



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO – UEMA
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA E PRODUÇÃO – DMM
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**ESTUDO DA USINABILIDADE DAS LIGAS DE ALUMÍNIO: UMA AVALIAÇÃO
COM BASE NO TESTE DE PROPRIEDADES FÍSICAS.**

SEBASTIÃO RAIMUNDO DE JESUS BELÉM LEITÃO FILHO

São Luís
2015

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO

**ESTUDO DA USINABILIDADE DAS LIGAS DE ALUMÍNIO: UMA AVALIAÇÃO
COM BASE NO TESTE DE PROPRIEDADES FÍSICAS.**

Sebastião Raimundo de Jesus Belém Leitão Filho

Orientador: Prof. Dr. Jean Robert P. Rodrigues

Coorientador: Esp. Eng. Mec. Hércules Araújo Oliveira

Trabalho de Conclusão de curso apresentado na Universidade Estadual do Maranhão – UEMA, ao Departamento de Engenharia Mecânica e Produção, do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade Estadual do Maranhão – UEMA como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

SEBASTIÃO RAIMUNDO DE JESUS BELÉM LEITÃO FILHO

**ESTUDO DA USINABILIDADE DAS LIGAS DE ALUMÍNIO: UMA AVALIAÇÃO
COM BASE NO TESTE DE PROPRIEDADES FÍSICAS.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica e Produção, do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade Estadual do Maranhão – UEMA, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Qualificação aprovada em, _____ de _____ de 2015.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jean Robert P. Rodrigues
(Orientador)

Esp. Eng. Mec. Hércules Araújo Oliveira
(Coorientador)

Prof. Dr. Mauro Araújo Medeiros
(Membro da Banca Examinadora)

Prof. Dr. Denilson Moreira Santos
(Membro da Banca Examinadora)

Dedico este trabalho aos meus pais,
Sebastião Raimundo de Jesus Belém Leitão
e Odete Lima Alves Leitão.

AGRADECIMENTO

Ao meu Deus em primeiro lugar, pelo discernimento e orientação para que este trabalho fosse desenvolvido e concluído com êxito. Por ter me guiado até aqui, possibilitando galgar lugares mais altos, pois Ele sabe o melhor para mim. Agradeço ainda pelas maravilhas que tem feito na minha vida, pelas bênçãos que mesmo sendo imerecida, me sobrevieram e capacitaram, pelo seu amor incondicional, sua graça e misericórdia que me acompanham todos os dias. E hoje posso contemplar tudo aquilo que me foi dado, como nas Escrituras diz, *“Mas, buscai primeiro o reino de Deus, e a sua justiça, e todas estas coisas vos serão acrescentadas.”*

Aos meus pais Sebastião Raimundo de Jesus Belém Leitão e Odete Lima Alves Leitão pelo apoio e incentivo. Por terem contribuído na construção do meu caráter, pautado, nos mais nobres valores que por certo alicerçaram a minha formação pessoal e de construir em mim um cidadão, comprometido com a verdade, a ética e o amor, assim como valorizar e defender o que é mais caro e importante para a construção de um mundo melhor. Pelas orações que com certeza foram muitas pela minha vida, que supriram meu ser para resistir ao cansaço, desânimo e tentações do “mundo”. Pela repreensão necessária aos erros cometidos no exercício do viver. Por acreditarem em mim, e me induzirem a confiar no meu potencial, por me ensinarem a correr atrás dos sonhos e jamais desistir. Pelo direcionamento no caminho certo, como nos ensina as Escrituras, *“Ensina o teu filho no caminho que deve andar e ainda quando for velho, não se desviará dele”*. Pela compreensão e perdão nas muitas vezes em que não pude atender com excelência aos pedidos que me fizeram durante esse período árduo, cujo tempo disponível no dia parecia insuficiente para a construção da presente monografia.

Aos meus queridos irmãos Walderrai Leitão, cunhada Andressa e Odélei Leitão pela força dada, pelo crédito e confiança que em mim sempre depositaram e fortaleceram os meus ideais de chegar até aqui e galgar ainda lugares mais altos. Por muitas vezes não podermos estar juntos, devido ao compromisso e dedicação para a conclusão desse trabalho, por estarem sempre presentes quando podiam, pois o fato de morarem em outras cidades não impediu esse apoio. À minha família que vendo todo o sacrifício e trabalho dispendidos, buscavam formas ou organizavam eventos nos finais de semana com o intuito de me descontraírem e que viesse a relaxar a mente, para eliminar a tensão e recarregar as baterias para uma nova semana de labor.

Ao Professor Dr. Jean Robert pela honra de lhe ter como orientador, por ter desempenhado um excelente papel como professor e orientador, com contribuição imensurável, grato pelos conselhos e críticas construtivas que foram de vital importância no desenvolver e conclusão desse trabalho.

Aos meus queridos primos e tios que também contribuíram significativamente para a construção da minha vida pessoal e também por confiarem que eu teria condições de atingir minhas metas. Agradecer em especial ao meu primo Pedro Alves que considero como irmão, a confiança e me fazer acreditar que era possível se concretizar esse trabalho, pela companhia, alegrias e brincadeiras vivenciadas nesse período de construção da monografia, pelas distrações necessárias para não perder a serenidade e ser capaz de vencer a tensão, própria do momento vivido.

Ao Co-Orientador Eng. Hércules Oliveira pelas considerações de grande significância feitas no desenvolver desse trabalho. Pelos tempos de análise e correções, pelo auxílio efetivo mais precisamente na parte experimental.

Aos meus amigos e irmãos em Cristo da igreja IBR, aos grupos aos quais sou integrante, com especial menção à Célula a que pertencço e da qual sou líder e ao ministério de louvor do qual sou co-líder, obrigado pelas orações, pela força, confiança e compreensão das ausências e não envolvimento mais constante nas responsabilidades a mim colocadas.

A todos os meus amigos do curso de Engenharia Mecânica (meu período 2011.1 e demais períodos), por todo apoio, incentivo e companheirismo, pelos momentos de alegrias e tristezas juntos, são amizades que se solidificaram.

Aos professores do Departamento de Engenharia Mecânica da UEMA, pelos quais recebi o conhecimento indispensável para chegar até aqui.

Aos amigos e profissionais que tanto somaram para a concretização desse trabalho.

“O temor do Senhor é o princípio da sabedoria”

Provérbios 1:7

RESUMO

A usinabilidade dos materiais está intrínseca as suas propriedades, quanto ao material da ferramenta e é correlacionada por vários parâmetros e condições de corte, incluindo vida da ferramenta, temperatura de corte, força de corte, acabamento superficial da peça, velocidade de corte, entre outros. Este trabalho apresenta um referencial teórico sobre a usinabilidade de materiais metálicos. O objetivo deste estudo de usinabilidade de alguns metais é demonstrar seus resultados através de ensaios de usinabilidade em unidades de velocidade baseados em um teste que não requer usinagem, o teste de propriedades físicas. Foram pesquisados os variados tipos de ligas de alumínio, suas características, e variantes do índice de usinabilidade associando-os aos parâmetros de corte. A fundamentação da realização do ensaio do teste se deu baseados nos estudos de Henkin, seguindo a linha dos tipos de propriedades físicas catalogados. As propriedades dos metais selecionados e unidades sendo determinadas montou-se um banco de dados para comparação dos mesmos e assim utilizá-los no teste proposto em estudo. Os testes foram desenvolvidos por um programa de software de processamento de dados, através de planilhas reajustadas por inúmeras reformulações de cálculos com base na Equação geral de usinabilidade, com fórmulas e otimização, para a entrada das variáveis e processamento a fim de gerar os valores esperados e gráficos representativos e assim obter os índices de usinabilidade para o alumínio e ligas escolhidos.

Palavras - chave: Usinabilidade, Alumínio e Ligas, Velocidade de Usinabilidade, Equação Geral da Usinabilidade.

ABSTRACT

The machinability of the material is its intrinsic properties, on the tool material and is correlated by various cutting conditions and parameters, including tool life, cutting temperature, shear rate, surface finish the workpiece, cutting speed, etc. This study aims to present a theoretical framework on the machinability of metal materials. The objective of this study machinability of some metals is demonstrated by the results of machinability tests in speed units based on a test that does not require machining, the physical properties test. The various types of aluminum alloys were investigated, their characteristics, and variants of the machinability index linking them to the cutting parameters. The basis of testing the test was given based on studies of Henkin, following the line of the types of cataloged physical properties. The properties of selected metals and units being determined, was set up a database to compare them and thus use them in the test proposed in the study. The tests were developed by a data processing software program through reset by numerous spreadsheets re calculations based on the general equation machinability with formulas and optimization, for the input variables and the processing to generate expected values and representative graphics and thus obtain the machinability indexes for the selected aluminum and alloys.

Key - words: Machinability, Aluminum and Alloys, Speed Machinability, General Equation machinability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Diagrama da cunha cortante.	22
Figura 2.2 - Plano mostrando as zonas de cisalhamento primária e secundária.....	22
Figura 2.3 - Formas de cavacos produzidos na usinagem dos metais.	25
Figura 2.4 - Classificação dos processos de fabricação.....	26
Figura 2.5 - Variação da dureza (HRA) de alguns materiais de ferramentas x temperatura....	30
Figura 2.6 - Materiais para ferramentas de corte.....	31
Figura 2.7 - O resultado das ferramentas mais utilizadas pela pesquisa.	32
Figura 2.8 - O resultado dos materiais mais utilizados pela pesquisa.	32
Figura 2.9 - Comparação entre propriedades de vários materiais para ferramenta de corte. ...	33
Figura 2.10 - Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte.	35
Figura 2.11 - Representação esquemática dos desgastes de cratera (a) e de flanco (b).	36
Figura 2.12 - Principais causas de desgaste de ferramentas.	38
Figura 2.13 - Formação de cavaco e desgaste de ferramenta.	40
Figura 2.14 - Cunha de Corte da Ferramenta (torneamento).....	43
Figura 2.15 - Arestas de corte e superfícies da cunha de corte de uma ferramenta de torno. ..	44
Figura 2.16 - Ângulos da cunha cortante medidos no plano de referência.	45
Figura 2.17 - Ângulos de Saída, de Cunha e de Folga da ferramenta, representados no plano admitido de trabalho.	46
Figura 2.18 - Sistema de referência da ferramenta.	47
Figura 2.19 - Esforços no processo de torneamento.....	50
Figura 2.20 - Componentes da força principal de corte.	51
Figura 2.21 - Funções do fluido de corte.....	53
Figura 2.22 - Denominação das ligas de alumínio.	60
Figura 2.23 - Grupos de alumínios com seus principais elementos ligantes.	60

LISTA DE QUADRO

Quadro 3.1 - Variável com suas respectivas unidades adotado na equação de usinabilidade..	65
Quadro 3.2 - Alumínio forjado e ligas trabalhadas (recozido) / AA-ASTM.....	66
Quadro 3.3 - Alumínio forjado e ligas trabalhadas (termicamente tratado) / AA-ASTM.....	66
Quadro 3.4 - Representação das variáveis com respectivas propriedades e unidades.	68
Quadro 3.5 - Relação entre geometria de corte e “comprimento característico”.	68
Quadro 3.6 - Conversão de Unidades.....	71

LISTA DE TABELA

Tabela 3.1 – Condutividade Térmica (W/m.K) relacionado a temperatura °F para alumínio forjado e ligas trabalhadas (recozido) AA-ASTM	66
Tabela 3.2 - Condutividade Térmica (W/m.K) relacionado a temperatura °F para alumínio forjado e ligas trabalhadas (termicamente tratado) AA-ASTM.	67
Tabela 3.3 - Propriedades Mecânicas e Físicas do alumínio forjado e ligas trabalhadas (recozido) AA-ASTM.....	67
Tabela 3.4 - Propriedades Mecânicas e Físicas do alumínio forjado e ligas trabalhadas (termicamente tratado) AA-ASTM	67
Tabela 3.5 - Dados de entrada de alumínio forjado e ligas trabalhadas (recozido) AA-ASTM	70
Tabela 3.6 - Dados de entrada de alumínio forjado e ligas trabalhadas (termicamente tratado) AA-ASTM.	70
Tabela 4.1 - Valores Finais de usinabilidade com base nos testes de propriedades físicas para o Alumínio forjado e ligas trabalhadas (recozido).	75
Tabela 4.2 - Valores Finais de usinabilidade com base nos testes de propriedades físicas para o alumínio forjado e ligas trabalhadas (termicamente tratado).	75

LISTA DE GRÁFICO

GRÁFICO 4.1 - Relação entre a condutividade térmica e a usinabilidade do alumínio e ligas trabalhadas (recozido).....	76
GRÁFICO 4.2 - Relação entre a condutividade térmica e a usinabilidade do alumínio e ligas trabalhadas (termicamente tratado).	76
GRÁFICO 4.3 - Relação entre a condutividade térmica e a usinabilidade do alumínio e ligas trabalhadas (recozido e termicamente tratado).....	77
GRÁFICO 4.4 - Relação entre a dureza e a usinabilidade do alumínio e ligas trabalhadas (recozido).....	78
GRÁFICO 4.5 - Relação entre a dureza e a usinabilidade do alumínio e ligas trabalhadas (termicamente tratado).....	78
GRÁFICO 4.6 - Relação entre a dureza e a usinabilidade do alumínio e ligas trabalhadas (recozido e termicamente tratado).	79

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABNT	<i>Associação Brasileira de Normas Técnicas</i>
ABAL	<i>Associação Brasileira do Alumínio</i>
ALCOA	<i>Companhia de Alumínio da América</i>
APC	<i>Aresta Postiça de Corte</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ASM	<i>Aerospace Specification Metals</i>
ASME	<i>The American Society Of Mechanical Engineers</i>
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
NBR	<i>Sigla De Norma Brasileira Aprovada Pela ABNT</i>
ap	Profundidade de Usinagem [mm]
$A\gamma$	Superfície de Saída
$A\alpha$	Superfície Principal de Folga
$A'\alpha$	Superfície Secundária de Folga
d	Diâmetro da Ferramenta ou da Peça [mm]
f	Grandeza de Avanço [mm/revolução]
F_c	Força de Corte
F_e	Força Efetiva de Corte
F_f	Força de Avanço
F_p	Força Passiva
F_t	Força Ativa
F_u	Força de Usinagem
n	Velocidade de Rotação da Ferramenta ou da Peça [rpm]
P_f	Plano Admitido de Trabalho
P_o	Plano Ortogonal
P_s	Plano Principal de Corte da Ferramenta
$P's$	Plano Secundário de Corte
P_r	Plano de Referência
S	Aresta Principal de Corte
S'	Aresta Secundária de Corte
vc	Velocidade de Corte [m/min]

v_f	Velocidade de Avanço [m/min]
V_B	Desgaste de Flanco Médio
V_{BMax}	Desgaste de Flanco Máximo
K_F	Distância Frontal Entre Cratera e Flanco
K_T	Profundidade da Cratera
χ_r	Ângulo de Posição principal da Ferramenta [°]
χ'_r	Ângulo de Posição Secundário da Ferramenta [°]
φ	Ângulo da Direção de Avanço (de Cisalhamento) [°]
ϵ_r	Ângulo de Ponta da Ferramenta [°]
λ	Ângulo de Saída (Inclinação) da Ferramenta [°]
β	Ângulo de Cunha da Ferramenta [°]
α	Ângulo de Folga da Ferramenta [°]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1	Considerações Iniciais	20
2.2	Processo de Formação de Cavaco.....	20
2.2.1	Tipos de Cavaco	23
2.2.2	Formas de Cavaco	24
2.3	Classificação dos Parâmetros dos Processos de Usinagem	25
2.3.1	Classificação Quanto ao Processo de Remoção de Material.....	26
2.3.2	Classificação Quanto à Geometria da Ferramenta de Corte.....	27
2.3.3	Classificação Quanto à Finalidade da Operação de Corte.....	27
2.4	Ferramentas de Corte	28
2.4.1	Materiais para Ferramenta.....	28
2.4.2	Propriedades de um Material para Ferramenta de Corte	32
2.5	Avarias e Desgastes das Ferramentas de Corte	33
2.5.1	Tipos de Desgaste da Ferramenta.....	35
2.5.2	Mecanismos Causadores do Desgaste da Ferramenta	37
2.5.3	Tipos de Avarias nas Ferramentas de Corte	38
2.5.4	Vida Útil da Ferramenta	40
2.6	Geometria da Ferramenta.....	42
2.6.1	Ângulos Medidos no Plano de Referência da Ferramenta	44
2.6.2	Ângulos Medidos no Plano de Corte da Ferramenta.....	46
2.6.3	Ângulos Medidos no Plano Ortogonal	46
2.7	Grandezas e Condições de Usinagem.....	48
2.7.1	Velocidades de Corte.....	48
2.7.2	Velocidade de Avanço.....	49
2.7.3	Profundidade de Usinagem.....	49
2.8	Força de Usinagem	49
2.9	Fluido de Corte	52

2.9.1	Ação dos Fluidos de Corte.....	53
2.10	Acabamento Superficial da Peça Usinada.....	54
2.10.1	Superfícies de Ligas de Alumínio Usinadas.....	55
2.11	O estudo da Usinabilidade.....	56
2.11.1	Importância das Ligas na Usinabilidade do Alumínio	57
2.11.2	Ensaio de Usinabilidade.....	62
2.11.3	Teste de Propriedades Físicas.....	63
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	65
3.1	Metodologia	65
3.2	Tipo de Material Ensaio	66
3.3	Meio de Obtenção do Ensaio	69
3.4	Variáveis de Entrada no Ensaio	70
3.5	Aplicação dos Valores de Unidades	70
4	RESULTADO E DISCUSSÕES	74
5	CONCLUSÃO.....	81
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	83
	REFERÊNCIAS	84

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Chiaverini (1986) o processo de Usinagem nesta operação é a retirada de uma porção do material das peças pela ação de uma ferramenta – esta se chama ferramenta de corte – a qual produz o cavaco, apresentada com característica por forma geométrica irregular.

Para Machado (2009) o processo de usinagem é reconhecido por ser o processo de fabricação do mundo mais popular, o qual transforma em cavaco aproximadamente 10% sobre o total de metal produzido, gerando emprego de dezenas de milhões de pessoas no mundo. No entanto, embora conhecido popularmente, considera-se ainda um processo deveras repentino e a definição ambivalência seguinte, representa com clareza a sistemática do assunto: “É um processo, complexo e simples ao mesmo tempo, onde se produzem peças, removendo-se excesso de material, na forma de cavacos”. É “complexo” pelas dificuldades em se determinar as repentinas condições de corte ideais. É “simples” porque, primeiramente determinadas as condições ideais de corte, o cavaco é produzido sistematicamente perfeito, dispensando qualquer tipo de intervenção especial do operador. As condições de corte ideais fundamentam de: (1) geometria e material adequado da ferramenta de corte; (2) avanço adequado e velocidade de corte para um parâmetro de profundidade de corte determinadas no início do processo; (3) fluido de corte adequado; todas as condições listadas usadas em uma junção máquina-ferramenta, já identificadas para análise, para usinar um devido material em estudo. Seguindo estas condições de corte ideais possibilitam produzir peças seguindo critério de especificações de acabamento, forma e tamanho ao menor custo possível.

Da mesma forma, Destro (1995) cita que a Usinabilidade, sendo considerada como propriedade tecnológica, é atribuída pela associação de fatores sucedidos da interação do ambiente e do par peça-ferramenta o qual estão submetidos. Os fatores se identificam discriminados pela ASME (1985). Os principais são: (1) material da peça (tenacidade, dureza, composição química, etc.); (2) material da ferramenta (composição, tratamento térmico na superfície, propriedades, revestimento, etc.); (3) parâmetros de usinagem (geometria, fixação da ferramenta, ação de fluido, avanço, velocidade de corte, profundidade de usinagem, etc.).

Conforme Ferraresi (1970), no estudo das operações dos metais, a operação de usinagem entende-se como aquela que, ao conferir à peça o acabamento, ou as dimensões, ou a forma, ou mais ainda envolvendo juntos qualquer um destes três itens, produzem cavaco. E por cavaco entende-se, na retirada pela ferramenta gera uma quantia de material da peça, e esta possui característica típica em sua apresentação de forma geométrica irregular. Também

aborda como definição de Usinabilidade “uma grandeza tecnológica que por meio de um valor numérico comparativo (índice de usinabilidade), expressa um conjunto de propriedades de usinagem de um material em relação a outro tomado como padrão”.

Urtiga (1984) definiu Usinabilidade como uma grandeza tecnológica que se representa por meio de um valor comparativo (Índice de Usinabilidade) que resulta em uma associação de propriedades de usinagem quando comparado um metal ao outro, tido como referencial. Ao referencial, ou padrão de usinabilidade pré-estabelecido quanto a confiança é atribuído o índice 100.

Em análise específica de material, temos o Alumínio e suas ligas. Songmene, et. al. (2011) cita que eles são relativamente fáceis de moldar, especialmente em processos de remoção de material, tais como a usinagem. De fato, o alumínio e suas ligas podem ser facilmente usinados, sendo considerados como a família de materiais que apresentam os mais altos níveis de usinabilidade, em comparação com outras famílias de metais leves, tais como de titânio e as ligas de magnésio. Esta usinabilidade quantifica o desempenho de usinagem, e pode ser definido para uma aplicação específica por vários critérios, tais como a vida útil da ferramenta, acabamento de superfície, chip de evacuação, a taxa de remoção de material e energia da máquina-ferramenta.

O presente trabalho de conclusão de curso com o tema, “Estudo da Usinabilidade do alumínio e ligas: uma avaliação com base no teste de propriedades físicas” dar-se-á pela análise dos alumínios e suas ligas, as condições de usinagem desses metais, investigar os parâmetros abordados e sua usinabilidade quanto a propriedades físicas, seguindo uma criação de banco de dados com essas propriedades para a aplicação da equação geral de usinabilidade. Concomitante, um estudo específico para o material Alumínio e suas ligas, com revisão bibliográfica geral e específica do assunto para assim compreender a aplicação da equação do teste de propriedades físicas com resultados calculados experimentalmente por simulação.

Como objetivo geral este trabalho visa estudar parâmetros de usinagem, condições de corte, e a usinabilidade do alumínio e suas ligas com ênfase no teste de propriedades físicas do material.

