



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO - UEMA
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS - CCT
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E PRODUÇÃO -DEMECP
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**ESTUDO DA USINABILIDADE DOS AÇOS INOXIDÁVEIS A PARTIR DA
VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CORTE: UMA AVALIAÇÃO COM BASE NO
TESTE DE PROPRIEDADES FÍSICAS.**

BRUNO DUARTE

**São Luís
2015**



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO- UEMA

**ESTUDO DA USINABILIDADE DOS AÇOS INOXIDÁVEIS A PARTIR DA
VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CORTE: UMA AVALIAÇÃO COM
BASE NO TESTE DE PROPRIEDADES FÍSICAS.**

Bruno Duarte

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.

São Luís

2015

Duarte, Bruno.

Estudo da usinabilidade dos aços inoxidáveis a partir da variação dos parâmetros de corte: uma avaliação com base no teste de propriedade física / Bruno Duarte.—São Luís, 2015.

... f

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual do Maranhão, 2015.

Orientador: Prof. Dr. Jean Robert Pereira Rodrigues.

BRUNO DUARTE

**ESTUDO DA USINABILIDADE DOS AÇOS INOXIDÁVEIS A PARTIR DA
VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CORTE: 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.

Orientador: Prof. Dr. Jean Robert P. Rodrigues
Coorientador: Esp. Eng. Mec. Hércules Araujo Oliveira

Qualificação aprovada em, ____ de ____ de 2015.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jean Robert P. Rodrigues
Universidade Estadual do Maranhão - UEMA

Esp. Eng. Mec. Hércules Araujo Oliveira
Universidade Federal do Maranhão - UFMA

Prof. MSc. Wellinton Assunção
Universidade Estadual do Maranhão - UEMA

Prof. MSc. Edilson Dantas Nobrega
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades.

In memoriam a minha, querida mãe, Lúcia de Fátima Duarte, que em vida sempre me motivou para a busca do conhecimento, devo tudo a ela.

Ao professor Dr. Jean Robert P. Rodrigues pela disposição no decorrer do projeto por dar suporte necessário para que esse projeto de conclusão de curso se concluísse.

Ao coorientador Esp. eng. mec. Hércules Oliveira pelo suporte e considerações no decorrer do projeto.

Aos professores do departamento de engenharia mecânica da UEMA, através dos quais recebi o conhecimento necessário para chegar até aqui.

A todos os amigos do curso de engenharia mecânica em especial minha turma (2010.2).

Aos amigos Raphael Cantanhede, Sebastião Raimundo e George Fernando pelo incentivo e troca de ideias nessa fase fácil do curso de engenharia mecânica.

A todos as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento desse trabalho.

"Quem não vive para servir, não serve para viver".

Mahatma Gandhi.

RESUMO

O entendimento do processo de fabricação por usinagem passa pelo estudo que dizem respeito tanto ao material da peça a ser usinado, quanto ao da ferramenta e ainda sobre o tipo de máquina ferramenta bem como a operação e às variáveis de processo envolvidas no corte dos metais, ou seja, é uma operação que depende da harmonia de todos os parâmetros. Neste contexto, o objetivo deste trabalho é apresentar um referencial teórico sobre a usinabilidade dos aços inoxidáveis a partir dos parâmetros de corte: uma avaliação com base no teste de propriedades físicas. Analisando os aços inoxidáveis Martensíticos, austeníticos e ferríticos quanto às suas características gerais e individuais, bem como parâmetros de corte que afetam o índice de usinabilidade a partir de uma análise de suas propriedades físicas, comentar os tipos de testes de usinabilidade e os principais problemas decorrentes da má usinabilidade. A metodologia do trabalho se deu a partir do estudo proposto de Henkin em duas partes, na primeira a partir do estudo de Henkin com coleta de dados na literatura disponível e posteriormente com as compilações. Todos os ensaios foram realizados no gerenciador de processamento de dados a partir das necessidades de várias repetições de cálculos, além de uma organização e otimização da planilha, facilitando a entrada de dados e a obtenção de resultados e gráficos. Dessa forma conseguiu-se obter os índices de usinabilidade expressos em valores de velocidade de usinagem dos materiais.

Palavras – chave: Usinabilidade, Parâmetros de corte, Propriedades Físicas.

ABSTRACT

Understanding of machining for manufacturing process involves the study concerning both the material of the part to be machined on the tool as well as on the type of machine tool as well as the operation and process variables involved in the cutting of metals that is, an operation that depends on the harmony of all parameters. In this context, the aim of this study is to present a theoretical framework on the machinability of stainless steel from the cutting parameters: an evaluation based on the test of physical properties. Analyzing stainless steels Martensitic, austenitic and ferritic as its authorizations and individual characteristics as well as cutting parameters that affect machinability index from an analysis of their physical propriedads, review the types of machinability tests and the main problems arising of poor machinability. Methodology The work was given from the study proposed Henkin in two parts, the first from Henkin study with data collection in the available literature and later with the builds. All assays were performed in the data processing from the manager needs several repetitions of calculations, and an organization and optimization of the worksheet, to facilitate data entry and obtaining the results and graphs. Thus it was possible to obtain the machinability index expressed in values of the material machining speed.

Key - words: Machinability, cutting Parameters, Physical Properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1- Formação de cavaco.....	4
Figura 3.2-Esquema da formação de cavaco.....	5
Figura 3.3- Zonas primárias e secundárias de cisalhamento	6
Figura 3.4 – classificação quanto a forma dos cavaco.....	7
Figura 3.5 - Materias para ferramenta de corte quanto a tenacidade e dureza.....	11
Figura 3.6 Características de resistência dos materiais da ferramentas.	12
Figura 3.7- Relação dureza e temperatura dos principais materiais de ferramenta. 12	
Figura 3.8 Materiais usados na usinagem,.....	13
Figura 3.9 - Cunha de corte da ferramenta de torneamento.	15
Figura 3.10 - Aresta da cunha de corte.....	15
Figura 3.11 - (a) Ângulo de ferramenta no plano de referência (b) ângulo da ferramenta no plano de medida (normal á aresta de corte).....	17
Figura 3.12 -Desgaste de ferramenta na superfície de folga.....	19
Figura 3.13 - Principais Desgaste em ferramentas de torneiar.	20
Figura 3.14 - a) Desgaste de cratera e b) Desgaste de flanco.	21
Figura 3.15 - Representação esquemática do desgaste de entalhe.	22
Figura 3.16 - Mecanismos de Desgaste.....	23
Figura 3.17- Distribuição das Solicitações no processo de torneamento.....	26
Figura 3.18- Decomposição das Força de usinagem.	28
Figura 3.19 - Funções do fluido de corte.....	31
Figura 3.20 - Redução do atrito entre a ferramenta e cavaco.	31
Figura 3.21 Direções possíveis de aplicação do fluido lubrificador.....	34
Figura 3.22 - Classificação dos ensaios de usinabilidade.	39

LISTA DE QUADRO

Quadro 3.1-Causas e ações para minimização de avarias e desgastes da ferramenta.....	24
Quadro 4.1 – Unidades utilizadas na equação de usinabilidade	45
Quadro 4.2 - Aços Inoxidáveis (recozido) / classe AISI-SAE	46
Quadro 4.3 – Propriedades e unidades do comprimento característico	47

LISTA DE TABELA

Tabela 4.1- Distribuição das condutividades térmicas (w/m.k) nas temperaturas dos aços inoxidáveis (recozido) classe AISI-SAE	46
Tabela 4.2- Propriedades mecânicas de aços inoxidáveis (recozido) Classe AISI-SAE	47
Tabela 4.3- Relação entre geometria de corte e comprimento característico	48
Tabela 4.4- Dados de entrada de aços inoxidáveis (recozido) Classe AISI-SAE.....	49
Tabela 4.5- Conversão de unidades	51
Tabela 5.1 - Resultado de usinabilidade com base em teste de propriedades físicas de aços inoxidáveis (recozido)	53

LISTA DE GRÁFICO

GRÁFICO 5.1 - Dureza x Usinabilidade, Aços inoxidáveis recozido.	54
GRÁFICO 5.2 - Condutividade térmica x Usinabilidade, Aços inoxidáveis recozido.	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

Abreviatura/ Símbolo	Descrição	Unidade
ABNT	Associação brasileira de normas técnicas	-
APC	Aresta postiça de corte	-
ASTM	<i>American society for testing and materials</i>	-
ASM	Aerospace specification metals	-
ASME	The american society of mechanical engineers	-
DIN	Deutsches institut fur normung	-
ISO	International organization for standardization	-
NBR	Norma brasileira aprovada pela ABNT	-
Ap	Profundidade de usinagem	mm
A _y	Superfície de saída	-
A _α	Superfície Principal de Folga	-
A'α	Superfície secundária de folga	-
D	Diâmetro da Ferramenta ou da peça	mm
F	Grandeza de avanço	mm/volta
F _c	Força de Corte	N/m ²
F _e	Força efetiva de corte	N/m ²
F _f	Força de avanço	N/m ²
F _p	Força passiva	N/m ²
F _t	Força ativa	N/m ²
F _u	Força de usinagem	N/m ²
N	Velocidade de Rotação da ferramenta ou da peça	Rpm
P _f	Plano admitido de trabalho	-
P _o	Plano ortogonal	-

Os	Plano Principal de corte da ferramenta	-
P's	Plano secundário de corte	-
Pr	Plano de referência	-
S	Aresta principal de corte	-
S'	Aresta Secundária de corte	-
Vc	Velocidade de corte	m/min
Vf	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	Mm
K _T	Profundidade da cratera	Mm
Xr	Ângulo de Posição principal da ferramenta	[°]
X'r	Ângulo de posição secundário da ferramenta	[°]
Φ	Ângulo de Cisalhamento	[°]
Er	Ângulo de ponta da ferramenta	[°]
Λ	Ângulo de saída da ferramenta	[°]
B	Ângulo de cunha da ferramenta	[°]
A	Ângulo de folga da ferramenta	[°]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	2
2.1 OBJETIVO GERAL	2
2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO	2
3 REVISÃO BIBLIOGRAFICA	3
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	3
3.2 USINAGEM NA INDUSTRIA METAL MECÂNICA	3
3.3 FORMAÇÕES DE CAVACO	3
3.3.1 Tipos de cavaco	6
3.3.2 Formas de cavaco	8
3.4 CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE USINAGEM	8
3.4.1 Classificação quanto ao processo de remoção de Material	9
3.4.2 Classificação quanto á geometria da ferramenta de corte	9
3.4.3 Classificação quanto á finalidade da operação de corte	10
3.5 CONSIDERAÇÕES GERAIS DA FERRAMENTA DE CORTE	10
3.5.1 Materiais da ferramenta	10
3.5.2 Propriedades das ferramenta de corte	11
3.5.3 Evolução dos materiais de ferramenta	13
3.6 GEOMETRIA DA FERRAMENTA DE CORTE	14
3.6.1 Ângulos da ferramenta do plano de medida	16
3.6.2 Ângulos da ferramenta no plano de referência	17
3.7 DESGASTE, FALHA E VIDA DA FERRAMENTA	18
3.7.1 Tipos de desgaste de ferramenta	20
3.7.2 Causas e mecanismos de desgaste	22
3.7.3 Tipos de avarias	23
3.8 VELOCIDADE DE USINAGEM	25

3.9	VELOCIDADE DE CORTE	25
3.10	VELOCIDADE DE AVANÇO	26
3.11	FLUIDO DE CORTE	30
3.11.1	O Fluido de corte como refrigerante	32
3.11.2	O Fluido de corte como lubrificante	32
3.11.3	Classificação dos fluidos de corte	33
3.11.4	Métodos de aplicação dos fluidos de corte	33
3.12	ESTUDO DE USINABILIDADE	34
3.12.1	Importancia e aplicação dos aços inoxidáveis	35
3.12.2	Principais grupos que influenciam a usinabilidade	36
3.12.3	Principais problemas decorrentes da má usinabilidade	37
3.12.4	Efeitos das propriedades físicas na usinabilidade	37
3.12.5	Ensaio de usinabilidade	38
3.12.6	Tipos de ensaios de usinabilidade	40
3.13	TESTE DE PROPRIEDADE FÍSICA	42
3.14	CONSIDERAÇÕES SOBRE EQUAÇÃO GERAL DE USINABILIDADE	44
4	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	45
4.1	METODOLOGIA	45
4.2	MATERIAL ENSAIADO	45
4.3	PROCESSAMENTO DE DADOS	49
4.4	DECLARAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE ENTRADA	49
4.5	ANÁLISE DIMENSIONAL E CONVERSÃO DE UNIDADES	50
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
6	CONCLUSÃO	57
7	SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS	59
8	REFERENCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

As ligas ferrosas, aquelas em que o ferro é o principal constituinte, incluem os aços e os ferros fundidos. São produzidos em maiores quantidades do que qualquer outro tipo de metal. Elas são especialmente importantes como materiais de construção em engenharia CALLISTER (2008).

Os materiais metálicos quando no ensaio de usinabilidade sofrem influência de vários fatores como por exemplo: Composição química, microestrutura, resistência do material, avanço utilizado na usinagem, velocidade de corte, penetração e escolha do fluido de corte de acordo com PECKENER (1977).

Segundo FERRARESI (1977) os principais fatores que determinam a usinabilidade são: material da peça, composição química, microestrutura, propriedades físicas, químicas e mecânicas bem como ferramenta de corte, geometria e material da ferramenta ainda o processo/máquina: operação de usinagem adotado, condições de usinagem, condições de refrigeração (fluido de corte), rigidez da máquina, ferramenta e fixação da peça. Para MACHADO (1999) o tipo de ferramenta de corte utilizada, as condições de corte, etc. tudo isto deve ser selecionado arbitrariamente. Por isto que usinabilidade é uma função do teste, e qualquer número de usinabilidade deve acompanhar uma descrição completa do teste. Sem esta informação adicional, este número não tem significado.

O Material adotado nesse trabalho são os aço inoxidáveis ferríticos, martensíticos e austeníticos. Segundo ANTOHONY XAVIER e ADITHAN (2009) aços inoxidáveis são amplamente utilizados em talheres, pias, tubos, produtos lácteos, alimentos e na indústria farmacêutica, bem como em molas, porcas, cavilhas e parafusos devido à sua alta resistência a alta corrosão e resistência à oxidação. Para ASAKAWAT et al (2003) e KOPAK&SALI (2001) a usinagem dos aços inoxidáveis é mais complexa em comparação com a usinagem de outros aços de baixa liga, devido a algumas características, como ter baixa condutividade térmica, alto endurecimento, deformação e sensibilidade mecânica.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

- Realizar um estudo teórico sobre usinabilidade dos aços inoxidáveis a partir da variação dos parâmetros de corte: uma avaliação com base nos teste de propriedades físicas.

