinada no acabamento superficial. Seu custo representa cerca de 15% do valor de todos os produtos manufaturados em todos os países industrializados.

No entanto, as operações de corte de metal convencional ainda são os processos de fabricação mais utilizados, um negócio de US \$ 60 bilhões/por ano. Ainda é essencial desenvolver uma compreensão mais fundamental dos processos de corte de metais. Embora os processos de corte de metal convencional sejam processos de formação de cavacos, o controle de cavacos foi ignorado no controle do processo de fabricação por um longo período de tempo (SOUZA et al., 2016).

Conforme SANTOS (2007) na indústria moderna, o tempo é um dos fatores mais importantes que influenciam o custo de produção, por isso há uma grande necessidade de

diminuição do tempo de produção, particularmente reduzindo o tempo e o número de operações de usinagem sem adição excessiva no custo da ferramenta.

LOPES (2012) destaca que com aumento nos últimos anos dos preços dos insumos metálicos necessários à fabricação de ligas metálicas, em especial o níquel e do cromo utilizados na produção de aço, está se tornando cada vez mais dispendioso os custos de fabricação desses produtos para as empresas metalúrgicas, de forma que, o controle da formação de cavacos se tornou necessário para redução dos custos assim como a reciclagem começou a ser mais atraente para a indústria.

De acordo com CALLISTER JR (2006), o custo da usinagem depende muito da taxa de remoção do material e pode ser reduzido aumentando a velocidade de corte e/ou o movimento de avanço, mas há limites em relação à vida útil da ferramenta devido ao calor gerado na aresta de corte.

A usinagem é um processo de semi-acabamento ou acabamento essencialmente feito para conferir a precisão dimensional, na forma e acabamentos superficiais exigidos ou estipulados para permitir que o produto satisfaça os seus requisitos funcionais básicos, ou seja, proporcionar um melhor desempenho e uma vida útil longa ao produto ou peça, mas para que esses objetivos sejam alcançados, necessariamente a extração do material excedente da peça tem como consequência a formação de cavacos de diversos tipos (WEINGAERTNER; SCHROETER, 2012).

Durante a fabricação de uma peça, vários processos são necessários para remover o excesso de material. Três processos de usinagem primários – torneamento, furação e fresagem – são usados como principais meios de remoção, os quais extraem o material excedente na forma de cavacos. Cada processo desempenha um papel fundamental na forma como um produto é fabricado e melhora as propriedades únicas deste (SALES; SANTOS, 2013).

2.1.1. Torneamento

Sales e Santos afirmam que dentre os processos de usinagem, o torneamento é o mais

simples e amplamente utilizado na indústria, pois possui alta flexibilidade, baixo tempo de configuração, dentre outras vantagens. O torneamento é executado por um dispositivo denominado torno, o qual gira o produto à medida que as lâminas cortam e raspam as áreas definidas no projeto, sendo o material extraído o formador do cavaco (SALES e SANTOS, 2013).

O processo de rotação pode ser realizado no exterior ou no interior de uma peça. O movimento de rotação, baseado em parte no próprio eixo do torno, permite que peças cilíndricas sejam fabricadas por meio de um movimento uniforme de rotação. Isso requer três movimentos relativos entre a peça e a ferramenta, nomeadamente: movimento de corte, movimento de avanço e movimento de penetração. O processo ocorre ao retirar, em de forma contínua, o cavaco do corpo da peça trabalhada, que é removido por uma ferramenta de corte único, que deve ter dureza maior do que a dureza do corpo da peça trabalhada (MACHADO et al., 2011), como esquema mostrado na Figura 2.2.

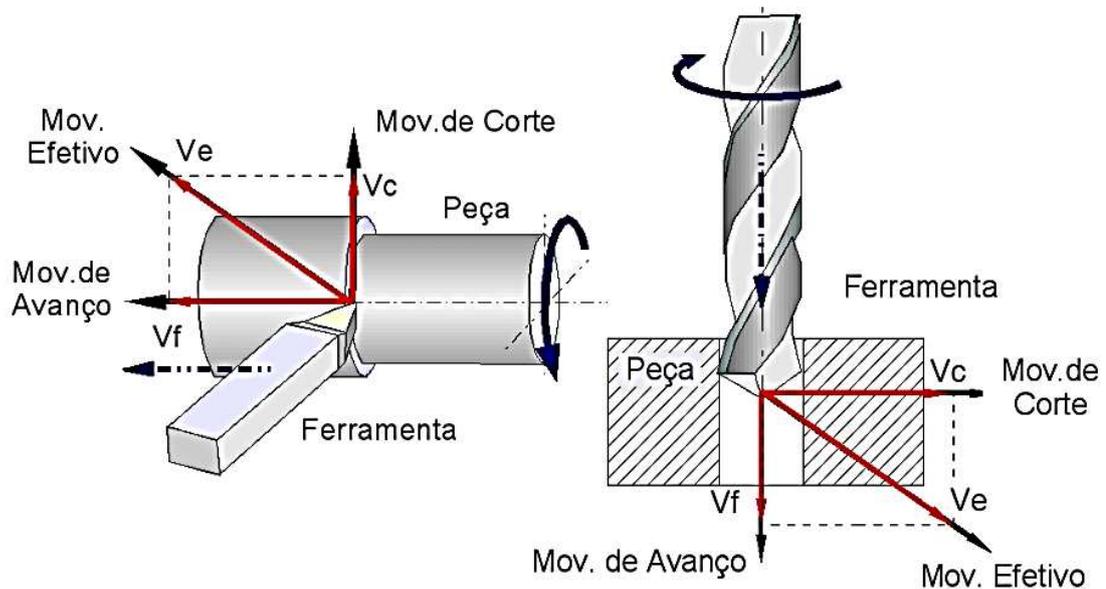


Figura 2.2: Esquema de movimento rotativo usado no processo de usinagem. (ADAPTADO DE STOETERAU, 2015).

Os tornos motorizados são o tipo mais comum encontrado em uso na indústria geral. Os tornos de torre e os tornos de propósito especial são mais comumente usados para aplicações que exigem a fabricação repetida de peças. Os tornos de torre apresentam um suporte de

ferramenta que permite que a máquina execute uma série de operações sucessivas de corte sem interferência do operador (CORRÊA et al., 2014).

As ferramentas de corte dos tornos funcionam ao longo de dois eixos de movimento para criar cortes com profundidade e diâmetro precisos. Os tornos estão disponíveis em dois tipos diferentes, o tipo tradicional manual e o tipo automatizado de controle numérico (CNC), sendo identificados como um dos três subtipos diferentes: tornos de torre, tornos motorizados e tornos de propósito especial (LOPES, 2012).

2.1.2. Fresamento

O fresamento é outro processo que utiliza cortadores rotativos para remover material, mas a diferença reside na forma como o equipamento funciona. Uma fresadora possui uma mesa móvel em que o material é montado. Na maioria das fresadoras, as ferramentas de cortes múltiplos são estacionárias e a mesa move o material para que os cortes desejados possam ser feitos. Outros tipos de fresadoras apresentam ferramentas de mesa e de corte com outros implementos móveis (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

A ação de corte dos muitos dentes da peça da fresa fornece um método rápido de usinagem. A superfície usinada pode ser plana, angular ou curvada. A superfície também pode ser desbastada em qualquer combinação de formas (CORRÊA *et al.*, 2014).

As operações de fresagem envolvem o uso de cortadores rotativos multiponto para remover o material de uma peça de trabalho (LOPES, 2012). Existem dois tipos principais de operações de fresagem: fresagem facial e fresagem periférica. A fresagem facial corta superfícies planas na peça de trabalho e cavidades de fundo plano. O movimento pode ser horizontal ou vertical. A fresagem periférica corta ranhuras profundas, linhas e dentes de engrenagem (SALES; SANTOS, 2013).

Descrevem AGOSTINHO, VILELLA e BUTTON (2004) que a peça a ser trabalhada pode ser movimentada na ferramenta de corte de duas maneiras. A fresagem convencional envolve a movimentação da peça contra a rotação do cortador, sendo este é o método

recomendado para fresadoras manuais. A fresagem de escalada, por outro lado, move a peça de trabalho na mesma direção que a rotação do cortador, sendo o método preferencial para a fresagem CNC.

O fresamento é melhor aplicado como um processo secundário para uma peça já trabalhada, pois ajuda a adicionar recursos como furos, rebaixos, ranhuras e contornos (MACHADO; SILVA, 2008). Algumas das operações que uma fresadora é capaz de realizar incluem corte, rebate, roteamento, decapagem e outros trilhos de ferramentas complexas, tornando a máquina de fresar um dos equipamentos mais flexíveis em uma oficina de máquinas (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Existem quatro tipos de máquinas de fresar: fresadoras de mão, fresadoras planas, fresadoras universais e fresadoras omniversais, e apresentam cortadores horizontais ou instalados em um eixo vertical (KRABBE, 2008). Conforme esperado, a fresadora omniversal permite o uso de ambas as ferramentas de corte, montadas vertical e horizontalmente, tornando-se uma das fresadoras mais complexas e flexíveis disponíveis (VENTURA, 2008).

2.1.3 Furação

A furação é um dos processos de usinagem mais importantes, pois os furos que são criados se destinam, muitas vezes, a auxiliar na montagem de peças, máquinas ou equipamentos, garantindo estabilidade e precisão ao produto. Em seu processo, cria um furo, normalmente redondo, cujas partes retiradas formam o cavaco (CALLISTER JR, 2006).

Para retirada das aparas da peça trabalhada é utilizada uma peça projetada na forma da broca para perfuração, que ajuda os cavacos produzidos durante o processo a serem retiradas do corpo e do contato com a peça trabalhada, mantendo-a livre de resíduos e mantendo a precisão e segurança da operação de furação (SANTOS, 2007).

2.2. Mecanismo de formação do cavaco

Mesmo com todos os equipamentos sofisticados e técnicas utilizadas na indústria moderna, a mecânica básica de formação de um cavaco permanece a mesma. À medida que uma ferramenta de corte raspa a peça a ser trabalhada, o material diretamente à frente da ferramenta é deformado plasticamente sob uma determinada pressão e cortado. O material deformado procura então aliviar sua condição estressada por fratura e flui no espaço acima da ferramenta na forma de um cavaco (BARBOSA, 2014). A Figura 2.3 apresenta um esquema da formação do cavaco.

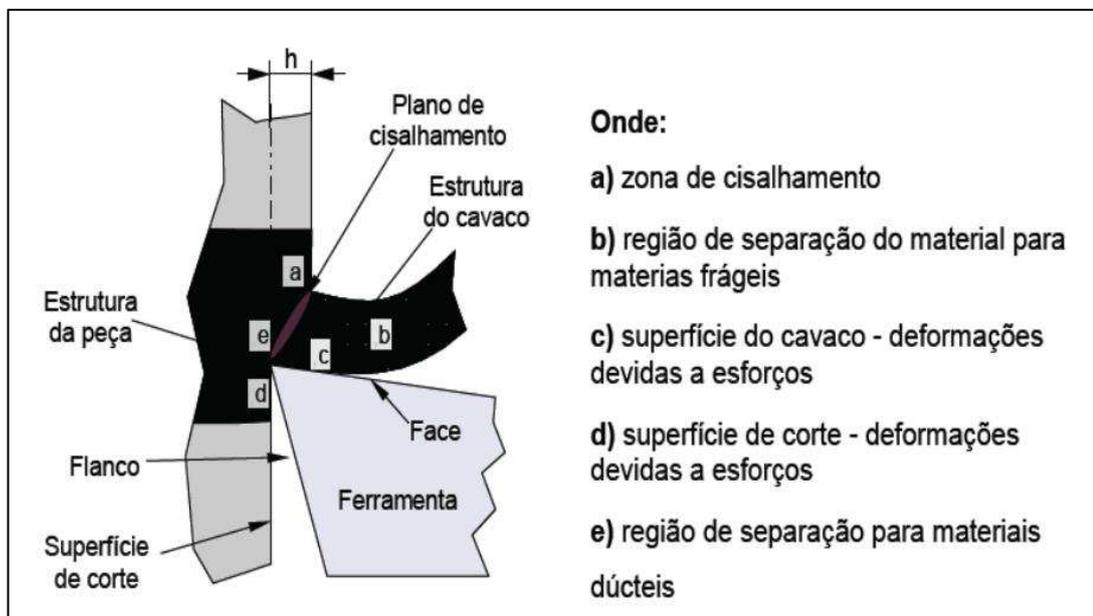


Figura 2.3: Esquema da formação de cavacos (ADAPTADO DE OLIVEIRA, 2015).