Os objetivos específicos visam discutir com base nos testes de Usinabilidade, o teste de propriedades físicas, a facilidade ou dificuldade de usinabilidade de determinados materiais selecionados; Analisar as relações entre a medida da Usinabilidade das ligas de alumínio e suas propriedades pela fórmula, assim como os critérios de avaliação da usinabilidade.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Considerações Iniciais

A fim de se obter novas técnicas e informações sobre o assunto, um grande número de pesquisadores e estudiosos vem se dedicando nesses últimos tempos. Se referindo particularmente a pesquisas acadêmicas ou aos setores industriais, responsáveis pela influência na maioria dos estudos na área, tem-se descoberto e/ou desenvolvido a análise da usinabilidade de novos materiais, novas abordagens aos parâmetros de usinagem, melhores condições de usinagem para uma determinada ferramenta, sobretudo no aperfeiçoamento de novas formas de usinagem, visando o aspecto comercial, onde a busca por redução dos custos e maior qualidade dos produtos é inerente.

Para Amorim (2003), Usinagem é um termo que abrange processos de fabricação mecânica resultantes de superfícies através da retirada de material, concedendo forma e dimensão à peça. Para Ferraresi, (1977), cita que no processo, o material removido da superfície da peça durante a usinagem é denominado cavaco.

Campos et al. (2010) fala que de um modo geral, o processo de usinagem consiste de um material que é submetido a remoção por uma ferramenta de corte, resultando em fragmentos menores, denominado “cavaco”, tendo como resultado final uma peça com dimensões e formas desejadas.

A usinabilidade dos materiais pode se determinar por diversas variáveis, identificadas como critérios de usinabilidade. Os critérios de Usinabilidade podem representar diversas grandezas, porém, segundo alguns pesquisadores, (Ferraresi, 1970; Stemmer, 1995; Diniz et al., 1999) os principais são os relativos aos esforços observados na usinagem, acabamento superficial dos componentes fabricados e tempo de vida da ferramenta.

2.2 Processo de Formação de Cavaco

Conforme Ferraresi (1970), a formação do cavaco tem influência em diversas grandezas ligadas à usinagem, tais como o desgaste da ferramenta e suas causas, as forças de corte, a aresta postiça de corte, entre outros. Esse mesmo autor cita também que o estudo experimental do processo de usinagem, é de suma importância, pois a teoria da plasticidade não explica sucintamente os fenômenos observados. No mecanismo de formação do cavaco, as deformações e velocidades são altíssimas, em contraste aos abordados na teoria da

plasticidade. A formação do cavaco, nas condições normais de usinagem se processa da seguinte forma, (MACHADO, et al. 2004):

- a. Durante a usinagem, a ação da ferramenta cortante recalca a seção “klmn” (Figura 2.1). Neste ponto, o material começa a sofrer deformações elásticas.
- b. Dando continuidade do processo o limite de escoamento é superado, rompendo-o, e o material passa a se deformar plasticamente. Deformações plásticas seguem produzindo, até que para manter este regime, as tensões não são mais suficientes. Logo uma zona de cisalhamento primária é definida (Figura 2.2), que para facilitar o estudo ela é representada por apenas um plano, definido pela linha OD da Figura 2.1.
- c. Depois de o material entrar no regime plástico, as tensões ultrapassam o limite de resistência do material pelo avanço da ferramenta, isso referente a zona de cisalhamento primária, o qual promove a ruptura, iniciada pela abertura de uma trinca na superfície de contato da extremidade da ferramenta, o ponto “O” (Figura 2.1) e que pode se estender ao ponto “D”. A amplitude de propagação da trinca, que depende, sobretudo da ductilidade ou da fragilidade do material usinado determina o tipo de cavaco, se for um material altamente deformável, a ruptura se realiza somente nas imediações da aresta cortante e o cavaco resultante denomina-se contínuo; e para materiais frágeis, o cavaco resultante é de cisalhamento ou de ruptura.
- d. Passando pela região de cisalhamento primário, devido ao movimento relativo entre a ferramenta e a peça, o volume “klmn” tende a movimentar-se por sobre a superfície de saída da ferramenta e ao escorregar, transfere uma porção, ou lamela de material (cavaco). Adjacente ao volume de material já conhecido “klmn” da Figura 2.1, possui uma porção de material semelhante, e subsequente a este, outro surge, sucessivamente, sendo um processo onde se repete esse fenômeno a cada ciclo, e cada ciclo representado em quatro etapas, formando no final destes uma lamela de cavaco, o qual segue:
 1. Deformação Elástica (recalque)
 2. Deformação plástica.
 3. Ruptura.
 4. Movimento sobre a superfície de saída da ferramenta.

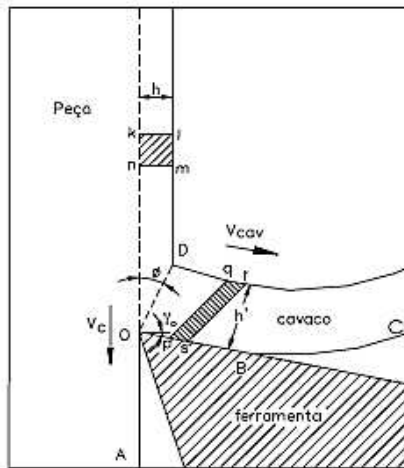


Figura 2.1 - Diagrama da cunha cortante.

Fonte: (MACHADO, 2004)

Algumas literaturas abordam o tratamento desta etapa de movimento por sobre a superfície de saída como sendo um sistema simples de atrito de Coulomb, sem maiores consequências para o processo. Não devemos considera-lo dessa forma. Alguns autores da literatura contemporânea, como (TRENT, et al., 2000) e (MACHADO et al., 2004) citam que o cavaco, na maioria dos casos, ao atravessar a superfície de saída da ferramenta sofre ainda altíssimas deformações plásticas cisalhantes, numa pequena região junto à interface com a ferramenta (na zona de fluxo), desenvolvendo ali altíssimas temperaturas, o que compromete a resistência das ferramentas. Esta região é denominada de zona de cisalhamento secundária (plano definido pela linha OB da Figura 2.1) e pode ser vista na Figura 2.2.

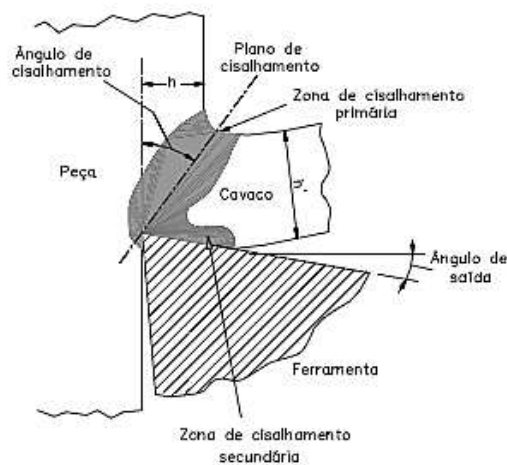


Figura 2.2 - Plano mostrando as zonas de cisalhamento primária e secundária.

Fonte: (MACHADO, 2004)

2.2.1 Tipos de Cavaco

A literatura (TRENT e WRIGHT, 2000; MACHADO e SILVA, 1999) relata que as características físicas dos cavacos resultantes das operações de usinagem, seu volume, sua fórmula e cor refletem diretamente nas características do processo de usinagem que foram responsáveis pela sua produção. Capla (2006) cita que essas alterações nos cavacos quando os mesmos em produção podem representar a qualidade superficial quando submetidos à usinagem, também como variações na vida útil da ferramenta de corte e desvio dimensional.

Os cavacos são classificados de diversas maneiras. Ferraresi (1970) e Diniz et al. (2000) abordam uma maneira mais didática, e apresenta a classificação do cavaco em tipos e formas. Os tipos de cavacos basicamente são três, com uma definição mais clara de Rodrigues (2005) para esses tipos, segue:

- Cavaco contínuo: é definido pelo seu longo comprimento, constituído por lamelas justapostas às quais estão numa disposição contínua. Na sua maioria é encontrado na usinagem de materiais dúcteis (alumínio, cobre e aços de baixa liga) em que os ângulos de saída da ferramenta representam valores elevados, assim como a influência direta de pequenos e médios avanços com altas velocidades de corte.
- Cavaco parcialmente contínuo, ou de cisalhamento: mostra-se formado por lamelas justapostas bem distintas. Ferraresi (1970) comenta que as porções de cavaco são cisalhados na zona de cisalhamento primária, e posteriormente, soldados parcialmente. Sua formação é oriunda do aumento da deformação e redução do coeficiente da resistência do material, sujeitos a vibrações externas e heterogeneidades da disposição estrutural cristalográfica do material da peça. Há possíveis ocorrências, dependendo do material da peça, de variações nas velocidades de corte, de elevados avanços e pequenos ângulos de saída.
- Cavaco descontínuo ou de ruptura, sua formação é apresentada por fragmentos arrancados da peça usinada. Há a redução da superfície de contato entre o cavaco e a superfície de saída. Da mesma forma, a ação do atrito; os valores para o ângulo de saída devem ser baixos, nulos ou negativos. É produzido pela usinagem de materiais frágeis ou de estrutura heterogênea, como o latão ou ferro fundido.

Em literaturas contemporâneas, outros autores, como Machado et al. (2004) e Rodrigues (2005) abordam um último tipo de cavaco, no caso, o segmentado. A peça nesse

processo sofre altas tensões de compressão e por ser um material endurecido, o material é frágil, logo essa elevada tensão de compressão incita a formação de trincas contrariamente a deformação plástica do cavaco, com maior ocorrência em materiais com pobres propriedades térmicas, a dizer do titânio e suas ligas. Estes cavacos também são formados utilizando ferramentas para usinagem de materiais endurecidos onde se utiliza ângulo de saída negativo, num processo conhecido como “cisalhamento termoplástico catastrófico” onde esse processo depende da temperatura resultante da usinagem do material, como critério de uma dada velocidade de corte, a saber, “velocidade de corte crítica”.

Algumas análises da literatura fazem referência a importância do controle do tipo de cavaco e sua formação. De Amorim (2002) relata que o cavaco contínuo dificulta tanto a remoção do cavaco como o armazenamento do mesmo. No entanto, alguns autores, como Stemmer (1995) alegam que, baseado no acabamento superficial, na durabilidade da ferramenta de corte e na energia consumida, o cavaco resultante contínuo representa o mais benéfico. Da mesma forma, o cavaco parcialmente contínuo apresenta riscos, como causador de vibrações que podem ocasionar danos na superfície usinada, como ondulações, alto índice de desgaste da ferramenta, entre outros.

Diniz et al. (1999) e Amorim (2002) relatam que dentre os cavacos com mais influência negativa no sistema, é o cavaco contínuo. Existem processos adotados que podem evitar a sua formação, ou amenizar os problemas acarretados pelo cavaco contínuo. Adotam-se certas alterações nos parâmetros de corte, dentre as quais são:

- Diminuição do ângulo de saída e de inclinação da ferramenta, ou ainda o uso destes como valores negativos;
- Aumento do avanço e da profundidade de corte;
- Diminuição da velocidade de corte e
- Uso de quebra - cavaco.

2.2.2 Formas de Cavaco

Diniz (2000) relata que não existe uma distinção tão clara entre os cavacos contínuos e de cisalhamento. De acordo com as condições de usinagem e a geometria da ferramenta, se ambas influenciarem uma maior deformação ao cavaco, pode-se passar do tipo de cavaco contínuo ao cisalhamento, porém o fator mais influente no tipo de cavaco é o material da peça usinada. Abrangendo a determinação do cavaco pelo material, para materiais

dúcteis (alumínio e aço) geram cavacos contínuos ou parcialmente contínuos e materiais frágeis (ferros fundidos e latões) geram cavacos descontínuos.

Coppini, Marcondes e Diniz (2006) discutem que é impossível classificar os cavacos do tipo arrancados (segmentados) quanto às suas formas, porém para os cavacos contínuos, lamelares e cisalhados (parcialmente contínuos) podem ser classificados, melhor descritos na Figura 2.3.

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- Salto		
1-3- Emaranhado	2-3- Emaranhado		4-3- Emaranhado	5-3- Emaranhado			

Figura 2.3 - Formas de cavacos produzidos na usinagem dos metais.

Fonte: (MACHADO et al. 2009) e (ISO 3685, 1993)

Machado et al. (2009) cita que a norma ISO faz uma classificação mais detalhada das formas de cavaco, conforme Figura 2.3. Diniz (2000), Rohloff (2012) expõem a classificação dos tipos de cavaco quanto à forma:

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

2.3 Classificação dos Parâmetros dos Processos de Usinagem

Stoeterau (2004), Machado et al. (2004) abordam a definição de usinagem segundo a Norma DIN 8580, agrupa todos os principais processos, podendo-se dividir esses processos de fabricação de metais e ligas metálicas em: com remoção de cavaco, e os sem

remoção de cavaco. Sendo que a usinagem pode ser classificada baseada nos processos de acordo com a Figura 2.4.

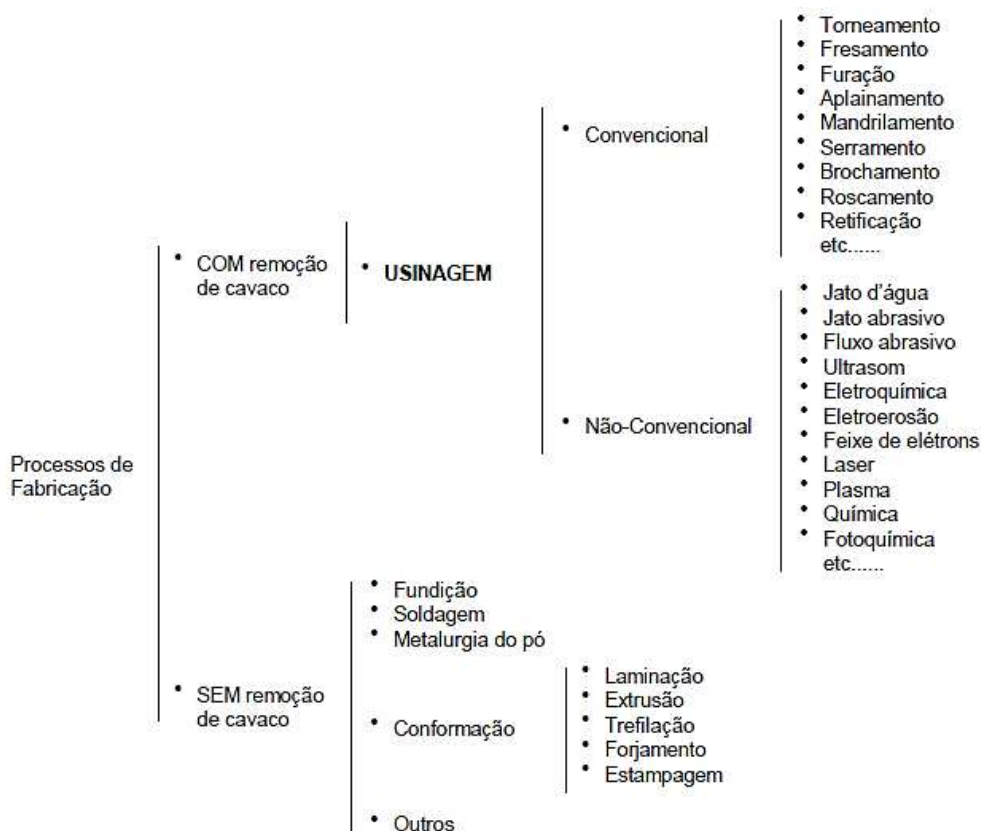


Figura 2.4 - Classificação dos processos de fabricação

Fonte: (MACHADO, et al., 2004)

2.3.1 Classificação Quanto ao Processo de Remoção de Material

A primeira, e grande divisão dos processos de Usinagem consistem em dois segmentos, conforme De Souza (2011) e Weingaerther et al. (2003):

- Processos convencionais: os mais utilizados em processos, no que consiste o emprego de energia mecânica na remoção do material pelas operações de corte, na sua maioria por cisalhamento, na atuação do contato físico da par ferramenta-peça – ex: torneamento, fresamento, aplainamento, retificação.
- Processos não convencionais (especiais): onde são mais utilizados em serviços nas indústrias e grandes laboratórios devido ao custo, para compensar, as operações se utilizam de tipos alternativos de energia de usinagem (p.ex. termelétrica), não geram marcas-padrão na superfície da peça e a remoção de material por volume é muito

menor se comparado aos processos convencionais – ex: remoção por jato d'água, jato abrasivo, remoção por ultrassom, remoção eletroquímica, eletroerosão, remoção química entre outros.

2.3.2 Classificação Quanto à Geometria da Ferramenta de Corte

De Souza (2011) e Weingaerther et al. (2003) continua essa classificação com relação a geometria de corte:

- Procedimentos de corte na usinagem com ferramentas de geometria determinado. São operações em que a ferramenta de usinagem possui uma aresta cortante, ou melhor, um gume de corte (dimensões e formato notórios), responsável por traçar o caminho de corte. Com a trajetória desse movimento, origina-se o processo de remoção do material que resulta em cavaco. Ex: torneamento, fresamento, mandrilamento, roscamento e outros.
- Procedimentos de corte com ferramentas de geometria não determinada. São operações com ferramentas que se constitui de alta quantidade de grãos abrasivos, estes, agem como vários gumes cortantes. Esses grãos abrasivos podem permanecer unidos pela associação de um determinado tipo de liga ou aglomerante, e são desprendidos e/ou quebrados da ferramenta concomitantemente a retirada de material da peça na forma de cavaco. Ex: Polimento, Lapidação, Retificação, Lixamento, Brunimento, Jateamento, e outros.

2.3.3 Classificação Quanto à Finalidade da Operação de Corte

Quanto à finalidade, as operações de usinagem podem ser classificadas por De Souza (2011) e Weingaerther et al. (2003) em:

- Operações de desbaste, uma usinagem com objetivo de alcançar as formas e dimensões próximas às especificações finais de fabricação, é um processo grosseiro que visa mais a retirada de material que o acabamento na peça.
- Operações de acabamento, sucedidas após a operação de desbaste, age na correção, cuja usinagem objetiva-se na peça atingir as dimensões finais, ou um acabamento especificado, ou ambos. É um processo cauteloso, onde minuciosamente, as possíveis falhas do projeto final são identificadas e assim corrigidas.

2.4 Ferramentas de Corte

Define-se a usinagem por ser um processo que utiliza como ferramenta um material mais duro que o da peça. A ferramenta, em trabalho, cisalha o material usinado, responsável por uma forma final desejada à peça. Estudos tem se desenvolvido pela demanda de vários materiais de ligas que foram criados com maior resistência, principalmente para suprir as necessidades aeronáuticas, para desenvolverem ferramentas ainda mais resistentes, com novas aplicações, novas geometrias de corte para seu maior rendimento e vida útil, baseados na dureza, por exemplo.

Já para Machado et al. (2004), porém, há também a utilização específica de ferramentas com resistência ao impacto (tenacidade), quando na usinagem de materiais frágeis ou processos como fresamento, onde a atividade não é contínua, isto é, interrompida, necessitando que essas ferramentas suportem impactos advindos do processo, choques mecânicos ou térmicos.

2.4.1 Materiais para Ferramenta

Ferraresi (1977) cita que uma operação de usinagem é considerada otimizada, quando a seleção do material da ferramenta de corte e as condições de usinagem adotadas são determinadas a fim de que o custo de operação venha ser mínimo, ou seja, alcançada a máxima produtividade para um par máquina-ferramenta utilizada. Diversos são os fatores a serem considerados (alguns dos quais são opostos), unidos à demasiada quantidade de materiais para ferramentas disponíveis no mercado, tende a deixar mais criterioso a seleção da melhor ferramenta para cada caso. De acordo com esse mesmo autor, Shaw (1984) e Diniz et al. (1999), alguns fatores são:

- Material a ser usinado – a dureza e o tipo de cavaco, que são duas das características do material da peça;
- Processo de usinagem – se possui corte contínuo, corte interrompido, uso ou não de fluido de corte, tipo de operação (acabamento ou desbaste), tempo de ciclo. Por exemplo: tipos de processos que usavam ferramentas rotativas de pequeno diâmetro utilizam ainda numerosos materiais de ferramentas arcaicos (aço-rápido), por suprir as altas rotações responsáveis por se conseguir velocidades de corte adaptáveis com material de ferramentas de corte mais nobre;

- Condição da máquina-ferramenta (potência, depreciação, velocidades disponíveis, conservação, etc.) – por máquinas-ferramentas se apresentarem antigas, com baixa potência, folgas e baixa rotação exigem materiais de ferramentas com maior tenacidade e que não requeiram alta velocidade de corte;
- Forma e dimensão da Ferramenta – Ferramenta não responde normas e formas padronizadas, usualmente são feitas de aço-rápido ou outro tipo, como material duro que possa ser fixado ao suporte por solda (metal duro sujeito a choques térmicos, suportando-os);
- Custo do material da ferramenta – relação custo/benefício razoável;
- Condições de usinagem – condições de usinagem típicas de acabamento exigem ferramentas com alto nível de resistência ao desgaste, em operações de desbaste exigem ferramentas com alto nível de tenacidade (resistência a impactos).
- Condições de operação – O material da ferramenta sofre influência tanto pelas condições de operação da usinagem quanto da rigidez do sistema de fixação (máquina-peça-ferramenta). Cortes interrompidos, ou com baixa rigidez do sistema de fixação requerem ferramenta de corte mais tenaz.

Machado (1988) cita que as propriedades gerais de um material de ferramenta são dureza, tenacidade, resistência ao desgaste, resistência à compressão, resistência ao cisalhamento, boas propriedades mecânicas e térmicas a altas temperaturas, resistência ao choque térmico e inércia química. O material de ferramenta é baseado no princípio da dureza relativa e, é óbvio que o surgimento de novos materiais e ligas estruturais com excelentes propriedades de resistência mecânica e elevada dureza contribuiu para o aparecimento de materiais de ferramentas mais resistentes para as operações de usinagem.

Matosinhos et al. (2003) relatam que uma ferramenta corta o material basicamente porque é mais dura e mais aguda do que a peça a ser cortada, mas nem todo material duro é adequado para ser uma ferramenta de corte. A dureza de uma ferramenta de corte está associada à sua resistência ao desgaste por abrasão, o que afeta basicamente o desgaste de flanco (na superfície de folga da ferramenta). A tenacidade indica a capacidade da ferramenta em suportar elevadas forças de corte e cargas de impacto causadas por cortes interrompidos, o que acarreta a fratura e o lascamento da aresta de corte de ferramenta.