2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

- Elaborar um banco de dados de que possa servir como parâmetro para a caracterização do índice de usinabilidade;
- Relacionar o índice de usinabilidade, em valor de velocidade, com as propriedades físicas dos aços inoxidáveis;
- Discriminar os parâmetros de corte envolvidos no ensaio de usinabilidade a partir da equação geral de usinabilidade.

3 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Uma grande contribuição de ensaios de usinabilidade é a possibilidade de geração de banco de dados de usinagem, que é uma tarefa árdua, mas de grande contribuição prática. Por meio de ensaios de usinabilidade pode-se catalogar resultados e gerar informações práticas preciosas do ponto de vista de chão de fábrica. Informações deste tipo são encontradas nos catálogos dos principais fabricantes de ferramentas de corte do mercado mundial (MACHADO,1999).

Usinagem é um “processo de fabricação com remoção de cavaco”. De uma maneira mais sistemática e geral se coloca: operação que ao conferir à peça forma, dimensões e acabamentos, produz cavaco (RUFFINO et al., 2009).

As diferenças de usinabilidade entre materiais podem ser atribuídas às propriedades físicas e químicas (DKI, 2010). Através de referências na literatura é estimado que cerca de 10% do produto interno bruto dos Estados Unidos estejam associados a processos de usinagem (Shaw, 2005).

Dessa forma, percebe-se a importância de um estudo direcionado a essa área que tanto influencia na indústria metal mecânica.

3.2 USINAGEM NA INDÚSTRIA METAL MECÂNICA

Diversos produtos industrializados, em alguma de suas fases de fabricação, sofrem algum processo de usinagem abaixo são listados Alguns exemplos da importância da usinagem (STOETERAU et al., 2004).

- 80% dos furos são realizados por usinagem;
- Aproximadamente 100% dos processos de melhoria da qualidade superficial são feitos por usinagem;
- O comércio de máquinas-ferramentas representa uma das grandes fatias da riqueza mundial;
- Aproximadamente 70% das engrenagens para transmissão de potência;
- Aproximadamente 90% dos componentes da indústria aeroespacial;

- Aproximadamente 100% dos pinos médico-odontológicos;
- Aproximadamente 70% das lentes de contatos;
- Lentes para cd player ou suas matrizes.

3.3 FORMAÇÕES DE CAVACO

Segundo LUIZ (2007) o processo de formação de cavado é muito estudado e discutido nos processos de usinagem, sendo que envolvem aspectos econômicos e de qualidade da peça, a segurança do operador, a utilização adequada da máquina-ferramenta, produtividade, etc. É associado a sua formação diversos fatores ligados à usinagem, tais como o desgaste da ferramenta, os esforços de corte, o calor gerado na usinagem, a penetração do fluido de corte, etc.

Segundo TRENT et al., (2000) a formação do cavaco, como mostra a figura 3.1, nas condições normais de usinagem se processa da seguinte forma:

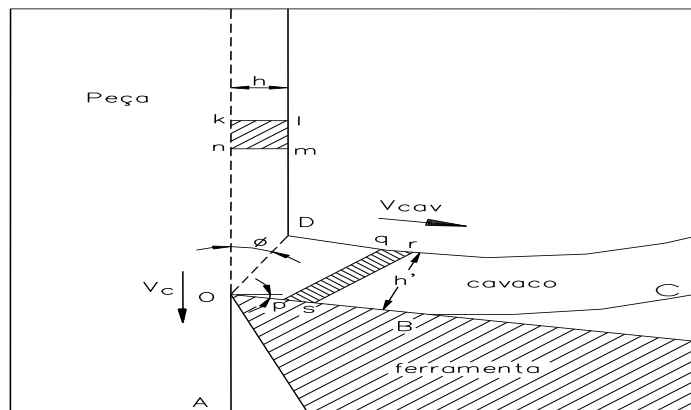


Figura 3.1- Formação de cavaco

Fonte: Adaptado de (MACHADO et al., 1999).

- Devido à penetração da ferramenta na peça uma pequena porção de material “klmn” é recalcada contra a superfície de saída da ferramenta conforme se observa na figura 3.1;
- A partir da penetração, o material que formará o cavaco é comprimido, a peça sofre uma deformação plástica, a qual aumenta progressivamente, até que as tensões de cisalhamento se tornem suficientemente altas, de modo a iniciar um deslizamento entre a porção de material recalcado e a peça. Este deslizamento realiza-se segundo os planos de cisalhamento dos cristais da

porção de material recalçada. Durante a usinagem, estes planos simultâneos irão definir certa região entre a peça e o cavaco, dita zona de cisalhamento primário. Para facilitar o tratamento matemático dado à formação do cavaco, esta região é assemelhada a um plano, dito plano de cisalhamento, definido pelo ângulo de cisalhamento ϕ ;

- Prosseguindo com a penetração da ferramenta, começará uma ruptura parcial ou completa na região de cisalhamento, dependendo naturalmente da ductilidade do material e das condições de usinagem. Para materiais altamente deformáveis, a ruptura se realiza somente nas imediações da aresta cortante e o cavaco originado é denominado cavaco contínuo. Para materiais frágeis se origina o cavaco de cisalhamento ou de ruptura. Se não forem levadas em conta essas afirmações enumeradas e estabelecer uma análise mais dinâmica do processo de corte. TRENT et al., (2000) afirmam que em altíssimas velocidades de corte o fenômeno de formação do cavaco se assemelha mais a um fenômeno de escoamento de fluido;
- Devido ao movimento relativo entre a ferramenta e a peça, inicia-se um escorregamento da porção de material, cavaco, deformado e cisalhado sobre a superfície de saída da ferramenta. Enquanto isso acontece, uma nova porção de material (imediatamente adjacente à porção anterior) está se formando e cisalhando. Esta nova porção de material irá também escorregar sobre a superfície de saída da ferramenta, repetindo novamente o fenômeno.
- Como se observa na figura 3.2 são apresentados alguns parâmetros que influenciam, na ferramenta de corte, para a formação do cavaco.

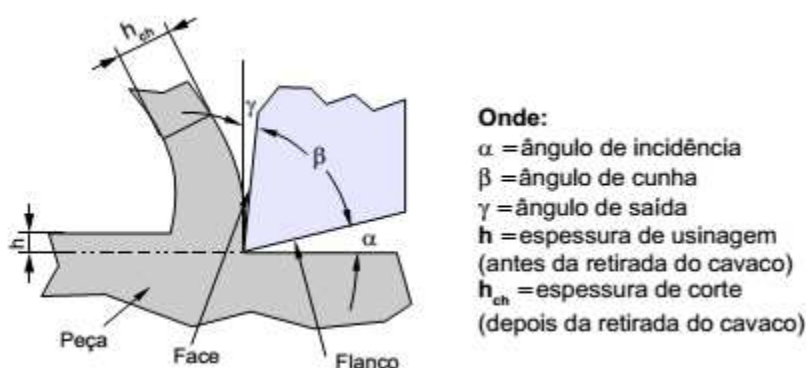


Figura 3.2-Esquema da formação de cavaco.

Fonte: Adaptado de DE AMORIM, (2002)

TRENT et al., (2000) e MACHADO et al., (2004) admitem a formação de uma segunda região de cisalhamento localizada na interface cavaco-ferramenta denominada de zona de cisalhamento secundária como é visto na figura 3.3.

De acordo com RAMANUJACHAR et al., (1996) Nesta região ocorreriam fenômenos com altíssima geração de calor e desgaste por transferência de átomos entre ferramenta e cavaco.

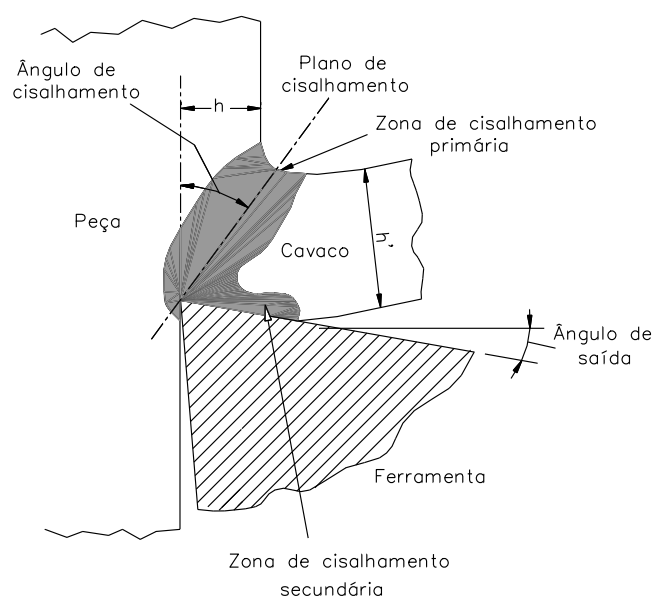


Figura 3.3- Zonas primárias e secundárias de cisalhamento

Fonte: Adaptado de MACHADO et al., 1999.

3.3.1 Tipos de cavaco

Segundo DE AMORIM (2002) um tipo de cavaco pode causar problema, assim como danos à superfície da peça ou ainda estar ocupando volume excessivo, no que diz respeito às suas características do tipo, forma e tamanho elas podem ser consideradas como indicativas de problemas.

Os tipos de cavaco são basicamente três (DE AMORIM, 2002):

- **Cavaco contínuo**, definido pelo seu longo comprimento, independente da forma. É observado principalmente na usinagem de metais dúcteis (como

aços baixa liga), sob pequenos e médios avanços, com altas velocidades de corte e grandes ângulos de saída da ferramenta.

- **Cavaco de cisalhamento ou parcialmente contínuo**, ocorre principalmente quando a trinca, ao propagar-se pelo plano de cisalhamento, provoca a ruptura total do cavaco, que em seguida, é soldado devido à pressão e temperatura.
- **Cavaco arrancado ou descontínuo**, mais comuns na usinagem de metais frágeis, como ferro fundido cinzento. Este tipo de cavaco ocorre também na usinagem de alguns materiais menos frágeis com os seguintes parâmetros de corte: baixas velocidades de corte, grandes avanços e com ângulo de saída pequeno.

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

Figura 3.4 – classificação quanto a forma dos cavaco.

Fonte: Adaptado de (MACHADO et al., 1999)

Nos estudos de SHAW (1984) e MACHADO et al., (1999) é citado o cavaco segmentado, que ocorre mais facilmente na usinagem de materiais com baixa condutividade térmica, como o titânio e suas ligas,

É muito importante que se faça o controle do tipo de cavaco e sua formação, por que o cavaco contínuo, além de oferecer perigo ao operador, pode ser enrolado ao redor da peça ou ferramenta, dificultando a operação e como consequência tornando a superfície usinada menos atrativa (LUIZ, 2007).

Segundo DINIZ et al., (2000) existem medidas e técnicas que são utilizadas para evitar a formação contínua do cavaco, além de minimizar os problemas por ele causados. Para isso se adota algumas alterações nos parâmetros de corte, dentre eles estão:

- 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;
- Uso de quebra-cavaco.

3.3.2 Formas de cavaco

De acordo com REIS et al., (2007) além do tamanho do cavaco, é classificado quanto à sua forma. Essa classificação se faz necessária devido ao fato de que algumas formas de cavaco dificultam significativamente a operação de usinagem, prejudicam o acabamento superficial da peça e desgastam mais ou menos a ferramenta, além de contribuírem para o aumento de temperatura do processo.

A classificação usual para as formas de cavacos são as seguintes (DE AMORIM, 2002):

- Cavaco em fita ;
- Cavaco Helicoidal;
- Cavaco espiral;
- Cavaco em lascas ou pedaços.

Segundo a norma (ISO, 1993), existe uma classificação mais detalhada das formas de cavaco possíveis conforma foi visto na figura 3.4.

3.4 CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE USINAGEM

Levando em consideração diferentes parâmetros os processos de usinagem podem ser divididos em classes, de acordo com DE SOUZA (2011) e WEINGAERTHER et al., (2003) é elaborado a seguinte classificação:

3.4.1 Classificação quanto ao processo de remoção de Material

Segundo DE SOUZA (2011) os processos de remoção por usinagem podem ser divididos em duas grandes categorias:

- **Processos convencionais**, os mais comumente aplicados, em que as operações de corte empregam energia mecânica na remoção do material, principalmente por cisalhamento, no contato físico da ferramenta com a peça – ex: torneamento, furação e retificação.
- **Processos especiais (não-convencionais)**, mais utilizados em indústrias e grandes laboratórios devido ao custo, as operações se utilizam de outros tipos de energia de usinagem (p.ex. termelétrica), não geram marcas-padrão na superfície da peça e a taxa volumétrica de remoção de material é muito menor que a dos processos convencionais – ex: remoção térmica, remoção química, remoção eletroquímica, remoção por ultra-som e remoção por jato d'água.

3.4.2 Classificação quanto á geometria da ferramenta de corte

Segundo DE SOUZA (2011) Os processos convencionais de usinagem ainda podem ser subdivididos quanto a geometria da ferramenta de corte em duas classes:

- **Operações de corte com ferramentas de geometria definida.** São aqueles processos em que a ferramenta possui uma aresta cortante, ou seja, um gume de corte (com formato e tamanho conhecidos), que descreve uma trajetória em relação à peça a ser usinada. Esse movimento resulta na remoção do material na forma de cavaco. Ex: Torneiar, Fresar, Furar, Rosquear, Alargar, Brochar, Serrar, Plainar e outros.
- **Operações de corte com ferramentas de geometria não-definida.** São aqueles processos nos quais a ferramenta é formada por uma grande quantidade de grãos abrasivos, que funcionam como vários gumes de corte. Esses grãos abrasivos podem ser mantidos juntos por meio de algum tipo de aglomerante, e são quebrados e/ou arrancados da ferramenta ao mesmo

tempo em que retiram material da peça na forma de cavaco. Ex: Retificar, Brunir, Lapidar, Lixar, Polir, Jatear, Tamborear e outros.

3.4.3 Classificação quanto á finalidade da operação de corte

Segundo DE SOUZA (2011) Quanto à finalidade, as operações de usinagem podem ser classificadas em:

- **Operações de desbaste**, uma usinagem com objetivo de alcançar as dimensões próximas às exigidas no processo de fabricação, é um processo grosseiro que visa mais a retirada de material que o acabamento na peça.
- **Operações de acabamento**, realizada depois da operação de desbaste, pois é mais preciso, a usinagem é destinada a obter na peça as dimensões finais, ou um acabamento especificado, ou ambos. É um processo mais delicado que visa mais a precisão e o acabamento da peça que a retirada de material.