A deformação de um material de trabalho significa que força suficiente foi exercida pela ferramenta de corte para remodelar ou retirar permanentemente a parte definida do material da peça trabalhada. Independentemente da ferramenta que está sendo usada ou do metal que está sendo cortado, o processo de formação de cavaco ocorre por um mecanismo chamado de deformação plástica. Essa deformação pode ser visualizada como cisalhamento, fenômeno que ocorre quando um metal é submetido a uma carga que excede seu limite elástico. Os cristais do metal alongam-se através de uma ação de escorregar ou cortar, que ocorre dentro

dos cristais e entre cristais adjacentes (BORGES, 2009).

As operações de corte mais práticas, como torneamento e fresagem, envolvem duas ou mais arestas de corte inclinadas em vários ângulos até a direção do corte, conforme ilustrado na Figura 2.4. No entanto, o mecanismo básico de corte pode ser explicado pela análise de corte feito com uma única aresta de corte (VENTURA, 2008). Se um material for remodelado, é dito que excedeu o limite de plástico. Um cavaco é uma combinação de deformação plástica e cisalhamento, ou seja, o cavaco deformado é separado do material original por fratura (CORRÊA *et al.*, 2014).

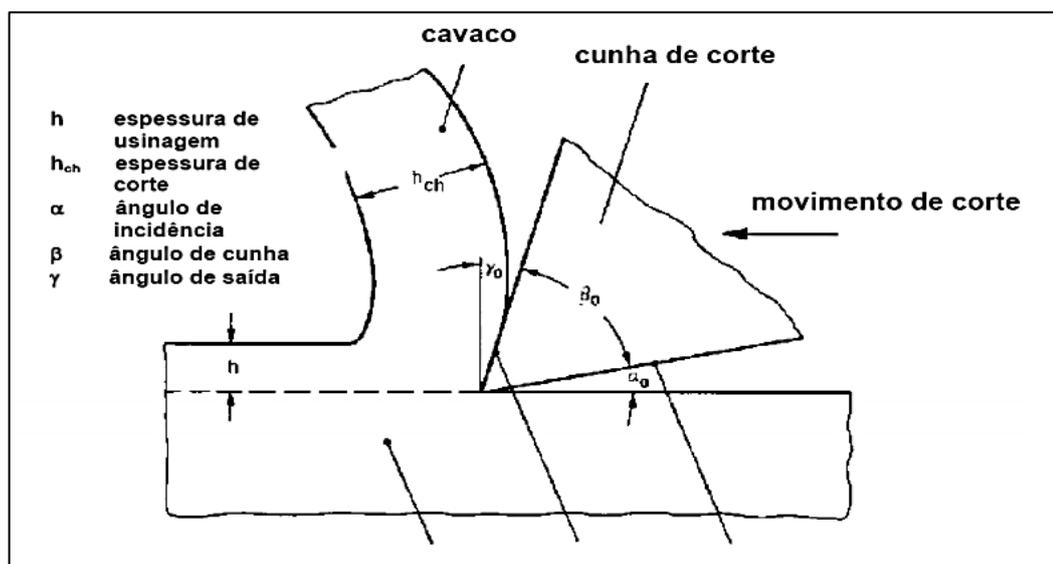


Figura 2.4: Ângulos envolvidos na formação do cavaco. (ADAPTADO DE OLIVEIRA, 2015).

Um melhor controle de cavaco requer previsibilidade da capacidade de quebra de lascas/cavaco em um determinado conjunto de parâmetros de usinagem. Mas, é difícil determinar o processo de formação de cavacos devido ao mecanismo complexo de sua formação, que tem várias combinações de condições de usinagem com vários parâmetros de processo envolvidos que são determinantes (CALLISTER JR, 2006).

A falha no controle da formação de cavacos está intimamente relacionada com a rugosidade da superfície da peça trabalhada, a imprecisão no produto, o desgaste da ferramenta, etc, por isso, o controle de cavaco é necessário para executar operações confiáveis

em sistemas de usinagem automatizados (ARENAS, 2007).

2.2.1. Tipos de cavaco

O tipo de cavaco que se forma depende de muitos fatores, tanto da ferramenta quanto do material. Em geral, os principais fatores são o ângulo formado pelas faces de borda da peça e da ferramenta e também do ângulo em que esta é apresentada à superfície (BARBOSA, 2009).

O conhecimento dos tipos de cavacos é essencial para todos os operadores de máquinas de usinagem porque promove a previsão sobre a condição de operação. Os tipos de cavacos podem ser caracterizados segundo a curvatura do resíduo metálico produzido na usinagem (CIMM, 2014). Os cavacos resultantes de corte de metal foram classificados em três tipos básicos: Cavaco de ruptura ou Tipo 1, Cavaco Contínuo ou Tipo 2 e Cavaco de Cisalhamento ou Tipo 3 (BARBOSA, 2014), mostrados na Figura 2.5.

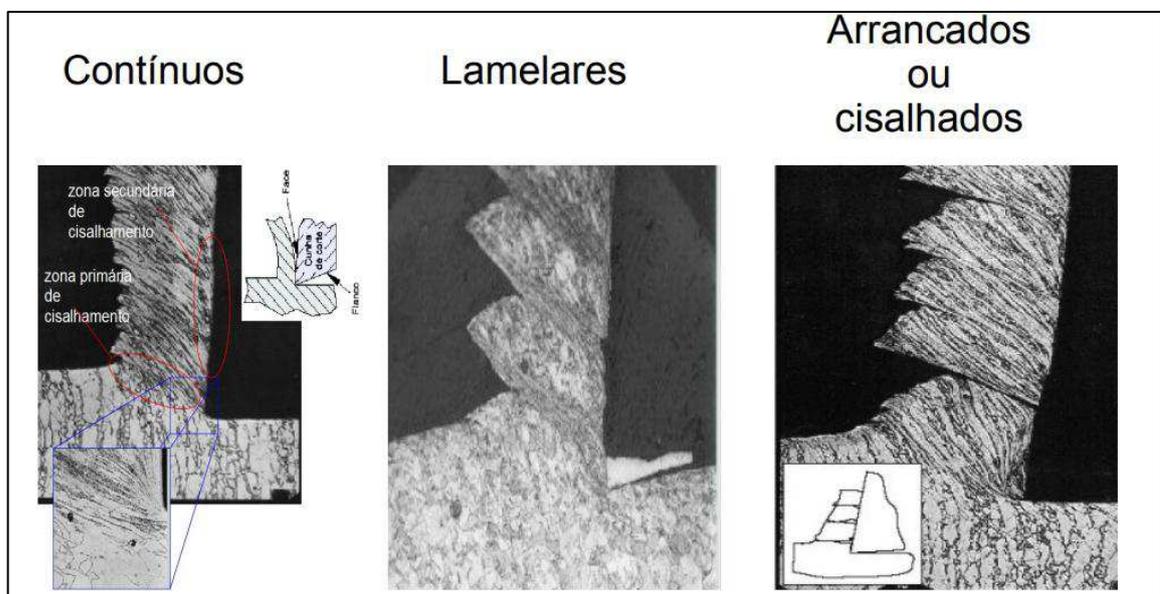


Figura 2.5: Tipos básicos de cavacos. (ADAPTADO DE STOETERAU, 2015).

Os cavacos de ruptura, como mostrado na Figura 2.6, são produzidos quando o metal

quebradiço, como o ferro fundido e o bronze duro, são cortados ou quando alguns metais dúcteis são cortados em condições de corte precárias (BORGES, 2009). À medida que o ponto da ferramenta de corte entra em contato com o metal, ocorre uma compressão e o cavaco começa a fluir ao longo da interface da ferramenta. Quanto mais esforço é aplicado ao metal quebradiço pela ação de corte, mais o metal é comprimido até chegar a um ponto onde a ruptura ocorre e o cavaco se separa da porção não mecanizada (CALLISTER JR, 2006).

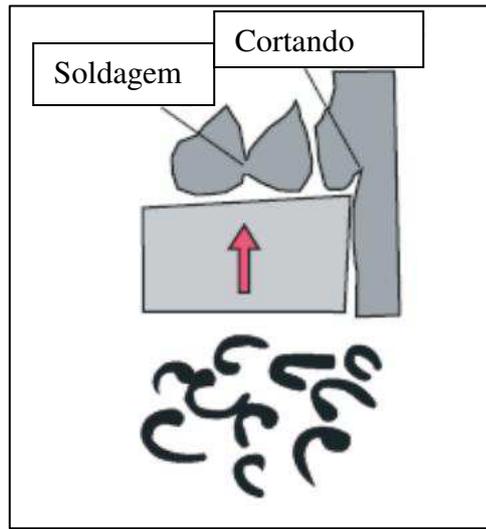


Figura 2.6: Cavacos de ruptura. (ADAPTADO DE STOETERAU, 2015).

Os cavacos de ruptura se formam de maneira segmentada. É formada quando a usinagem de material quebradiço, como ferro fundido, latão etc. com velocidade de corte lenta e com ângulo de rake pequeno. Estas microplaquetas se formam em material dúctil quando o atrito entre a ferramenta e a peça de trabalho é alto. Os cavacos de ruptura em material dúctil dão um acabamento superficial fraco em uma máquina lenta (STEMMER, 2011).

As condições favoráveis para formar este tipo de cavaco são: a peça de trabalho deve ter natureza frágil; velocidade lenta do corte; ângulo de ferramenta reduzido; e grande profundidade do corte (MOREIRA, 2012).

Este ciclo é repetido indefinidamente durante a operação de corte, com a ruptura de cada segmento que ocorre no ângulo de corte ou no plano. Geralmente, como resultado dessas rupturas sucessivas, uma superfície pobre é produzida na peça trabalhada. Os cavacos de ruptura são formados por uma série de rupturas que ocorre aproximadamente perpendicular à

face do lugar da ferramenta, cada elemento de cavaco que passa ao longo da face da ferramenta e os pequenos segmentos de cavaco podem se aderir parcialmente um ao outro e se torna um pouco mais longo (SANTOS, 2007).

Uma vez que os cavacos se dividem em pequenos segmentos, o atrito entre a ferramenta e os cavacos reduz, resultando em um melhor acabamento superficial. Esses cavacos são convenientes para manipular, coletar e descartar. Os cavacos de ruptura tendem a ser formados quando uma ou mais ou as seguintes condições existem: material frágil, como ferro fundido e bronze; grande espessura do cavaco; baixa velocidade de corte; e ângulo pequeno da ferramenta (BARBOSA, 2014).

A abordagem mais lógica no desenvolvimento de modelos de corte para usinagem com cavaco de ruptura é investigar e entender a direção absoluta do fluxo de cavacos, já que o processo de enrolamento de lascas e os subsequentes processos de queima de cavacos dependem muito da natureza do fluxo de cavacos e sua direção (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

O cavaco contínuo (Figura 2.7) é uma fita contínua produzida quando o fluxo de metal ao lado da face da ferramenta não é muito restringido por uma borda construída ou fricção na interface da ferramenta. O cavaco de fita contínua é considerado ideal para ações de corte eficientes porque resulta em melhores acabamentos (CALLISTER JR, 2006).

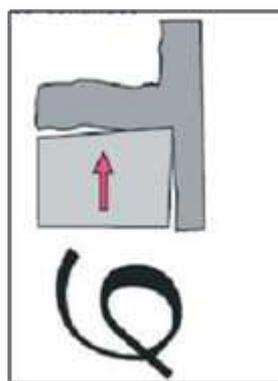


Figura 2.7: Representação do Cavaco de Contínuo. (ADAPTADO DE STOETERAU, 2015).

Ao contrário do cavaco Tipo I, as fraturas ou rupturas não ocorrem aqui, devido à natureza dúctil do metal. Os cavacos contínuos tendem a ser formados quando as seguintes

condições existem: material dúctil; velocidade de corte elevada; espessura pequena de cavacos; ângulo de rack grande; e atrito mínimo do cavaco na face da ferramenta polida; uso de lubrificantes de corte eficientes ou uso de material de ferramenta com baixo coeficiente de atrito (BARBOSA, 2009).