A Figura 2.5 mostra a deterioração da dureza com a temperatura para diferentes materiais de ferramenta de corte. É possível observar que até mesmos materiais

tecnologicamente avançados, como cerâmicas, apresentam queda em suas durezas com o aumento da temperatura, apesar de numa taxa menor que a observada para os aços.

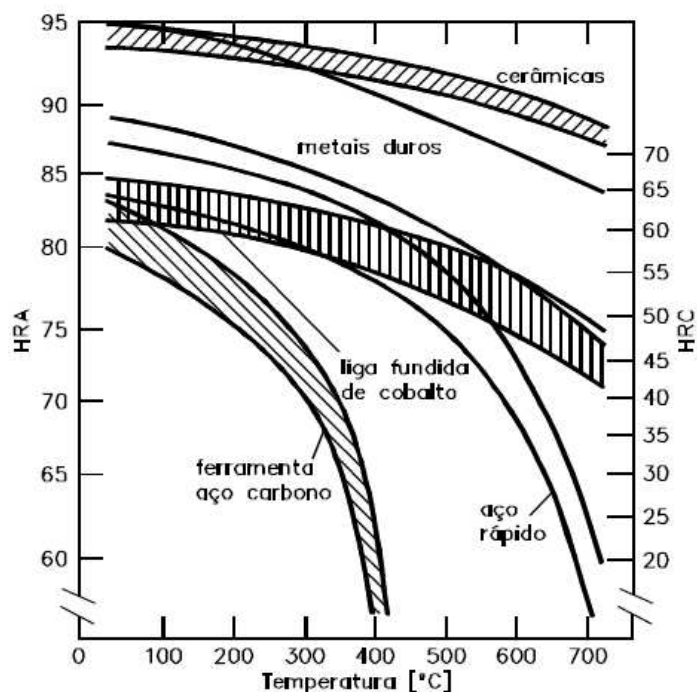


Figura 2.5 - Variação da dureza (HRA) de alguns materiais de ferramentas de corte x temperatura.

Fonte: MACHADO e da SILVA, 2004.

Baseado no exposto por De Amorim (2002), estudos são voltados para o maior desafio quando no desenvolvimento de ferramentas de corte na qual consiste a relação entre a dureza e a tenacidade, sendo duas propriedades de altíssima influência para o desempenho da ferramenta de corte e que não comumente se encontram associadas em um mesmo material. Atualmente, conseguem-se boas combinações de dureza e tenacidade, tanto em materiais de ferramenta puros quanto nos revestidos. As ferramentas revestidas buscam o equilíbrio entre as propriedades necessárias através do uso de um material base, que confere propriedades de tenacidade e alguma dureza, e um revestimento, com alta dureza, resistência a abrasão e inércia química.

A Figura 2.6, corresponde aos materiais para ferramentas de corte existentes no mercado mundial. À medida que se desce na lista, se encontram em ordem crescente de dureza, e decrescente de tenacidade. Esta ordem também representa o avanço tecnológico dos materiais, de acordo com a cronologia, com algumas exceções.

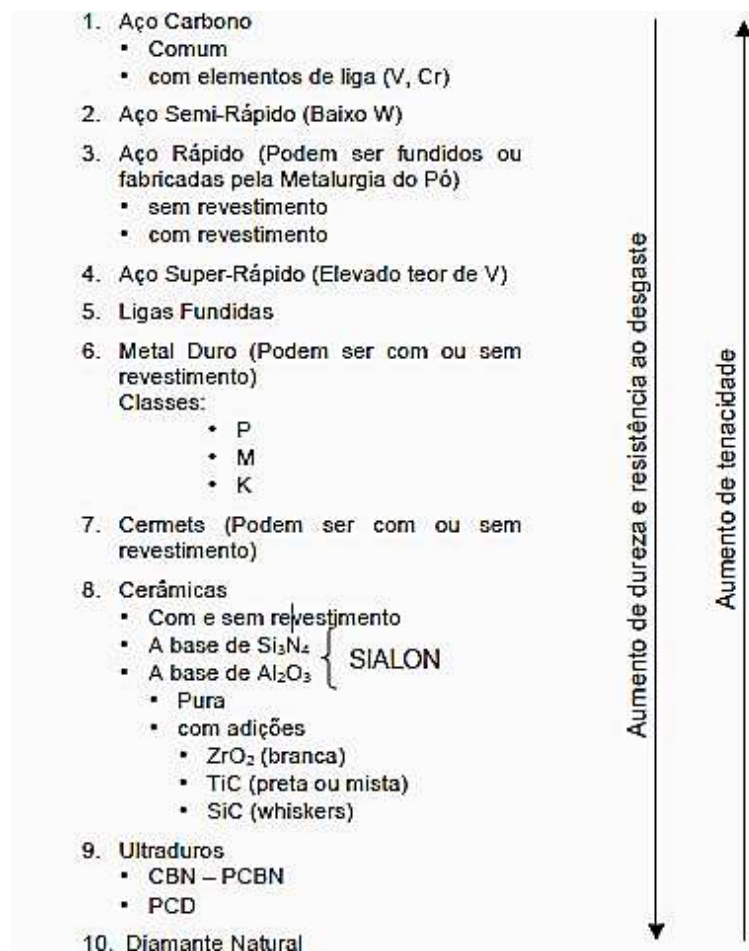


Figura 2.6 - Materiais para ferramentas de corte.

Fonte: MACHADO e da SILVA, 2004.

Hui (2007) cita em seu trabalho que foi realizada uma pesquisa pela revista *Máquinas e Metais* das 476 empresas prestadoras de serviço de usinagem para terceiros que responderam aos formulários enviados, 52,1 % trabalham visando um crescimento em 1999. As Figuras 2.7 e 2.8 expressam através de gráficos o resultado de ferramentas mais utilizadas e materiais mais usinados pelas empresas.

Hui (2007) comenta que essas empresas estão trabalhando preferencialmente com ferramenta de metal duro, que predominam com 39 % das utilizações. Este volume é seguido de perto (36%) pelas ferramentas de aço rápido, enquanto 13 % processos empregam aço temperado e os restantes são divididos entre as ferramentas diamantadas e as de cermet. Para os materiais, o aço carbono é o material mais usinado. Ele é empregado em 20 % das peças usinadas e é seguido de perto entre os não-ferrosos e o aço inox. O ferro fundido é usinado em 16% das aplicações e em último lugar está outro empate de 13 % para os aços temperados e materiais não-metálicos.

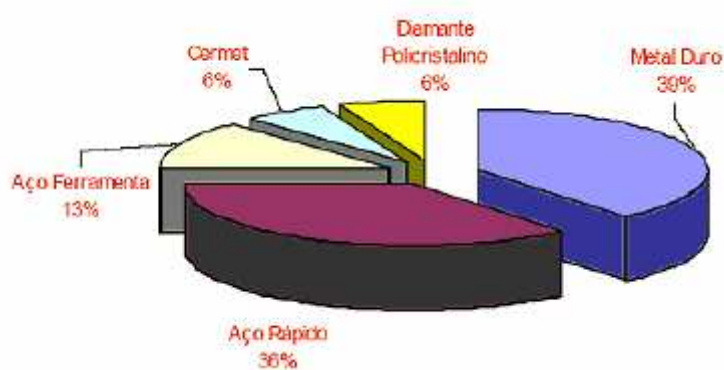


Figura 2.7 - O resultado das ferramentas mais utilizadas pela pesquisa.

Fonte: Máquinas e metais nº 403 – Agosto 1999.

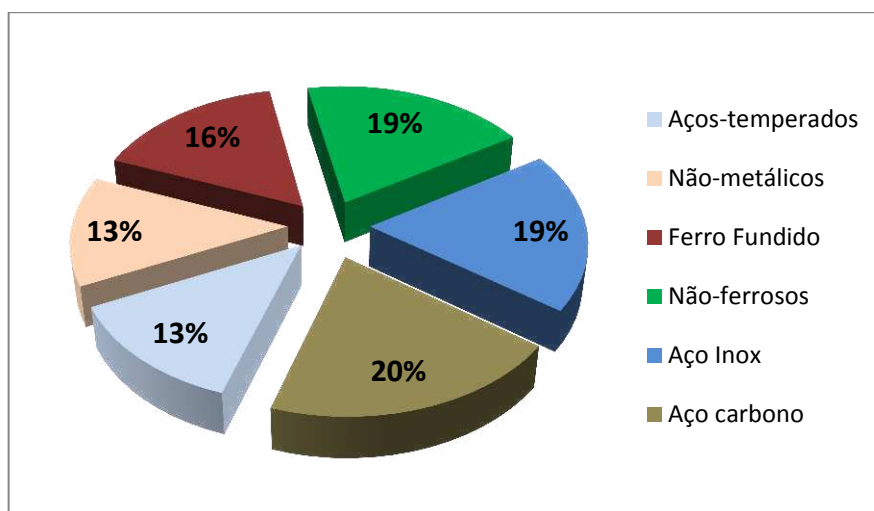


Figura 2.8 - O resultado dos materiais mais utilizados pela pesquisa.

Fonte: Máquinas e metais nº 403 – Agosto 1999, Adaptado.

2.4.2 Propriedades de um Material para Ferramenta de Corte

Diversos autores como Machado e da Silva (2004), Diniz (2000), entre outros relatam as principais propriedades e características que o material de ferramenta de corte, por sua vez, deve possuir e que são de suma importância para a seleção de uma ferramenta de corte. Assim como, Espanhol (2008) abordou também referente às principais características e propriedades que o material da ferramenta de corte deve possuir, são elas:

- Alta dureza, sobretudo nos processos a quente;
- Boa tenacidade a fim de se prevenir contra falhas por rupturas;
- Elevada resistência ao desgaste;

- Elevada resistência à compressão;
- Elevada resistência ao cisalhamento;
- Resistência a oxidação;
- Bons índices de propriedades mecânicas e térmicas a temperaturas elevadas;
- Elevada condutividade térmica;
- Inferiores índices de expansão volumétrica;
- Elevada resistência ao choque térmico;
- Inerte quimicamente.

A Figura 2.9 refere-se a algumas das principais propriedades que se espera em uma ferramenta de corte, suas associações aos tipos de materiais mais usados e a intensidade dessas propriedades de um material com relação aos demais.

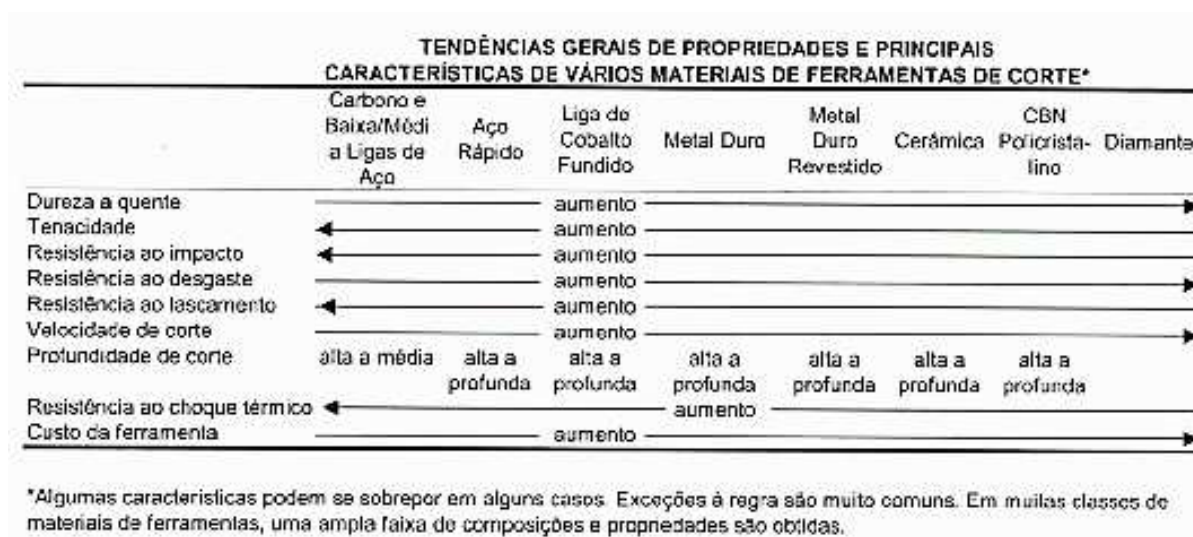


Figura 2.9 - Comparação entre propriedades de vários materiais para ferramenta de corte.

Fonte: Machado e Da Silva, 2004.

2.5 Avarias e Desgastes das Ferramentas de Corte

Para Childs et al. (2000), o dano à ferramenta se classifica basicamente em dois grupos: desgaste e avaria. O desgaste é caracterizado pela perda de material em quantidades pequenas, podendo ser no nível molecular ou atômico, de modo contínuo e progressivo. A avaria, por sua vez, acontece em grandes quantidades e de forma súbita.

Conforme Diniz, Marcondes e Coppini (2006), “Desgaste é a perda contínua e microscópica de partículas da ferramenta devido à ação do corte.” Além de sofrerem

desgastes, diversas outras ocorrências (avarias) aparecem na ferramenta em uso. O autor Hui (2007) também contribui para a explicação sobre desgaste, que é o fator limitador do grau de utilização das ferramentas de corte, que devido o tempo de corte e os custos, representam basicamente a economia de um processo de fabricação.

O autor Childs et al. (2000) citam que não existe material de ferramenta que possa suportar integralmente por muito tempo os efeitos inerentes ao processo de usinagem sem problemas. As ferramentas de corte devem suportar muita fricção, altas temperaturas e tensões normais. Na usinagem, o tipo de dano à ferramenta e a taxa de desgaste são muito sensíveis quando se mudam as condições de corte. O desgaste da ferramenta pode não ser evitado, mas pode ser reduzido se devidamente estudado e entendido os mecanismos de sua ocorrência.

Amorim (2002) contribui para a identificação de duas causas de maior influência no processo de usinagem, onde indicam a substituição da ferramenta de corte, que seguem:

- Avarias ou falhas catastróficas, como lascamento, trincamento ou até mesmo quebra da ferramenta;
- Desgaste excessivo, de modo que as condições de corte ou a qualidade da peça usinada sejam comprometidas.

Espanhol (2008) acrescentou uma definição bem sucinta sobre cada uma dessas causas, baseado em Machado e Silva (2004), onde para Avaria, diz que é um processo de destruição da ferramenta que ocorre repentinamente e inesperada causada pela lasca, trinca ou quebra da mesma. A avaria acarreta a perda de massa da ferramenta de corte na maioria dos casos. Já para Desgaste excessivo, de acordo com a norma ISO 3685 (1993), se houver alteração da sua forma original durante o corte, ocorre o desgaste em ferramentas de corte, resultante da perda de material ao longo do processo. No desgaste, a perda de massa é de maneira contínua e progressiva, em progressões mínimas. Com isso, há a redução gradual do poder de corte, fazendo com que a máquina operatriz eleve a potência além da pré-estabelecida.

Amorim (2002), cita também que na prática, as avarias e falhas catastróficas ocorrem em processos de corte interrompidos, como o fresamento, por choques térmicos e mecânicos. Já nos processos contínuos, como o torneamento, são difíceis de ocorrer, exceto para condições de corte que excedam as recomendadas, ou haja defeito de fabricação na ferramenta. Ao contrário das avarias e falhas catastróficas, há ocorrência do desgaste de

ferramenta tanto nos processos de corte contínuo quanto no interrompido, resultado devido vários mecanismos diferentes.

2.5.1 Tipos de Desgaste da Ferramenta

Existem três tipos principais de desgaste de ferramenta: desgaste de flanco, desgaste de cratera e desgaste de entalhe.

De acordo com Machado e Da Silva (2004), em condições normais de corte, uma das formas de desgaste apresentada na Figura 2.10 irá prevalecer, e elas se desenvolvem por vários mecanismos de desgaste.

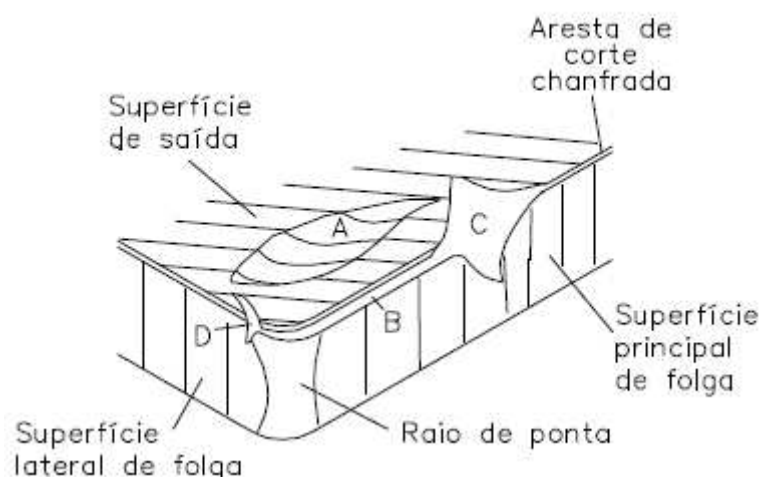


Figura 2.10 - Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte.

Fonte: DEARNLEY E TRENT, 1982.

Área A – desgaste de cratera.

Área B – desgaste de flanco ou frontal.

Área C e D – desgaste de entalhe.

Amorim (2002) comenta que o desgaste de cratera, representada pela “área A”, ocorre na superfície de saída da ferramenta durante o corte, causado pelo fluxo de cavaco, localizado na zona de deslizamento do cavaco. Este tipo de desgaste é resultado de uma combinação entre os mecanismos de desgaste por difusão e por abrasão, e ocorre, sobretudo, a altas velocidades de corte, devido às altas temperaturas geradas, favorecendo o mecanismo de desgaste por difusão. Devido à redução da resistência a abrasão causada pela difusão, influencia-se o desgaste abrasivo, sendo então a forma da cratera resultante da distribuição de tensões na superfície de saída da ferramenta. O desgaste se manifesta sob a forma de uma

cratera alongada com as extremidades arredondadas, paralela à aresta de corte, ambas detalhadas na Figura 2.11.

Espanhol (2008) comenta também que pelo aumento do desgaste de cratera, ocasiona a quebra da ferramenta quando tal desgaste coincide também com o desgaste de flanco (frontal). A fim de evitar esse tipo de desgaste, recomenda-se a utilização de ferramentas de metal duro revestido ou cerâmicas.

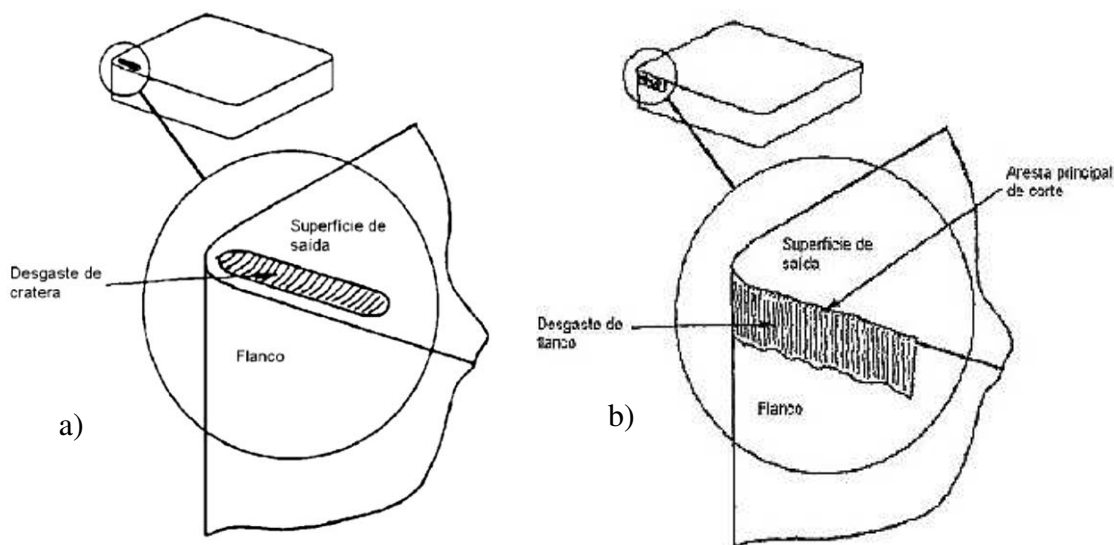


Figura 2.11 - Representação esquemática dos desgastes de cratera (a) e de flanco (b).

Fonte: Amorim, 2002.

Amorim (2002), comenta para o desgaste de flanco, que ocorre nas superfícies de folga da ferramenta, atingindo tanto a aresta principal de corte como a secundária, ou as duas. Ao atingir a aresta principal de corte, gera um aumento das forças e assim temperaturas envolvidas no corte, sujeitando vibrações tanto na ferramenta como na peça. Já na aresta secundária de corte, da qual dependem o controle dimensional e a qualidade do acabamento superficial da peça, um desgaste excessivo gera uma superfície mal acabada e desvio na especificação das peças. Em condições usuais de usinagem, o desgaste de flanco é o tipo de falha que apresenta o maior risco de danos à peça e que exige mais potência de corte, motivo pelo qual costuma ser o mais usado na determinação de critérios de fim de vida de ferramenta.

Sihvo; Varis (2008), também contribui citando que o desgaste de flanco está presente em todas as operações de corte. É o tipo de desgaste de ferramentas mais comum e também é relativamente fácil de ser medido. Para vários tipos de ferramentas, a largura do desgaste de flanco é adequada para predeterminar a vida da ferramenta.

Tönshoff et al (1993) aborda que para processos específicos, como torneamento, o desgaste de ferramenta além de afetar a precisão e a qualidade da superfície de peça, também aumenta drasticamente forças de corte. A variação da força de corte ocasiona a instabilidade do movimento da ferramenta, gerando um aumento da incorreção. O desgaste de flanco durante esse processo provoca superfície e qualidade da superfície da peça, mas o desgaste de cratera controla a confiabilidade do mesmo processo de torneamento.

Machado e Da Silva (2004) relatam que o desgaste de entalhe não é propriamente um mecanismo, como alguns consideram, mas sim uma forma de desgaste, e seu surgimento é nas regiões coincidentes com as laterais do cavaco (áreas C e D da Figura 2.10). No entanto, ainda não existe um consenso na literatura, que explique exatamente o mecanismo que provoca o desgaste de entalhe. Ele ocorre, principalmente, na usinagem de materiais resistentes a altas temperaturas (tais como: titânio, ligas de níquel, aço inoxidável e cobalto). Na altura da profundidade de corte, área C da Figura 2.10, ele pode se desenvolver somente na superfície de folga, ou em ambas as superfícies de saída e de folga da ferramenta.