3.5 CONSIDERAÇÕES GERAIS DA FERRAMENTA DE CORTE

3.5.1 Materiais da ferramenta

De acordo com FERRARESI (1977) a ferramenta de usinagem é essencial para o processo, por esse motivo deve ser fabricada com material adequado que atenda as exigências dos esforços, temperaturas e fatores de corte.

A seleção de um material para ser utilizado em uma ferramenta de corte depende de uma série de fatores, entre os quais podem ser ponderados:

- Material a ser usinado- dureza do material e tipo de cavaco;
- Processo de usinagem- ferramentas rotativas de pequenos diâmetros utilizam materiais mais antigos (tipo aço rápido) devido às dificuldades de se obter as velocidades indicadas para materiais mais nobres;
- Condição da máquina – como as máquinas antigas apresentam diversos problemas como alinhamento e folgas, exigem materiais mais tenazes que não requeiram altas velocidades para que as vibrações não criem problemas mais acentuados;
- Custo do material da ferramenta – relação custo/ benefício;

- Condições de usinagem – condições de acabamento exigem ferramentas mais resistentes ao desgaste para atender a precisão e qualidade exigidas, operações de desbaste exigem ferramentas mais tenazes, etc.;
- Condições de operação – corte interrompido e/ou sistemas de fixação pouco rígida, exigem ferramentas mais tenazes.

A análise exposta por DE SOUZA (2011) explica a necessidade de se desenvolver ferramentas com materiais que atendam as diversidades dos metais que necessitam ser usinados. Segundo RUFFINO et al., (2009) como já se sabe dureza e tenacidade são duas propriedades antagônicas (alta dureza se associa a baixa tenacidade e vice-versa), a dosagem destas propriedades nos materiais de ferramentas de corte se tornou um desafio para os fabricantes abaixo como mostra a figura 3.5 essa interação.

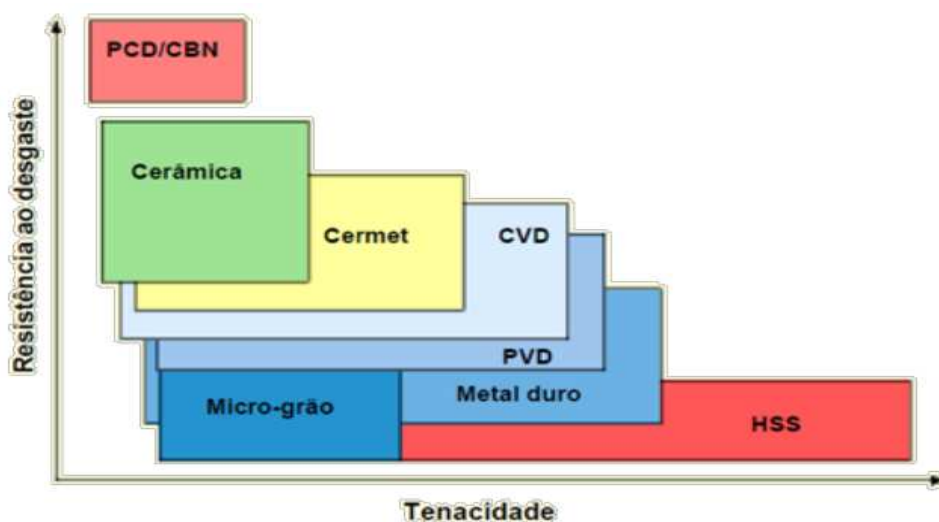


Figura 3.5 - Materiais para ferramenta de corte quanto a tenacidade e dureza.

Fonte: Adaptado de (DE SOUZA, 2011)

3.5.2 Propriedades das ferramenta de corte

Para DINIZ et al., (2006) as principais propriedades que um material de ferramenta de corte deve apresentar são listadas abaixo:

- Resistência a compressão;
- Resistência ao Cisalhamento;

- Dureza;
- Resistência á flexão e tenacidade, conforme figura 3.6;
- Resistência do gume;
- Resistência interna de ligação;
- Resistência a quente;
- Resistência á oxidação;
- Resistência á abrasão;
- Boas propriedades térmicas e mecânicas em altas temperaturas, visto na figura 3.7.



Figura 3.6 Características de resistência dos materiais da ferramentas.

Fonte: Adaptado de (STOETERAU et al., 2004)

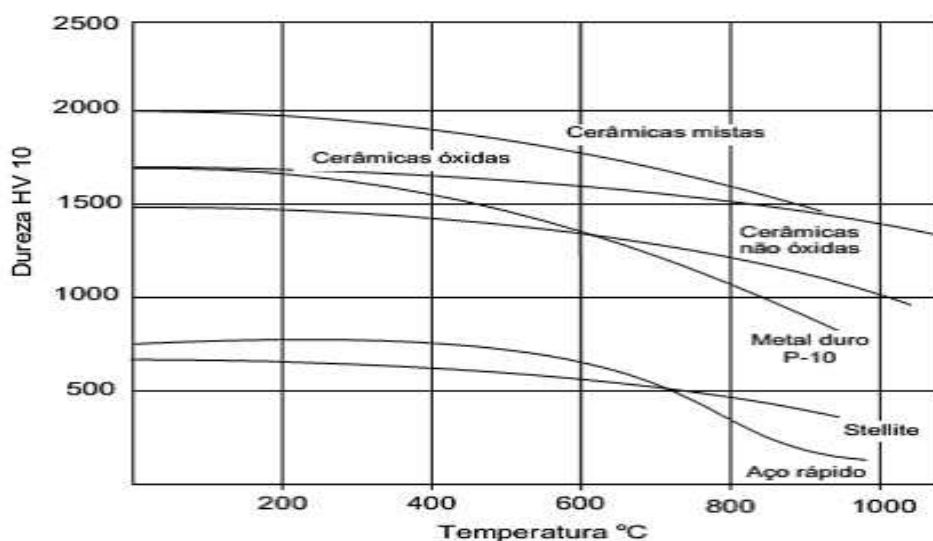


Figura 3.7- Relação dureza e temperatura dos principais materiais de ferramenta.

Fonte: Adaptado de (STOETERAU et al., 2004)

3.5.3 Evolução dos materiais de ferramenta

Em conformidade com MACHADO et al., (1999) são listados abaixo os principais grupos de materiais para ferramenta de corte existente no mercado:

- Aço ferramenta (1868);
- Aço rápido (1900);
- Stellite (1910);
- Metal duro (1926);
- Cerâmicas (1938);
- Nitreto de boro cúbico (Década de 50);
- Diamante mono e policristalino (Década de 70).

De acordo com FERRARESI (1977) desde os primórdios dos processos de fabricação, surgiram diversos materiais aplicados a ferramentas de corte, sendo que os mais usados em ferramentas de corte são: o aço-rápido e o metal-duro, juntos somam 90% das aplicações na indústria moderna. Os materiais mais avançados como: nitreto de boro cúbico (CBN – cubic boron nitride), cerâmica e diamantes, detêm apenas 10% das aplicações. Apesar dessa proporção, ainda foram desenvolvidos diversos materiais para ferramentas de usinagem conforme a figura 3.8.

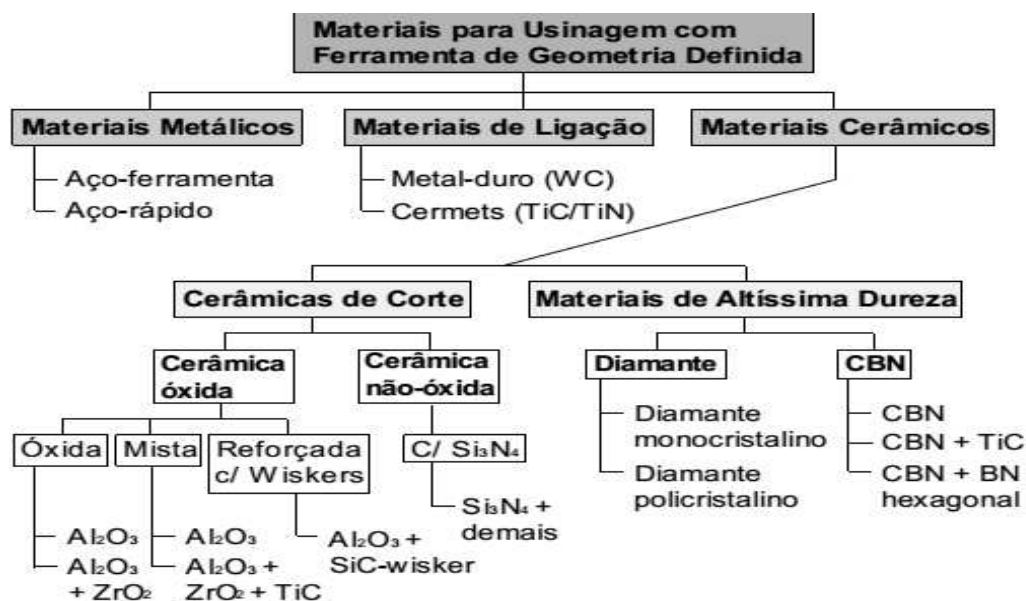


Figura 3.8 Materiais usados na usinagem,

Fonte: Adaptado de (STOETERAU et al., 2004)

3.6 GEOMETRIA DA FERRAMENTA DE CORTE

A ferramenta de corte é usada para realizar uma operação específica de usinagem e a geometria (ângulos) desta ferramenta deve ser devidamente escolhida para poder executá-la com precisão, (DE SOUZA, 2011).

A parte da ferramenta que define a origem do cavaco é dita de cunha cortante ou gume de corte ainda através do movimento relativo entre a ferramenta e a peça. As arestas que limitam as superfícies de corte são arestas de corte (DINIZ et al., 2006).

A seguir são descritas as principais partes construtivas de uma ferramenta de corte onde algumas são demonstradas na figura 3.9:

- a) **Parte de corte** - elemento ativo da ferramenta formado por suas cunhas de corte. Essa parte ativa da ferramenta é construída ou fixada sobre um suporte ou cabo da ferramenta, através do qual é possível fixar a ferramenta para construção, afiação, reparo, controle e trabalho. Pode-se ter, portanto, uma superfície de apoio da ferramenta, ou a ferramenta poderá ser fixada pelo seu eixo;
- b) **Superfícies de saída (A_y)** – é a superfície da cunha de corte por onde o cavaco é formado e sobre a qual o cavaco desliza durante sua saída da região do trabalho de usinagem;
- c) **Superfície principal de folga (A_α)** – é a superfície da cunha de corte da ferramenta que contém sua aresta principal de corte e que defronta com superfície em usinagem principal;
- d) **Superfície secundária de folga ($A'\alpha$)** – é a superfície da cunha de corte da ferramenta que contém sua aresta de corte secundária e que defronta com a superfície em usinagem secundária, visto na figura 3.10;
- e) **Aresta secundária de corte (S')** – é a aresta da cunha de corte formada pela intersecção das superfícies de saída e de folga secundária. Gera na peça a superfície em usinagem secundária ilustrada na figura 3.10;
- f) **Aresta Principal de Corte (S)** – é a aresta da cunha de corte formada pela intersecção das superfícies de saída e de folga principal. Gera na peça a superfície em usinagem principal.

- g) **Ponta de corte** – é a parte da cunha de corte onde se encontram as arestas principal e secundária de corte. A ponta de corte pode ser a intersecção das arestas, ou a concordância das duas arestas através de um arredondamento, ou o encontro das duas arestas através de um chanfro.

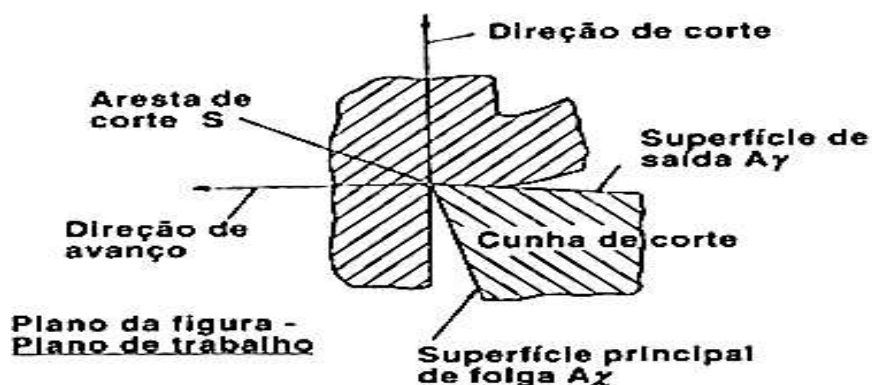


Figura 3.9 - Cunha de corte da ferramenta de torneamento.

Fonte: Adaptado de DE SOUZA (2011)

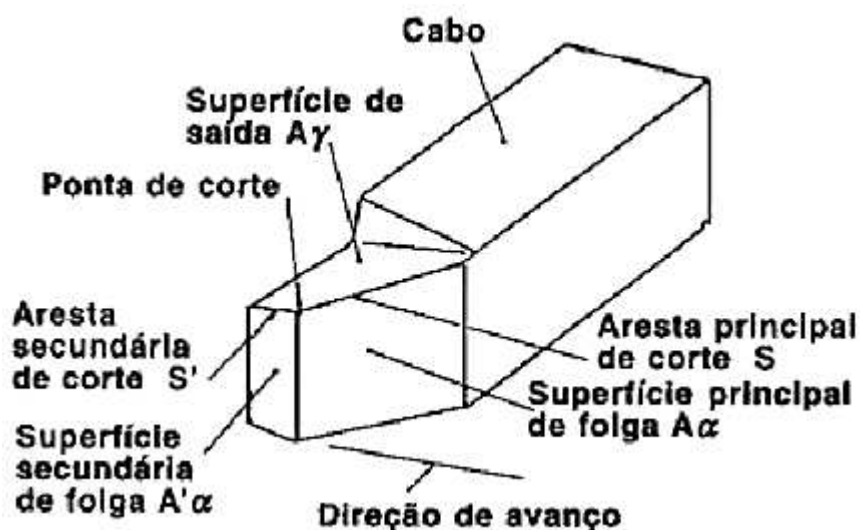


Figura 3.10 - Aresta da cunha de corte.

Fonte: Adaptado de FERRARESI (1977)

Para LUIZ (2007) o processo de corte é realizado pela aproximação e penetração da cunha da ferramenta sobre a peça. O rendimento desse fenômeno de retirada de cavaco depende dos valores dos ângulos da cunha, isso por que este

parâmetro é o responsável por romper as forças de coesão do material da peça. Os ângulos e superfícies na geometria de corte das ferramentas são elementos fundamentais para o rendimento e a durabilidade delas. A denominação das superfícies da ferramenta, dos ângulos e das arestas é normalizada pela ABNT (associação brasileira de normas técnicas).