Os cavacos contínuos são formados pela deformação plástica contínua de metal sem fratura na frente da aresta de corte da ferramenta e pelo fluxo suave do cavaco na face da ferramenta. O aço leve e o cobre são considerados materiais mais desejáveis para obter cavacos contínuos. Os cavacos obtidos têm a mesma espessura em toda extensão, sendo o tipo de cavaco mais desejável, uma vez que se origina de um corte estável, resultando em um acabamento de superfície geralmente bom. Por outro lado, esses cavacos são difíceis de manusear e descartar (BORGES, 2009).

Os cavacos contínuos, de acordo com o nome, formam espirais em um segmento contínuo. Este cavaco é formado durante o corte de material dúctil como o alumínio, o cobre etc. com uma alta velocidade de corte. O atrito entre ferramenta e material é mínimo durante esse processo. Esta é a forma devido à deformação plástica contínua do material por aplicação da ferramenta. Esses cavacos têm espessura igual ao longo do comprimento e geralmente resultam em um bom acabamento superficial (CASTILLO, 2015). A Tabela 2.1 apresenta as condições mais favoráveis para formação de cavacos contínuos e os benefícios de sua formação para o processo.

Tabela 2.1: Condições mais favoráveis para formação de cavacos contínuos e os benefícios de sua formação para o processo. (ADAPTADO DE BARBOSA, 2009; BORGES, 2009; CASTILLO, 2015).

Condições mais favoráveis para formar cavacos contínuos	Benefícios dos cavacos contínuos
A peça de trabalho deve ter natureza dúctil.	Dá alto acabamento superficial de usinagem de material dúctil.
O ângulo do rack deve ser grande.	
O atrito entre a peça e a ferramenta deve ser mínimo.	As pastilhas contínuas se formam quando baixa fricção que minimiza a perda de fricção.
A velocidade de corte deve ser alta.	
Profundidade de corte deve ser pequeno.	Devido ao baixo atrito, a vida da

Uso adequado de refrigerante e lubrificante. A ferramenta deve ter baixo coeficiente de atrito.	ferramenta é alta O consumo de energia é baixo.
--	--

O cavaco de cisalhamento, Figura 2.8, forma-se na usinagem com o uso de grandes evoluções e velocidade de corte comumente superiores a 100 m/mm em materiais dúcteis e tenazes como aços liga e aço-carbono. O ângulo de cisalhamento é o plano onde ocorre o deslizamento para começar a formação de aparas (VENTURA 2008).



Figura 2.8: Cavaco de cisalhamento. (ADAPTADO DE STOETERAU, 2015).

Os cavacos por cisalhamento se assemelham ao cavaco contínuo, exceto que uma borda construída que é formada no rosto da ferramenta. Ocorrem durante a usinagem de metal dúctil com fricção excessiva entre a ferramenta e a peça de trabalho. Este cavaco não é suave como cavacos contínuos. O cisalhamento é formado devido à alta temperatura entre a ferramenta e a peça de trabalho. Esta alta temperatura é devido à alta força de atrito entre a ferramenta e a peça de trabalho (SOUZA et al., 2016).

Os fatores comuns que promovem a consolidação de cavaco de cisalhamento são: corte de metal dúctil; força de atrito elevado na face da ferramenta; alta temperatura entre a ferramenta e a peça de trabalho; falta de fluido refrigerante e lubrificante (DORÉ, 2007). A Tabela 2.2 apresenta um comparativo entre as características dos processos de formação do

cavaco.

Tabela 2.2: Comparativo entre processos de formação de cavaco. (ADAPTADO DE BARBOSA, 2009; BORGES, 2009; CASTILLO, 2015).

Tipo de cavaco	Tipo de material	Ângulo de bascula	Profundidade do corte	Velocidade de corte
Contínuo	Dúctil	Alto	Pequeno	Grande / médio
Ruptura	Frágil, Dúctil, mas difícil de trabalhar	Médio	Alto	Baixo
Cisalhamento	Dúctil	Médio baixo	Médio	Médio

Independentemente do ângulo de cisalhamento, a deformação compressiva causada pela força da ferramenta contra a peça trabalhada fará com que o cavaco seja mais espesso e mais curto do que a camada do material retirado da peça (BORGES, 2009). O trabalho ou a energia necessária para deformar o material geralmente representam a maior parcela de forças e trabalho envolvidos em uma operação de remoção de metal. Para uma camada de material de trabalho de dimensões determinadas, quanto mais espesso o cavaco, maior a força necessária para produzi-lo (MACHADO; SILVA, 2008).

A energia mecânica consumida na área de corte é convertida em calor. As principais fontes de calor são: a zona de cisalhamento, a interface entre a ferramenta e o cavaco onde a força de atrito gera calor e a parte inferior da ponta da ferramenta que esfrega contra a superfície usinada. A interação dessas fontes de calor, combinada com a geometria da área de corte, resulta em uma distribuição de temperatura complexa (BARBOSA, 2014).

Os tipos de cavacos dependem de: natureza da peça de trabalho, natureza da ferramenta, dimensão da ferramenta, taxa de alimentação, velocidade de corte, fricção entre ferramenta e peça de trabalho e ambiente de corte como temperatura, fricção etc. Os cavacos têm dois tipos de fluxo (STOETERAU, 2015):

- a) Fluxo lateral do cavaco: fluxo de cavaco na face da ferramenta;
- b) Fluxo de retorno de cavaco: fluxo de cavaco observado em um plano perpendicular à borda de corte.

O fluxo lateral do cavaco indica a quantidade de resíduo material que se encaixa na face secundária, ou no perfil da ranhura da ferramenta de usinagem. Os efeitos combinados desses dois tipos de fluxo de cavaco fazem um fluxo de cavacos tridimensional, levando posteriormente a uma curvatura e a uma quebra. Para o estudo de fluxo de cavacos, o objetivo mais importante é estabelecer o modelo do ângulo de fluxo lateral de cavaco, que na maioria das pesquisas é chamado de ângulo de fluxo de cavaco (BARBOSA, 2015).

Os cavacos de usinagem variam muito em forma e comprimento. Na usinagem, são desejados cavacos contínuos e de ruptura, porque inesperados cavacos longos podem danificar a superfície acabada da peça de trabalho; pode quebrar as inserções, ou mesmo prejudicar o operador. Portanto, o estudo da quebra de aparas é muito importante para otimizar o processo de usinagem. O controle de cavaco eficiente contribuirá para uma maior confiabilidade do processo de usinagem, uma superfície melhor acabada e maior produtividade (MOREIRA, 2012).

2.2.2. Formas de cavacos

O corte é um processo físico complexo em que estão envolvidos fenômenos de fricção, bandas de cisalhamento adiabático, aquecimento excessivo, tensões grandes e altas taxas de deformação. As características da forma da ferramenta, a ponta, os ângulos do rake e do flanco e a velocidade de corte, entre outros, desempenham um papel muito importante nas forças de corte geradas, no consumo de energia, no desgaste da ferramenta e na morfologia do cavaco obtida a partir do corte. Muitos parâmetros e combinações são possíveis para projetar o corte adequado para a usinagem de uma peça de metal (STEMMER, 2015).

As características geométricas, que dão a forma, e metalúrgicas dos cavacos representam o nível de desempenho dos processos, pois testemunham a maioria dos fenômenos físicos, químicos e térmicos que ocorrem durante a usinagem. Na era de fabricação moderna, os métodos exigem maximização da produtividade e com a introdução do sistema de fabricação integrada de computador (CIM) e do sistema de fabricação flexível (FMS), houve aumento máximo da produtividade (MACHADO; SILVA, 2008).

A forma dos cavacos é um importante índice de qualidade da usinagem porque indica direta ou indiretamente: a natureza e o comportamento do material trabalhado sob condição de usinagem; a necessidade de energia específica, ou seja, a quantidade de energia necessária para remover o volume unitário de cavaco do material trabalhado; e a natureza e grau de interação nas interfaces entre ferramentas e cavacos (MACHADO *et al.*, 2011).

A forma do cavaco gerado no processo de usinagem está intimamente relacionada com a produtividade do produto. Se gerar uma forma de cavaco incorreta, tempo e dinheiro são perdidos devido a riscos de segurança para o operador, danos nas ferramentas de produção e na superfície da peça trabalhada, além da perda de produtividade devido à parada frequente na máquina de produção por quebra ou necessidade de limpeza e manutenção (BORGES, 2009). De acordo com a norma ISO 3685, as formas de cavaco podem ser classificadas, conforme a Figura 2.9.

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 2.9: Classificação dos tipos de cavaco pela forma, segundo a Norma ISO 3685 (ABNT, 1993)

Cavacos em fita: os cavacos em fita são geralmente os mais problemáticos. Se afundam em toda a máquina-ferramenta (Figura 2.10), ficam enrolados na ferramenta, na peça de trabalho e na fixação, causando a quebra das ferramentas, atolam o equipamento de

manipulação de cavaco, são difíceis de remover e são perigosas, especialmente quando começam a chicotear ao redor. Os aços com baixo teor de carbono e aços duros geralmente causam esse tipo de cavaco. Uma das maneiras mais rápidas de eliminar o cavaco em fita é aumentar o avanço, porque um cavaco mais espesso quebra mais facilmente (SOUZA et al., 2016).

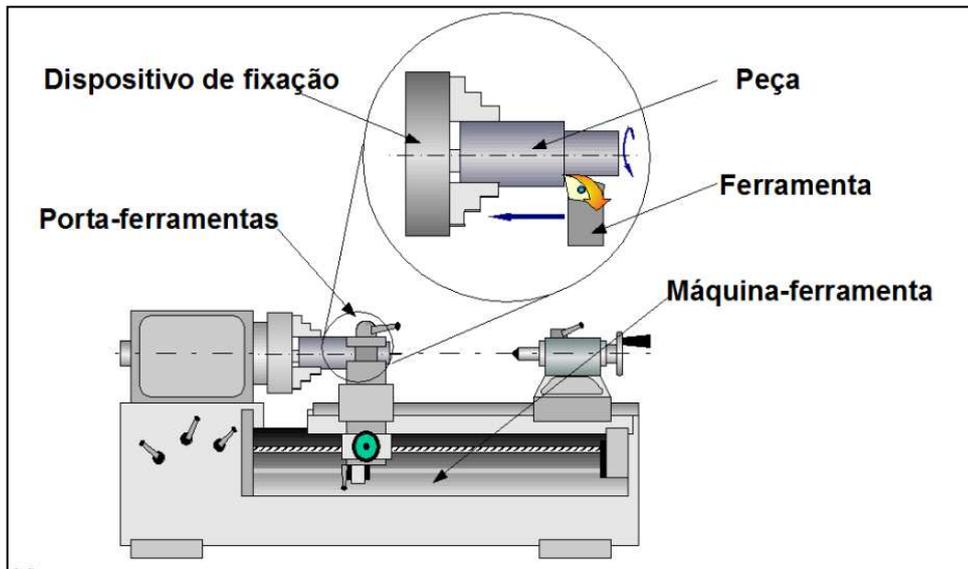


Figura 2.10: Máquina-ferramenta utilizada no processo de usinagem. (ADAPTADO DE STOETERAU, 2015).

Cavacos emaranhados: são cavacos contínuos muito parecidos com cavacos em fita. Geralmente são causados pelas mesmas condições que os cavacos em fita e criam os mesmos problemas. Parece correto, portanto, que, para corrigir uma situação de cavacos, os mesmos métodos seriam usados como com cavacos em fita. Além disso, o resfriamento das microplaquetas com um refrigerante de inundação ou névoa à medida que saem da ferramenta ajudará frequentemente a quebrá-las (WEINGAERTNER; SCHROETER, 1991).

Cavacos de hélice plana: são cavacos que estão perto do ponto de ruptura. Os problemas que esse tipo de cavaco cria problemas semelhantes aos criados por cavacos em fita. Os cavacos de hélice infinitos são comuns quando se usam materiais muito dúcteis, como aços com chumbo ou outros materiais macios (BARBOSA, 2015).

Cavacos de hélice oblíqua: geralmente não são um problema, desde que sejam

consistentes e sem extensões ocasionais. Um cavaco de hélice oblíqua e consistente está perto do cavaco em espiral ideal (SANDVIK COROMANT, 2005).

Cavaco em espiral: Se existe um cavaco perfeito, é a metade da virada ou o cavaco de forma "6". Esta é a forma do cavaco que o operador busca em sua operação de corte. O cavaco de meio turno é conhecido como a forma de cavaco clássico (STEMMER, 2011).