2.5.2 Mecanismos Causadores do Desgaste da Ferramenta

A Figura 2.12 descreve de forma demonstrativa os tipos de desgaste e suas possíveis alocações. Para Borba (2013) os fatores principais, baseado na citação de Stemmer (1995):

- Abrasão;
- Aderência;
- Difusão;
- Desgaste químico e eletrolítico;
- Oxidação;

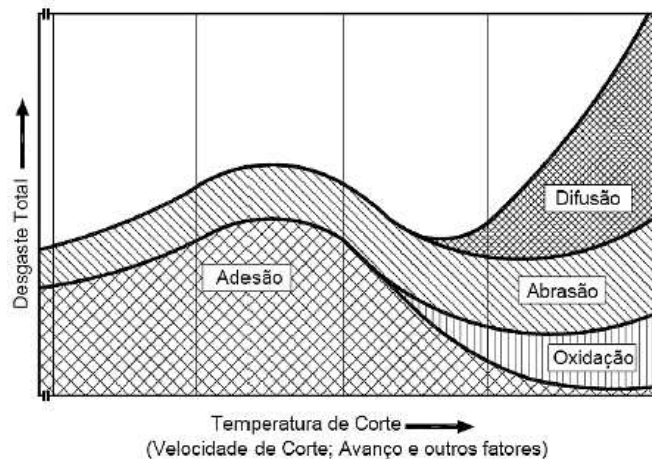


Figura 2.12 - Principais causas de desgaste de ferramentas.

Fonte: Vieregge (1970), Machado e Silva (2004).

Hui (2007), diz que à medida que a temperatura na aresta de corte aumenta, os mecanismos dominantes são:

- Desgaste por aderência, solda por pressão (formação de aresta postiça).
- Desgaste abrasivo e deformação plástica.
- Desgaste por oxidação.
- Desgaste por difusão;

Onde não há um material para ferramentas de corte que seja superior sob todos estes aspectos, portanto é necessário escolher o melhor para cada caso.

Childs et al. (2000), classificam três causas básicas responsáveis pelos danos em ferramentas, quais sejam: (1) danos à ferramenta devido à adesão, (2) os causados por origem mecânica e (3) danos de origem térmica. Os danos causados por origem mecânica são avarias ou desgastes. Nessa categoria, inclui-se a abrasão. Por sua vez, os danos de origem térmica incluem a difusão, o desgaste por corrente elétrica e a oxidação, pois estes são fenômenos intensificados pelo aumento da temperatura.

2.5.3 Tipos de Avarias nas Ferramentas de Corte

A literatura apresenta variações na classificação dos tipos de avarias. Grande parte dos autores, como Machado e Da Silva (2004); Amorim (2002); e Diniz et al. (2003) consideram os seguintes:

- Deformação plástica da aresta de corte: é um tipo de avaria que ocorre devido à sobreposição dos efeitos da pressão aplicada à ponta da ferramenta e às altas temperaturas nessa região. O crescimento desta deformação, além de piorar o acabamento superficial, pode gerar a quebra da aresta de corte. Pode ser evitada pela escolha adequada da geometria da ferramenta. A utilização de uma ferramenta com maior dureza a quente e maior resistência à deformação plástica pode evitar essa ocorrência. Outra medida que pode ser tomada é a mudança das condições e usinagem, visando à redução dos esforços e da temperatura de corte.
- Lascamento: ocorre em materiais frágeis e/ou quando a aresta de corte é pouco reforçada (pequeno ângulo de cunha), e diferentemente dos desgastes frontal e de cratera que retiram pequenas partículas continuamente, retira partículas maiores de uma só vez. Prejudica o acabamento superficial da peça e pode levar à quebra ou colapso da ferramenta. Pode ser eliminado ou amenizá-lo trabalhando com ferramenta mais tenaz, aumentar o raio de ponta e/ou o ângulo de cunha, uso adequado do ângulo de incidência, suavizando o primeiro contato da ferramenta com a peça.
- Trincas: este tipo de avaria é causado pela variação de temperatura e/ou pela variação dos esforços mecânicos, que ocasionam fadigas térmicas e/ou esforços mecânicos. Quando tem origem térmica, ocorrem perpendicularmente à aresta de corte. Quando tem origem mecânica, devido, por exemplo, ao corte interrompido, são paralelas à aresta. Seu crescimento leva também a quebra da ferramenta. Para evitar trincas de origem mecânica, utiliza-se ferramenta mais tenaz, reduzir o avanço de corte e elevar a estabilidade da usinagem. Para evitar trincas de origem térmica, não usar se possível o uso de fluido de corte aliado, somado ao uso de uma ferramenta mais tenaz.
- Quebra: é o resultado final da continuação das avarias e/ou desgaste citado acima. Algumas vezes, porém, a quebra pode ocorrer imprevisivelmente devido a possíveis fatores, a seguir: ferramenta muito dura, carga excessiva sobre a ferramenta, raio de ponta, ângulo de ponta ou cunha pequenos, corte interrompido, parada repentina do movimento de corte, entre outros. A quebra da ferramenta propicia não somente dano na mesma, mas também no porta-ferramenta e na própria peça. A quebra é resultado também da escolha não apropriada da ferramenta ou das condições inadequadas de trabalho.

2.5.4 Vida Útil da Ferramenta

O estudo sobre ferramentas de corte que possuam boas propriedades de resistência ao desgaste a altas temperaturas é justificada para se obter uma vida útil da ferramenta maior, e com isso maior produtividade. Pelo autor Casagrande (2004), a vida da ferramenta pode representar como o tempo que esta ferramenta trabalha efetivamente até perder sua capacidade de corte, em função de parâmetros previamente estabelecidos. A vida útil de uma ferramenta também é um critério observado na determinação da usinabilidade de um material, se útil ou não para o trabalho de usinagem.

Casagrande (2004) comenta também que a vida de ferramenta é o critério mais usado para avaliação da usinabilidade dos materiais. A equação (1) reconhecida como equação de Taylor, oferece uma estimativa da vida útil da ferramenta na usinagem para um determinado material. As constantes K e x são determinadas para o material usinado. A Figura 2.13 ilustra bem as forças e demais fatores inerentes ao processo de formação de cavaco.

$$T = K \cdot V_c^{-x} \quad (1)$$

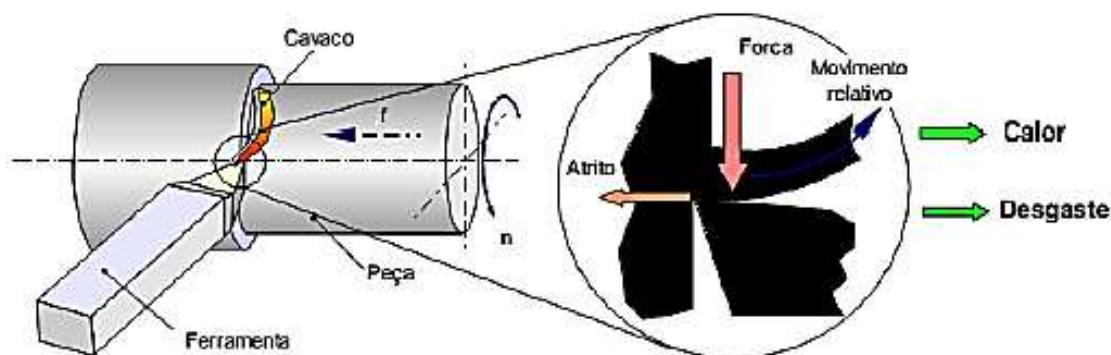


Figura 2.13 - Formação de cavaco e desgaste de ferramenta.

Fonte: (STOETERAU, et al., 2004)

Alguns fatores são fundamentais no processo de usinagem. Foram citados por Espanhol (2008), fatores relativos à peça, à ferramenta de corte, às condições de corte e ao fluido de corte, todos referentes à vida da ferramenta, ao que segue.

Os fatores relativos à peça que afetam a vida da ferramenta:

- Composição química;
- Tamanho do grão e microestrutura;
- Fusão e processo de fundição;

- Tipo de fabricação de base: forjado, laminado, trefilado;
- Tipo de tratamento térmico: recozimento, normalização, Têmpera, revenimento;
- Propriedades mecânicas: resistência à tração, ductilidade, dureza, encruamento;
- Forma e dimensão.

Os fatores relativos à ferramenta de corte que afetam a vida da ferramenta:

- Composição química da ferramenta;
- Tratamento térmico;
- Dureza e resistência ao desgaste;
- Tenacidade;
- Geometria.

Os fatores relativos às condições de corte e à máquina que afetam a vida da ferramenta:

- Velocidade de corte;
- Avanço de corte;
- Profundidade de corte;
- Rigidez do equipamento;
- Tipo de máquina.

Os fatores relativos ao fluido de corte que afetam a vida da ferramenta:

- Propriedades lubrificantes;
- Propriedades refrigerantes;
- Formas de aplicação.

Espanhol (2008) comenta que para que se usufrua satisfatoriamente o potencial da vida da ferramenta depende da boa conciliação de todos os fatores acima. Porém o fator mais importante, conforme Machado e Da Silva (2004) é a velocidade de corte, por ser a maior causadora da progressão do desgaste seguida pelo avanço e, em último, a profundidade de corte. A vida útil pode ser expressa de várias maneiras, como por exemplo:

- Percurso de corte (km);
- Volume de material removido;
- Tempo total de trabalho;
- Percurso de avanço (mm);
- Número de peças produzidas.

Pereira (2010) cita que a NORMA ISO 3685 (1993) é uma norma específica para determinação de fim de vida para ferramentas monocortantes de aço rápido, metal duro e cerâmica em operações de desbaste. Estabelece ensaios de usinabilidade, e quando qualquer um dos limites recomendados pela norma for ultrapassado deve-se reafiar ou substituir a ferramenta.

Os principais parâmetros utilizados para determinação da vida útil de ferramentas de metal duro, segundo a NORMA ISO 3685 (1993) são:

- Desgaste de flanco médio, $VB = 0,3$ mm.
- Desgaste de flanco máximo, $VB_{Max} = 0,6$ mm, no caso do desgaste não ocorrer de forma regular ao longo do flanco.
- Profundidade da cratera, $KT = 0,06 + 0,3f$, (onde f representa o avanço).
- Distância frontal entre cratera e flanco, $KF = 0,02$ mm.
- Falha catastrófica.

Essa norma aborda também para ferramentas de aço rápido e de cerâmica, os critérios mais comuns que são os relativos ao desgaste de flanco médio e máximo, cujos valores são os mesmos indicados para ferramentas de metal duro. Também cita a rugosidade superficial e o crescimento repentino das forças de usinagem como critério de fim de vida de ferramenta em operações de acabamento. No caso específico da rugosidade média, os valores indicados são: 0,4; 0,8; 1,6; 3,2; 6,3; 12,5mm, a serem definidos de acordo com a necessidade do fabricante.

2.6 Geometria da Ferramenta

De acordo com Reis (2000), a geometria da ferramenta de corte representa grande influência nos processos de usinagem dos metais. Ela tem uma influência marcante sobre algumas variáveis do processo de usinagem tais como: força e potência fundamentais ao

corte; calor gerado ao longo do corte; acabamento superficial da peça; desgaste da ferramenta e forma e tipo de cavaco produzido. Com isso, é necessária a definição da geometria da ferramenta de corte.

A norma brasileira ABNT NBR 6163 - Conceitos da Técnica de Usinagem – Geometria da Cunha Cortante – Terminologia (1980) define os ângulos da cunha cortante da ferramenta. E para isso, é necessário, assim, definir a ferramenta através dos ângulos da cunha de corte. Machado e Silva (2004) traz uma definição bem clara sobre esse assunto. São expostas as principais partes construtivas de uma ferramenta de corte, e melhor detalhadas num mesmo plano bidimensional através da Figura 2.14 seguinte:

- Cunha de corte: é a cunha formada pelas superfícies de saída e de folga da ferramenta. Através do movimento relativo entre a peça e a ferramenta, formam-se os cavacos sobre a cunha de corte.
- Superfície de Saída ($A\gamma$): é a superfície da cunha de corte sobre a qual o cavaco se desliza.
- Superfície Principal de Folga ($A\alpha$): é a superfície da cunha de corte, que determina a folga entre a ferramenta e a superfície em usinagem. Distinguem-se a superfície principal de folga $A\alpha$ e a superfície secundária de folga $A'\alpha$.

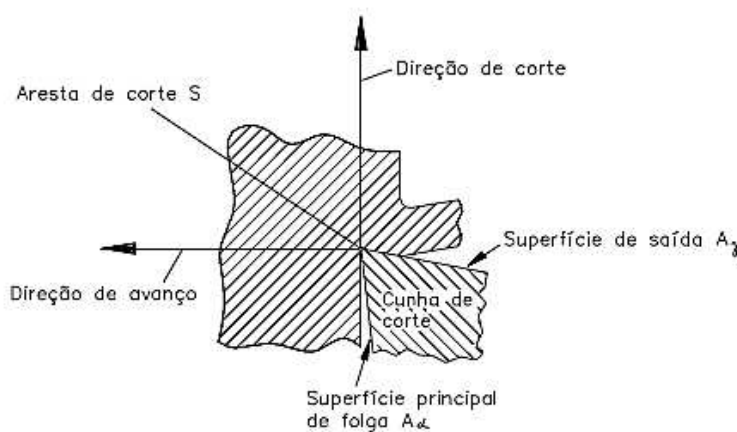


Figura 2.14 - Cunha de Corte da Ferramenta (torneamento).

Fonte: Machado e Silva, 2004

- Arestas de Corte: são as arestas da cunha de corte formada pelas superfícies de saída e da folga. Deve-se distinguir a aresta principal de corte S e a aresta secundária de corte S' :

- Aresta Principal de Corte S: é a aresta de corte cuja cunha de corte, observada no plano de trabalho, e para um ângulo da direção de avanço $\phi = 90^\circ$, indica a direção de avanço.
- Aresta Secundária de Corte S': é a aresta de corte cuja cunha de corte, observada no plano de trabalho, e para o ângulo da direção de avanço $\phi = 90^\circ$, indica a direção contrária à direção de avanço.
- Ponta de Corte: parte da cunha de corte onde se encontram as arestas principal e secundária de corte.
- Ponto de Corte Escolhido: ponto destinado à determinação das superfícies e ângulos da cunha de corte, ou seja, as definições se referem a um ponto da ferramenta, dito ponto de corte escolhido ou “Ponto de Referência”.

Todas essas partes construtivas da ferramenta são mais bem descritas analisando a Figura 2.15 num plano tridimensional.

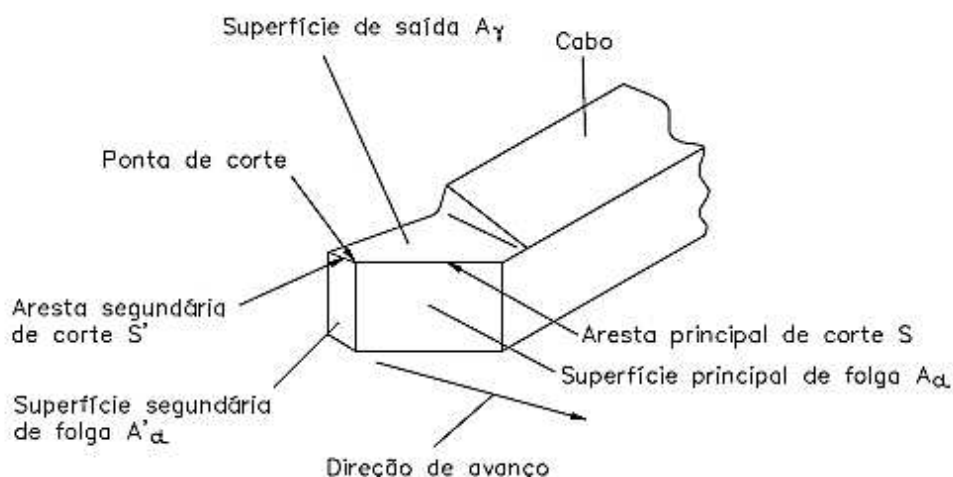


Figura 2.15 - Arestas de corte e superfícies da cunha de corte de uma ferramenta de torno.

Fonte: Machado e Silva, 2004

2.6.1 Ângulos Medidos no Plano de Referência da Ferramenta

Definição do assunto segundo Machado e Silva (2004):

- Ângulo de Posição principal da Ferramenta (χ_r): ângulo formado entre o plano de corte da ferramenta P_s e o plano admitido de trabalho P_f , medido no plano de

referência da ferramenta. É sempre positivo e situa-se sempre fora da cunha cortante, de forma que o seu vértice indica a ponta de corte.

- Ângulo de Posição Secundário da Ferramenta (χ'_r): ângulo entre o plano de corte secundário da ferramenta P_s e o plano admitido de trabalho P_f , medido no plano de referência da ferramenta. É sempre positivo e situa-se sempre fora da cunha cortante, de forma que o seu vértice indica a ponta de corte.
- Ângulo de Ponta da Ferramenta (ϵ_r): ângulo entre os planos principal de corte P_s e secundário de corte P'_s medido no plano de referência da ferramenta.

A Figura 2.16 expressa de forma mais clara a atuação de cada ângulo medido, com sua respectiva determinação no espaço. Relacionando esses ângulos, temos:

$$\chi_r + \chi'_r + \epsilon_r = 180^\circ$$

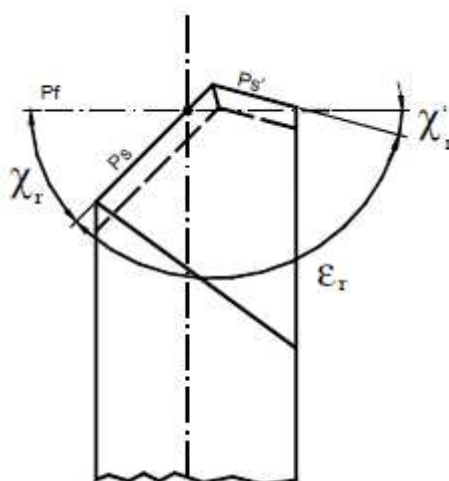


Figura 2.16 - Ângulos da cunha cortante medidos no plano de referência.

Fonte: Reis, 2000

Com relação ao alumínio, Weingaertner; Schroeter (1991) comentam que no processo de furação desse material o ângulo de ponta normalmente empregado tem valores entre 118° e 140° , mas esse valor pode chegar a 150° para furação de chapas finas ou até 90° para usinagem de ligas com teor de silício acima de 12%.

2.6.2 Ângulos Medidos no Plano de Corte da Ferramenta

- Ângulo de Inclinação da Ferramenta (λ): ângulo entre a aresta de corte e o plano de referência da ferramenta, medido no plano de corte da ferramenta.

2.6.3 Ângulos Medidos no Plano Ortogonal

- Ângulo de Saída da Ferramenta (γ): ângulo entre a superfície de saída $A\gamma$ e o plano de referência da ferramenta, medido no plano ortogonal da ferramenta.
- Ângulo de Cunha da Ferramenta (β): ângulo entre as superfícies de saída $A\gamma$ e de folga $A\alpha$, medido no plano ortogonal da ferramenta.
- Ângulo de Folga (ou incidência) da Ferramenta (α): ângulo entre a superfície de folga $A\alpha$ e o plano de corte da ferramenta, medido no plano ortogonal da ferramenta.

A Figura 2.17 expressa de forma mais clara a atuação de cada ângulo medido, com sua respectiva determinação no espaço. Relacionando esses ângulos, temos:

$$\gamma + \beta + \alpha = 90^\circ$$

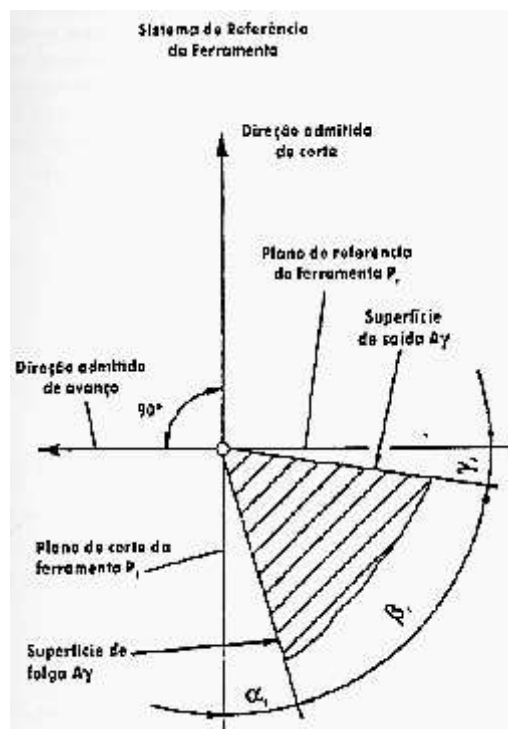


Figura 2.17 - Ângulos de Saída, de Cunha e de Folga da ferramenta, representados no plano admitido de trabalho.

Fonte: Diniz, 2000

Os estudos de Weingaertner; Schroeter (1991), para ligas de alumínio dúcteis, afirmam que o ângulo de incidência pode ser de 17° . Já para as ligas mais resistentes e com alto teor de silício o ângulo de incidência varia entre 12° e 15° , ambos utilizando ferramenta de broca helicoidal.

Casagrande (2004) cita que em relação à geometria de ferramenta, um dos parâmetros que pode influenciar na força de corte é o ângulo de saída da ferramenta (γ). Quanto menor for o γ maior será a força de corte resultante no processo de usinagem, porém se o ângulo γ for muito grande a ferramenta não terá muita resistência e será mais sensível a choques. O ângulo de inclinação (λ) causa o mesmo efeito, apesar de em menor escala. Já para o ângulo de folga (α), a diminuição do mesmo causa o aumento da força de corte devido ao aumento do atrito ferramenta-peça. Sua influência torna-se inexpressiva para valores maiores que 5° .