3.6.1 Ângulos da ferramenta do plano de medida

Os ângulos da ferramenta do plano de medida são o ângulo de folga, ângulo de cunha, ângulo da saída. Abaixo são definidos com mais detalhes por DE SOUZA (2011):

- a) **Ângulo de folga (α).** *Formado entre a superfície de folga e o plano de corte medido no plano de medida da cunha cortante; influencia na diminuição do atrito entre a peça e a superfície principal de folga. A função do ângulo de folga (α) é evitar o atrito entre a superfície transitória da peça e a superfície de incidência (flanco) da ferramenta e permitir que a aresta de corte penetre no material e corte livremente*
- b) **Ângulo de cunha (β).** *A principal função do ângulo β é aumentar a resistência mecânica da ferramenta, visto que materiais de difícil corte exercem maior pressão próxima à aresta de corte e por isso exigem uma cunha menos aguda. Portanto, quanto maior for β , maior a área de dissipação de calor e maior a resistência da ferramenta de corte.*
- c) **Ângulo da saída (γ).** *Formado pela superfície de saída da ferramenta e pelo plano de referência medido no plano de medida; é determinado em função do material, uma vez que tem influência sobre a formação do cavaco e sobre a força de corte. Este é um dos ângulos mais importantes da ferramenta, pois influi decisivamente na força e na potência necessária ao corte, no acabamento da superfície usinada e no calor gerado. A grandeza de γ depende principalmente dos seguintes fatores: resistência do material da ferramenta de corte; resistência e dureza do material da peça a ser usinada; quantidade de calor gerado pelo corte; aumento da velocidade de avanço como é observado figura. 3.11- (a).*

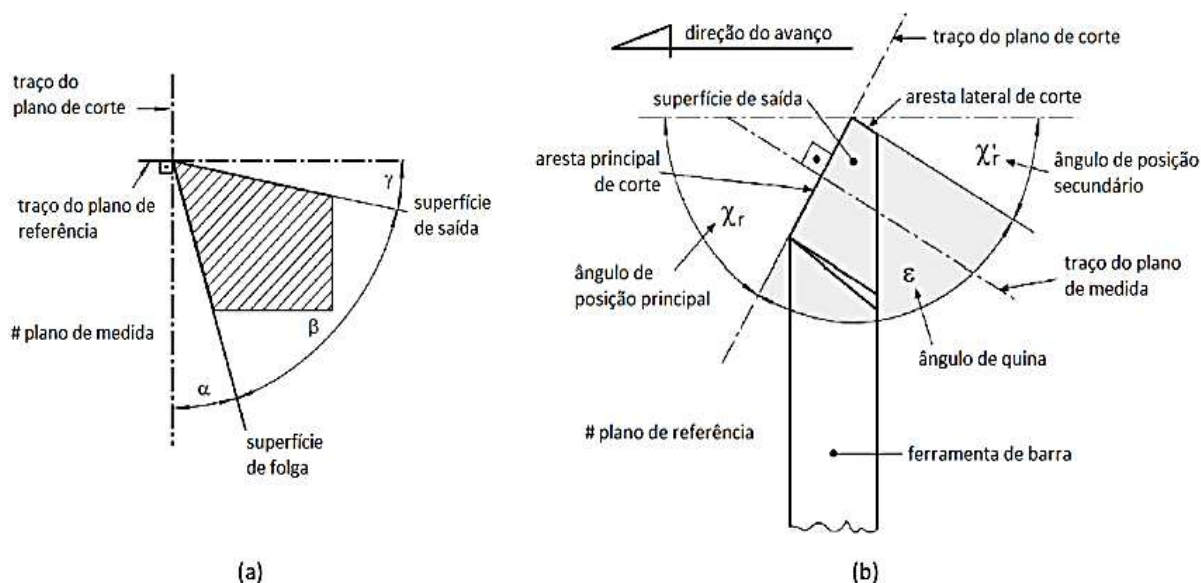


Figura 3.11 - (a) Ângulo de ferramenta no plano de referência (b) ângulo da ferramenta no plano de medida (normal à aresta de corte).

Fonte: Adaptado de DE SOUZA (2011)

3.6.2 Ângulos da ferramenta no plano de referência

Como é exposto por MACHADO (1999) os ângulos do sistema de referência são identificados com o acréscimo da palavra ferramenta e os símbolos representativo como o índice identificador do plano, no qual são medidos. Conforme exposto por DE SOUZA (2011):

- a) **Ângulo de posição principal (χ_r).** Formado pela projeção da aresta principal de corte sobre o plano de referência e pela direção do avanço medido no plano de referência. O ângulo χ_r tem as seguintes funções: controlar o choque de entrada da ferramenta; distribuir as tensões de corte favoravelmente no início e no fim de corte; alterar a espessura do cavaco e o comprimento atuante da aresta de corte; aumentar o ângulo de quina (ϵ_r); gerar uma força passiva na ferramenta que ajuda a eliminar eventuais vibrações; influir na direção de saída do cavaco. Em trabalhos de desbaste usuais, o ângulo χ_r pode variar de 30° a 60° . Na ferramenta de sangrar e no bedame, $\chi_r = 90^\circ$. Não se aconselha usar $\chi_r > 90^\circ$ para não acunhar a ponta da ferramenta no material como se observa na figura 3.11- (b);

- b) **Ângulo de quina (ϵ_r).** Formado pela projeção das arestas lateral e principal de corte sobre o plano de referência e medido no plano de referência. É determinado conforme o avanço. A principal função do ângulo ϵ_r (assim como do ângulo β) é aumentar a resistência mecânica da ferramenta, visto que materiais de difícil corte exercem maior pressão próxima à aresta de corte e por isso exigem uma quina menos aguda. Conseqüentemente, tais materiais provocam maior aquecimento na região mais próxima à ponta da ferramenta (cunha e quina). Portanto, quanto maior for ϵ_r , maior a área de dissipação de calor e maior a resistência da ferramenta de corte como se demonstra na figura 3.11 – (b);
- c) **Ângulo de posição secundário (χ'_r).** Formado entre a projeção da aresta lateral de corte sobre o plano de referência e a direção de avanço medido no plano de referência. O ângulo χ'_r indica a posição da aresta secundária de corte. Sua principal função é controlar o acabamento, ou seja, permitir que apenas uma pequena parte da aresta secundária entre em contato com a superfície usinada, evitando assim vibrações. No entanto, deve-se lembrar que o acabamento da superfície usinada depende também do raio de quina da ferramenta (r_ϵ).
- d) **O ângulo de inclinação (λ).** É o ângulo formado entre a aresta principal de corte e sua projeção sobre o plano de referência medido no plano de corte. Tem por finalidade controlar a direção do escoamento do cavaco, proteger a quina da ferramenta contra impactos e atenuar vibrações como é visto na figura. 11 – (b).

3.7 DESGASTE, FALHA E VIDA DA FERRAMENTA

Para CASAGRANDA (2004) a vida da ferramenta pode ser descrita como o tempo que esta ferramenta trabalha efetivamente até perder sua capacidade de corte, em função de parâmetros previamente estabelecidos.

Segundo DE AMORIM (2002) existem vários tipos de desgaste de ferramenta, no entanto, o mais utilizado como critério de fim de vida de ferramenta é o desgaste de flanco. O desgaste de flanco ocorre na superfície de folga da ferramenta, afetando sua afiação e está presente em todas as operações de usinagem figura 3.12.

Conforme CASAGRANDA (2004) a vida de ferramenta é o critério mais usado para avaliação da usinabilidade dos materiais. A equação (1) é conhecida como equação de Taylor, fornece uma estimativa da vida útil da ferramenta na usinagem de um determinado material. As constantes K e x são determinadas para o material usinado.

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

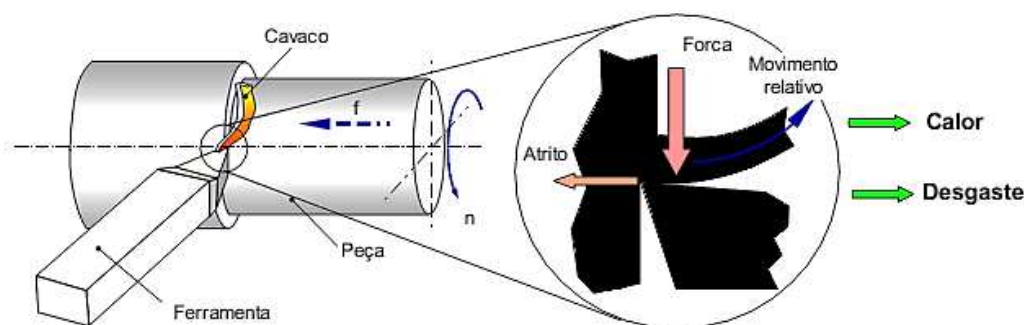


Figura 3.12 -Desgaste de ferramenta na superfície de folga

Fonte: Adaptado de STOETERAU et al., (2004)

Segundo DE SOUZA (2011) em função das condições de corte durante o processo de usinagem, a ferramenta fica sujeita a uma combinação de vários fatores de origem térmica, mecânica, química e abrasiva (elevada pressão de contato entre peça/ferramenta/cavaco).

Mais comumente, os desgastes se apresentam como falhas contínuas, isto é, possuem comportamento determinístico ao longo de sua progressão até a deterioração completa da ferramenta. Este fato contribui para se estabelecer um controle maior da vida. Entretanto, as avarias se caracterizam de forma que não podem ser controlada ou prevista, são falhas transitórias que ocorrem aleatoriamente, levam a ferramenta ao colapso (quebra total) e são detectadas freqüentemente somente após o ocorrido CASAGRANDA (2004).

Para DE AMORIM (2002) é entendido duas causas de maior relevância, num processo de usinagem, que estabelecem o momento necessário para a substituição da ferramenta de corte, que são:

- Avarias ou falha 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.

Para DINIZ et al., (2000), as avarias e falhas catastróficas costumam ocorrer em processos de corte interrompido, como por exemplo o fresamento, devido aos choques térmicos e mecânicos envolvidos nestes processos. Já nos processos de corte contínuo, podemos citar o torneamento, sua ocorrência é mais ausente, salvo para condições de corte que excedam as recomendadas, ou que a ferramenta possua algum defeito de fabricação.

3.7.1 Tipos de desgaste de ferramenta

Desgaste de flanco, desgaste de cratera e desgaste de entalhe são as formas de desgaste de ferramenta mais comuns estudadas como vemos na figura 3.13 (De AMORIM, 2002).

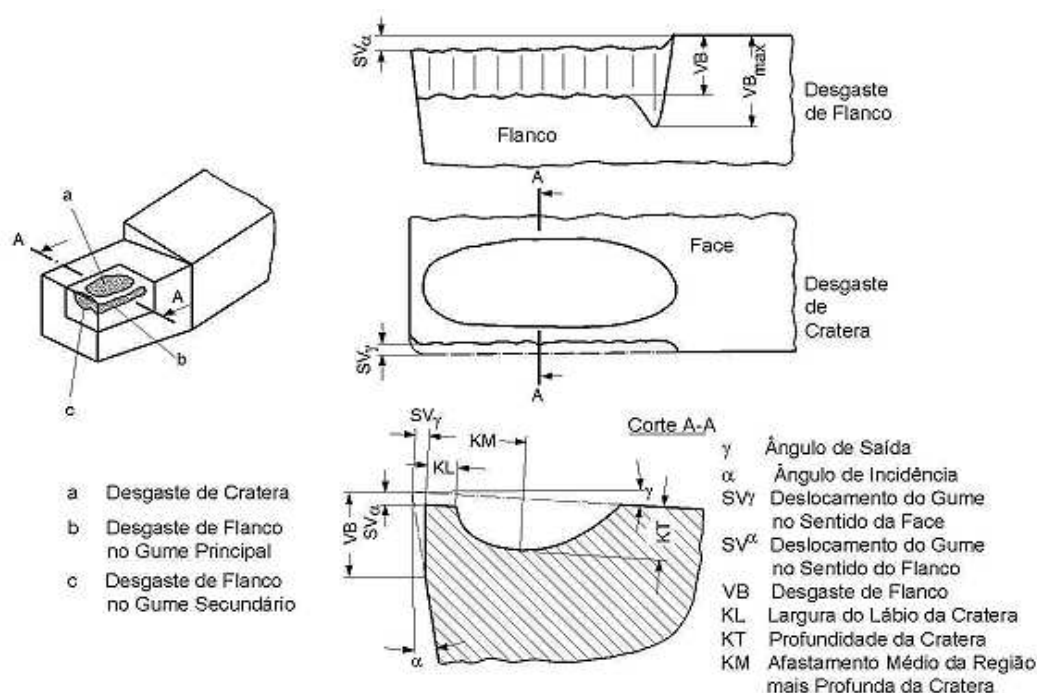


Figura 3.13 - Principais Desgaste em ferramentas de tornear.

Fonte: DE AMORIM (2002).

Como observado na figura 3.13, o desgaste de flanco se apresenta caracteristicamente nas superfícies de folga, atingindo tanto a aresta principal de corte como a secundária, ou ambas. A partir do momento em que atinge a aresta

principal de corte, resulta num aumento das temperaturas e forças envolvidas no corte, podendo causar 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 resulta numa superfície mal acabada e peças fora da especificação por DE AMORIM (2002).

Em condições normais 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 (DINIZ et al., 2006).

Para MACHADO et al., (2009) o desgaste de cratera figura 3.14 – (a) acontece na superfície de saída da ferramenta durante o procedimento de corte, isso ocorre devido ao fluxo de cavaco que produz atrito com a ferramenta na zona de deslizamento. Este tipo de desgaste resulta de uma combinação entre os mecanismos de desgaste por abrasão e por difusão, e ocorre principalmente a altas velocidades de corte, devido às altas temperaturas geradas, o que favorece o mecanismo de desgaste por difusão. Devido à redução da resistência à abrasão causada pela difusão, é favorecido o desgaste abrasivo, sendo então a forma da cratera resultante da distribuição de tensões na superfície de saída da ferramenta. O desgaste assume então a forma de uma cratera alongada com as extremidades arredondadas, paralela à aresta de corte.