Cavacos em vírgula: não apresentam um problema de um ponto de vista de manipulação, mas esses cavacos são um sinal de que pode ocorrer uma vida útil menor ou uma falha prematura na ferramenta de corte. O cavaco em vírgula é formado por uma pressão muito alta e causa calor intenso, deflexão da ferramenta e peça de trabalho e falha rápida na ferramenta. Um cavaco em vírgula significa que seu caminho de fluxo está excessivamente restrito e as causas incluem: uma velocidade de avanço muito alta, um ângulo de inclinação muito negativo, uma seleção ou configuração incorreta da quebra cavaco ou uma inserção desgastada (RODRIGUES, 2013). A Figura 2.11 expõe os fatores que influencia na forma do cavaco.

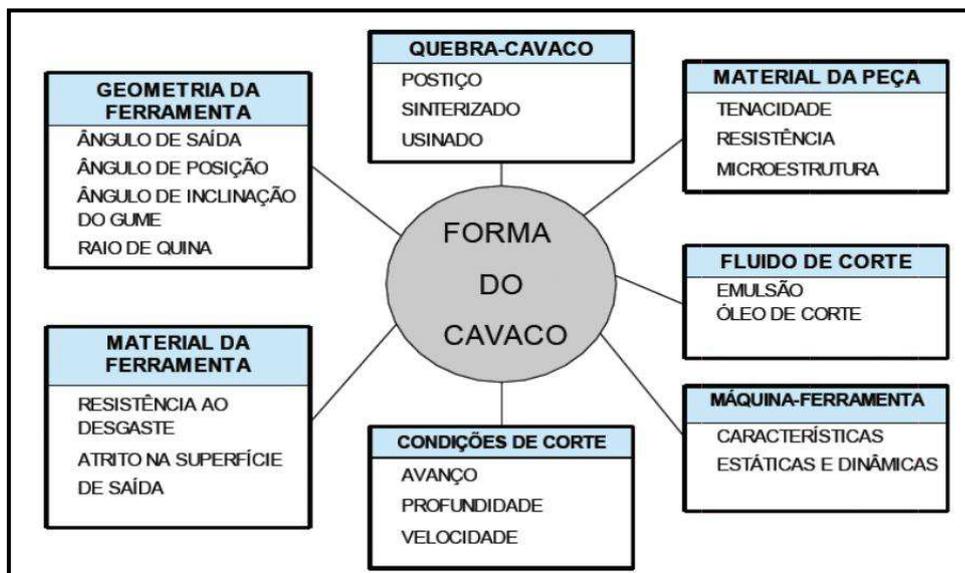


Figura 2.11: Fatores de influência na forma do cavaco. (ADAPTADO DE MARTINS, 2014)

A forma de cavacos usinados depende principalmente de: material de trabalho; material e geometria da ferramenta de corte; níveis de velocidade de corte e alimentação e, até certo ponto, na profundidade de corte; ambiente de usinagem ou fluido de corte que afeta a

temperatura e fricção entre a ferramenta de trabalho e o cavaco. O conhecimento dos mecanismos básicos da formação de cavacos ajuda a entender as características dos cavacos e a obter formas de cavaco favoráveis a qualidade do produto e redução de custos de produção (VENTURA, 2008).

2.2.3. Grau de recalque

O grau ou fator de recalque é um elemento muito importante na teoria da usinagem, uma vez que norteia fatores de usinabilidade como:

- pressão específica do cavaco sobre a ferramenta;
- volume de cavaco produzido por unidade de potência;
- temperatura;
- é uma relação que diz respeito a quanto o cavaco se deformou, mas nada diz sobre a vida da ferramenta de corte (MARTINS, 2014, p. 34).

A equação (1) que define o grau/fator de recalque é apresentada a seguir.

$$\Lambda_h = \frac{m}{f \cdot a_p \cdot \rho \cdot l'} \quad (1)$$

onde:

m – peso do cavaco [g];

f e a_p – avanço e profundidade de corte [mm];

ρ – peso específico do material [g/mm³];

l' – comprimento do cavaco [mm].

No processo de formação do cavaco, o matéria-prima recalçada atravessa zona de cisalhamento, em que acontece, anteriormente a ruptura, a deformação plástica do material.

3. FATORES DE INFLUÊNCIA NA FORMAÇÃO DO CAVACO

O estudo da formação de cavacos é o método mais eficiente e barato para entender as características da usinagem de materiais. De acordo com os trabalhos de pesquisa da Souza et al (2016) para garantir o controle de cavaco, as seguintes condições devem ser observadas: se há resistência suficiente do material para produção de cavaco; envergamento do cavaco devido à falta de homogeneidade da deformação em várias camadas de metal; direcionando o fluxo de cavaco para obstáculos naturais que curvam o cavaco na direção oposta ao envergamento. São diversos fatores que exercem influência simultaneamente na formação de cavacos.

O padrão e a extensão da deformação total dos cavacos devido às deformações de cisalhamento primário e secundário destes à frente e ao longo da face da ferramenta dependem do: material de trabalho, da ferramenta, do material e geometria, da velocidade de usinagem (VC) e movimentação e da aplicação de fluido de corte (SANTOS, 2007). A Figura 3.1 apresenta os modelos clássicos de formação do cavaco.

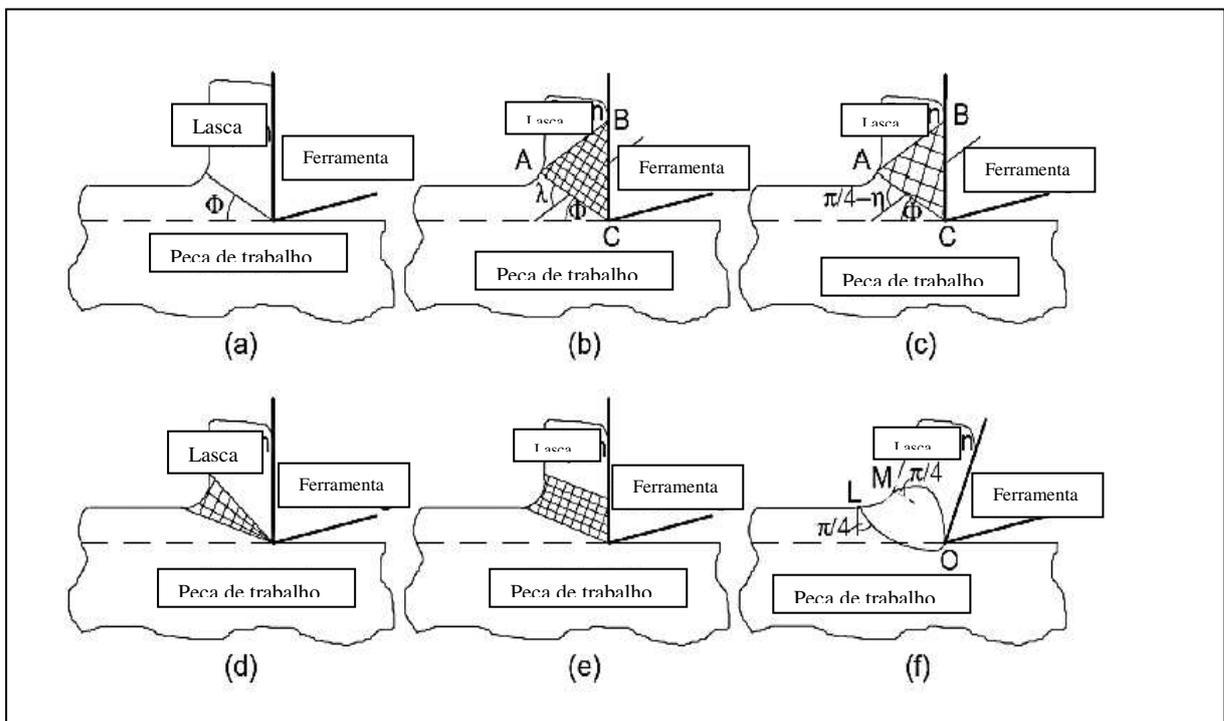


Figura 3.1: Modelos clássicos de formação de cavaco (ADAPTADO DE MARTINS, 2014).

No mecanismo de formação de cavacos na usinagem contínua de materiais dúcteis, a camada não cortada do material de trabalho logo à frente da ferramenta de corte é submetida a compressão quase total (CALLISTER JR, 2006). A força exercida pela ferramenta no cavaco surge da força normal, N e força de fricção, F como indicado na Figura 3.2.

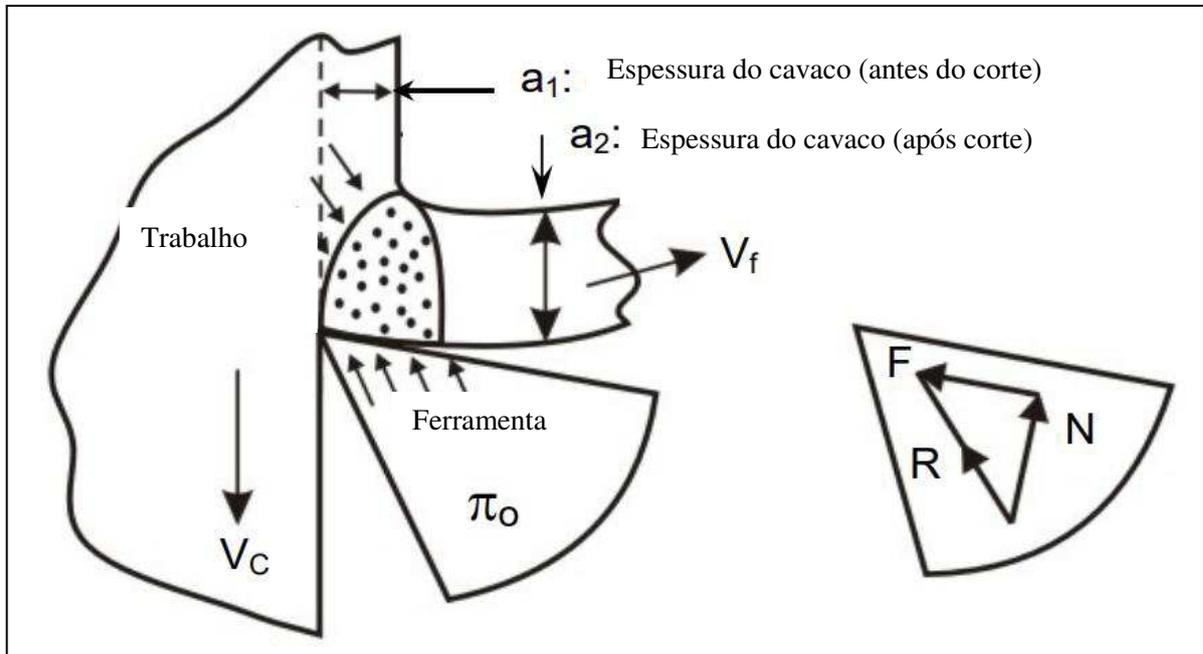


Figura 3.2: Compressão do material de trabalho (camada) à frente da face da ferramenta.
(ADAPTADO DE BORGES, 2009).

Devido a tal compressão, o esforço de cisalhamento se desenvolve, dentro dessa região comprimida, em diferentes magnitudes e direções e aumenta rapidamente em proporção. Sempre que o valor do esforço de cisalhamento atingir ou exceder a resistência ao cisalhamento do material trabalhado na região de deformação, o rendimento ou o deslizamento ocorrem na forma de cisalhamento naquela região e no plano do esforço de cisalhamento máximo (BORGES, 2009).

Mas as forças que causam as tensões de cisalhamento na região do cavaco rapidamente diminuem e, finalmente, desaparecem enquanto a região se move ao longo da superfície do ancinho e depois ultrapassa o ponto de acoplamento na ferramenta. Como resultado, o deslizamento ou cisalhamento para de se propagar muito antes da separação total ter lugar (CALLISTER JR, 2006).

Entretanto, a porção sucessiva do cavaco começa a sofrer compressão seguida de cisão e cisalhamento. Este fenômeno se repete rapidamente, resultando em formação e remoção de cavacos em finas camadas. Esse fenômeno foi explicado de forma simples por Piispanen (SANTOS, 2007).