A Figura 2.18 expressa mais claramente o arranjo de cada plano medido, com sua respectiva direção e atuação. Relacionando esses ângulos, temos:

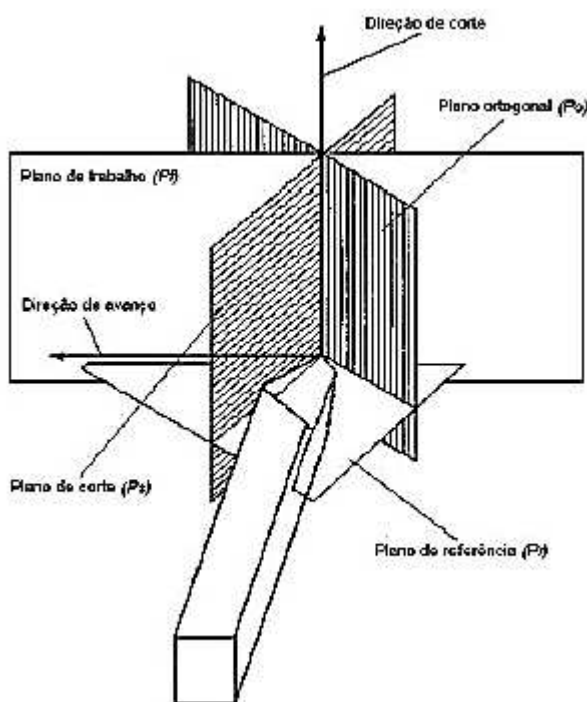


Figura 2.18 - Sistema de referência da ferramenta.

Fonte: Adaptado de Ferraresi, 1970

Amorim (2002), comenta que os ângulos referentes à ferramenta e à posição desta em relação a peça (Figuras 2.16 e 2.17) são medidos em diferentes planos de referência (Figura 2.18), com diferentes representações para cada operação de usinagem. Para a operação de torneamento, os ângulos mais influentes são o ângulo de posição da ferramenta (χ_r), o ângulo de posição secundário da ferramenta (χ'_r) e o ângulo de ponta de ferramenta (ϵ_r), medidos no plano de referência (P_r), o ângulo de inclinação da ferramenta (λ_s) no plano de corte (P_s) e o ângulo de saída da ferramenta (γ) e o ângulo de folga (α) medidos no plano ortogonal (P_o).

2.7 Grandezas e Condições de Usinagem

De acordo com Diniz; Marcondes; Coppini (2001), as grandezas e suas relações geométricas, apresentam uma terminologia baseada na ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). Segue dentre as principais variáveis, Velocidade de corte (v_c), velocidade de avanço (v_f) e profundidade de usinagem (a_p).

2.7.1 Velocidades de Corte

Stemmer (2001), diz que a velocidade de corte (v_c) é a velocidade instantânea no ponto de referência do gume cortante, segundo uma direção e sentido de corte. Essa velocidade está relacionada diretamente com o diâmetro do furo e com a rotação da ferramenta, para o processo de furação, por exemplo.

Diniz; Marcondes; Coppini (2003) acrescentam também que essa velocidade tangencial instantânea é resultado da rotação da ferramenta ao redor da peça, onde os movimentos de corte e de avanço ocorrem simultaneamente, como o processo de furação, citado acima e também o de torneamento e fresamento. Seu valor é calculado a seguir:

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

Onde:

v_c = velocidade de corte, (m/min);

d = diâmetro da ferramenta ou da peça [mm];

n = velocidade de rotação da ferramenta ou da peça [rpm].

2.7.2 Velocidade de Avanço

Para uma definição levando em conta o processo de furação, Ferraresi (1977), diz que o avanço é o percurso linear por revolução (volta), num sentido paralelo ou coincidente com a direção do eixo do furo. Stemmer (2001), também contribui afirmando que a grandeza de avanço (f) é a relação da dimensão do movimento, expressa em mm, por rotação ou curso, medido no plano de trabalho.

Diniz; Marcondes; Coppini (2003), conclui de forma abrangente, a definição: “é a quantidade de movimento em um determinado tempo”. O cálculo, segundo o autor segue:

$$V_f = f \cdot n = \frac{1000 \cdot V_c}{\pi \cdot d} \cdot f \quad (3)$$

Onde:

v_f = velocidade de avanço, (m/min);

f = avanço, (mm/revolução).

2.7.3 Profundidade de Usinagem

Diniz et al. (2000), aborda a profundidade (a_p) ou largura de corte (usinagem) como sendo a profundidade de penetração da ferramenta em relação a peça, tomado perpendicularmente ao plano de trabalho. No processo de furação em cheio, ela equivale à metade do diâmetro da broca.

Diniz; Marcondes; Coppini (2001), comenta que para o processo de fresamento frontal, “ a_p ” é chamada profundidade de corte, entretanto, no fresamento tangencial, “ a_p ” é chamada largura de usinagem.

2.8 Força de Usinagem

Banin Júnior (2009) comenta sobre o conhecimento dos esforços de corte envolvidos no processo que se mostra particularmente interessante para que se possa analisar a usinabilidade de determinado material, definir métodos econômicos do ponto de vista energético e permitir com que se escolha uma máquina-ferramenta rígida o suficiente para garantir qualidade dimensional.

Lucas Filho (2004) diz que a força atuante no par ferramenta/peça no decorrer do processo de usinagem é uma força espacial, sua representação pode ser uma resultante de suas

componentes geométricas (decomposição vetorial) e físicas (pelas ações físicas específicas em certas direções de cisalhamento, atrito, empuxo, etc.) como podemos ver na Figura 2.19. De fato, a força total de usinagem é derivada da ação de inúmeras forças que agem nas diversas áreas de contato entre o par ferramenta/peça. Isto dificulta a análise das correlações entre as várias componentes físicas da força total de usinagem.

Nos estudos de Reis (2000), aborda que no processo de corte tridimensional aparece uma força de usinagem (F_u) resultante das forças atuantes pela ferramenta, e que agem sobre a superfície inferior do cavaco. A indicação de F_u é muito importante para o entendimento do processo de usinagem, pois é responsável pela estimativa da potência de corte de trabalho, e informa a definição de diversos fenômenos decorrentes na usinagem.

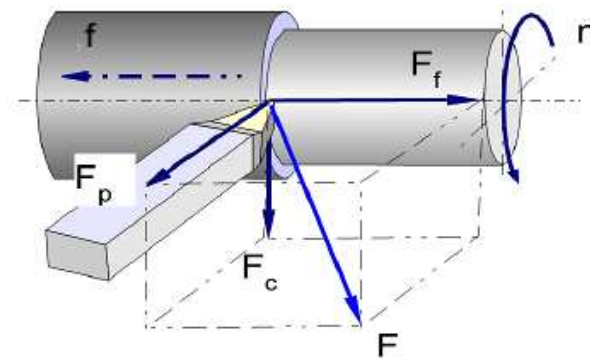


Figura 2.19 - Esforços no processo de torneamento.

Fonte: Stoeterau, et al., 2004

Ferraresi (1977) no seu estudo com operação de torneamento cita que as componentes da força de usinagem (F_u) são de suma importância para esse processo. As componentes com maior destaque são: força de corte, força de avanço e força de profundidade de corte. Os vetores destes componentes determinam as arestas de um triedro triortogonal, que através do vértice representa o ponto de referência da ferramenta específico de concentração da força. Tanto a Figura 2.19 como a Figura 2.20 representa um diagrama de forças de usinagem.

Para Espanhol (2008) essa força de usinagem é resultante de duas componentes de forças, são elas:

- Forças ativas: - Força de corte
 - Força de avanço
 - Força Efetiva de Corte

- Força passiva: - Força de profundidade

Onde, Segundo Banin Júnior (2009):

- Força de corte (F_c) – É conhecida também de força principal de corte. É a projeção de F_u sobre a direção de corte.
- Força de avanço (F_f) – Projeção da força de usinagem F_u sobre a direção de avanço.
- Força Passiva (F_p) – É chamada também de força de profundidade. É a projeção de F_u sobre uma perpendicular ao plano de trabalho.
- Força Efetiva de Corte (F_e) – Para fins de análise vetorial, é a projeção de F_u sobre a direção efetiva de corte.

Analizando as forças Ativas (F_f) e Passivas (F_p), tem-se uma relação conforme Machado et al. (1999), sendo o diagrama das forças no plano conforme a Figura 2.20:

$$F_u = \sqrt{F_p^2 + F_t^2} \quad (4)$$

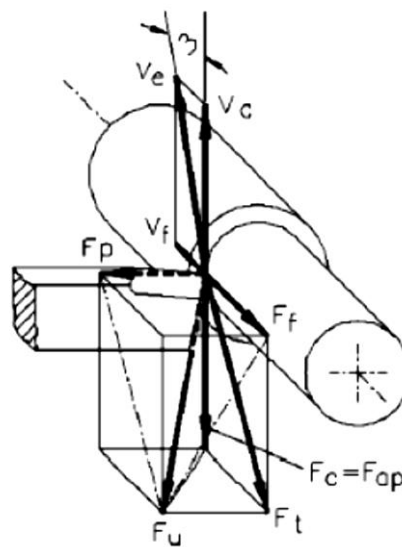


Figura 2.20 - Componentes da força principal de corte.

Fonte: Ferraresi, 1977

2.9 Fluido de Corte

O objetivo maior da utilização de fluido de corte durante a usinagem de materiais é diminuir a temperatura do inserto durante a usinagem, aumentando a sua vida útil (DINIZ, 2007). O conhecimento referente ao desempenho dos fluídos de corte quando aplicado em diferentes processos é importante para elevar a eficiência de qualquer tipo de usinagem. Esta eficiência pode ser mensurada, além da vida útil do inserto, através da rugosidade da superfície da peça usinada (ÁVILA, 2001).

Machado e Da Silva (2004) mencionam que uma análise ampla e final do uso do fluido de corte é a diminuição do custo total por partes usinadas ou o aumento da taxa de produção. A obtenção disto é graças a um ou mais benefícios que os fluidos de corte podem proporcionar, são eles:

- Aumento da vida da ferramenta pela refrigeração e lubrificação;
- Diminuição das forças de corte devido à lubrificação, portanto redução de potência;
- Melhoria no acabamento superficial da peça;
- Remoção de forma simples do cavaco da zona de corte;
- Menor distorção da peça pela atuação do refrigerante.

Com as razões mencionadas, podem-se abordar as funções dos fluidos de corte:

- Lubrificar (à baixas velocidades de corte);
- Refrigerar o par ferramenta/peça (à altas velocidades de corte);
- Ajudar na remoção do cavaco da zona de corte;
- Proteção na máquina-ferramenta e a peça de corrosão atmosférica;
- Colabora na quebra do cavaco;
- Evitar a formação de APC
- Redução do atrito oriundo do processo pelo contato da ferramenta e cavaco;
- Restringir a solda do cavaco na superfície de saída;
- Melhorias no âmbito econômico.
- Fig. 2.21

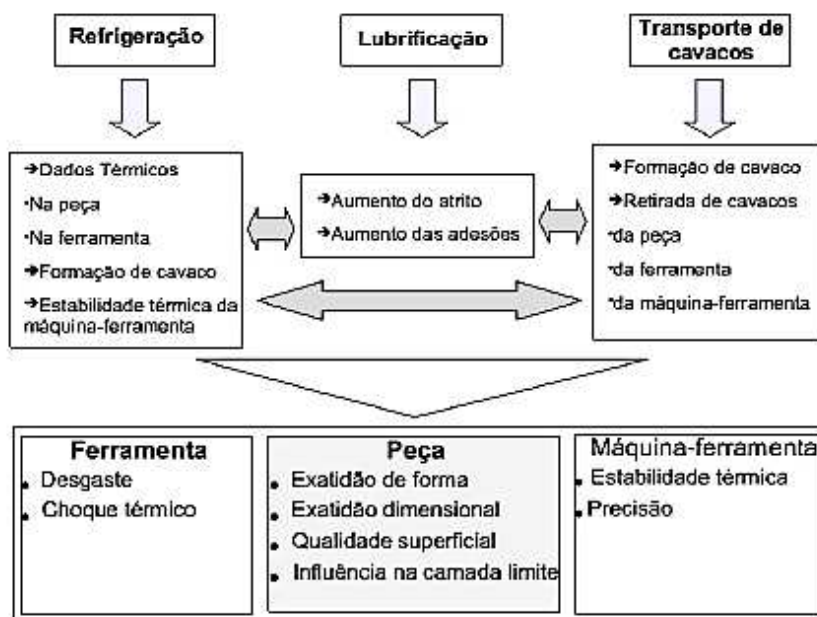


Figura 2.21 - Funções do fluido de corte.

Fonte: Weingaerther, et al., 2003

Machado e Da Silva (2004) comenta associando o fluido de corte que às baixas velocidades de corte, a refrigeração é quase que desnecessário, enquanto que a lubrificação é importante para reduzir o atrito e evitar a formação de APC. Assim, um fluido de corte à base de óleo deve ser usado. Às altas velocidades de corte, as condições do processo não beneficiam a penetração do fluido de corte na interface para que ele exerça o papel lubrificante. Nestas condições de usinagem a refrigeração se torna mais eficiente, sendo a utilização do fluido de corte à base de água mais indicada.

2.9.1 Ação dos Fluidos de Corte

Machado e Diniz (2000) afirmam que uma das maneiras de se amenizar os efeitos dos tempos improdutivos que os desgastes da ferramenta geraram, pode ser alcançada pela introdução, no processo, de sistemas de lubrificação e refrigeração eficazes. Porém, na última década as pesquisas tiveram como meta restringir ao máximo o uso de fluidos refrigerantes e/ou lubrificantes na produção metal mecânica. Os fatores importantes que justificam esse procedimento incluem os custos operacionais da produção, questões ecológicas, as exigências legais de conservação do meio ambiente e a preservação da saúde do ser humano.

Costa e Santos (2006) nos estudos de fluido de corte, citam que este como refrigerante evita que a ferramenta alcance uma temperatura alta, tanto pela dissipação do calor (refrigeração), como também pela diminuição do calor gerado (lubrificação). Quando

um fluido de corte é a base de água, possui maior atuação na dissipação de calor (refrigeração) que a redução de calor (lubrificação). A eficiência do fluido de corte em reduzir a temperatura diminui com o aumento da velocidade de corte e da profundidade de corte.

Costa e Santos (2006) já para lubrificante, explicam que o fluido de corte forma um filme (película) entre a ferramenta e a peça, impedindo quase totalmente o contato direto entre os mesmos. O fluido de corte pode também restringir o caldeamento (microsoldagem) de cavacos da superfície de saída da ferramenta e evitar o aparecimento da aresta postiça de corte (APC), isso quando são adicionados certos aditivos apropriados.

Machado e da Silva (2004) comentam que a capacidade do fluido de corte em limpar os cavacos da zona de corte, depende da viscosidade e da vazão do fluido de corte, assim, como também da operação de usinagem e do tipo de cavaco sendo formado. Em algumas operações, tais como furação e serramento, esta função é de grande relevância, visto que ele pode evitar o bloqueio do cavaco na zona de corte e, conseqüentemente, quebra da ferramenta.

2.10 Acabamento Superficial da Peça Usinada

Segundo Ferraresi (1977), a qualidade da superfície de uma peça é caracterizada pelo acabamento obtido na usinagem e pelas propriedades físicas e mecânicas do metal na camada superficial. Espanhol (2008) cita que ao longo do processo de usinagem, estas propriedades são influenciadas em virtude da ação de alguns aspectos:

- Pressão da ferramenta imposta na peça;
- Atrito da superfície de incidência imposta na peça;
- Atrito do material na região de deformação plástica;
- Calor gerado no corte;
- Vibração da máquina e ferramenta;
- Fenômenos específicos do processo de formação do cavaco;
- Geometria da ferramenta;
- Condições de usinagem, como avanço, profundidade de corte e a mais importante, velocidade de corte.

Machado et al. (2011) comentam que o acabamento de uma superfície usinada é a combinação de vários fatores que podem ser divididos em rugosidade, ondulações e falhas. Estes autores definem o acabamento de uma superfície usinada da seguinte forma:

- As ondulações e erros de forma são definidos como irregularidades superficiais ou erros macrogeométricos cujos espaçamentos são maiores que as irregularidades consideradas rugosidades. Podem ser geradas por vibrações e flexões da ferramenta e/ou da peça devido à força de usinagem, erros de fixação da peça ou da ferramenta, etc.
- As falhas são interrupções na topografia típica de uma superfície. São não intencionais, inesperadas e indesejáveis. Podem ser causadas por defeitos inerentes ao processo de usinagem, como inclusões, trincas, etc.
- A rugosidade de uma superfície é composta de irregularidades finas ou erros microgeométricos resultantes da ação inerente ao processo de corte (marcas de avanço, aresta postiça de corte, desgaste da ferramenta, etc.). Em muitos casos a rugosidade é utilizada como parâmetro de saída para controlar um processo de usinagem.

Sobre Rugosidade Superficial e seus parâmetros, Faria (2007) aborda dois efeitos independentes que somados representam a rugosidade da superfície final, obtida durante a operação de usinagem:

- A rugosidade da superfície teórica (padrão) que é o resultado da geometria da ferramenta e do avanço
- A rugosidade da superfície real que é o resultado das irregularidades da operação de corte.

2.10.1 Superfícies de Ligas de Alumínio Usinadas

Baseado nos estudos de Cunha (2012), referente a usinabilidade de uma liga de Alumínio, cita algumas influências na usinagem deste:

- No que diz respeito às ligas fundidas, a microestrutura exerce certa influência, ou seja, partículas duras difundidas numa matriz de material mais tenaz podem ser avaliadas como resultando em superfícies usinadas mais ásperas. A qualidade das superfícies

produzidas por peças usinadas à partir de ligas fundidas podem ser classificadas como boas a muito boas.

- A pureza do material utilizado é de fundamental importância para ligas de alumínio com fins específicos (ex.: HD para armazenamento de informações de computadores), os quais devem ser usinados para obtenção de superfícies bem acabadas ($R_t < 0,1 \mu m$). Para satisfazer estas condições, os materiais de alumínio forjado usados devem ter uma microestrutura extremamente uniforme, livre de heterogeneidades e impurezas.
- A velocidade de corte é um importante parâmetro que influencia na qualidade superficial. No geral, a rugosidade é inversamente proporcional à velocidade de corte. Às baixas velocidades de corte a rugosidade da superfície aumenta drasticamente, devido à aresta postiça de corte criada (APC). As regiões de baixas velocidades de corte devem ser, como uma regra geral, evitadas na usinagem de alumínio. Aresta postiça de corte é um fenômeno típico na usinagem de ligas de alumínio e é causada pela adesão e retirada periódica de material da peça na ferramenta de corte.

2.11 O estudo da Usinabilidade

Ferraresi (1977), aborda como definição ampla de Usinabilidade “uma grandeza tecnológica que expressa um conjunto de propriedades de usinagem de um material em relação a outro tomado como padrão”. Porém, a definição de compreensão mais simples e com melhor aplicação em estudo foi apresentada por Mills e Redford (1983): “Usinabilidade é a propriedade de um material que governa a facilidade ou a dificuldade com a qual este material pode ser usinado usando uma ferramenta de corte”.

Já Destro (1995), diz que a Usinabilidade adapta-se para descrição, otimização e comparação do processo de Usinagem como propriedade tecnológica. A usinabilidade depende de variáveis, essas chamadas critérios de usinabilidade. Os critérios correlacionam as diretrizes, cuja análise avaliativa coexiste no objeto de execução do teste de Usinabilidade. Esses critérios listam-se podendo ser básicos (acabamento superficial, vida da ferramenta, força de usinagem, produtividade, etc.) ou específicos (características do cavaco, análise dimensional, material da peça ou ferramenta, temperatura de corte, etc.).

Ferraresi (1970) cita que os principais fatores que influenciam a usinabilidade são: Processo mecânico e condições de usinagem:

- Material da ferramenta;

- Parâmetros de corte;
- Fluidos de corte;
- Rigidez da máquina,
- Ferramenta e sistema de fixação;
- Tipo de trabalho executado pela ferramenta (corte contínuo ou intermitente, condições de entrada e saída da ferramenta).

Material da peça:

- Microestrutura;
- Dureza;
- Propriedades de tensão e deformação;
- Rigidez
- Composição química.

Nos estudos de Amorim (2002), analisa que são vários os fatores ligados ao material da peça que influem na usinabilidade do par ferramenta-peça. Dentre estes, as propriedades do material e a composição química são os que mais se destacam. Este último é de suma importância, tem participação quando correlacionado a adição de materiais, formando ligas.

Ferraresi, (1990) fala que referente ao Alumínio comercialmente puro, mesmo por ser extremamente dúctil, mostra relativa usinabilidade. Por exemplo, com a associação de ligas mais resistentes com cobre têm boa usinabilidade. As ligas com silício são mais difíceis de usar. As ligas com magnésio são muito empregadas na indústria aeronáutica.

2.11.1 Importância das Ligas na Usinabilidade do Alumínio

Para Oliveira (1987) a presença de elementos de liga gera alterações microestruturais, que tem influência sobre as propriedades mecânicas obtidas e sobre a usinabilidade, dependendo da quantidade, forma e distribuição desses elementos. Conforme Machado et al. (2009), a adição de sulfetos, chumbo, selênio, telúrio e grafite contribuem para a melhora da usinabilidade. Entretanto, partículas abrasivas como carbonetos, nitretos e carbonitretos são sempre prejudiciais, pois facilitam o desgaste da ferramenta de corte.

Chiesa; Fuoco e Santarini (1995) destacaram a importância das propriedades desses materiais para a aplicação nas indústrias de transportes, tanto automobilística quanto aeroespacial, é importante registrar que tais setores industriais eram responsáveis por, aproximadamente, dois terços da demanda mundial de fundidos em alumínio (na época 83% na França; 83% no Japão e 60% nos Estados Unidos).

Budynas (2008) aborda que as ligas de alumínio representam-se em fundidas ou forjadas (para trabalhos mecânicos). As ligas fundidas tem quantidade elevada de elementos para facilitar a fundição, mas isto dificulta o trabalho a frio. Os elementos de liga mais comumente aplicados são o silício, cobre, magnésio, manganês e zinco.

Da mesma forma, Cunha (2012) divide as ligas de alumínio em dois grupos:

- Ligas Conformadas Ou Trabalhadas (*wrought alloys*) – ligas destinadas à fabricação de produtos semi-acabados, que passarão por processos de usinagem ou conformação até atingirem o produto final, como laminados planos (placas e chapas), laminados não planos (tarugos, barras e arames) perfis extrudados e componentes forjados.
- Ligas Fundidas (*cast alloys*) – ligas destinadas a fabricação de componentes fundidos.

Conforme Cunha (2012) estes dois grupos se subdividem em:

- Ligas Não Tratáveis Termicamente – Não são endurecidas por meio de tratamento térmico.
- Ligas Tratáveis Termicamente – São endurecidas por meio de tratamentos térmicos.

Sousa (2013) comenta que sobre essa classificação é conforme a maneira que o endurecimento do material é conseguido, sendo que nas ligas tratáveis termicamente, o trabalho mecânico a frio (laminação a frio ou trefilação) aumenta a quantidade de discordâncias dentro do metal, aumentando sua resistência mecânica.