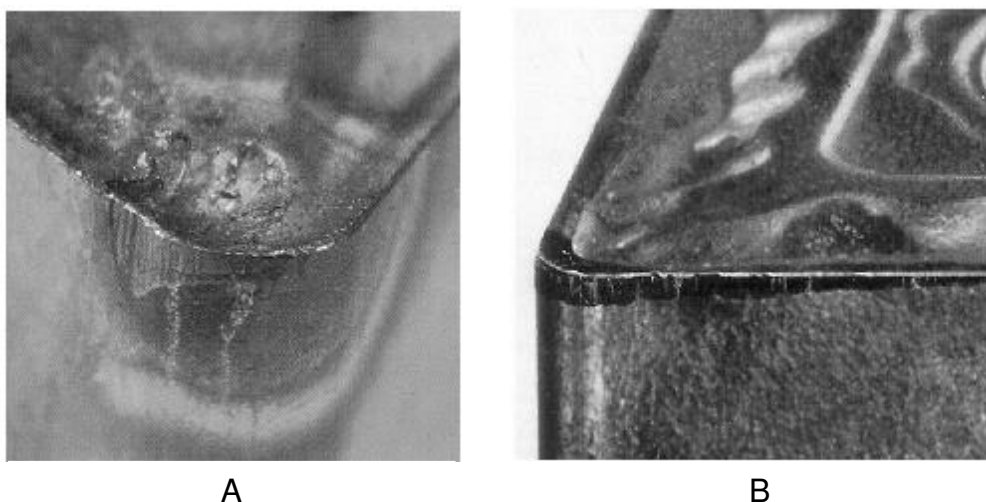


Figura 3.14 - a) Desgaste de cratera e b) Desgaste de flanco.

Fonte: Adaptado de DE SOUZA, (2011)

O desgaste de flanco, visto na figura 3.14- (b), é comum ser mais pronunciado na região onde ocorre o contato com a superfície externa da peça do que nas demais regiões, o que pode ocorrer devido a várias causas, como corte de uma camada de material endurecido pelo passe anterior da ferramenta ou ainda oxidado devido às altas temperaturas, exposição ao ar ou ao fluido de corte.

Este tipo de desgaste é chamado desgaste de entalhe. Apesar de nem sempre afetar o processo de corte, o desgaste de entalhe pode ser bastante prejudicial, pois o entalhe costuma ser relativamente profundo, constituindo uma região de concentração de tensões, que pode levar à quebra da ferramenta na figura 3.15 podemos observar melhor o desgaste de entalhe (DE AMORIM, 2002).

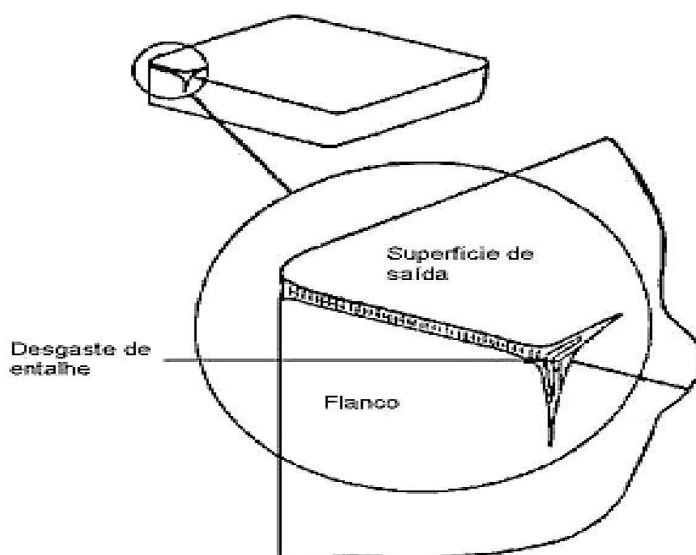


Figura 3.15 - Representação esquemática do desgaste de entalhe.

Fonte: Adaptado de (DE AMORIM, 2002)

3.7.2 Mecanismos de desgaste

Tipos de Danificação do gume devido as diferentes excitações no cunha de corte bem como eventuais mudanças na operação ainda pela alteração nos parâmetros de usinagem como por exemplo a variação da velocidade ou calibração do ângulo de cunha como se observa na figura 3.16, (FERRARESI, 1977):

- Adesão;
- Abrasão mecânica;
- Oxidação;

- Difusão.

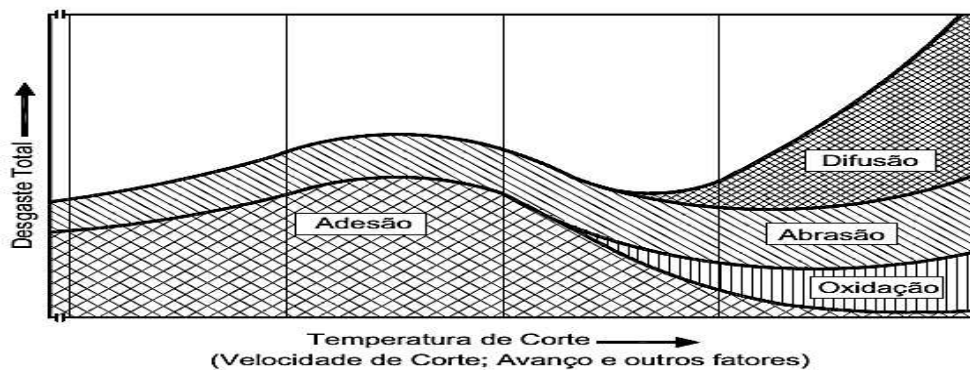


Figura 3.16 - Mecanismos de Desgaste.

Fonte: Adaptado de STOETERAU et al., (2004)

3.7.3 Tipos de avarias

Com relação as avarias a classificação feita por DE SOUZA, (2011) se faz QUADRO (3.1):

- **Deformação Plástica da Aresta de Corte** – é um tipo de avaria da ferramenta devido ao excesso de pressão aplicada à ponta da ferramenta, somado à alta temperatura nesse local. Tais deformações provocam deficiência do controle de cavacos e deterioração do acabamento superficial da peça. O aumento desta deformação pode acabar provocando a quebra da aresta de corte.
- **Lascamento** - ao contrário dos desgastes frontal e de cratera, que retiram continuamente partículas muito pequenas da ferramenta, no lascamento partículas muito maiores são retiradas de uma só vez. Ocorrem principalmente em ferramentas com material frágil e/ou quando a aresta de corte é pouco reforçada. Prejudicam o acabamento superficial da peça e, se continuam crescendo, provocam a quebra da ferramenta.
- **Trincas** – são causadas pela variação da temperatura e/ou pela variação dos esforços mecânicos. Quando as trincas têm origem térmica, elas correm perpendicularmente à aresta de corte e quando têm origem mecânica são

paralelas à aresta. Alguns fatores que geram variação de temperatura ou de esforços mecânicos na usinagem são: corte interrompido, acesso irregular do fluido de corte, variação da espessura do corte e solda da pastilha no porta-ferramentas. Para se evitar a formação de trincas pode-se, dentre outros procedimentos, escolher uma ferramenta mais tenaz, diminuir o avanço por dente e posicionar a fresa mais corretamente em relação à peça (estes dois últimos no processo de fresamento).

- **Quebra** – como foi visto anteriormente, todos os desgastes e avarias da ferramenta ao crescerem podem gerar a quebra da ferramenta. Algumas vezes, porém, a quebra pode ocorrer inesperadamente devido a alguns fatores como: ferramenta muito dura, carga excessiva sobre a ferramenta, raio de ponta, ângulo de ponta ou ângulo de cunha pequeno, corte interrompido, parada instantânea do movimento de corte, entupimento dos canais de expulsão de cavacos ou dos bolsões de armazenamento dos cavacos, etc.. A quebra da ferramenta ocasiona não somente dano na ferramenta, mas também no porta-ferramentas e na própria peça.

Quadro 3.1-Causas e ações para minimização de avarias e desgastes da ferramenta.

Tipos De Desgaste E /Ou Avaria	Possíveis Causas	Ações para Minimizar
Desgaste de flanco	Velocidade de corte muito alta- se a causa for a presença de APC; Resistência ao desgaste insuficiente da Ferramenta; Abrasão; Aresta postiça de corte.	Redução da velocidade de corte; Seleção de classe da ferramenta mais resistente ao desgaste; Aumento da velocidade de corte se o desgaste for causado pela APC.
Desgaste de entalhe	Oxidação.	Seleção de fluido de corte com agentes antioxidantes; Redução da velocidade de corte.
Desgaste de cratera	Difusão.	Seleção de classe de ferramenta que possua cobertura de óxido de alumínio.
Deformação plástica	Altas temperaturas combinadas com altas pressões na região de corte.	Seleção de classe de ferramenta com maior dureza a quente; Redução da velocidade de corte.
Trincas de origem mecânica	Variação excessiva de esforço na aresta de corte	Seleção de classe de ferramenta mais tenaz; Redução de avanço; Suavização do primeiro contato da ferramenta com a peça; Aumento da estabilidade.
Trincas de origem térmica	Excessiva Variação de Temperatura	Seleção de classe de ferramenta mais tenaz; Aplicação de fluido de corte.

Lascamento	Classe da ferramenta muito frágil; Geometria da ferramenta muito fraca; Choque da ferramenta com a peça.	Seleção de classe de ferramenta mais tenaz; Aumento do ângulo de ponta de raio de ponta e /ou do ângulo de cunha (chanframento da aresta); Suavização do primeiro contato da ferramenta com a peça.
------------	--	---

Fonte: Adaptado de DINIZ et al., (2000)

3.8 VELOCIDADE DE USINAGEM

Para DE AMORIM, (2002) cada movimento realizado durante o processo de usinagem é realizado em um determinado intervalo de tempo. Esse deslocamento em um intervalo de tempo resulta em uma velocidade. Sendo a velocidade de corte e velocidade de avanço as velocidades principais

- Maior Efeito sobre a vida da ferramenta que o avanço e a profundidade de corte, sendo de crítica seleção;
- No geral, 50% de aumento na velocidade de corte resulta em 90 % de perda na vida da ferramenta;
- Um aumento na velocidade de corte é o meio menos desejável para se aumentar a produtividade;
- Materiais de corte como metais duros revestidos, cerâmicas, diamante policristalino e CBN têm boas propriedades a altas velocidades de corte;
- Uma alta velocidade de corte pode gerar problemas de vibração, vida de componentes da máquina, produção e segurança;
- Criteriosas considerações devem ser feitas a respeito de aumentos na produção e custo /peça.

3.9 VELOCIDADE DE CORTE

Definido pelo deslocamento da ferramenta diante da peça, considerado no tempo, para operações do tipo aplainamento e brochamento, onde os movimentos de corte e de avanço não ocorrem concomitantemente (DE AMORIM, 2002).

Segundo DINIZ et al., (2006) velocidade tangencial instantânea resultante da rotação da ferramenta em torno da peça, para as operações do tipo torneamento,

fresamento, ou furação, onde os movimentos de corte e de avanço ocorrem concomitantemente. Para estes últimos, a velocidade de corte é calculada por:

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

Onde:

V_c é a velocidade de corte, em m/min;

d é o diâmetro da ferramenta ou da peça, em mm;

n é a velocidade de rotação da ferramenta ou da peça, em RPM.

3.10 VELOCIDADE DE AVANÇO

De acordo com TRENT et al., (2000) “o conhecimento das forças de corte figura. 3.17 é necessário para a estimativa da potência requerida e para o projeto de máquinas operatrizes, suportes e fixação de ferramentas, com rigidez adequada e livres de vibração”. ademais, a força de corte pode ser um importante indicador da usinabilidade, constituindo um parâmetro importante na tomada de decisões sobre o material a ser usado em determinada operação.

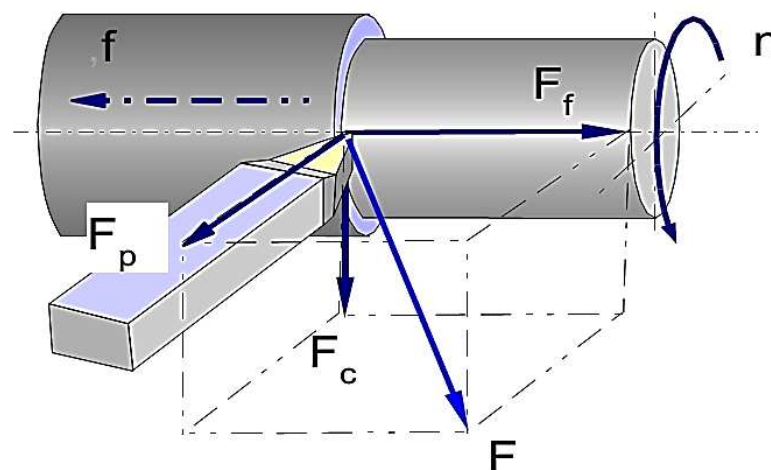


Figura 3.17- Distribuição das Solicitações no processo de torneamento.

Fonte: Adaptado de STOETERAU et al., (2004)

Consoante STOETERAU et al., (2004), as forças de usinagem são consideradas como uma ação da peça sobre a ferramenta. A força total resultante

que atua sobre a cunha cortante durante a usinagem é chamada de força de usinagem (F_u). Como o processo de usinagem é extremamente complexo e cheio de variáveis e condições, não se conhece a direção nem o sentido da força de usinagem, tornando-se impossível medi-la e conhecer melhor as influências de diversos parâmetros no seu valor. Então, não se trabalha com a força de usinagem propriamente, mas com suas componentes segundo diversas direções conhecidas.

De acordo com o exposto no trabalho de TRENT et al., (2000) componentes de F_u - Inicialmente, F_u é decomposta em uma componente que está no plano de trabalho, chamada força ativa (F_t) e uma componente perpendicular ao plano de trabalho, chamada força passiva ou força de profundidade (F_p) figura 3.18.

Componentes da Força Ativa (F_t) – as componentes da força ativa contribuem para a potência de usinagem, pois estão no plano de trabalho, plano em que os movimentos de usinagem são realizados.

- ✓ Força de Corte (F_c) – projeção de F_u sobre a direção de corte;
- ✓ Força de Avanço (F_f) – projeção de F_u sobre a direção de avanço;
- ✓ Força de Apoio (F_{ap}) – projeção de F_u sobre a direção perpendicular à direção de avanço, situada no plano de trabalho;
- ✓ Força Efetiva de Corte (F_e) – projeção de F_u sobre a direção efetiva de corte.

Componente passiva ou de profundidade (F_p) – componente de F_u em um plano perpendicular ao de trabalho. Esta componente não contribui para a potência de usinagem, pois é perpendicular aos movimentos, (TRENT Et al., 2000).