A superfície inferior torna-se suave devido à deformação plástica adicional ocasionada pela fricção intensiva com a ferramenta em alta pressão e temperatura. O padrão de deformação de cisalhamento por deslizamento lamelar, também pode ser visto em cavacos reais por montagem adequada, gravação e polimento da superfície lateral do cavaco de usinagem e observação sob microscópio (CORRÊA *et al.*, 2014).

3.1. Geometria da Ferramenta de corte

A formação de cavacos é parte do processo de usinagem, que ocorre durante o corte da peça de trabalho por alguns meios mecânicos. As aparas dependem do material da peça de trabalho, da ferramenta e das condições de corte. O desenvolvimento de máquinas-ferramentas de alta velocidade, máquinas com maior capacidade e resistência, a introdução de novos materiais e ferramentas levam a um aumento significativo da eficiência e da produtividade da usinagem, principalmente devido ao aumento da velocidade de corte (CAMARGO, 2016).

Do crescimento da velocidade de corte, surgiu a necessidade de fornecer remoção segura e racional das lascas inerentes aos processos, as quais são denominadas de cavaco. Controlar o tipo e a produção de cavaco no corte de metal é importante na usinagem e facilita a sua reutilização, bem como a proteção de superfície usinada, a integridade da ferramenta de corte, a saúde e segurança do trabalhador e pode reduzir a utilização de energia aplicada nos processos dos materiais (CAMARGO, 2016).

A ferramenta de corte geralmente não define o tipo de cavaco, mas sim a qualidade do cavaco e as distinções claras entre os tipos. Uma ferramenta contundente produz um cavaco degradado que é grande, cisalhado e varia de um meio de formação para outro, muitas vezes

deixando para trás uma superfície de má qualidade (BARBOSA, 2014).

A geometria e a nomenclatura das ferramentas de corte, mesmo as ferramentas de corte de ponto único, são assuntos complexos. A operação de corte mais simples é aquela em que uma ferramenta de borda reta se move com uma velocidade constante na direção perpendicular à aresta de corte da ferramenta, retirando o excesso da superfície usinada e consequentemente formando o cavaco. Isso é conhecido como o processo de corte bidimensional ou ortogonal ilustrado. A operação de corte pode ser melhor entendida em termos de parâmetros de corte ortogonal (STOETERAU, 2015). A Figura 3.3 mostra a aplicação de uma ferramenta de corte de ponto único em uma operação de rotação.

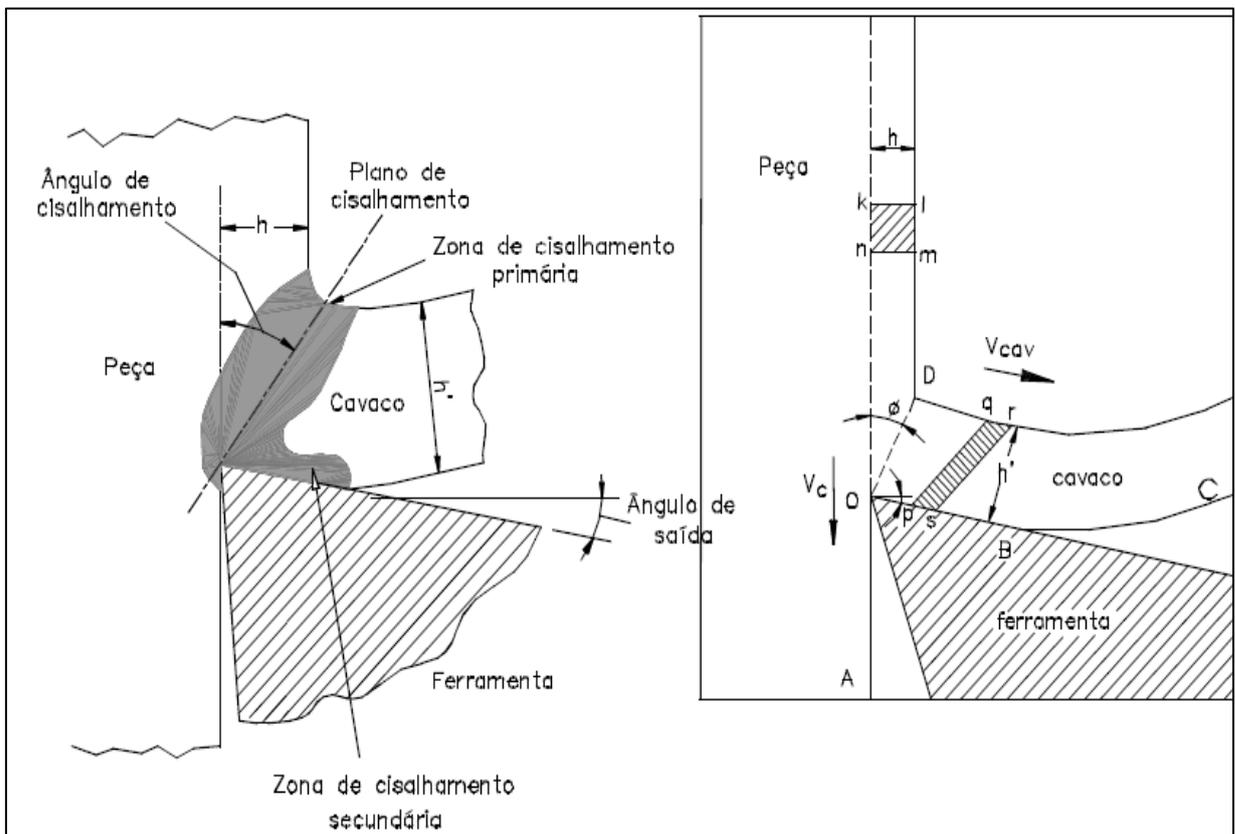


Figura 3.3: Ilustração de uma operação de corte de uma peça e formação de cavaco em termos de parâmetros de corte ortogonal. (ADAPTADO DE MARTINS, 2014).

De acordo com Stoeterau (2015), os processos de usinagem se classificam quanto ao tipo de ferramenta utilizada para retirada do material da peça conforme disposto na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Classificação dos processos de usinagem conforme tipo de ferramenta utilizada para retirada do material da peça. (ADAPTADO DE STOETERAU, 2015).

Tipo de ferramenta	Tipo de processo
Ferramenta de geometria definida	Tornear, fresar, furar, rosquear, alargar, brochar, serrar, plainar, outros
Ferramentas de geometria não definida	Retificar, brunir, lapidar, lixar, polir, jatear, tamborear, outros
Processos não convencionais	Remoção térmica, remoção química, remoção eletroquímica, remoção por ultrassom, remoção por jato d'água, outros

De acordo com Stoeterau (2015), a geometria da ferramenta exerce influência na formação do cavaco, na saída do cavaco, nas forças de corte, no desgaste da ferramenta e na qualidade final do trabalho, ou seja, no resultado do acabamento da superfície usinada.

Além disso, a forma e a posição da ferramenta de corte em relação à peça de trabalho têm um efeito importante na coleta de cavacos. Os elementos geométricos mais importantes, em relação à formação de cavacos, são a localização da aresta de corte e a orientação da face da ferramenta em relação à peça de trabalho e à direção do corte (STEMMER, 2015). Um exemplo de como a geometria da peça de corte influi diretamente no tipo de cavaco formado é demonstrado na Figura 3.4.

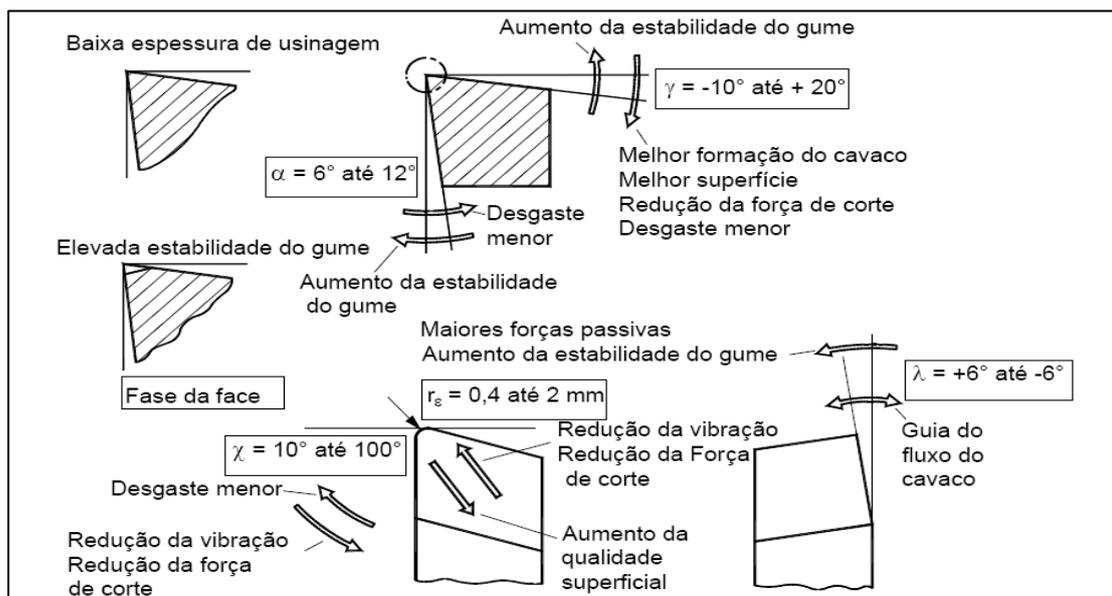


Figura 3.4: Influência da geometria da ferramenta de corte na formação do tipo de cavaco.

(ADAPTADO DE MARTINS, 2014).

Outras considerações de forma dizem principalmente respeito ao alívio ou a depuração, isto é, o ângulo aplicado às superfícies da ferramenta para evitar esfregar ou arrastar contra a peça do trabalho (DORÉ, 2007). Como exemplo da complexidade da geometria das ferramentas de usinagem, a Figura 3.5, apresenta uma ferramenta de torneiar e todas as suas partes.

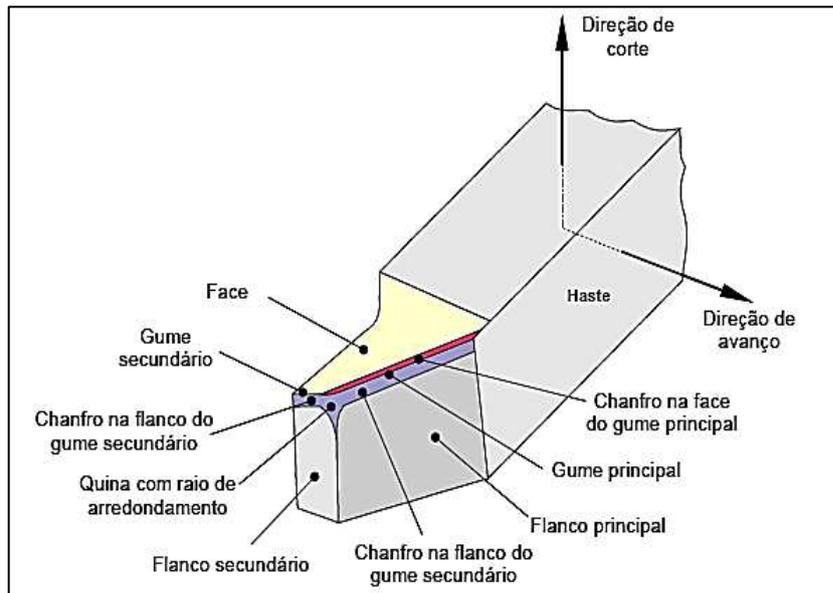


Figura 3.5: Geometria da ferramenta de torneiar. (ADAPTADO DE STOETERAU, 2015).

Para as exigências rigorosas nas indústrias, a qualidade das ferramentas de corte foi melhorada continuamente para obter melhores técnicas de corte. No entanto, os cavacos são gerados em menos tempo, desta forma esses métodos exigem um melhor controle de longos cavacos contínuos, que é um dos fatores mais importantes em relação ao desempenho da peça trabalhada (VENTURA, 2008).

3.2. Quebra Cavaco

A quebra do cavaco ocorre de forma eficaz, não só do ponto de vista da produção, mas também do ponto de vista de segurança, quando a usinagem utiliza ferramentas adequadas. Ao usar o aço a velocidades de corte eficientes, um cavaco contínuo flui em alta velocidade, se distanciando do trabalho que está sendo executado na peça (CIMM, 2014).