Siegel (1985), nos seus estudos descreve que as ligas comerciais a base de alumínio fundido são classificadas basicamente nos sistemas binários abaixo:

- Alumínio-cobre;
- Alumínio-silício;
- Alumínio-magnésio;
- Alumínio-zinco;

- Alumínio-manganês;
- Outras ligas, desenvolvidas com fins bastante específicos como,liga alumínio-estanho.

Pereira (2010) cita que as ligas alumínio-silício possuem propriedades inigualáveis com relação a características de fluidez e isenção de fragilidade a quente, além de apresentar boa resistência a corrosão e baixo peso específico. A utilização do silício é geralmente de 0,1% a 13% da composição, sendo o elemento responsável pelas variações do diagrama de equilíbrio. Ele aumenta a fluidez do alumínio líquido, diminui a porosidade, aumenta a dureza e melhora a resistência mecânica.

O cobre por sua vez aumenta a resistência mecânica, contribui para o aumento da elasticidade e da resistência à tração e a usinabilidade em teores de até 5% para ligas dúcteis.

O comportamento do magnésio no alumínio é similar ao do cobre. Normalmente, as ligas AlSiCu têm entre 0,03 e 0,2% de Mg (HEINE; LOPER; ROSENTHAL, 1967).

Em ligas de alumínio fundidas sob pressão os teores de manganês são da ordem de 0,3 até 0,5% (Doehler, 1951).

As ligas forjadas, também conhecidas como ligas trabalhadas, sendo estas as que serão abordadas como objetos de estudo e materiais para o teste de propriedades físicas, tem suas particularidades e serão descritas a seguir.

As ligas de alumínio trabalhadas (forjadas) são identificadas pelo sistema xxxx. Nele, o primeiro dígito indica a série e o principal elemento de liga; o segundo indica modificações da liga original ou limites de impureza; e os últimos dois dígitos identificam a liga de alumínio, ou pureza do alumínio (CALLISTER, 2007) conforme mostra a Figura 2.22. E mostrando o principal elemento de cada liga presente, temos a Figura 2.23.

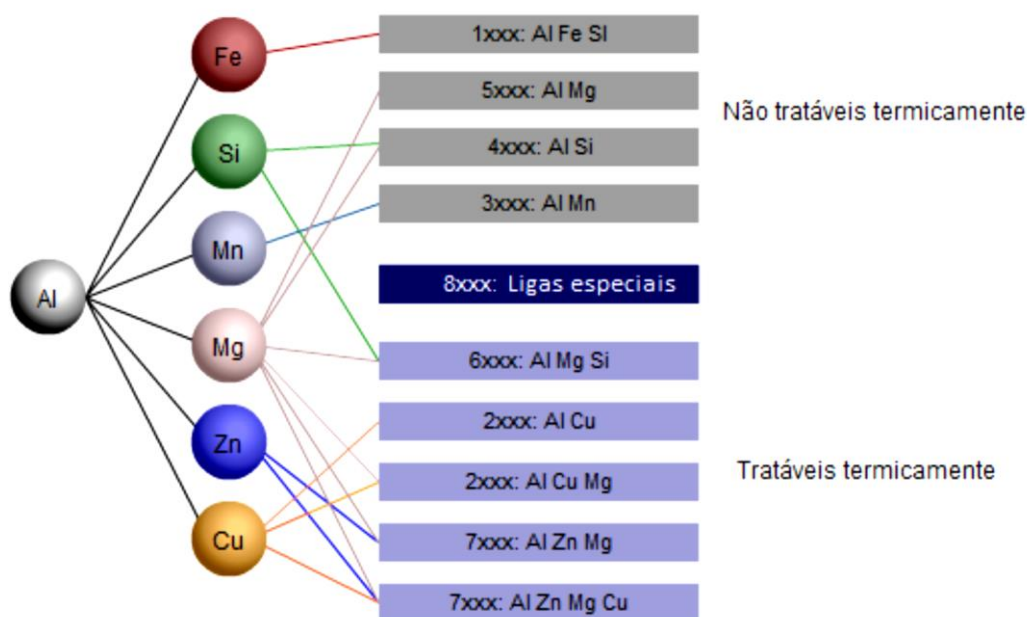


Figura 2.22 - Denominação das ligas de alumínio.

Fonte: <http://aluminium.matter.org.uk/content/html/eng/> acessado: 11/07/2015

GRUPO	PRINCIPAL ELEMENTO DE LIGA
1 xxx	Alumínio não ligado de pureza mínima de 99,0%
2 xxx	Cobre
3 xxx	Manganês
4 xxx	Silício
5 xxx	Magnésio
6 xxx	Magnésio e silício
7 xxx	Zinco
8 xxx	Outros elementos

Figura 2.23 - Grupos de alumínio com seus principais elementos ligantes.

Fonte: Companhia Brasileira de Alumínio. Catálogo, 2002

Cunha (2012) comenta que o alumínio e suas ligas podem vir acompanhados do estado de endurecimento da liga, ou estado de Têmpera. São utilizadas as seguintes denominações para esta indicação.

- F - como fabricado – Refere-se à condição resultante após qualquer tipo de processamento (laminação a frio, laminação a quente, fundição, etc.) em que não foram realizados controles sobre a velocidade de resfriamento ou quantidade de encruamento empregados.

- O (oh) recozido – Nos produtos conformados, refere-se a produtos que sofreram recozimento visando a redução do limite de resistência e aumento de ductilidade. Nos produtos fundidos, indica um recozimento para alívio de tensões e estabilidade dimensional.
- H – endurecido por encruamento – Refere-se a produtos endurecidos por encruamento, podendo ou não apresentar tratamentos térmicos.
- T – tratado termicamente – refere-se aos produtos que sofreram tratamentos térmicos visando aumento de resistência.
-

Cabe ressaltar que as ligas selecionadas nesse estudo para o teste são as ligas 1100-O, 2014-T6, 5052-O, 6061-T6 e 7075-T6. De acordo com ASM Handbook (1990), ABAL (2007) e ALCOA (2010) para os alumínio forjados e ligas, temos:

- 1100-O (99.00Al(min)): Alumínio comercialmente puro, muito dútil no estado recozido, indicada para a deformação a frio. Esta liga tem excelente resistência à corrosão, a qual é crescente com o aumento da pureza da liga. Aplicações em equipamentos para indústrias alimentícias, químicas, bebidas, trocadores de calor, utensílios domésticos.
- 2014-T6 (4.4Cu-0.8Si-0.8Mn-0.5Mg): A Liga 2014 é comumente usada em componentes da indústria aeronáutica, devido a sua altíssima resistência mecânica. A liga é endurecida por precipitação com boa resistência após o tratamento térmico. A Liga 2014 também oferece boas características de usinagem. Outras aplicações da liga 2014 incluem veículos militares, pontes, manufaturas de armas e aplicações estruturais.
- 5052-O (2.5Mg-0.25Cr): A Liga 5052 é dútil no estado recozido, mas endurecem rapidamente sobre tratamento térmico. Alta resistência à corrosão em ambientes marítimos. Em geral, a resistência mecânica aumenta com os teores crescentes de Mg. Aplicações como carroceria de ônibus, equipamentos rodoviários e veículos em geral, vagões, utensílios domésticos, equipamentos para indústria alimentícia, construções, embarcações.
- 6061-T6 (1.0Mg-0.6Si-0.30Cu-0.20Cr): A Liga 6061 é indicada para aplicações que requerem alta resistência à corrosão. O propósito geral da liga é apresentar excelente resistência a corrosão em condições atmosféricas e boa resistência a corrosão em água do mar. É praticamente inexistente a suscetibilidade a corrosão por tensão. Aplicações

típicas incluem acessórios e conectores elétricos, ferragens decorativas, acoplamentos hidráulicos, componentes de freios, corpos de válvulas, componentes para uso comercial, industrial, automotivo e aeroespacial.

- 7075-T6 (5.6Zn-2.5Mg-1.6Cu-0.23Cr): A liga 7075 possui a maior resistência dentre todas as ligas de alumínio. As têmperas –T6 e T651 apresentam resistência típica de 572 MPa, a qual é maior do que muitos aços doces. Devido a sua alta resistência, a liga 7075 é utilizada em estruturas sob altas tensões. As aplicações incluem acessórios aeronáuticos, engrenagens e eixos, componentes de mísseis, componentes de válvula reguladora de pressão, chaves e vários outros componentes aeronáuticos, aeroespaciais e de defesa.

2.11.2 Ensaios de Usinabilidade

A vasta contribuição que os ensaios de usinabilidade podem oferecer é a viabilidade de geração de bancos de dados, envolvendo materiais, ferramentas, parâmetros e processos de usinagem adotados (BARBOSA; COSTA; MACHADO, 2007). Para que haja aceitável confiabilidade destes bancos de dados, a escolha dos critérios e procedimentos padronizados é crucial para que seja possível a transferência e utilização dos dados gerados sem restrições. Assim sendo, Ferraresi (1970) cita que inúmeros ensaios têm sido feitos para avaliar o comportamento da associação peça-ferramenta perante características como: desgaste da ferramenta, força de usinagem, acabamento da peça, temperatura de corte, entre outros.

Através dos estudos de Machado et al. (2009) pode-se ter uma classificação bem elaborada em relação aos ensaios de usinabilidade, e também subdivisões correlacionados, envolvendo-os da seguinte forma:

- Os que requerem Usinagem: Podem fazer parte dos ranking testes (ou testes classificatórios) sendo testes de curta duração que meramente indicam a usinabilidade relativa de duas ou mais associações de pares ferramenta-peça para uma condição de corte específica, e dos Testes Absolutos os quais são testes de curta ou longa duração que indicam os méritos relativos de duas ou mais associações de pares ferramenta-peça para um dado intervalo de condições de corte.
- Os que não necessitam de Usinagem: Restringem-se aos ranking testes, sendo testes de curta duração.

Embora, cada Teste tenha sua vantagem, sua particularidade, melhor tipo de aplicação, entre outros fatores, iremos nos reter ao tipo de ensaio de usinabilidade determinado no estudo desse trabalho, que segue.

2.11.3 Teste de Propriedades Físicas

Uma observação inicial, quanto a estudos sobre a associação de propriedades físicas, como os estudos de Drucker (1950) e outros autores que correlacionaram a resistência de escoamento e de tração que se identificou como estresse de inércia. Após saberem que as forças de inércia são insignificantes em velocidades de usinagem convencional, o que é imprescindível, com isso abandonaram essa linha de pensamento.

Machado (2004) cita que o teste tem objetivo de comparar usinabilidade de materiais da peça, porém essa análise não garante que o Ranking permanecerá o mesmo, se alterar as condições de corte e o tipo de ferramenta, por exemplo, associado aos critérios adotados, como a vida da ferramenta.

Dados experimentais sobre todos os materiais analisados em estudo no trabalho de (HENKIN, 1962), assim também demais campos de estudo encontrados na literatura indicam a temperatura usual de trabalho em torno de 1000°F para uma vida útil de 60 minutos. Este conhecimento possibilita pela primeira vez e, através de cálculos claros, ordenar e providenciar os materiais, suas propriedades e parâmetros na obtenção da usinabilidade, com base em três das suas propriedades físicas: dureza Brinell Hb, condutividade térmica K e redução da área Ar. A constante A é estabelecido associando diversas unidades padrões utilizado.

Baseados nos estudos e técnicas de análise dimensional por (HENKIN; DATSKO 1963), citados por (MILLS; REDFORD, 1983), relaciona a medida da usinabilidade associando as propriedades tais como condutividade térmica do material (B), redução percentual de área obtida em ensaio de tração convencional (Ar), dureza Brinell (HB) do material e comprimento característico (L) com a V_{60} de um material, descrita na equação (4).

$$V_{C60} = \frac{B}{L \cdot HB} \sqrt{1 - \frac{Ar}{100}} \quad (4)$$

Onde,

B = Condutividade térmica do material;

L = Um comprimento característico;

HB = Dureza Brinell do material;

Ar = Redução de área obtida em ensaio de tração convencional.

Um estudo similar foi desenvolvido por Janitzki (1944), que considera V_{60} e propriedades físicas, citados por (MILLS et al., 1983) baseado na equação (5).

$$V_{C60} = \frac{D}{Ar \cdot HB} \quad (5)$$

Onde,

D é uma constante dependente das dimensões de corte;

Ar e HB já foram citados na equação (4).

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Metodologia

Partimos agora, tomando o tema escolhido “Estudo da Usinabilidade das Ligas de Alumínio: Uma avaliação com base no Teste de Propriedades Físicas”, para o estudo da Usinabilidade, a partir da análise proposta por Henkin (1962), com contribuição do estudo de Oliveira (2014) que se baseou também nesse autor, com o objetivo de registrar as propriedades físicas dos materiais em estudo a fim da realização do ensaio. A equação (4) é equação geral de usinabilidade base do estudo em questão, a qual segue:

$$V_{C60} = \frac{B}{L \cdot HB} \sqrt{1 - \frac{Ar}{100}}$$

Assim, com a fórmula obtida, segue a descrição das variáveis da fórmula para a simulação do teste, no QUADRO 3.1:

QUADRO 3.1 - Variável com suas respectivas unidades adotado na equação de usinabilidade.

Variáveis	Propriedades	Unidades
HB	Dureza Brinell do material	Kgf/mm ²
B	Condutividade térmica do material	Btu/h.ft.°F
L	Um comprimento característico	ft
Ar	Redução de área obtida em ensaio de tração convencional	--

Fonte: Henkin, 1962. Adaptado.

Primeiramente, foram estudados de forma geral os parâmetros individualmente para entender a atuação de cada um na resolução da fórmula em questão. Depois de ter especificado as propriedades e correlacionando suas variáveis para análise, também suas respectivas unidades, pode-se dar início a aplicação.

Com as propriedades catalogadas dos metais selecionados, foi-se criado um banco de dados com essas propriedades a fim de associar e interligar os inúmeros valores adquiridos dos materiais, garantindo a veracidade e imparcialidade das informações coletadas. Por fim, poder concluir os ensaios conforme o proposto por Henkin (1962).

3.2 Tipo de Material Ensaiado

A fim de alcançar um banco de dados favorável, foram inicialmente investigados uma gama de materiais metálicos não-ferrosos, no caso alumínio e ligas com suas respectivas propriedades pertinentes ao uso na fórmula. No entanto, não foi aquilo que esperávamos quanto a quantidades obtidas, pois para cada material deveria constar todas as propriedades necessárias, o que demandou uma árdua investigação nos materiais e propriedades que acarretou numa seleção bem minuciosa, sendo feito a escolha de 5 (cinco) materiais distintos.

O arquivo de maior destaque para a realização do banco de dados foi a enciclopédia dos livros “*ASM Metals Handbook, sendo Desk Edition 2001, Vol 1 ao 21 e Metalweb Aluminum Handbook and Stock Availability 2011*”. Com a conclusão do banco de dados, a seletiva dos materiais está representado nos QUADROS 3.2, 3.3 seguintes.

QUADRO 3.2 - Alumínio forjado e ligas trabalhadas (recozido) / AA-ASTM.

1100	Condição em Têmpera: O
5052	Condição em Têmpera: O

Fonte: ASM International, 2000.

QUADRO 3.3 - Alumínio forjado e ligas trabalhadas (termicamente tratado) / AA-ASTM.

2014	Condição em Têmpera: T6
6061	Condição em Têmpera: T6
7075	Condição em Têmpera: T6

Fonte: ASM International, 2000.

Sabe-se da importância da temperatura para a usinabilidade de um material. Na obtenção das propriedades físicas dos materiais, como a condutividade térmica, foi-se pré-estabelecido uma temperatura de 300°F. Mas na ausência de propriedades para esse valor, por se tratar de dados bem específicos, deu-se a extrapolação dos valores de 77°F e 212°F para a sua obtenção da temperatura final requisitada, conforme mostra a TABELA 3.1, 3.2.

TABELA 3.1 – Condutividade Térmica (W/m.K) relacionado a temperatura °F para alumínio forjado e ligas trabalhadas (recozido) AA-ASTM

Alumínio	77 °F	212 °F	300 °F
1100	210	204,11	200,28
5052	138,50	138,20	138,02

Fonte: ASM Intern., 2000. Para as temperaturas da condutividade térmica encontraram-se em (ASM HANDBOOK, 1998), (ASM HANDBOOK, 1990), (ASM HANDBOOK, 1993).

TABELA 3.2 - Condutividade Térmica (W/m.K) relacionado a temperatura °F para alumínio forjado e ligas trabalhadas (termicamente tratado) AA-ASTM.

Alumínio	77 °F	212 °F	300 °F
2014	154,30	154,00	153,38
6061	168,00	161,75	157,67
7075	130,00	121,40	115,80

Fonte: ASM Intern., 2000. Para as temperaturas da condutividade térmica encontraram-se em (ASM HANDBOOK, 1998), (ASM HANDBOOK, 1990), (ASM HANDBOOK, 1993).

Com os valores finais de condutividade térmica para a temperatura de estudo, a fim da realização do ensaio de usinabilidade, pode-se correlaciona-los as propriedades mecânicas e físicas pertinentes ao estudo desses materiais através da TABELA 3.3 e 3.4.

TABELA 3.3 - Propriedades Mecânicas e Físicas do alumínio forjado e ligas trabalhadas (recozido) AA-ASTM.

Alum	Redução de área (%)	Alongamento em 50 mm (2 pol.), (%)	Dureza (HB)	Resist. à tração (Mpa)	Limite de elasticidade (Mpa)	Condutivida de Térmica (W/m.K)
1100	90,00	55,00	5,15	20,00	14,00	200,28
5052	35,00	50,00	82,60	52,00	38,00	138,02

Fonte: ASM Internacional, 2000; Metalweb Aluminium, 2011.

TABELA 3.4 - Propriedades Mecânicas e Físicas do alumínio forjado e ligas trabalhadas (termicamente tratado) AA-ASTM

Alum	Redução de área (%)	Alongamento em 50 mm (2 pol.), (%)	Dureza (HB)	Resist. à tração (Mpa)	Limite de elasticidade (Mpa)	Condutivida de Térmica (W/m.K)
2014	60,00	20,00	100,00	45,00	35,00	153,38
6061	51,80	20,00	78,26	32,00	38,00	157,67
7075	33,00	30,00	130,42	55,00	45,00	115,80

Fonte: ASM Internacional, 2000. Metalweb Aluminium, 2011.

Com a obtenção das propriedades de cada material, se baseando na fórmula em estudo, resta-se determinar a propriedade do comprimento característico (L), mas para encontrar esse resultado necessita-se da resolução da equação (6), baseado nos estudos de Henkin (1962). O QUADRO 3.4 mostra essas propriedades do comprimento característico.

$$q = w^{1-a} \cdot t^a \quad (6)$$

QUADRO 3.4 - Representação das variáveis com respectivas propriedades e unidades.

Símbolo	Propriedades	Unidades
q	comprimento característico – L;	ft
w	largura de corte;	in
a	Constante;	--
t	Profundidade de corte.	in

Fonte: Henkin, 1962, adaptado.

Obs: como o valor de área é menosprezável, “q” é dado em apenas uma dimensão.

O valor de “a” é representado como função adimensional, varia de acordo com a relação entre a profundidade do corte e a largura de corte (t / w). Henkin (1962) define o valor de “a” correlacionando-a as demais variáveis pertencentes a equação (6). O QUADRO 3.4 expõe com mais clareza essa relação.

QUADRO 3.5 - Relação entre geometria de corte e “comprimento característico”.

$\frac{t}{w}$	a	q (elem. comp)
0	1	t
0,15	$\frac{2}{3}$	$t^{\frac{2}{3}} \cdot w^{\frac{1}{3}}$
1	$\frac{1}{2}$	$t^{\frac{1}{2}} \cdot w^{\frac{1}{2}}$

Fonte: Henkin, 1962.

Depois de definido a função do comprimento característico, resta-se considerar os valores que serão adotados nessa relação de geometria de corte para a equação geral de usinabilidade sendo esses: w = 0,004160 ft e t = 0,000475 ft. Essa relação está representada pela equação (7).

$$\frac{t}{w} \quad (7)$$

Assim, definidos os valores das variáveis “w” e “t”, substitui-se a fim de encontrarmos o comprimento característico:

$$\frac{t}{w} = \frac{0,000475}{0,004160} = 0,1142$$

Encontrado o valor da relação, seguimos o raciocínio, correlacionando o valor ao QUADRO 3.5 identificando a faixa de intervalo do valor encontrado, apresentado para um intervalo de $0,1 \leq t/w \leq 0,2$, $a = 2/3$, e baseado nas considerações experimentais abordadas por Henkin (1962) e entendimento pela execução do cálculo por Oliveira (2014), sucede a análise.

Aplicando os valores considerados de “w” e “ft” na equação (6), temos a seguinte fórmula expandida:

$$q = 0,004160^{1-\frac{2}{3}} \cdot 0,000475^{\frac{2}{3}}$$

$$q = 0,004160^{\frac{1}{3}} \cdot 0,000475^{\frac{2}{3}}$$

$$q = 0,000868 \text{ ft}$$

Por fim, encontramos o valor do comprimento característico para as considerações nesse presente estudo. O valor de comprimento característico encontrado será abordado para todos os demais materiais utilizados em estudo, uma vez que os parâmetros de corte foram unânimes para todos os materiais.

3.3 Meio de Obtenção do Ensaio

Todos os ensaios foram realizados em uma planilha de um programa de Software de Processamento de Dados gerada a partir das necessidades de várias repetições de cálculos, possibilitando reajustar os dados disponíveis além de um controle e otimização da planilha para fins de cálculo, possibilitando de forma fácil e clara a entrada de dados e a conclusão dos resultados esperados.

3.4 Variáveis de Entrada no Ensaio

Depois da escolha de cada material, com suas respectivas propriedades catalogadas nos requisitos pré-estabelecidos, designamos as variáveis de entrada, a fim de realizar o ensaio de usinabilidade, baseado na equação geral de usinabilidade. As TABELAS 3.5 e 3.6 citam esses dados.

TABELA 3.5 - Dados de entrada de alumínio forjado e ligas trabalhadas (recozido) AA-ASTM.

Alum	Redução de área (%)	Dureza (HB)	Condutividade Térmica (Btu/h.ft.°F)	Comprimento Característico (ft)
1100	90,00	5,15	115,72	0,00087
5052	35,00	82,60	79,75	0,00087

Fonte: ASM Internacional, 2000. Metalweb Aluminium, 2011.