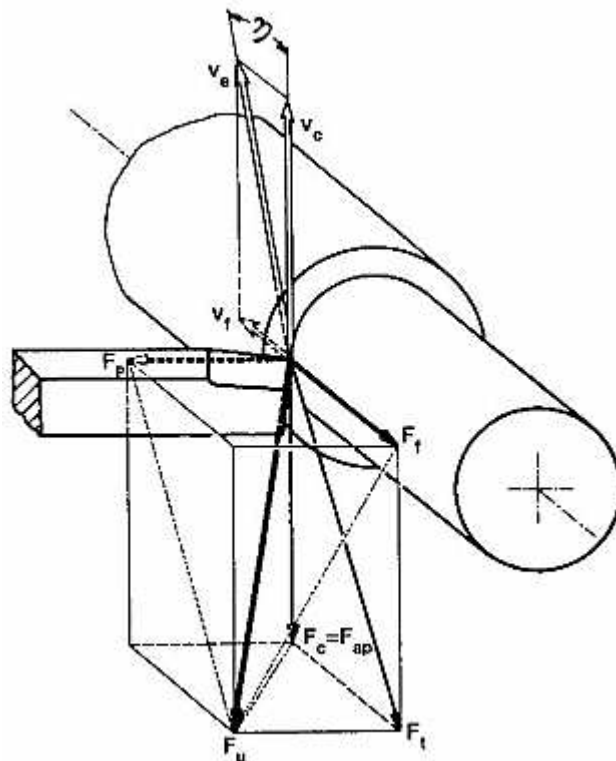


Figura 3.18- Decomposição das Força de usinagem.

Fonte: Adaptado de (Diniz et al., 2000)

A necessidade de se estudar as forças de corte é por que elas são responsável pela deflexão elástica da peça e da ferramenta durante o corte e também é responsável pela dificuldade de obtenção de tolerâncias de forma e dimensão apertadas. sendo assim temos a seguinte relação entre as forças de usinagem, ativa e passiva, (MACHADO et al., 1999):

$$Fu = \sqrt{Fp^2 + Ft^2} \quad (3)$$

Pelos Estudos realizados por CASAGRANDA (2004), Varios fatores podem influenciar no aumento ou na diminuição dos esforços de corte resultante.

- **Material da peça:** a composição química do material tem grande influência sobre os esforços de corte. À medida que aumenta o teor de coarbono, observa-se o crescimento destes esforços, enquanto a adição de elementos de liga como o enxofre, chumbo e bismuto causam a sua diminuição;

- **Material da ferramenta:** a mudança do material da ferramenta gera uma pequena variação no coeficiente de atrito entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta, mas os estudos de Nakayama e Arai mostram, em 1976, que estas variações têm pouco ou nenhum efeito sobre a pressão específica de corte. Uma exceção é quando são utilizadas coberturas de nitreto de titânio, onde a diminuição do coeficiente de atrito entre a ferramenta e a peça é mais significativa, e por isso provoca valores de K_s menores do que o se observa para outros materiais de ferramentas;
- **Geometria da 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. A diminuição do ângulo de folga (α) causa o aumento da força de corte devido ao aumento do atrito ferramenta-peça. Sua influência torna-se inexpressiva para valores maiores que 5° ;
- **Avanço(f):** o aumento do avanço provoca um aumento na velocidade de avanço, diminuindo o atrito, uma vez que o corte se torna mais dinâmico. Além disso, o aumento da velocidade de avanço faz com que o ângulo de saída efetivo da ferramenta aumente, causando a redução de K_s . A força de corte cresce com o aumento do avanço, devido ao aumento da área da seção de corte. Deste modo, o aumento imposto ao avanço resulta em um crescimento não-linear da força de corte;
- **Velocidade de corte(V_c):** para materiais dúcteis operando com baixas velocidades de corte, é comum ocorrer o fenômeno de formação da Aresta Postiça de Corte (APC). Com a formação da APC, a pressão específica de corte tende a diminuir, já que a APC proporciona um ângulo de saída maior que o da ferramenta. DINIZ et al., (2006) recomenda que se trabalhe com velocidades de corte mais elevadas (acima de 150m/min) para evitar a formação da APC, fazendo com que a variação do K_s com a V_c não seja tão acentuada. Estas velocidades de corte, porém, estão fora da faixa de trabalho recomendada para a usinagem de aços inoxidáveis austeníticos com ferramentas de aço rápido;

- **Profundidade de usinagem(ap):** o aumento da profundidade de usinagem causa um aumento na força de corte na mesma proporção, porém não afeta a pressão específica de corte;
- **Lubrificação e refrigeração:** os fluidos de corte podem atuar de duas maneiras em relação a usinabilidade. Se a principal função do fluido é a lubrificação, ele irá melhorar a usinabilidade do material, diminuindo o atrito entre o cavaco e a ferramenta e consequentemente os esforços de corte. Quando a principal função do fluido é a refrigeração, ele irá piorar a usinabilidade, pois resfriará o material, encruando o mesmo e aumentando os esforços necessários para se efetuar o corte;
- **Estado de afiação da ferramenta:** à medida que a ferramenta é utilizada surgem alguns tipos de desgaste. Um desgaste muito comum é o desgaste de flanco. com o aumento do desgaste de flanco ocorre um aumento nos esforços de corte devido ao maior atrito entre a peça e a ferramenta.

3.11 FLUIDO DE CORTE

As principais funções dos fluidos de corte foram listadas a partir das pesquisas de REIS et al., (2007) e STOETERAU et al., (2004):

- Lubrificar;
- Redução do atrito entre ferramenta e cavaco como observado na figura 3.20;
- Refrigeração da ferramenta;
- Refrigeração da peça;
- Expulsão dos cavacos gerados;
- Melhoria no acabamento superficial;
- Refrigeração da máquina-ferramenta;
- Melhorias de caráter econômico;
- Prevenção contra a soldagem cavaco-ferramenta;
- Proteção contra a corrosão;
- Redução da dilatação (distorção) térmica da peça;

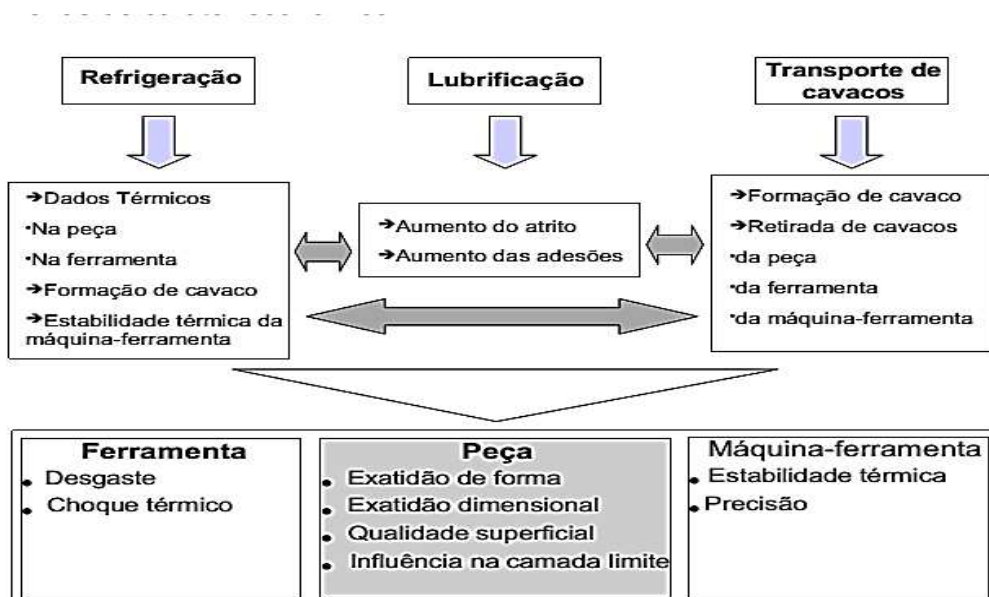


Figura 3.19 - Funções do fluido de corte.

Fonte: Adaptado de WEINGAERTHER et al., (2003)

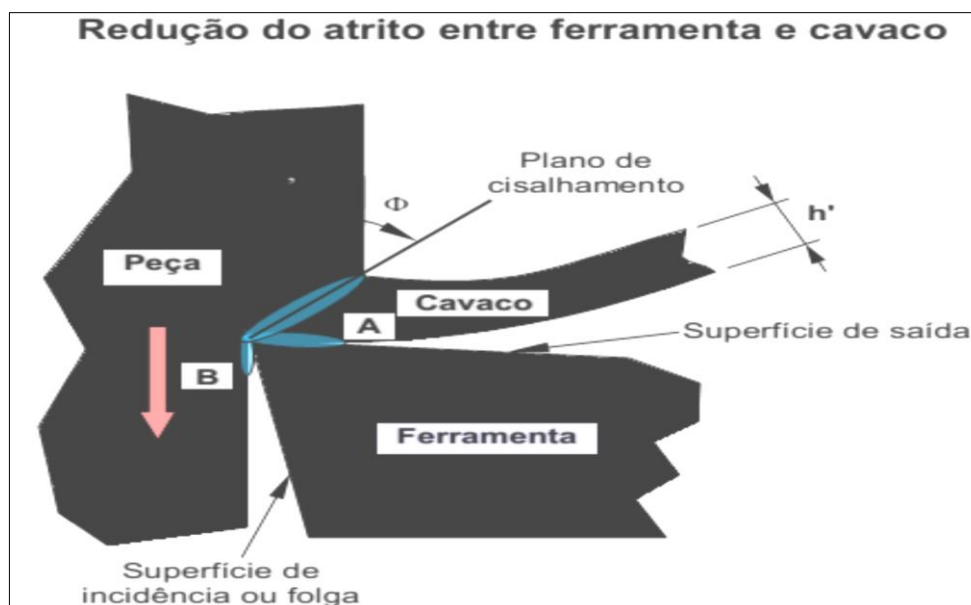


Figura 3.20 - Redução do atrito entre a ferramenta e cavaco.

Fonte: Adaptado de (REIS et al., 2007)

Análise da figura 3.20 pela imagem pode ser observar um esquema de formação de cavaco onde é feita uma análise dos fluidos de cortes nas zonas onde o refrigerante é aplicado (WEINGAERTHER et al., 2003):

- Zona A – Superfície do cavaco, deformações devidas ao esforço , diminuição do atrito na interface ferramenta-cavaco (diminuição do calor gerado);
- Zona B – Superfície de corte, diminuição do atrito na interface peça-ferramenta (diminuição do calor gerado);
- Zona C - diminuição do atrito entre a ferramenta e o cavaco (aumento do ângulo de cisalhamento ϕ , diminuição de na taxa de deformação $\dot{\epsilon}$ e 0).
- Redução de deformações devidas às tensões oriundas de grandes aquecimentos locais ou mesmo totais;
- Eliminação de cores de revenido na superfície usinada (usinagem por abrasão, retirada de material por atrito), operações de retificação - acabamento da peça;
- Manutenção das medidas da peça em trabalho em operações com tolerâncias estreitas;
- Facilidade para o manuseio da peça usinada.

3.11.1 O Fluido de corte como refrigerante

De acordo STOETERAU et al., (2004) os requisitos que um fluido de corte deve possuir para retirar eficientemente o calor da região de corte, da peça e da ferramenta, são:

- ✓ Baixa Viscosidade a fim de que flua facilmente;
- ✓ Capacidade de "molhar" bem o material para estabelecer um bom contato térmico;
- ✓ Alto calor específico e alta condutividade térmica.

Algumas vezes, o material da ferramenta é extremamente resistente ao desgaste e não necessita de fluido de corte para que nenhum dano possa ser causado à peça.

3.11.2 O Fluido de corte como lubrificante

Com a lubrificação se permite, no corte, uma redução do coeficiente de atrito entre cavaco e ferramenta e ferramenta e peça, que facilita o fluxo de cavaco, reduzindo a força e a potência de corte, bem como a temperatura. Então, para que

um fluido seja bom lubrificante é necessário que ele possua as seguintes características estabelecidas por MACHADO et al., (1999):

- Resistir a pressões e temperaturas elevadas sem vaporizar;
- Boas propriedades antifricção e antisoldantes;
- Viscosidade adequada – a viscosidade deve ser suficientemente baixa para permitir uma fácil circulação do fluido e suficientemente alta de modo a permitir uma boa aderência do fluido às superfícies da ferramenta;
- Além destas propriedades necessárias para refrigeração e lubrificação, outras propriedades também são exigidas de um fluido de corte, quais sejam;
- Ausência de odores desagradáveis;
- Não corroer, mas, pelo contrário, ter a capacidade de proteger a peça e a máquina dos efeitos da corrosão;
- Isenção da tendência a originar precipitados sólidos que depositam nas guias da máquina e/ou entopem os tubos de circulação do fluido de corte;
- Não causar dano à pele humana e nenhum outro risco à saúde.

3.11.3 Classificação dos fluidos de corte

Os diversos fluidos de corte podem ser classificados da seguinte maneira, DE SOUZA (2011) e DA SILVA (2008):

- Ar;
- Tipos Aquosos:
 - Água;
 - Emulsões.
- Óleos:
 - Óleos minerais;
 - Óleos graxos;
 - Óleos compostos;
 - Óleos de extrema pressão.

3.11.4 Métodos de aplicação dos fluidos de corte

Segundo (DE SOUZA, 2011) as direções definidas para a aplicação dos fluidos lubrificantes e refrigerantes figura 3.21 são: sobre cabeça (A); entre a

superfície inferior do cavaco e a superfície de saída da ferramenta (B); entre a peça e a superfície de folga da ferramenta (C).

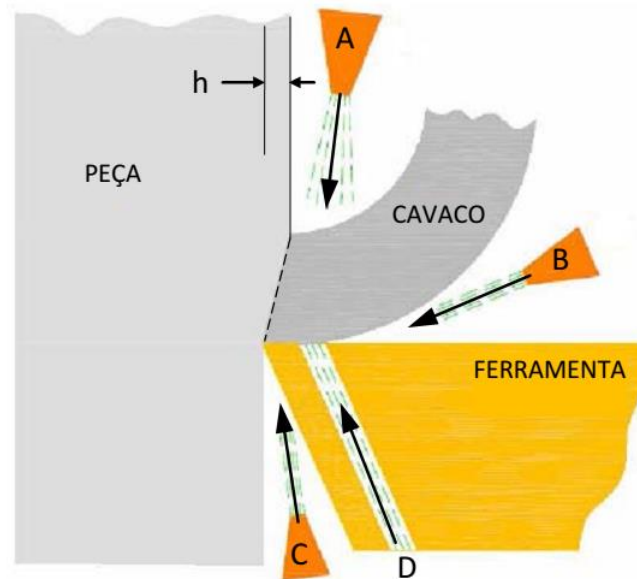


Figura 3.21 Direções possíveis de aplicação do fluido lubrificante

Fonte: (DE SOUZA, 2011)

As formas de aplicação dos fluidos de corte mais utilizadas atualmente são as seguintes (DE SOUZA, 2011):

- I. Jorro do fluido à baixa pressão, ou por gravidade;
- II. Vazão extremamente baixa de fluido;
- III. Sistema a alta pressão.