Com o advento da usinagem de controle numérico (NC) e sistemas automáticos de manipulação de cavacos, o controle de cavacos está se tornando mais importante do que nunca. O controle de cavacos em qualquer máquina-ferramenta, antiga ou nova, ajuda a evitar interferências com ferramentas e reduz os perigos de segurança causados por estilhaços voadores (SOUSA et al. 2015).

No que diz respeito à conveniência e à segurança, os cavacos em hélice curta, hélice em espiral e espiral (Figura 3.6) são ideais na usinagem de metais dúcteis e ligas em alta velocidade.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
FITA		HÉLICE					OUTROS		
FITA	EMARANHADO	HÉLICE PLANA	HÉLICE OBLÍQUA	HÉLICE LONGA	HÉLICE CURTA	HÉLICE ESPIRAL	ESPIRAL	VÍRGULA	ARRANCADOS
desfavorável			médio		favorável		médio		

Figura 3.6: Classificação de cavacos quanto a forma favorável de formação. (ADAPTADO DE FRANCARO, 2015).

A formação do cavaco é um processo cíclico. Em cada ciclo, uma parte da superfície da peça é retirada, formando o cavaco, que continuará fluindo até entrar em contato e ser bloqueado por obstáculos como a superfície da peça de trabalho ou a ferramenta de corte. O raio de curvatura do cavaco ficará cada vez menor, mas continuamente fluindo. Quando o cacho se encaixa bem o suficiente para fazer com que a deformação do cavaco exceda a tensão de ruptura do material, o cavaco antigo irá quebrar, e novas lascas se formarão,

crescerão e fluirão (BARBOSA, 2015).

Na indústria, as ferramentas de corte geralmente possuem ranhuras para ajudar a quebrar os cavacos. O sulco de quebra de cavacos pode ajudar um cavaco a enrolar com mais força para torna-lo mais fácil de quebrar; e sob condições particulares, o sulco de quebra de cavacos também pode reduzir a fricção em uma ferramenta de rake para reduzir o consumo de energia do processo de corte de metal. (ARENAS, 2007)

Os princípios e métodos de quebra de cavacos são geralmente classificados da seguinte maneira: quebra automática, quebra contra a ferramenta e quebra contra a peça, conforme demonstrado na Figura 3.7.

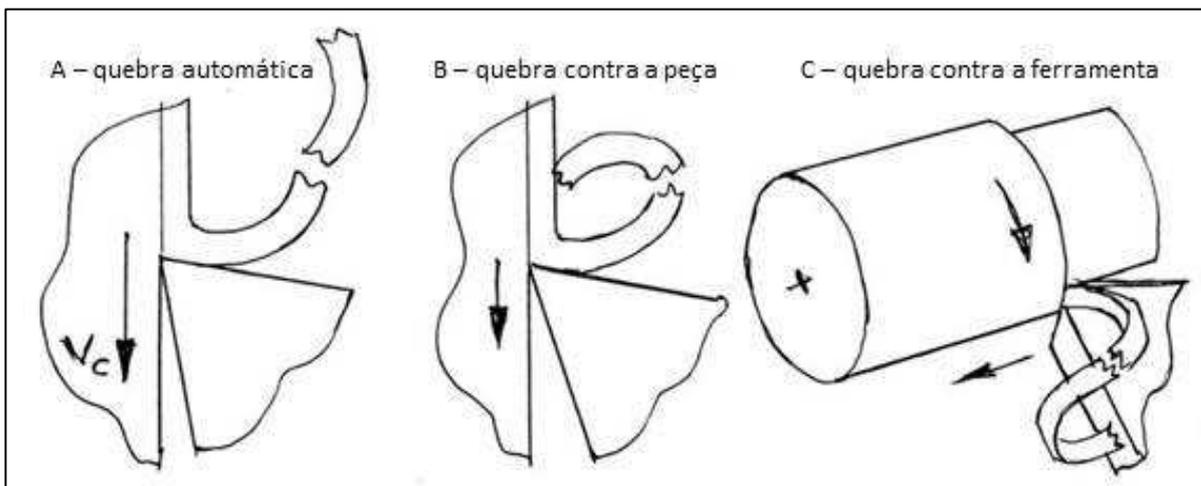


Figura 3.7: Métodos de quebra de cavaco. (ADAPTADO DE BORGES, 2009).

Na quebra automática, as aparas dúcteis geralmente se enrolam ou tendem a enrolar mesmo na usinagem por ferramentas com superfície plana de ancinho devido à velocidade desigual do fluxo do cavaco em suas superfícies livres, a geração de calor pelo atrito e taxa de arrefecimentos desiguais nessas duas superfícies (BARBOSA, 2015).

Com o aumento da velocidade de corte e do ângulo de inclinação (positivo), o raio de curvatura aumenta o que é mais perigoso. Em caso de corte oblíquo devido à presença de ângulo de inclinação, efeito de corte restrito etc., os cavacos se desviam lateralmente resultando em enrolamento helicoidal das microplaquetas. As pastilhas onduladas podem se quebrar automaticamente por fratura natural do cavaco de saída, endurecido por tensão, após

resfriamento suficiente e resorte de mola (SOUZA et al., 2016). Este tipo de quebra de aparas é geralmente observado sob a condição próxima da que favorece a formação de cavacos articulados ou segmentados (Figura 3.7 – A).

Ao bater contra a superfície de corte do trabalho, como mostrado na Figura 3.7 – B, principalmente sob corte ortogonal puro, ocorre à ruptura do cavaco contínuo contra a peça, e a ruptura contra a ferramenta ocorre quando o cavaco bate contra o lado da ferramenta após cada metade para a volta total como indicado na Figura 3.7 – C. Na quebra por contato com a ferramenta, a quebra tridimensional de aparas é causada pela ruptura. Nessa condição, existem três maneiras de quebrar um cavaco (CARVALHO, 2011):

- a) Alterar as condições de corte;
- b) Alterar os recursos geométricos do corte de uma ferramenta;
- c) Projetar e usar uma quebra de cavaco ou uma cavidade com ranhura de quebra.

Aumentar profundidade de corte ou a taxa de alimentação pode melhorar significativamente a quebra de cavaco. No entanto, geralmente na indústria, isso não é uma maneira prática devido às limitações do processo de usinagem. Portanto, otimizar o design das características geométricas da ferramenta de corte e o rompimento/quebra de cavaco é a maneira mais prática e eficiente de quebrar o cavaco (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

O princípio básico da quebra forçada de cavacos é mostrado esquematicamente na Figura 3.8, quando a espinha denteada e quebrada corre sobre o calcanhar, pois o cavaco contínuo fica forçosamente dobrado e depois quebra.

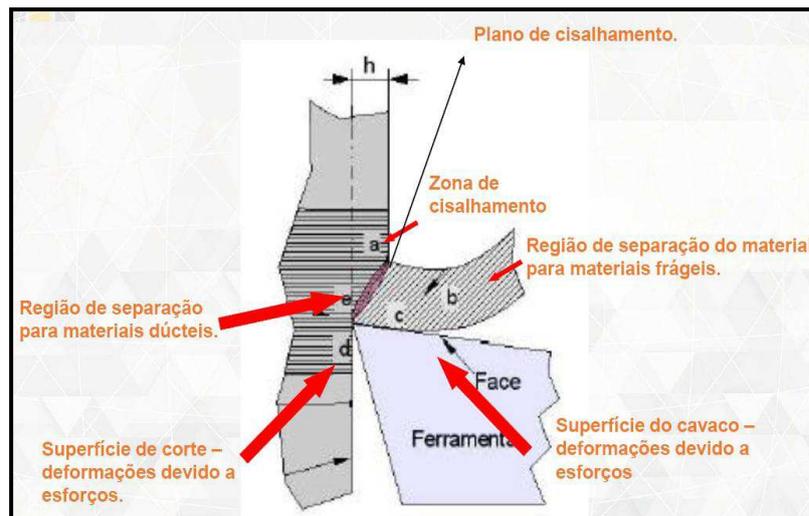


Figura 3.8: Princípio básico da quebra força da cavacos. (ADAPTADO DE FRANCARO, 2015).

Na quebra por contato de superfície de trabalho, um cavaco pode quebrar pelo contato com a superfície a ser usinada, o que é causado pelo enrolamento do cavaco; um cavaco pode, em vez disso, romper pelo contato com a superfície usinada, que é causada pela formação de espirais (CARVALHO, 2011).

O cavaco contínuo quente torna-se duro e quebradiço a uma determinada distância da sua origem devido ao trabalho de endurecimento e resfriamento. Se o cavaco em execução não se tornar bastante enrolado e trabalhar endurecido, não pode quebrar. Nesse caso, o cavaco contínuo é forçado a dobrar ou a enrolar-se de modo que se rompa em intervalos regulares. Tais cavacos quebrados são de tamanho e forma regular dependendo da configuração do quebra-cavaco (RODRIGUES, 2013).

Com novos materiais de peça de trabalho, novas ferramentas de corte / torno e novos métodos de usinagem constantemente estão sendo desenvolvidos, é difícil estabelecer e manter um banco de dados que permita conhecer todas as formas de quebra cavacos. Os designers otimizam o design da ferramenta com base em vários testes de corte (MOREIRA, 2012).

No processo de usinagem da indústria, alguns dispositivos especiais, como faca rotativa, um jato de alta pressão a gás/fluido e uma ferramenta de corte vibratória também são

projetados para quebrar o cavaco. No entanto, a maneira mais eficiente e mais comum de quebrar o cavaco é otimizar os recursos geométricos da ferramenta de corte. Atualmente, houve apenas um sucesso limitado no estudo do critério de quebra, mas as conquistas teóricas ficam atrás da realidade e dos requisitos da indústria (MARTINS, 2014).

3.3. Material da peça

Os cavacos descontínuos são normalmente resistentes, com força variada e com ligações longitudinais fracas nas áreas de deformação. A curvatura desses cavacos é conseguida devido à diferença de velocidades de camadas separadas de metal no domínio plástico da área de formação de cavacos (OLIVEIRA, 2008).

A direção do fluxo do cavaco para curvá-lo conforme necessário pode ser alterada pela curvatura do raio de curvatura do cavaco. A obtenção da forma e do tipo de cavaco desejados ou necessários depende fortemente das relações de contato na superfície frontal da ferramenta. É óbvio que esses fenômenos estão associados ao comportamento adesivo de materiais usinados e de ferramentas (KRABBE, 2008).

O aumento da capacidade adesiva dos materiais em contato leva ao crescimento do atrito na superfície frontal. E isso resulta na mudança da força de interação entre os materiais e na formação de cavacos contínuos. O comportamento dos metais sob atrito depende da sua solubilidade mútua em fase sólida e da capacidade de formar compostos químicos entre si. Assim, o principal fator que determina o comportamento de fricção na superfície frontal é a capacidade dos metais para formar soluções sólidas e compostos intermetálicos (ARENAS, 2007).

Isso significa que as propriedades químicas dos materiais usinados que determinam sua solubilidade mútua em fase sólida têm a influência determinante sobre o comportamento de atrito. Se definido em que condições o cavaco contínuo se transforma em descontínuo, pode-se controlar o tipo de cavaco sem adicionar elementos especiais ao instrumento, tornando o processo mais barato (OLIVEIRA, 2008).

3.4. Fluidos de corte

Para uma melhor produtividade durante o trabalho do metal, as ferramentas de corte são resfriadas e lubrificadas com líquidos de refrigeração especiais que consistem em lubrificantes, refrigerantes e agentes anticorrosivos. No entanto, os cavacos são contaminados com essas substâncias e precisam ser limpos antes de qualquer processamento posterior, incluindo o descarte. É importante notar que esses produtos químicos têm um impacto ainda mais nocivo sobre o ambiente, além daquele produzido pelo processamento de cavacos em seco (CORRÊA *et al.*, 2014).

As funções do fluido de corte são: redução do atrito entre a ferramenta de corte e cavaco; refrigeração da peça usinada, da máquina-ferramenta e da ferramenta; retirada dos cavacos gerados; melhoria no acabamento superficial e melhorias de caráter econômico (JASINEVICIUS, 2017), a Figura 3.9 mostra as principais aplicações dos fluidos de corte nos processos de usinagem.