TABELA 3.6 - Dados de entrada de alumínio forjado e ligas trabalhadas (termicamente tratado) AA-ASTM.

Alum	Redução de área (%)	Dureza (HB)	Condutividade Térmica (Btu/h.ft.°F)	Comprimento Característico (ft)
2014	60,00	100,00	88,62	0,00087
6061	51,80	78,26	91,10	0,00087
7075	33,00	130,42	66,91	0,00087

Fonte: ASM Internacional, 2000. Metalweb Aluminium, 2011.

3.5 Aplicação dos Valores de Unidades

Por fim com o desenvolvimento do estudo da equação geral da usinabilidade exposta por Henkin (1962), as condições de corte estabelecidas, profundidade de corte “*t*” e largura de corte “*w*” gerando o comprimento característico, dureza, condutividade térmica e redução de área resulta em um valor de velocidade de corte, conforme a equação (4).

Este trabalho mostrará como unidade resultados em ft/min, valor este também estabelecido nos estudos de Henkin (1962) para comparação dos resultados do ensaio, e em m/min para uma velocidade V_{C60} .

Temos então a fórmula inicial:

$$V_{C60} = \frac{B}{L.HB} \sqrt{1 - \frac{Ar}{100}}$$

Ar é adimensional, pois é uma razão entre áreas, segue que se pode desconsiderar a parte da raiz na demonstração, pois não apresenta unidade.

Sucedee,

$$V_c = \frac{B}{L.HB} \quad (8)$$

Agora com as variáveis estabelecidas, substitui pelas suas respectivas unidades,

$$V_c = \frac{\left(\frac{Btu}{h.ft.^{\circ}F}\right)}{(ft). \left(\frac{kgf}{mm^2}\right)}$$

$$V_c = \frac{Btu.mm^2}{h.ft^2.^{\circ}F.kgf} \quad (9)$$

A fim de se obter uma unidade esperada para V_c , é necessário reajustar as unidades da equação (9) baseadas na tabela de conversão de unidades.

QUADRO 3.6 - Conversão de Unidades.

Btu	= 107,6687 Kgf.m
ft	= 0,3048 m
mm ²	= 0,00001076 ft ²
m	= 3,2808 ft
ft/min	= 0,3048 m/min

Fonte: Henkin, 1962.

Realizando as devidas substituições em (9), temos:

$$V_c = \frac{107,6687 \text{ kgf.m. } 0,00001076 \text{ ft}^2}{h. \text{ ft}^2. ^\circ\text{F. kgf}}$$

Realizando as devidas aproximações dos valores das unidades, temos:

$$V_c = \frac{0,001076. \text{ kgf.m. ft}^2}{h. \text{ ft}^2. ^\circ\text{F. kgf}}$$

$$V_c = \frac{0,001076. \text{ m}}{h. ^\circ\text{F}} \quad (10)$$

Realizando as devidas substituições dos valores das unidades em (10),

$$V_c = \frac{0,001076. 3,2808 \text{ ft}}{h. ^\circ\text{F}}$$

O valor obtido parcialmente do que se espera para esse teste é,

$$V_c = \frac{0,003529 \text{ ft}}{h. ^\circ\text{F}} \quad (11)$$

Esse valor está para V_c , e necessitando a fim de satisfazer o resultado do ensaio do teste de usinabilidade em 60min, a equação (13) transforma-se em,

$$V_{c60} = \frac{0,003529 \text{ ft}}{\text{min. } ^\circ\text{F}} \quad (12)$$

Então, obtido essa relação, deve-se multiplicar a equação (12) pelo valor de temperatura, no caso a mínima de trabalho. Essa temperatura, para esse estudo de caso refere-se as propriedades encontradas para 300°F, sendo o intervalo de temperatura estabelecido de 300°F à 1000°F.

Com isso, resolvendo, temos:

$$V_{C60} = \frac{300^{\circ}F. 0,003529 \text{ ft}}{\text{min. } ^{\circ}F}$$

O valor obtido final do que se espera para a conversão do resultado do teste é,

$$V_{C60} = \frac{1,0587 \text{ ft}}{\text{min}} \quad (13)$$

Portanto, todos os metais ensaiados na equação geral de usinabilidade proposta por (HENKIN, 1962) são multiplicados por 1,0587 para serem expresso numa velocidade, V_{C60} , em ft/min. Entretanto é necessário que se faça uma observação: essa relação pode sofrer alterações de acordo com a faixa de temperatura adotada para a coleta de dados e realização do ensaio; assim, para uma coleta de dados de condutividade térmica, dureza e redução de área de ensaios convencionais de tração em diferente temperatura, 300°F, usada por (HENKIN, 1962) é válida, mas o fator de multiplicação para a unidade de ft/min não será a mesma.

Além do mais, havendo necessidade de transformação do valor para unidades brasileiras para obtenção do valor em m/min, é substancial a conversão pela multiplicação do valor obtido final da equação (13), pelo fator 0,3048, mensurado no QUADRO 3.6 descrito anteriormente.

$$V_{C60} = \frac{1,0587 .0,3048m}{\text{min}}$$

$$V_{C60} = \frac{0,3227m}{\text{min}} \quad (14)$$

Por fim, encontramos a relação que utilizada em todos os materiais de estudo ensaiados no teste pela equação geral de usinabilidade abordada por Henkin (1962). Multiplica-se o valor da velocidade encontrada pela fórmula do teste de propriedades físicas por 0,3227 obtendo a resultante em unidade m/min.

4 RESULTADO E DISCUSSÃO

Para tanto, seguiu o estudo da equação geral da usinabilidade exposta por Henkin (1962), com base em um ensaio do teste de propriedades físicas, com a criação de um banco de dados definindo sua fórmula, seus parâmetros de usinagem adotados, a escolha de uma temperatura de referência de trabalho (300°F) para atender os pré-requisitos do ensaio, desenvolvendo uma tabela otimizada no programa Microsoft Excel. Com relação ao tipo de material, levamos em consideração suas variáveis na seleção de suas propriedades físicas e mecânicas, tipo de fabricação e/ou tratamento, valores das demais fórmulas utilizadas e fatores de conversão para a resolução da equação do teste de propriedades físicas.

Obtém-se então os valores referentes a usinabilidade de cada material selecionado em estudo, pelo teste de ensaio que não requer usinagem desenvolvido por Henkin (1962). Serão mostrados tabelas e gráficos referentes a esses dados obtidos a fim de catalogar e informar a relação de usinabilidade de cada material e suas correlações aos fatores condutividade térmica e dureza.

Para tanto, um princípio deve ser levado em consideração quanto aos valores obtidos pelo teste e as propriedades e parâmetros de usinagem dos metais adotados. Pela análise da equação geral de usinabilidade proposta por Henkin (1962), pode ser entendido a relação matemática que quanto menor a dureza do material, maior será a sua velocidade de usinagem obtida. Já para a condutividade térmica, quanto maior o seu valor maior será o resultado da velocidade de usinagem.

Para as TABELAS 4.1 e 4.2, os materiais escolhidos estão correlacionados aos seus valores obtidos no teste, sendo a primeira coluna descrita o valor da velocidade de usinagem sem correção das unidades. A segunda e terceira coluna representam os valores de velocidade de usinagem com a correção das unidades devida para resultados em ft/min e m/min respectivamente.

TABELA 4.1 - Valores Finais de usinabilidade com base nos testes de propriedades físicas para o Alumínio forjado e ligas trabalhadas (recozido).

Alumínio	Valor obtido pelo teste	$V_c = \text{ft/min}$	$V_c = \text{m/min}$
1100	8167,3395	8647,4484	2635,7423
5052	894,6824	947,2754	288,7296

TABELA 4.2 - Valores Finais de usinabilidade com base nos testes de propriedades físicas para o alumínio forjado e ligas trabalhadas (termicamente tratado).

Alumínio	Valor Obtido pelo Teste	$V_c = \text{ft/min}$	$V_c = \text{m/min}$
2014	644,2419	682,1130	207,9081
6061	928,9300	983,5362	299,7818
7075	482,6719	511,0453	155,7666

Relacionando os valores obtidos no teste desenvolvido nesse trabalho, pode-se obter uma relação existente. Com o resultado do ensaio de usinagem, analisando a velocidade de usinagem para o alumínio e suas ligas, vemos que para valores de condutividade térmica altos, temos resultados de V_c superiores aos de baixa condutividade. Já para valores de dureza altos, temos resultados de V_c inferiores aos de alta dureza, melhor compreendidos nas TABELAS 4.1 e 4.2.

Sabe-se que esse procedimento refere-se a teste matemático, possível de falhas, não podendo associar os resultados da velocidade de usinabilidade de um dado material exclusivamente, sendo uma ampla quantidade de testes que relacionam vários fatores e propriedades além dos abordados nesse estudo. Os valores de Condutividade térmica e de dureza são resultantes de não apenas uma propriedade, mas de uma associação de propriedades, sejam elas mecânicas, físicas e/ou químicas.

Com base nos valores obtidos de usinabilidade, pelo teste de propriedades físicas, toma-se a representação em gráficos dos valores obtidos correlacionando aos seus respectivos valores de dureza e condutividade térmica. Dessa forma, os GRÁFICOS 4.1, 4.2 e 4.3 demonstram a relação de condutividade térmica na influência dos valores da velocidade de usinagem. Para a relação da dureza na influência dos valores da velocidade de usinagem, os GRÁFICOS 4.4, 4.5, 4.6 a representam.

GRÁFICO 4.1 - Relação entre a condutividade térmica e a usinabilidade do alumínio e ligas trabalhadas (recozido).

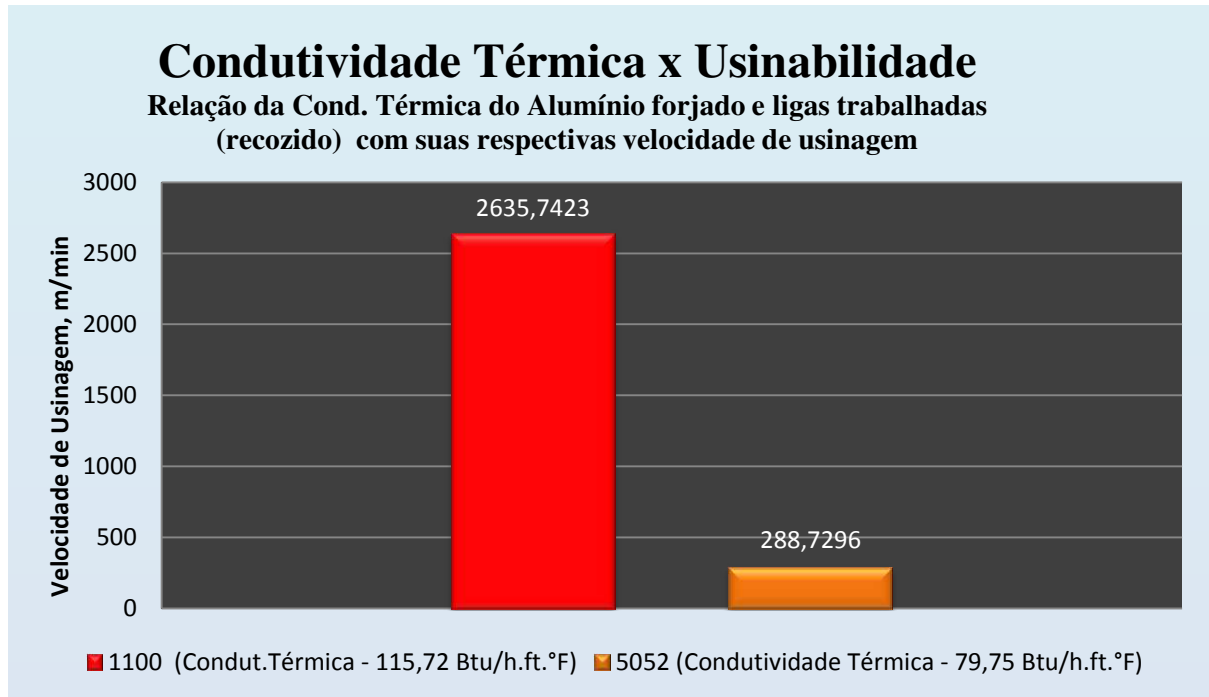


GRÁFICO 4.2 - Relação entre a condutividade térmica e a usinabilidade do alumínio e ligas trabalhadas (termicamente tratado).

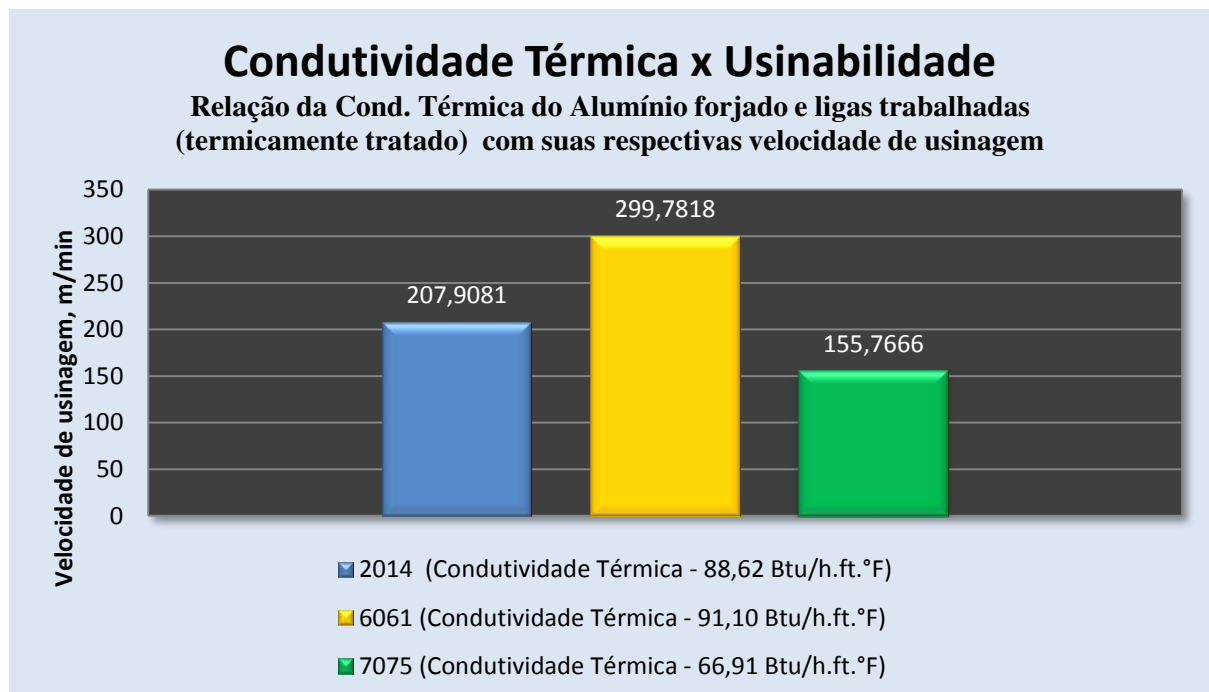
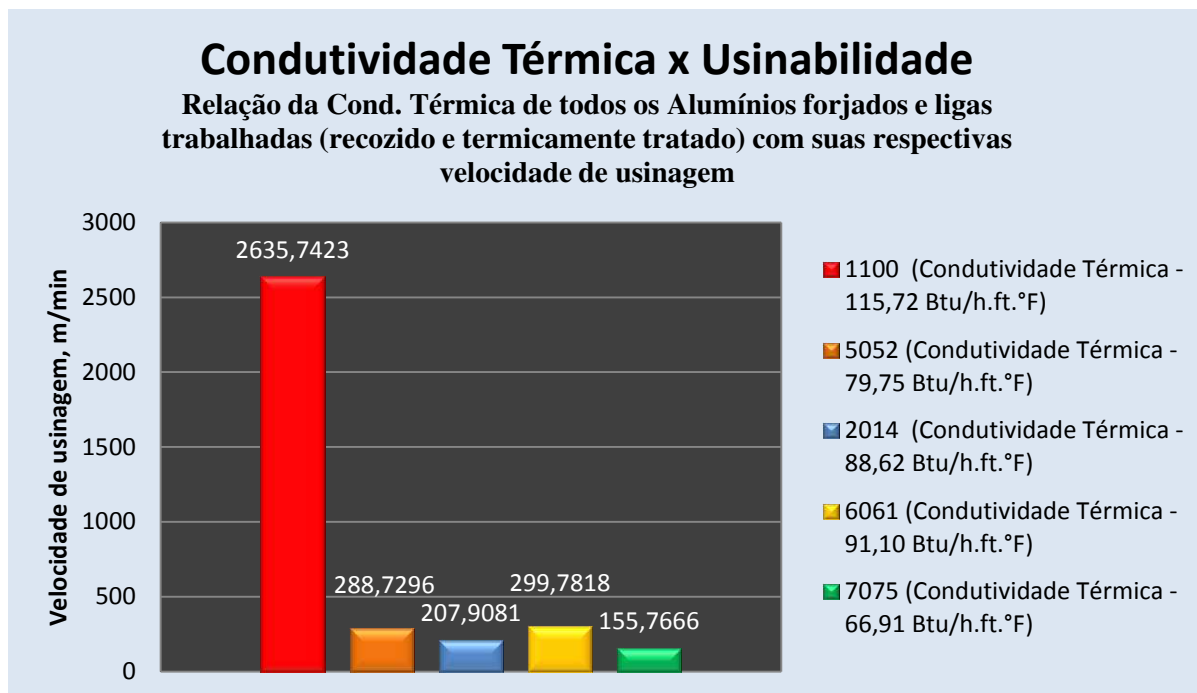


GRÁFICO 4.3 - Relação entre a condutividade térmica e a usinabilidade do alumínio e ligas trabalhadas (recozido e termicamente tratado).



A relação não foi fidedigna na sua amostragem de valores, pois se tratando de materiais, sua coleta de dados está sujeita a variações das suas propriedades, isso influencia em uma possível alteração de resultados, sendo pequenas ou até mesmo significantes. No presente trabalho, todos os demais tipos de alumínio selecionados obedecem a relação de influência da dureza e da condutividade térmica no valor do índice de usinabilidade dos materiais, por sua vez para as ligas de alumínio 2014-T6 e 5052-O não é absoluta, apresentando comportamento irregular.

Analisando as ligas de alumínio 5052-O e 2014-T6 entre si, notamos que não seguem a relação de influência da dureza e da condutividade térmica no resultado do índice de usinabilidade. A liga de alumínio 5052-O apresentou valores de condutividade térmica 79,75 (Btu/h.ft.°F) e dureza 82,60 (HB) inferiores a liga de alumínio 2014-T6 com condutividade térmica 88,62 (Btu/h.ft.°F) e dureza 100 (HB). Em contra partida, o alumínio 2014-T6 deveria apresentar velocidade de usinabilidade maior se baseado na sua condutividade térmica, porém o alumínio 5052-O é quem obtém o maior resultado, se baseado na sua dureza. O alumínio 2014-T6 mostra $V_{C60}=207,9081$ e o alumínio 5052-O mostra $V_{C60}= 288,7296$ conforme GRÁFICOS 4.3 e 4.6.

Podemos constatar que para essa situação, embora isolada, representa que a dureza possui maior influência no cálculo da velocidade de usinabilidade do que a condutividade

térmica. É indispensável a consideração da importância da redução de área do ensaio de tração convencional, embora apresentando valores relativamente pequenos, seus valores influenciam matematicamente na redução dos resultados de velocidade de usinagem. Assim sendo, o valor de V_C do alumínio 5052-O maior que o alumínio 2014-T6.

GRÁFICO 4.4 - Relação entre a dureza e a usinabilidade do alumínio e ligas trabalhadas (recozido).

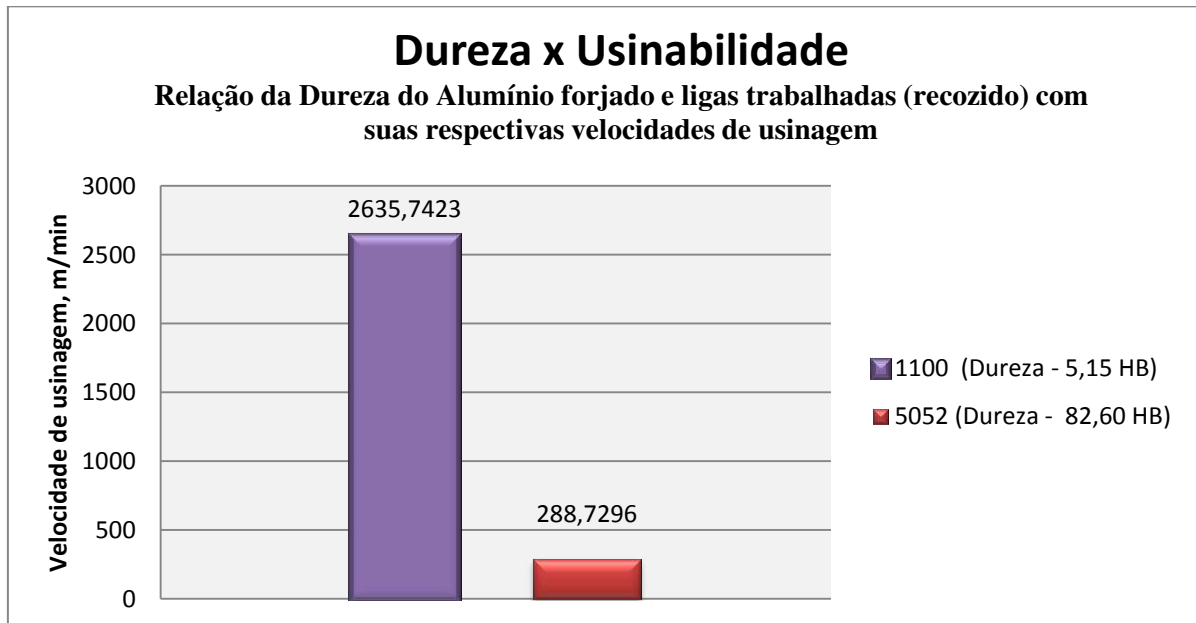


GRÁFICO 4.5 - Relação entre a dureza e a usinabilidade do alumínio e ligas trabalhadas (termicamente tratado).