3.12 ESTUDO DE USINABILIDADE

Para (STOETERAU et al., 2004) usinabilidade é a capacidade dos materiais de se deixarem trabalhar com ferramentas de corte:

- Materiais diferentes têm comportamento diferente;
- Ligas de mesmo material também podem ter comportamentos diferentes.

CASAGRANDA (2004) buscou uma fundamentação com os estudos de FERRARESI (1977) para usar uma definição mais sólida e sistemática, sendo: a usinabilidade pode ser definida como uma grandeza tecnológica que expressa um

conjunto de propriedades de usinagem de um material em comparação a outro tomado como padrão.

Alguns materiais podem ser adicionados como elementos de liga em aços, com a função de melhorar alguma característica de usinagem destes. Estes materiais são chamados aditivos de corte fácil. A adição de enxofre é bastante empregada na fabricação de aços com usinabilidade melhoradas. O enxofre combina-se com o manganês formando sulfeto de manganês (MnS), que atua na usinabilidade do material diminuindo os esforços através de três mecanismos, (STEMMER, 1995):

- Ocorrência de uma camada de MnS, que adere á superfície de saída da ferramenta, reduzindo as forças de corte através da redução do atrito entre cavaco e ferramenta;
- Aumento na vida da ferramenta, através da proteção oferecida á aresta de corte e á superfície de saída pela camada de MnS, que diminui os desgastes por abrasão e difusão;
- Redução das forças de corte através da diminuição da resistência ao cisalhamento do material.

Para aços alto carbono, por exemplo, é comum se fazer um tratamento de coalescimento (ou esferoidização) para facilitar a usinabilidade. Para aços dúcteis, como o AISI 303, é comum um encruamento prévio para evitar que o material do aço adira à ferramenta de corte, formando a aresta postiça de corte, e encrue durante a usinagem, (MACHADO et al., 1999).

3.12.1 Importancia e aplicação dos aços inoxidáveis

Para (Coutinho,1992) os aços inoxidáveis são elementos que em sua estrutura possuem um teor igual ou superior a 12 % de Cromo "Cr", sendo eles classificados em 4 (quatro) Grupos:

- Aços Inoxidáveis Martensíticos, com 12% - 17% Cr e 0,1% -1,0 % C;
- Aços inox de transformação controlada, com 14% - 17%Cr e um certo teor de Ni;

- Aços inox ferríticos, com 15% - 30 %Cr, baixo C, sem Ni e com eventuais adições de Mo, Nb e Ti;
- Aços inox austeníticos, com 18% - 25%Cr, 8% - 20 %Ni e baixo C.

A usinabilidade dos aços inoxidáveis varia dependendo dos elementos de liga, tratamento térmico e processo de fabricação (Forjamento, Fundido etc.) em geral a usinabilidade diminui com um alto teor de liga mais alto (COUTINHO, 1992).

A aplicação dos aços Inoxidáveis é bastante variada, sendo usados em materiais de construção, indústria mecânica, indústria química, petroquímica, aeronáutica, indústria de vidro, nas destilarias de álcool, etc. Sua propriedade anticorrosiva deve-se a formação de uma camada aderente passivada de 30 a 50 angstroms de óxido de cromo, impermeável, de boa plasticidade com baixa volatilidade e solubilidade (COSTA, 2012).

3.12.2 Principais grupos que influenciam a usinabilidade

Para DE SOUZA (2011) foram listados á baixo em grupos, de I a V, as principais variáveis que influenciam a usinabilidade:

I. Variáveis dependentes da máquina-ferramenta:

- Rigidez estática da máquina e seus constituintes;
- Características dinâmicas da máquina;
- Potência e força disponíveis na ponta da ferramenta;
- Gama de velocidade de corte e avanço.

II. Variáveis dependentes da ferramenta:

- Geometria da ferramenta;
- Material da ferramenta;

III. Variáveis dependentes da peça:

- Formas e dimensão;
- Rigidez estática da peça;
- Rigidez dinâmica da peça;
- Propriedade físicas, químicas e mecânicas do material peça;

- Temperatura da peça.

IV. Variáveis dependentes do fluido de corte:

- Propriedades refrigerantes;
- Propriedades lubrificantes;
- Temperatura do fluido;
- Forma e intensidade de aplicação;
- Nível de contaminação do fluido;

V. Variáveis dependentes do processo:

- Velocidade de corte;
- Parâmetros do processo(ap,f,etc.);
- Forma de atuação da ferramenta na peça(ex.:corte interrompido, corte contínuo, forma de entrada e saída da ferramenta, etc.)

3.12.3 Principais problemas decorrentes da má usinabilidade

Considerando as variáveis peça e máquina-ferramenta nos ensaios de usinabilidades, pelos trabalhos de WEINGAERTHER et al., (2003) e em função dos critérios de avaliação adotados podemos citar, abaixo algumas consequências da má usinabilidade:

- Desgaste rápido;
- Super aquecimento da ferramenta;
- Lascamento no gume de corte;
- Comprometimento da qualidade superficial;
- Necessidade de grande potência de usinagem;
- Grandes esforços de usinagem.

3.12.4 Efeitos das propriedades físicas na usinabilidade

As propriedades que afetam a usinabilidade são várias como por exemplo de grandezas micro e macroscópicas podemos citar Algumas propriedades que afetam a usinabilidade dos materiais, (DE AMORIM, 2002), são:

Dureza e resistência mecânica - em altos valores, estas propriedades diminuem a usinabilidade dos materiais, por oferecer demasiada resistência ao processo de corte. Em valores muito baixos, porém, causam a diminuição da usinabilidade devido ao favorecimento à formação de APC a baixas velocidades de corte, e porque o material tende a deformar muito antes de romper, aumentando a área de contato cavaco- ferramenta, o que causa um aumento nas forças de corte devido ao maior atrito na superfície de saída. Logo, deve-se tomar cuidado quanto à dureza do material, de modo a, sempre que possível, usar materiais com durezas intermediárias. Os autores DINIZ et al., (2000) sugerem um valor médio de dureza próximo a 200 HB como um ponto a partir do qual a variação da dureza, tanto para cima quanto para baixo, afeta de forma negativa um ou mais critérios de usinabilidade.

- **Condutividade Térmica** - atua de duas maneiras sobre o material: se este possui uma alta condutividade térmica, o calor gerado no corte é retirado rapidamente da interface peça ferramenta, de modo que a ferramenta não seja superaquecida, o que diminui seu desgaste. Por outro lado, materiais com baixa condutividade térmica tendem a apresentar altas temperaturas na interface cavaco - ferramenta, causando uma redução na resistência ao cisalhamento do material da peça, facilitando seu corte (DINIZ et al., 2006). Então, uma alta condutividade térmica favorece a usinabilidade do material. Dentre os tipos de materiais mais usinados, os que têm maior condutividade térmica é o alumínio, seguidos pelos aços sem liga, aços ligados e aços inoxidáveis.

3.12.5 Ensaio de usinabilidade

Os ensaios de usinabilidade são divididos em duas categorias básicas: que são ensaios que requerem usinagem e ensaios que não requerem usinagem, com subdivisões entre estas categorias, (figura 3.22), (MACHADO et al., 1999):

- Ensaios que requerem usinagem : faz distinção entre os testes relativos (ranking testes), que indicam a usinabilidade relativa entre dois ou mais pares ferramentas- peça para condições específicas de corte, e os testes absolutos,

que indicam os méritos de dois ou mais pares ferramenta- peça para uma dada faixa de condições de corte;

- Ensaios que não requerem usinagem: são sempre ranking testes.

Esses dois tipos de ensaios de usinagem ainda podem ser classificados quanto ao tempo de duração do teste:

- Curta duração: sempre realizados com o ranking testes;
- Longa duração: na maioria das vezes, (quase sempre), são realizados com os testes absolutos.

Os Ranking Testes e os Testes Absolutos foram bem definidos no trabalho de DE AMORIM, (2002):

- Os Rankings Testes, ou testes classificatórios, são aqueles que meramente indicam a usinabilidade relativa de duas ou mais combinações de pares ferramenta-peça, para uma condição de corte definida.
- Os Testes Absolutos são aqueles que indicam os méritos relativos de duas ou mais combinações de pares ferramenta-peça para uma faixa de condição de corte definida.

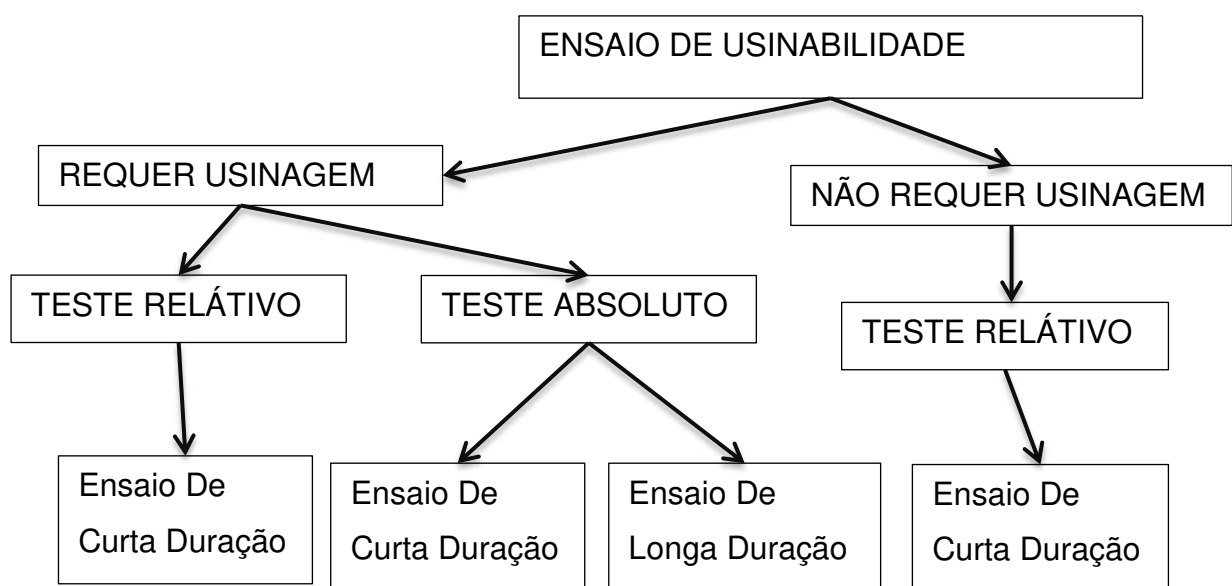


Figura 3.22 - Classificação dos ensaios de usinabilidade.

Fonte: Adaptado de MILLS et al.,(1983)

Segundo DINIZ et al., (2006) os Ranking Testes ou testes relativos são muito usados, especialmente na indústria, onde se fazem necessárias decisões rápidas. Porém, estes testes apresentam duas grandes desvantagens, a saber:

- I. Pode-se verificar através de um ensaio, que um material "A" se comporta melhor que um material "B", que por sua vez se comporta melhor do que um material "C". Porém, não há como saber quão melhor este material "A" é do que o material "B" ou "C", pois a medida de usinabilidade não foi relacionada com alguma escala previsível.
- II. Uma vez que os testes relativos têm o objetivo de comparar a usinabilidade dos materiais para determinada condição de corte, não há garantia de que a classificação permanecerá igual no caso de alguma condição de corte ser alterada.

Já os testes absolutos costumam abranger grandes amplitudes de velocidades de corte e, em alguns casos abrange também outras variáveis envolvidas, como avanço, profundidade de corte e geometria de ferramenta, (DINIZ, et al., 2006).

Como este trabalho tem um ensaio de usinabilidade definido para estudo, não se prolongará sobre os ensaios de usinabilidade que requerem usinagem.

3.12.6 Tipos de ensaios de usinabilidade

Os ensaios que não requerem usinagem são sempre os Ranking Testes e de curta duração, sendo de mais fácil execução do que os ensaios que requeiram usinagem, sejam estes relativos ou não. Estes ensaios são bastante úteis no sentido de prover uma resposta rápida à necessidade do projetista de componentes ou mesmo como um embasamento no desenvolvimento de novos materiais, (IAMS, 1980).

Alguns ensaios de usinabilidade são (serão apenas citados):

- Teste de composição química: proposto por CZAPLICKI, (1962), citado por MILLS et al. (1983); indica que ao se conhecer a composição química do

material, pode-se relacioná-la a medida de usinabilidade, BOULGER, et al., (1951) encontrou:

$$\text{Índice de Usinabilidade} = 146 - 400\%C - 1500\%Si + 200\%S \quad (4)$$

- Teste de microestrutura: Proposta por ZLATIN (1950), citado por MILLS et al., (1983); analisa-se a usinabilidade através da microestrutura e relacionando dureza e velocidade;
- Teste de pressão constante (F_f): proposto por BOULGER et al., (1951), citado por MILLS et al., (1983); é um teste de curta duração, mais usado no processo de furação devido à facilidade, consiste em aplicar uma força de avanço, (F_f), constante e medir o tempo para se furar uma chapa de espessura fixa e padrão, ou fixar um determinado tempo e medir o percurso de avanço;
- Teste de faceamento rápido: proposto por KRAUS et al., (1937) e LORENZ (1970), citado por MILLS et al., (1983); é muito prático e de curta duração, consiste em fazer um disco do centro para a periferia, normalmente com ferramenta de aço rápido. Dessa maneira, a velocidade vai aumentando constantemente, até atingir o ponto crítico onde promove o colapso da ferramenta, esse colapso é facilmente observado na superfície usinada da peça. A medida de usinagem pode ser o tempo para a falha da ferramenta, ou se pode adotar o percurso de avanço até atingir a falha;
- Teste de torneamento cônico proposto por HEGINBOTHAM et al., (1966), citado por MILLS et al., (1983); é considerado teste Absoluto, porém é de curta duração. Utiliza-se uma ferramenta de perfil cônico para ser usada em torneamento, iniciando no diâmetro menor para o maior do cone. Este procedimento permite um aumento progressivo da velocidade de corte, acelerando, dessa forma, o fim de vida da ferramenta;
- Teste de propriedade física: leva em considerações propriedades físicas e mecânicas para aplicação da equação geral da usinabilidade, será discutido e aprofundado a seguir;
- Teste de rosqueamento: não exatamente um ensaio de curta duração, apesar de assim classificado, este tipo de ensaio é bastante interessante por focar

não o material da peça ou da ferramenta de corte, mas o fluido de corte usado.