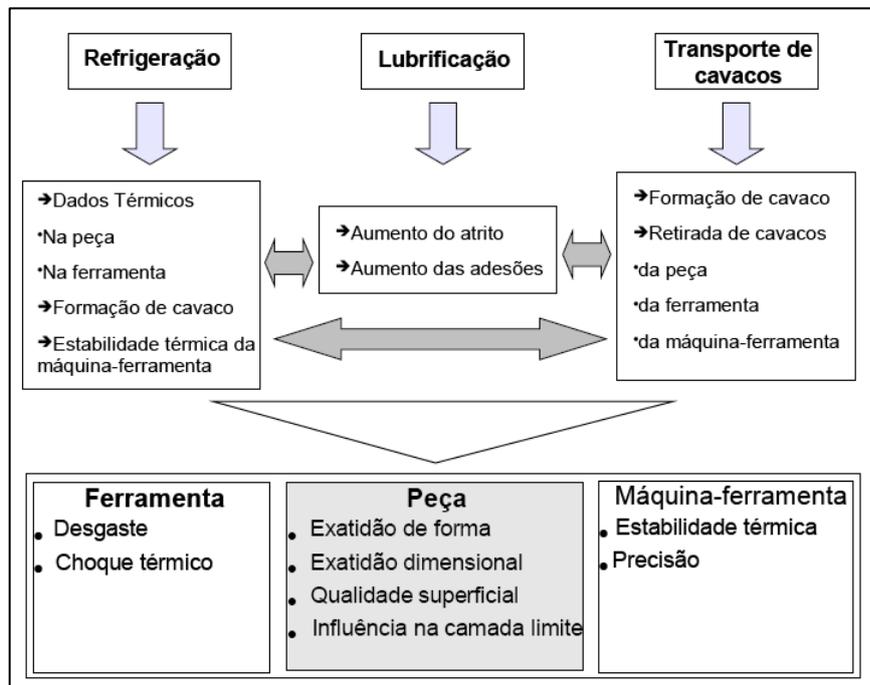


Figura 3.9: Principais funções atribuídas ao fluido de corte nos processos de usinagem.

(ADAPTADO DE STOETERAU, 2015).

O descarte de cavacos metálicos é prejudicial ao meio ambiente, independentemente de estarem contaminados com líquidos de resfriamento ou fluidos de corte ou não, também por isso os cavacos não devem acabar em aterros sanitários, perdendo assim o potencial de reutilização, o que representa um desperdício de tempo e dinheiro para o fabricante de peças metálicas ou de máquinas (AGOSTINHO; VILELLA; BUTTON, 2004).

3.5. Condições de corte

A ação de corte e a formação de cavacos podem ser mais facilmente analisadas se a borda da ferramenta for perpendicular ao movimento relativo do material. A maior deformação começa na zona de cisalhamento e o diâmetro determina o ângulo de cisalhamento (MACHADO; SILVA, 2008).

Os processos de usinagem com ferramentas de geometria definida e não definida, necessitam de um movimento relativo entre peça e ferramenta. Esses movimentos devem obedecer as leis da Cinemática e, portanto, estão envolvidas diversas forças nos processos (CASTILLO, 2015).

A Velocidade de Corte (V_c), é definida pela Equação 2.

$V_c = f$ (material peça/material ferramenta)

$$V_c = \frac{\pi d n}{1000} \quad (2)$$

Fazem parte também dos processos a Velocidade de Avanço (V_f) e a Velocidade efetiva de corte (V_e), conforme demonstrado na Figura 3.10.

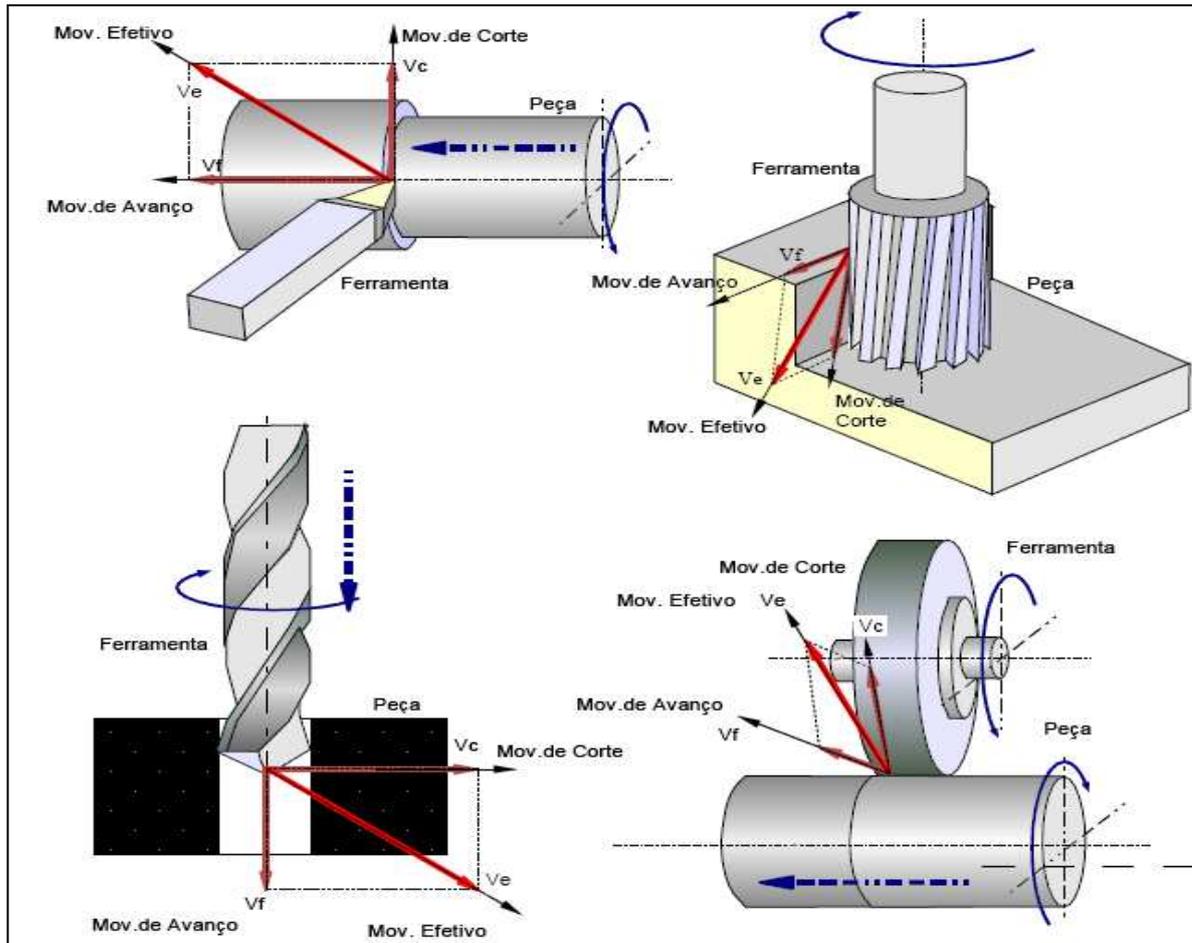


Figura 3.10: Movimentos de corte inerentes aos processos de usinagem para retirada de cavacos de peça de trabalho. (ADAPTADO DE STOETERAU, 2015).

A maior deformação começa na zona de cisalhamento e o diâmetro determina o ângulo de cisalhamento. Uma discussão geral sobre as forças que atuam no corte de metal é apresentada usando o exemplo de uma operação de rotação típica (STOETERAU, 2015)

3.6. Material da ferramenta

Pode-se controlar o tipo de cavaco alterando as propriedades da superfície frontal da ferramenta para alterar as condições da superfície. Uma das maneiras de resolver o problema dado é a implantação iônica da ferramenta com íons de vários materiais. Isso, por sua vez,

leva a um aumento significativo da resistência ao desgaste da ferramenta ao usinar, por exemplo, ligas de titânio, resistentes ao calor e resistentes à corrosão, geralmente associadas ao desgaste severo da ferramenta (RODRIGUES, 2013). A Figura 3.11 apresenta as propriedades dos materiais de ferramentas.

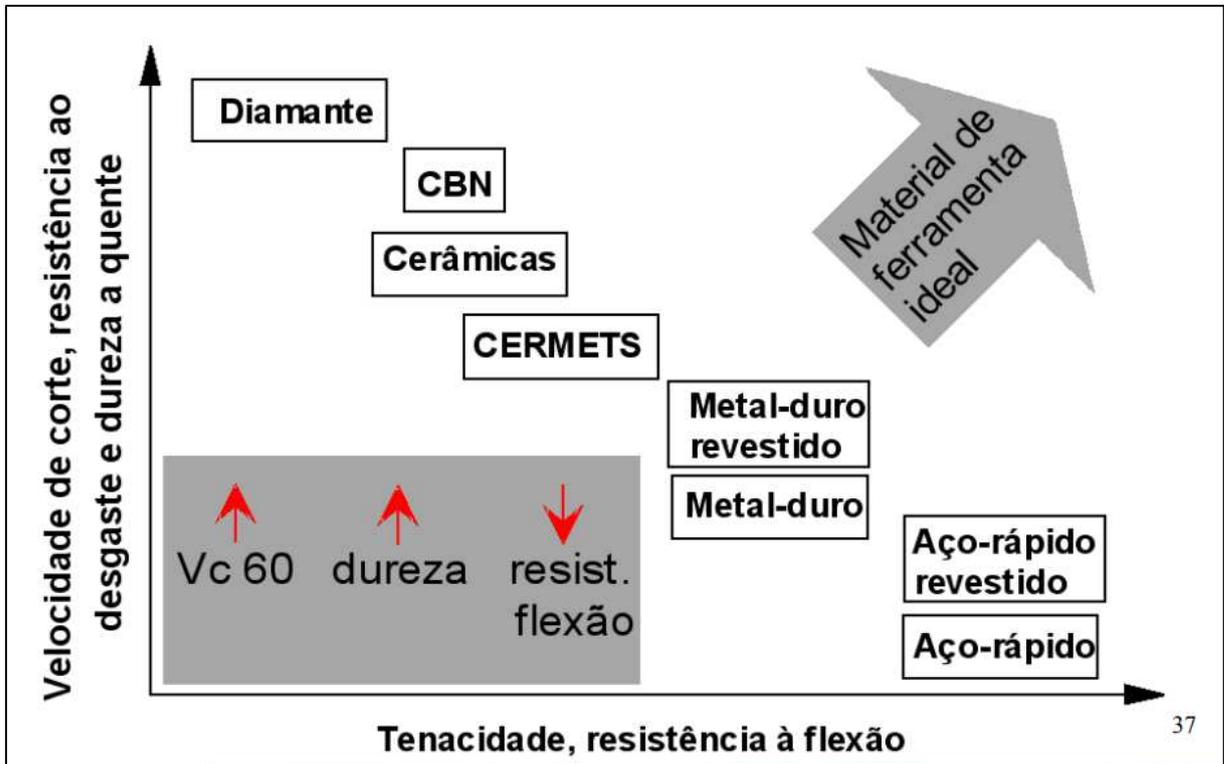


Figura 3.11: Propriedades dos materiais de ferramentas. (ADAPTADO DE STOETERAU, 2015).

Alterando as propriedades da superfície frontal da ferramenta, pode-se controlar o processo de formação de cavacos através da transformação de suas características básicas: comprimento de contato, relação de fricção, forças de corte, ângulo de cisalhamento, etc (MACEDO, 2001).

A implantação de íons na ferramenta de corte muda o contato adesivo entre o cavaco e a ferramenta. Isso leva a mudanças no caráter da formação de cavacos que aumentam a fragilidade dos cavacos na maioria dos casos, o que facilita a quebra e remoção da área de corte. A escolha do material para implantação deve ser feita de acordo com a condição de redução máxima da probabilidade de apreensão entre o material usinado e a ferramenta (SOUZA et al., 2016).

De acordo com o referido acima, pode-se concluir que é possível controlar o processo de formação de cavacos que atinge a forma e o tipo necessários, através da alteração das características da superfície frontal da ferramenta de corte. Considerando que a implantação de íons influencia a eficiência da ferramenta juntamente com a mudança do caractere de formação de cavacos, vale a pena aplicar ferramentas com superfície modificada para usinagem (MOREIRA, 2012).