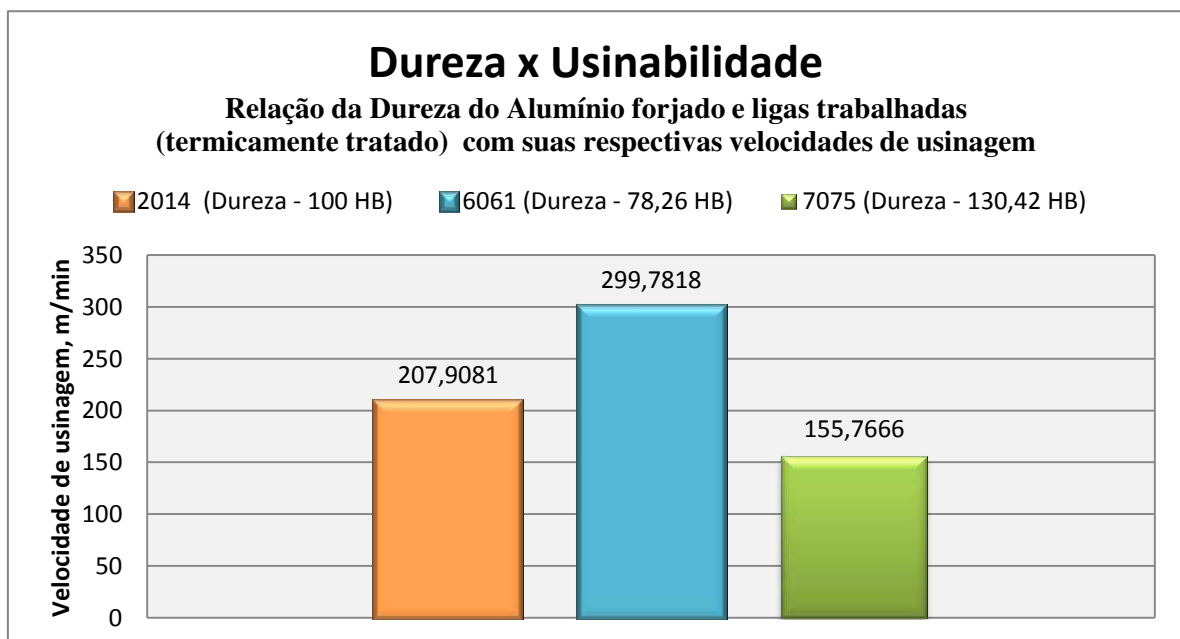
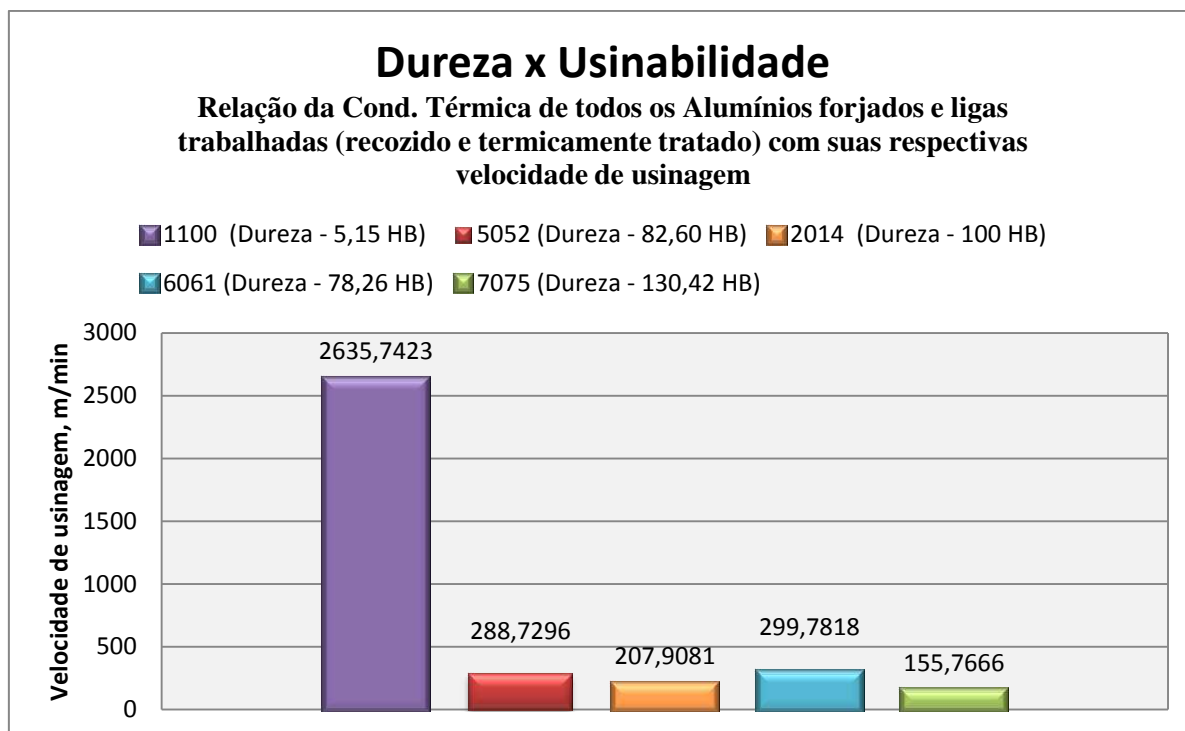


GRÁFICO 4.6 - Relação entre a dureza e a usinabilidade do alumínio e ligas trabalhadas (recozido e termicamente tratado).



A análise teórica e base de estudo deste trabalho dá-se plenamente na dissertação de Henkin (1962) com relação aos fatores direta e indiretamente ligados ao índice de usinabilidade, aos critérios adotados, as variáveis de maior e menor influência, e ao desenvolvimento da equação de usinabilidade desenvolvida no seu estudo e abordada no presente trabalho. Em relação aos seus materiais adotados, é imprescindível que seja feito comparação em coincidência aos estudados neste trabalho.

Portanto, os materiais idênticos ou correlacionados em ambos os estudos são: o alumínio comercialmente puro 1100-O (recozido), e não semelhante, porém da mesma classe de ligas trabalhadas, tem-se a liga de alumínio 2024-T4 estudadas no trabalho de Henkin (1962) e a liga de alumínio 2014-T6 selecionada no presente trabalho.

O alumínio comercialmente puro 1100-O apresentou para o resultado do ensaio de usinabilidade deste trabalho uma velocidade de 8647,4484 ft/min. Para o resultado obtido no trabalho de Henkin (1962) foi de 8650 ft/min. Se tratando de valor em unidades de milhar, a diferença de aproximadamente 3 dá-se por pela diferença nos valores adotados de dureza e condutividade térmica de 4,9 (HB) e 115 (Btu/h.ft.°F) respectivamente adotados no estudo de Henkin (1962).

A liga de alumínio 2014-T6 apresentou para o resultado do ensaio de usinabilidade deste trabalho uma velocidade de 682,1130 ft/min. Para o resultado obtido no trabalho de Henkin (1962) da liga de alumínio 2024-T4 foi de 1960 ft/min. A diferença de expressão alta em 1277 dá-se pela diferença nos valores adotados de dureza e condutividade térmica de 27,5 (HB) e 80 (Btu/h.ft.°F) respectivamente e também a diferença de liga e tratamento térmico adotados no estudo de Henkin (1962).

Para os demais valores das ligas de alumínio 5052-O, 6061-T6 e 7075-T6 não foram identificados estudos específicos para ensaios com base no teste de propriedades físicas, pelo fato do campo literário ser escasso, deixando como descobertas parciais de valores do índice de usinabilidade para esses materiais.

5 CONCLUSÃO

A elaboração desse presente trabalho deu-se numa progressão de ideias bem estabelecidas, no que consiste estudar a usinabilidade com base no teste de propriedades físicas, e avaliar os fatores que relacionam a esse estudo, que são: propriedades, tanto da peça como da ferramenta, parâmetros existentes e demais condições que influenciam a usinabilidade. Assim, com esses fatores estudados, vem-se a realização do ensaio de usinabilidade do alumínio e ligas, e obtenção do resultado da velocidade de usinabilidade para os mesmos.

Pôde-se observar a influência específica de cada propriedade associada à fórmula, sendo a dureza, a condutividade térmica e a redução de área de ensaios de tração convencional, e possibilitou também qual propriedade gera maior e menor relação no índice de usinabilidade, como visto, a dureza possui maior influência no cálculo.

Foi identificado que para os materiais selecionados em estudo no ensaio proposto, o que obteve maior índice de usinabilidade foi o Alumínio 1100-O, seguido da Liga 6061-T6, depois a Liga 5052-O, logo após a 2014-T6, e por fim o material com menor índice de usinabilidade, o 7075-T6.

Para o Alumínio 1100-O as propriedades se comportaram na fórmula como esperado. Baseada na relação de condutividade térmica *versus* usinabilidade e dureza *versus* usinabilidade, por possuir o maior e menor valor respectivamente das propriedades, repercutiu no maior valor de velocidade de usinabilidade no teste.

Para a Liga de Alumínio 6061-T6 as propriedades se comportaram na fórmula como esperado. Baseada na relação condutividade térmica *versus* usinabilidade e dureza *versus* usinabilidade, obtendo segundo maior e menor valor respectivamente das propriedades, repercutiu no segundo maior valor de velocidade de usinabilidade no teste.

Para as Ligas de Alumínio 2014-T6 e 5052-O, mostra que se comportaram diferente com relação às principais propriedades na relação com usinabilidade. Mesmo o valor da condutividade térmica ser maior do 2014 em relação ao 5052, a dureza do 5052 se mostra mais influente, por ser maior que a do 2014, influenciando um valor menor do índice de usinabilidade, se comparado ao 2014.

Para a Liga de Alumínio 7075-T6 as propriedades se comportaram na fórmula como esperado, pois baseado na relação condutividade térmica *versus* usinabilidade e dureza *versus* usinabilidade, por possuir o valor menor e maior respectivamente das propriedades, repercutiu no menor valor de velocidade de usinabilidade no teste.

Para fins de comparação, deu-se na associação com resultados encontrados no estudo da dissertação de Henkin, sendo para o mesmo estudo do alumínio 1100-O e a comparação da sua liga 2024-T4 com a selecionada nesse presente estudo 2014-T6. No entanto, para valores que foram estudados, porém não comparados com o estudo de Henkin seja pela ausência de estudo nesse citado trabalho, ou pela falta de campos de pesquisa e resultados com base nesse teste de propriedades físicas para esses materiais, cabe-se admiti-los, uma vez que se comprovou a confiança no estudo.

A referência dos estudos, firmados fielmente no teste de usinabilidade desenvolvido na dissertação de doutorado de Henkin (1962) é de suma importância para o mercado produtivo, áreas de fabricação e tecnologia, área industrial, uma vez que este estudo possibilita identificar seja para setores automotivos, náuticos, aeroespaciais, entre outros ou até mesmo para processos simples de utilização de materiais por apresentar de forma prática, econômica e rápida a melhor escolha de um dado material com base no seu índice de usinabilidade, buscando a velocidade de usinagem que melhor favorece o projeto ou aplicação.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

É importante enumerar sugestões a fim de embasar pesquisas futuras e expor o conhecimento sobre os índices de usinabilidade de metais de alumínio e ligas:

- Avaliar a influência dos parâmetros de corte de usinagem e alterá-los propondo um aumento do conteúdo de pesquisa sobre a usinagem dos metais;
- Realizar trabalhos relacionados ao ensaio de usinabilidade prático para se realizar um comparativo com os resultados teóricos, visando estabelecer uma zona de confiança para projetos sem condições de realização de ensaios práticos;
- Avaliar o ensaio de usinabilidade dos materiais com outras condições de temperatura de usinagem e assim adquirir um banco de dados.
- Estudar a influência nas propriedades específicas dos materiais, como propriedades mecânicas e físicas, com a mudança dos valores de temperatura.

REFERÊNCIAS

ABAL – Associação Brasileira do alumínio. Fundamentos e aplicações do alumínio. Técnica comunicação, 2ª edição, 2007.

ABNT NBR 6163 Conceitos Técnicos de Usinagem – Geometria da Cunha Cortante – Terminologia. 1980.

ALCOA Catálogo. Ligas e têmperas de extrusão. – 2010.

AMORIM, Heraldo José de. Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro. 2002.

ÁVILA, R. F.; **Abrão**, A. M. The effect of cutting fluids on the machining of hardened AISI 4340 steel. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 119, p. 21-26, 2001.

ASM HANDBOOK [Enciclopédia]. - [s.l.] : ASM Metals Handbook Vol 1-21, Publicações de 1990 à 2001.

ASM Metals Handbook Desk Edition 2001 [Livro]. - [s.l.] : 2ª ed. ASM International, 1998.

BANIN JÚNIOR, José Roberto. Análise De tensões residuais, integridade superficial e forças de usinagem no fresamento de topo de aço sae 4340 endurecido. Centro Universitário-FEI, São Bernardo do Campo, 2009.

BARBOSA, P. A.; **Costa**, E. S.; **Machado**, A. R. Usinabilidade de ferro fundido austemperado e nodular perlítico em furação. In: Simpósio do programa de pós-graduação em engenharia mecânica, 17. Universidade Federal de Uberlândia, 2007.

BORBA, Rodrigo Barros de. Estudo da influência das afiações em brocas escalonadas de canal reto na furação da liga de alumínio sae 306. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São João del-Rei, março de 2013.

BUDYNAS, **Richard** G. Shigley's mechanical engineering design. 8th ed. New York: Mcgraw-Hill, 2008.

CALLISTER, W. D. Materials science and engineering: an introduction. 7. Ed. USA John Wiley & Sons, 2007.

CAPLA, Eng Renato Lemes. Estudo da influência do sobremetal excedente de desbaste na operação de acabamento aplicando usinagem com altas velocidades. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2006.

CASAGRANDA M. V. Usinabilidade do Aço // Estudo da Usinabilidade do Aço Inoxidável Austenítico AISI 303. - Porto Alegre : [s.n.], 2004.

CHIAVERINI, Vicente. Tecnologia Mecânica, Vol. 2, Processos de Fabricação e Tratamento. McGrawHill, São, 1986.

CHILDS, T.; **Maekawa**, K.; **Obikawa**, T.; **Yamane**, Y. Metal machining theory and applications. 1th ed. New York: John Wiley & Sons Inc, 2000.

CHIESA, F.; **Fuoco**, R.; **Santarini**, M. Fundição de ligas de alumínio usadas em componentes para indústria automobilística. Revista Máquinas e Metais. São Paulo, n; 357, outubro, 1995, p. 126-37.

COSTA, Éder Silva; **Santos**, Denis Júnio. Disciplina: Processos de Usinagem. Divinópolis: Centro de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2006.

CUNHA, Daniel Fernandes da. Influência do teor de silício na usinabilidade da liga de alumínio 6351-avaliada através de força de corte e acabamento superficial. Universidade Federal de Uberlândia, 2012.

DESTRO, Jose Paulo Breda. Resistencia dos materiais a usinagem: conceito, medida e aplicações da nova propriedade. Campinas, São Paulo, Dezembro de 1995.

DE SOUZA Prof. Dr. André João. Apostila de Processos de Fabricação // Processos de Fabricação por Usinagem Parte 1. - Porto Alegre: [s.n.], 2011.

DINIZ, Anselmo Eduardo; **Marcondes**, Francisco Carlos; **Coppini**, Nivaldo Lemos. Tecnologia da usinagem dos materiais. MM Editora, São Paulo, 1999.

DINIZ, Anselmo Eduardo; **Marcondes**, Francisco Carlos; **Coppini**, Nivaldo Lemos. Tecnologia da usinagem dos materiais. MM Editora, São Paulo, 2000.

DINIZ, A.E. **Marcones**, F.C. e **Coppini**, N.L.. Tecnologia da Usinagem dos Materiais. 4ª Edição. Artliber Editora Ltda, São Paulo, 2003.

DINIZ, Anselmo Eduardo; et al. Tecnologia da usinagem dos materiais. 5. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2006

DINIZ, Anselmo Eduardo; et al. Tecnologia da usinagem dos materiais. 5. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2007.

DOEHLER, H. H.; Die casting. Tokyo: McGraw-Hill Book Company, 1951.

DRUCKER, D. C. “A dimensional Analysis of Metal Cutting”, J. Appl. Phys. 21, (1950).

ESPANHOL, Victor. Análise dos esforços de corte e acabamento superficial no torneamento de aço com ferramenta de superfície lisa e com quebra-cavaco. 2008.

FARIA, José Carlos de. Estudo da usinagem em torneamento da superliga a base de níquel NIMONIC 80. Universidade Estadual Paulista, Campus Guaratinguetá, 2007.

FERRARESI, Dino. Usinagem dos metais: Fundamentos da usinagem dos metais. São Paulo, Edgard Blucher, 1970.

FERRARESI, Dino. Fundamentos da Usinagem dos Materiais [Livro]. - São Paulo : Blucher LTDA, 1977.

FERRARESI, Dino. Fundamentos da Usinagem dos Metais. 8º reimpressão. São Paulo, Edgard Blücher, 1990.

GOMES, M. R. e **Filho**, E. B. Propriedades e Usos de Metais Não-Ferrosos Alumínio, Chumbo, Cobre, Estanho e Zinco . III Impressão , ABM, São Paulo,1977.

HEINE, Richard W.; **Loper**, Carl R. Jr; **Rosenthal**, Philip C. Principle of metal casting. 2 nd ed. USA: McGraw-Hill Book Company, 1967.

HENKIN A. e **Datsko** J., “The influence of Phisical Properties on Machinability”: Journal of Engineering for Industry, November de 1963.

HUI, Eng Huang Huai. Simulação da formação de cavacos usando fem (finite element method)–temperatura e força. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2007.

LUCAS FILHO, Fernando Cardoso et al. Análise da usinagem da madeira visando a melhoria de processos em indústrias de móveis. UFSC, Florianópolis, 2004.

MACHADO, Álisson R. A evolução dos materiais para ferramentas de corte. *Máquinas e Metais*, n. 268, p. 92-98, janeiro-fevereiro, 1988.

MACHADO A. e **Da Silva M. B.** Usinagem dos Metais // Apostila DEEME. - Uberlândia : [s.n.], 1999.

MACHADO, A. R. e **Diniz**, A. E. Vantagens e desvantagens do uso (ou não) de fluidos de corte. *Máquinas e Metais*. v. 37 (419), p. 134 – 151, 2000.

MACHADO Á. R. e **Da Silva M. B.** Usinagem dos Metais. - Uberlândia : [s.n.], 2004.

MACHADO, A. R. e **Da Silva**, M. B. Apostila de Usinagem dos Metais. 8ª edição. Editora UFU, Universidade Federal de Uberlândia, 2009.

MACHADO, A. R. et al. Teoria da usinagem dos materiais. São Paulo: Blucher, p.397, 2011.

MATOSINHOS, F. C. C. C.; **Silva**, R. B.; **Abrão**, A. M. Desempenho das ferramentas de metal duro e cermet no aço ABNT 1045. *Máquinas e Metais*, n. 454, p.44-57, novembro, 2003.

METALWEB Aluminium Handbook and Stock Availability. “Metal for hi-tec applications”. 2011.

MILLS B. e **Redford A. H.** Machinability of Engineering Materials [Livro]. - London : Applied Science Publishers, 1983.

NORMA ISO 3685. Tool life testing, with single point turning tools. 1993.

OLIVEIRA, Hércules Araújo. Estudo da usinabilidade dos materiais metálicos: uma avaliação com base no teste de propriedades físicas. Universidade Estadual do Maranhão, 2014.

OLIVEIRA JR., G. G. Fatores metalúrgicos que condicionam a usinabilidade das ligas de alumínio. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 42., Salvador. Anais... [S.I.: s.n.], 1987. p. 203-216.

PEREIRA, Allan Coutinho. Análise de capacidade para avaliar a influência da geometria de brocas helicoidais em furação profunda de uma liga de alumínio—um estudo de caso. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2010.

REIS, Alexandre Martins. Influência do ângulo de posição secundário da ferramenta, raio de ponta e lubrificação na usinagem em presença de aresta postiça de corte. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia, 2000.

RODRIGUES, Alessandro Roger. Estudo da geometria de arestas de corte aplicadas em usinagem com altas velocidades de corte. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2005.

SHAW, W. C.. Metal cutting principles, Oxford University Press. 1984.

SIEGEL, Miguel. Fundição. 15 ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1985.

SIHVO, I.; **Varis**, J. The wear of single flute gun drill and tool life tests. *Mechanika*, v. 73, n. 5, p. 1207-1392, 2008.

SOUSA, Marcelo do Nascimento. Influência das propriedades mecânicas das ligas de alumínio na usinabilidade—foco no grau de recalque, na dimensão da zona de fluxo e na microdureza dos cavacos. Tese de Doutorado, UFU, 2013.

SOUZA, A. J. Processos de Fabricação por Usinagem, Parte 1: Fundamentos da Usinagem dos Materiais. GPFAI, DEMEC, UFRGS, Apostila, 98p, 2011.

STEMMER, Caspar Erich. Ferramentas de corte II: brocas, alargadores, ferramentas de roscar, fresas, brochas, rebolos e abrasivos. Ed. da UFSC, 1995.

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

STOETERAU Prof. Dr. Eng. Rodrigo Lima e et al. Processos de Usinagem // Fabricação por Remoção de Material. - Florianópolis : [s.n.], 2004.

STOETERAU, Prof. Dr. Eng Rodrigo Lima. Introdução ao Projeto de Máquina-Ferramentas Modernas. Brasil: Editora UFSC, 2004.

TESSLER , M. B. e **Barbosa** , C. A. A Usinabilidade dos Aços Inoxidáveis. Metalurgia e Materiais - ABM, vol. 49, nº 413, Janeiro de 1993, págs.: 32 à 41.

TÖNSHOFF H. K. e **Cassel** C. Effects of Non-Metalic inclusions in Quenched and Tempered Steel on the Wear Behavior of Cermet Cutting Tools. - [s.l.] : Journal of Materials Processing Technology, Vol. 49, 1993.

TRENT E. M. e **Wright** P. K. Metal Cutting [Livro]. : Butterworth Heinemann, 2000.

URTIGA Filho, Severino Leopoldino. Análise das características mecânicas estruturais e de usinabilidade de ligas Al-Cu. Campinas, São Paulo. Outubro de 1984.

WEINGAERTHER, Prof. Dr. Eng. Walter Lindolfo e **Schroeter**, Prof. Dr. Eng. Bertrand Processos de Usinagem // Fabricação por remoção de material. - 1991.

WEINGAERTHER, Prof. Dr. Eng. Walter Lindolfo e **Schroeter**, Prof. Dr. Eng. Bertrand Processos de Usinagem // Fabricação por remoção de material. - 2003.