3.7. Usinagem

O controle de produção de cavacos durante os processos industriais de usinagem são de extremo interesse para diversas indústrias, não se limitando a metalúrgica, mas também aquelas que fazem uso de seus resíduos, especialmente os cavacos, para reciclagem e produção de bens e serviços (BORBA, 2013).

Os cavacos são subprodutos do trabalho mecânico em peças na indústria de metais, cuja quantidade gerada nos processos é significativa, por isso, inicialmente considerados resíduos e tradicionalmente descartados da produção industrial, hoje são objetos de estudo e controle (FERRARESI, 1997).

Observar os fatores relativos a formação do cavaco, assim como as características deste, proporciona diversas vantagens como: controle do rendimento dos insumos, redução os custos, preservação ou aumento da vida da ferramenta de corte e melhor acabamento da superfície trabalhada, considerando ainda maior economia e segurança nos processos produtivos (SANTOS, 2007).

Essas questões são particularmente oportunas hoje, porque muitas empresas estão operando turnos múltiplos para atender à crescente demanda do mercado, além de buscar reduzir seus custos, por meio da redução do número de processos e reaproveitamentos de resíduos. Ao interpretar tamanho, forma, cor e direção da formação do cavaco é possível determinar efetivamente como as ferramentas e máquinas estão funcionando (BARBOSA, 2014).

O controle da produção de cavacos também propicia maior confiança na segurança dos

processos em relação às operações automatizadas, porque a disposição dos cavacos é controlada, suave e confiável, visto que a formação de cavacos inadequados pode causar redução no tempo de atividade da máquina, aumento da necessidade de manutenção e consequentes paradas na produção, reduzindo assim a produtividade de uma indústria (ARENAS, 2007).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

4.1. Considerações finais

Qualidade, produtividade, custo e meio ambiente são quatro preocupações principais na fabricação. O controle de Cavaco é muito importante na otimização do processo de fabricação. Para alcançar os objetivos de controle de cavaco na indústria, a ferramenta preditiva de controle de cavacos é crucial.

Já as propriedades químicas dos materiais usinados são quem determinam sua solubilidade mútua, ainda em fase sólida e possuem influência sobre o comportamento do atrito. Portanto, é necessário definir em que condições o cavaco contínuo se transforma em descontínuo para que se controle o tipo de cavaco sem a adição de outros elementos especiais, diminuindo, assim, o custo do processo.

Com o objetivo de reduzir o atrito, principalmente, entre a ferramenta de corte e o cavaco e, ainda, refrigerar a peça usinada, a máquina-ferramenta e a própria ferramenta, os fluidos de corte são usados para melhorar a produtividade durante o trabalho do metal, proporcionando melhoria no acabamento superficial, contribuindo com a economicidade do processo, além de ajudar substancialmente na retirada dos cavacos gerados.

O controle de cavacos objetiva reduzir os riscos de segurança causados por estilhaços, além de ajudar a evitar interferências com ferramentas.

Conclui-se que os cavacos normalmente se quebram de uma das três maneiras: eles se quebram automaticamente, quebram contra a ferramenta ou quebram contra a peça de trabalho. Os cavacos que são um tamanho ideal não representam uma ameaça para a máquina e não danificam a peça, o porta-ferramentas ou a inserção. As questões de controle de cavaco geralmente são encontradas em aplicações de semi-acabamento, acabamento e profundidade de corte variável, que são a grande maioria das aplicações de torneamento na indústria.

4.2. Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestão de trabalho futuro, indica-se pesquisar sobre as questões de sustentabilidade envolvidas nos processos de usinagem, especificamente nas possibilidades de reaproveitamento dos cavacos produzidos e formas de limpeza de cavacos metálicos contaminados.

Neste mesmo sentido, outra pesquisa que seria de relevância acadêmica, seria pautada nas questões dos impactos ambientais causado pela produção de cavacos.

Além disso, sugere-se analisar a influência dos diferentes tipos de materiais na formação de cavacos.

E, também, pesquisar sobre a influência dos fluidos de corte na formação de cavacos.

5. REFERÊNCIAS

AGOSTINHO, O.L, VILELLA, R.C.; BUTTON, S.T. **Processos de Fabricação e Planejamento de Processos**. 2. ed. Campinas, UNICAMP, Processos Produtivos em Engenharia de Produção – Usinagem. 2004.

ARENAS, G. W. **Uma contribuição ao processo de furação sem fluido de corte com broca de metal duro revestida com TiAIN**. 2007. Tese (Doutorado)-Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2007.

BARBOSA, A. P. **Furação de ferro fundido austemperado e nodular perlítico**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)-Universidade Federal de Uberlândia Uberlândia, 2009.

BARBOSA, P. A. **Estudo do comportamento mecânico da usinagem de aços inoxidáveis**. 2014. 235 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo, 2014.

BARBOSA, R. da S. **Avaliação dos esforços de corte no fresamento frontal da liga de alumínio-silício (A356) quando mantido constante a produção de peças**. São João Del Rei/MG, 2015. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de São João del Rei. Departamento de Engenharia Mecânica. São João Del Rei – MG, 2015.

BORBA, Rodrigo Barros de. **Estudo da influência das afiações em brocas escalonadas de canal reto na furação da liga de alumínio SAE 306**. São João Del Rei/MG, 2013. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de São João del Rei. Departamento de Engenharia Mecânica. São João Del Rei – MG, 2013.

BORGES, Joel Brasil. **Usinagem Básica: Módulo III**. (Apostila) Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina. Unidade de Araranguá, Coordenação Geral de Cursos Técnicos. Curso Técnico em Eletromecânica. CEFET/SC, 2009.

CALLISTER JR., W. D. **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais**. Uma Abordagem Integrada. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2006. 702 p.

CAMARGO, Jonathan Felipe. **Análise da formação de cavacos no torneamento de aços inoxidáveis com emprego de um sistema de interrupção súbita de corte (QSD)**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2016.

CARVALHO, A. O. **Análise da dinâmica do processo de roscamento por conformação na liga de Magnésio AM60**. 2011. Dissertação (Mestrado)-Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São João del-Rei, São João del-Rei, 2011.

CASTILLO, W. J. G. **Furação profunda de ferro fundido cinzento GG25 com brocas de metal duro com canais retos**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Florianópolis, 2015.

CIMM. **Material Didático sobre Usinagem.** 2014. Disponível em: <http://www.cimm.com.br/materialdidatico/usinagem.shtml>>. Acesso em: 15 set. 2017.

CORRÊA, J. G. et al. Análise da microestrutura do cavaco proveniente da usinagem de um aço inoxidável martensítico AISI 410. **XVIII Colóquio de Usinagem**, 2014.

DINIZ, A. E.; MARCONDES F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais.** 8. ed. São Paulo: Artliber Editora Ltda., 2013. 272 p

DORÉ, C. **Influência da Variação da Nodularidade na Usinabilidade do Ferro Fundido Vermicular.** Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Florianópolis, 2007.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais.** 5. ed. São Paulo: E. Blücher, 2006.

FRANCARO, J. **Formação De Cavaco.** Teoria e prática de usinagem. Aula 3. Universidade tecnológica federal do Paraná. Campus Londrina, 2015.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 3685: **Tool - life testing with single-point turning tools**, 1993. 48p.

JASINEVICIUS, R. G. **Processos de Fabricação Mecânica.** Aula 5 Forças de corte. 2017.

KRABBE, D. F. M. **Otimização do Fresamento do Aço Inoxidável Aeronáutico 15-5 PH.** 2008. 119 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

LOPES, Cláudio Parreira. Análise do desgaste de ferramentas no fresamento de engrenagens cônicas de grandes dimensões fundidas em aço ABNT 4140. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. São João Del Rei, 2012.

MACEDO, S. E. M. **Análise de forças no fresamento de topo convencional e com altas velocidades de corte.** 2001. Dissertação (Mestrado Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina. Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Mecânica. Florianópolis, 2001.

MACHADO, Á. R. et al. **Teoria da Usinagem dos Materiais.** 2 ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2011.

MACHADO, R. A.; SILVA, M. B. **Usinagem dos metais.** 7. rev. Uberlândia, UFU, 2008 (Apostila didática).

MARTINS, J. **Mecanismo de formação e controle do cavaco.** Notas de aula. Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), Florianópolis, 2014.

MOREIRA, S. R. da S. **Energia específica de corte e integridade superficial no microfresamento do aço ABNT 1045.** Ilha Solteira: [s.n.], 2012 90 f. : il. Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de Conhecimento: Materiais e Processos de Fabricação,

2012. Disponível em:<
https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/94481/moreira_srs_me_ilha.pdf?sequence=1>. Acesso em: 15 set. 2017.

OLIVEIRA, V. V. de. **Influência da Geometria de Brocas na Furação do Ferro Fundido Vermicular** 55f. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2008. Disponível em:< <http://www.utfpr.edu.br/curitiba/estrutura-universitaria/diretorias/dirppg/programas/ppgem/banco-teses/dissertacoes/OLIVEIRAValterVanderde.pdf>>. Acesso em: 15 set. 2017.

OLIVEIRA, V. G. de. A influência do cavaco no processo de usinagem com ferramentas de corte em torno CNC. 15 f. 2015. Artigo (Graduação - Engenharia de Produção). Faculdade de Tecnologia FTEC de Caxias do Sul. Caxias do Sul, 2015. Disponível em:< <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAamgAG/a-influencia-cavaco-no-processo-usinagem-com-ferramentas-corte-torno-cnc>>. Acesso em: 15 set. 2017.

RODRIGUES, A. R. Formação de cavaco e microdureza da peça no fresamento do aço vp100 para moldes. **7º Congresso Brasileiro De Engenharia De Fabricação**. Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas 2013. Penedo, Itatiaia – RJ - Brasil .

SALES, W. F.; SANTOS, S. C. **Fundamentos da Usinagem dos Materiais**. Belo Horizonte: PUC Minas, 2013 (Apostila).

SANDVIK COROMANT, **Manual técnico de usinagem**: torneamento, fresamento, furação, mandrilamento e sistemas de fixação. Suécia, 2005.

SANTOS, S. C.; WILEY F. **Aspectos Tribológicos da Usinagem dos Materiais**. São Paulo: Artlibler, 2007.

SOUSA, M. do N. et al. Grau de recalque e zona de fluxo em usinagem de ligas de alumínio - otimização multiobjetivo e técnicas de metamodelagem. p. 834-843 . In: **Anais do Congresso Nacional de Matemática Aplicada à Indústria [= Blucher Mathematical Proceedings, v.1, n.1]**. São Paulo: Blucher, 2015. Disponível em:< <http://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/grau-de-recalque-e-zona-de-fluxo-em-usinagem-de-ligas-de-alumnio-otimizao-multiobjetivo-e-tnicas-de-metamodelagem-11972> <http://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/grau-de-recalque-e-zona-de-fluxo-em-usinagem-de-ligas-de-alumnio-otimizao-multiobjetivo-e-tnicas-de-metamodelagem-11972> >. Acesso em: 15 set. 2017.

SOUZA, F. L. C. de et al. **Avaliação do processo de formação de cavaco no torneamento do aço ABNT 1045**. Faculdade de Engenharia. Departamento de Engenharia Mecânica. Engenharia Mecânica - Campus Ilha Solteira, 2016.

STEMMER, E. C. **Ferramentas de Corte II**. Universidade Federal de Santa Catarina. 3a ed. UFSC: Florianópolis, 2015.

STEMMER, E. C. **Ferramentas de Corte I**. Universidade Federal de Santa Catarina. 5a ed. Florianópolis: UFSC, 2011.

STOETERAU, R. L. **Processos de Usinagem:** Fabricação por Remoção de Material. Apostila de disciplina: Processos de usinagem. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis - UFSC. Florianópolis: UFSC, 2015.

VENTURA, Carlos Eiji Hirata. **Análise da relação entre a formação do cavaco, vibração da ferramenta e desvio de forma no processo de torneamento.** 2008. Dissertação (Graduação em Engenharia Mecânica). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.

WEINGAERTNER, W. L.; SCHROETER, R. B. **Tecnologia de usinagem do alumínio e suas ligas:** toronar, fresar, furar e serrar. 2a ed. São Paulo: Alcan Alumino do Brasil, 1991.

WEINGAERTNER, Walter Lindolfo; SCHROETER, R.B. **Introdução aos Processos de Usinagem:** parte 1. Universidade Federal de Santa Catarina, 2012. 352 p. Apostila.