3.13 TESTE DE PROPRIEDADE FÍSICA

O teste de propriedade física é classificado como um teste de curta duração ou seja um Ranking teste, a técnica elaborada por HENKIN (1962) como vamos ver adiante adota algumas propriedades mecânicas e físicas, no entanto outros autores relacionaram propriedades mecânicas isoladas para estabelecer seus próprios índices de usinabilidade. O efeito da razão entre a resistência ao escoamento e a resistência à tração foi examinada por JANITZKY (1938) na relação da razão entre a resistência ao escoamento e a resistência à tração, entretanto não foi encontrada pesquisa para ter validade geral.

A linha de pesquisa de DRUCKER (1950) e outros autores relacionaram a resistência de escoamento e de tração com o que se configurou estresse de inércia. no entanto ao descobrirem que as forças de inércia em nada influenciavam na velocidade de usinagem, abandonaram essa linha de pesquisa.

Para finalizar a análise dos grupos adimensionais que estão incluídos é necessário mostrar que outros grupos foram considerados, alguns deles básicos ou multiplicação de outros, no entanto fisicamente não poderiam ser determinados, e experimentalmente que não forneceu a compilação desejada (HENKIN, 1962).

Logo o primeiro grupo verificado é o número térmico cuja importância foi reconhecida por BISACRE et al.; CHAO (1947) e posterior por outros. O número térmico foi determinado como a razão entre o tempo de trânsito ao longo do tempo de relaxamento. Mais notadamente, para o corte de metal gerado na interface cavaco ferramenta a sua capacidade de gerar ou não super aquecimento naquela região se ela é capaz nessa lógica de impedir danos maiores a operação, ao custo e a peça.

No segundo grupo se analisa a redução de área analisada a partir de ensaios de tração convencionais cujo foco é a elaboração das propriedades mecânicas correlacionadas ou seja, quanto maior for a ductilidade, mantendo todas as outras variáveis constantes, maior será a redução de área. O terceiro grupo poderia representar um aumento de temperatura, se todo o calor é levado com o chip, e absolutamente nenhuma é conduzido para fora. O quarto grupo (w/t), em que

W é a largura e a espessura t, representa a geometria do corte e não necessita de qualquer posterior elaboração (HENKIN, 1962).

Notadamente através de experimentos sobre todos os materiais estudados no trabalho de HENKIN (1962), bem como alguns dados adicionais encontrados na literatura indica que a temperatura de trabalho é cerca de 1000°F para uma vida útil de 60 minutos. Esta relação permite pela primeira vez e por meio de cálculos simples, ordenar e providenciar os materiais e prever a sua usinabilidade, com base em três das suas propriedades físicas: condutividade térmica K, redução da área Ar e dureza Brinell de Hb. A constante A é calculado forma as diversas unidades padrões utilizadas.

A descrição matemática desenvolvida por HENKIN et al., (1963), citados por MILLS et al., (1983) associa propriedades como comprimento característico (L), dureza Brinell (HB) do material, condutividade térmica (B) e redução percentual de área obtida em ensaio de tração (Ar) com a V60 de um material, equação (5). Em relação a outras compilações de ensaio de propriedades físicas pode apresentar erros significativos uma vez que não é feita uma ponderação dos materiais empregados na ferramenta de corte.

$$V_{c60} = \frac{B}{L \cdot HB} \sqrt{1 - \frac{Ar}{100}} \quad (5)$$

Onde:

HB= dureza brinell do material;

L= um comprimento caracteristico;

B= condutividade térmica do material;

Ar= redução de área obida em ensaio de tração convencionana.

Como mencionado anteriormente JANITZKI (1944) citado por MILLS et al., (1983). relacionou propriedades físicas com a Vc60 e obteve bons resultados baseado na equação(6).

$$V_{c60} = \frac{D}{Ar \cdot HB} \quad (6)$$

Onde:

D é uma constante dependente das dimensões de corte;
Ar e HB já foram citados na equação (5).

3.14 CONSIDERAÇÕES SOBRE EQUAÇÃO GERAL DE USINABILIDADE

O trabalho desenvolvido pela equação de usinabilidade envolve os parâmetros de dureza, resistência mecânica bem como condutividade térmica e outros que nesse trabalho serão apenas mencionado. Abaixo como é exposto no trabalho de HENKIN (1962) enumerou:

- Uma relação funcional foi desenvolvida entre as propriedades físicas, mecânicas e usinabilidade;
- Todas as propriedades do material são analisadas a baixo da temperatura crítica;
- A dureza Brinell e diminuição da área foram encontradas para descrever adequadamente o efeito das propriedades mecânicas da usinabilidade;
- A condutividade térmica foi encontrada para descrever adequadamente o efeito das propriedades térmicas da usinabilidade;
- Os valores de usinabilidade previstos não são mais precisos do que as propriedades que são usadas para calculá-los. O valor medido da redução de área pode variar de um para outro espécime do mesmo material por 50% ou mais;
- O material não deve ter qualquer temperatura de transição crítica abaixo de 1000 ° F. Se isso acontecer, é necessário voltar para a primeira relação básica e selecionar diferentes temperaturas e propriedades associadas a eles.

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 METODOLOGIA

Depois da elaboração do tema " Estudo da usinabilidade dos aços inoxidáveis a partir dos parâmetros de corte: uma avaliação com base nas propriedades físicas" partimos agora para o ensaio de usinabilidade tendo como base os estudos proposto por (Henkin,1962) citado por (Oliveira, 2014) para podermos relacionar os tipos de propriedades físicas necessárias para a elaboração do ensaio. Vamos utilizar para o ensaio a equação geral de usinabilidade (5) abaixo:

$$V_{c60} = \frac{B}{L \cdot HB} \sqrt[2]{1 - \frac{Ar}{100}}$$

Logo, partindo da equação (5), como já foi mencionado antes, no QUADRO 4.1, são feitas considerações a respeito das unidades.

Quadro 4.1 – Unidades utilizadas na equação de usinabilidade

Variável	Unidade
L	Ft
B	Btu/h.ff°F
HB	Kgf/mm ²
Ar	-

Fonte: Adaptado de HENKIN (1962)

Dessa forma, montou-se uma base de dados para comparar valores das propriedades físicas dos metais selecionados, buscando garantir a veracidade e integridade das informações coletadas. Para isso, analisaram-se diversos relatórios de ensaios de tração, monografias, dissertações, teses e livros. Para com isso conseguir realizar os ensaios de acordo com a proposta de HENKIN (1962).

4.2 MATERIAL ENSAIADO

A escolha dos aços inoxidáveis, alvo desse projeto se deve a sua larga amplitude de aplicação na engenharia. Para (COUTINHO, 1992), os aços inoxidáveis são classificados em ferríticos, martensítico e austeníticos são materiais de grande utilidade na indústria e são muito aplicados em equipamentos de processo, devido às suas excelentes propriedades químicas como alta resistência a

corrosão e resistência a temperaturas elevadas, no entanto são materiais de difícil usinabilidade.

Após uma pesquisa massiva na literatura pelos materiais que se identificam nas propriedades propostas pela equação (5) foram determinados 6 (seis) tipos de aços inoxidáveis para a realização do ensaio.

O livro “*ASM Metals Handbook Desk Edition 2001*” foi a referência de maior influência para coleta de dados. A partir da base de dados formado, foram selecionados os aços inoxidáveis que se encontram no QUADRO 4.2:

Quadro 4.2 - Aços Inoxidáveis (recozido) / classe AISI-SAE

Ferrítico	Martensítico	Austenítico
430	431	303
442	414	304

Fonte: (ASM, 2001).

As propriedades físicas dos metais, condutividade térmica e dureza, são muito influenciadas pela variação de temperatura, na tabela 4.1, são ilustrados os valores de condutividade para uma temperatura de 300 °F a partir de um cálculo de interpolação dos dados encontrados nas temperaturas de 212°F e 392°F.

Tabela 4.1- Distribuição das condutividades térmicas (w/m.k) nas temperaturas dos aços inoxidáveis (recozido) classe AISI-SAE

Aço	212 °F	392 °F	300 °F
430	26,1	27,3	26,69
442	20,1	26,5	23,23
431	20,2	27,65	23,84
414	24,9	25,86	25,37
303	16,2	25,79	20,89
304	16,2	21,5	18,79

Fonte: (ASM, 2001). Os valores de condutividade térmica foram encontrados em ASM HANDBOOK (1990) e ASM HANDBOOK (1993).

A partir do momento que foi determinada uma temperatura para estudo e execução do ensaio de usinabilidade e determinado os valores de condutividade térmica, tornou-se possível a montagem da tabela 4.4 com os valores padrões de estudo das propriedades mecânicas e físicas.

Tabela 4.2- Propriedades mecânicas de aços inoxidáveis (recozido) Classe AISI-SAE

Aço	R.T. (Mpa)	R. E. (Mpa)	A. 50 mm (2pol.)(%)	R.A. (%)	Dureza (HB)	C.T. (W/m.K)
430	517	310	30	65	155	26,69
442	515	310	30	50	100	23,23
431	860	655	20	55	260	23,84
414	795	620	20	60	235	25,37
303	620	240	50	55	160	20,89
304	585	235	60	70	149	18,79
R.T.= Resistência à tração; R.E.= Resistência ao escoamento; A.= Alongamento; R.A. = Redução de área; C.T.= Condutividade térmica.						

Fonte: (ASM, 2001), ASM HANDBOOK (1990) e ASM HANDBOOK (1993).

Logo a variável comprimento é a única propriedade a ser determinada para a realização do ensaio de usinabilidade proposto, pela formula (5), o QUADRO 4.5 mostra as propriedade e unidades para realização do cálculo do comprimento (L), Segundo HENKIN (1962), é dado pela equação (7):

$$q = w^{1-a} \cdot t^a \quad (7)$$

Quadro 4.3 – Propriedades e unidades do comprimento característico

Variável	Descrição	Unidade
a	= Constante;	-
w	= largura de corte;	Ft
t	= profundidade de corte;	Ft
q	= comprimento característico (L).	Ft

Fonte: Adaptado de HENKIN (1962).

Nota: O valor de área é desprezível, “q” é dado em uma só dimensão.

Para se estabelecer o valor de “a” devemos interpretar a tabela 4.6 estudado por Henkin, em que leva em consideração os parâmetros de corte adotado largura de corte “w” e profundidade de corte “t”.

Tabela 4.3- Relação entre geometria de corte e comprimento característico

$\frac{t}{w}$	a	q
0	1	t
0,15	$\frac{2}{3}$	$w^{\frac{1}{3}}, t^{\frac{2}{3}}$
1	$\frac{1}{2}$	$w^{\frac{1}{2}}, t^{\frac{1}{2}}$

Fonte: (HENKIN, 1962)

Para o estudo em questão é adotado as pesquisas de Henkin (1962) citado por Oliveira (2014), como os parâmetros adotados: $w = 0,004167$ ft e $t = 0,000475$ ft. A equação (8) indica a relação de geometria de corte.

$$\frac{t}{w} \quad (8)$$

Dessa maneira, substituímos “w” e “t” para encontrarmos por consulta na Tabela 4.6 o valor para constante “a”.

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

Logo, com base nas evidências experimentais estudadas por HENKIN (1962) citado por Oliveira (2014) e na tabela 4.3 apresentado para um intervalo de $0,1 \leq t/w \leq 0,2$, $a = 2/3$.

Cálculo para se determinar o comprimento Característico “q” Substituem-se os valores de “w” e “t” na equação (7),

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

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

Logo :

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

Dessa maneira, como os parâmetros de corte serão os mesmos para todos os materiais selecionados para este ensaio, o comprimento característico será igual para todos.

4.3 PROCESSAMENTO DE DADOS

A condução do ensaios foi realizado no software de procesamento de dados com as compilações a partir das necessidades de várias repetições de cálculos, além de uma organização e otimização da planilha, facilitando a entrada de dados e a obtenção de resultados.

4.4 DECLARAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE ENTRADA

Para efeito de simulação se teve todos os parâmetros de corte constante tomando como ponto de partida e análise propriedades isoladas sendo elas a condutividade térmica e em seguida a dureza. Com aços inoxidáveis selecionados, o comprimento característico (L), a redução de área (Ar), a dureza (HB) e condutividade térmica (B) nossas variáveis de entrada, conforme as tabela 4.4, vamos então nos preparar para posterior compilação no software.

Tabela 4.4- Dados de entrada de aços inoxidáveis (recozido) Classe AISI-SAE

Aço	Comprimento característico (ft)	Redução de área (%)	Dureza (HB)	Condutividade Térmica (Btu/h.ft.°F)
430	0,00087	65,00	155,00	15,42
442	0,00087	50,00	100,00	13,42
431	0,00087	55,00	260,00	13,78
414	0,00087	60,00	235,00	14,66
303	0,00087	55,00	160,00	12,07
304	0,00087	70,00	149,00	10,86

Fonte: (ASM, 2001), ASM HANDBOOK (1990) e ASM HANDBOOK (1993).

4.5 ANÁLISE DIMENSIONAL E CONVERÇÃO DE UNIDADES

Com a equação geral de usinabilidade proposta por HENKIN (1962) citado por OLIVEIRA (2014), pôde-se estudar diversos materiais adotando inúmeros parâmetros de usinagem, a equação (5) resulta em um valor de velocidade de usinagem. Este trabalho apresentará resultados em ft/min (a fim de comparar com os ensaios e estudos de HENKIN (1962)) e em m/min para uma velocidade V_{C60} .

Assim temos,

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

Como já foi comentado que Ar é adimensional, pois é uma razão entre áreas ainda se fosse considerada em valores de máximo ou mínimos em nada influenciaria na análise dimensional com isso, pode-se desconsiderar a parte da raiz na demonstração, pois não apresenta unidade.

Segue,

$$V_c = \frac{B}{L \cdot HB} \quad (9)$$

Substituindo os valores da equação (9), pelas respectivas unidades do QUADRO 4.1, temos:

$$V_c = \frac{\left(\frac{Btu}{h \cdot ft \cdot ^\circ F}\right)}{(ft) \cdot \left(\frac{kgf}{mm^2}\right)} \quad (10)$$

simplificando,

$$V_c = \frac{Btu \cdot mm^2}{h \cdot ft^2 \cdot ^\circ F \cdot kgf} \quad (11)$$

Utilizando a tabela para conversão de unidades.

Tabela 4.5- 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: (ASM, 2001), ASM HANDBOOK (1990) e ASM HANDBOOK (1993).

Fazendo as devidas substituições em (11),

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

Então,

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

Logo,

$$V_c = \frac{0,001076. m}{h. ^\circ\text{F}} \quad (12)$$

Fazendo as devidas substituições em (12), com base no QUADRO 4.5:

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

Resultado aproximado,

$$V_c = \frac{0,003529 \text{ ft}}{h. ^\circ\text{F}} \quad (13)$$

Como o estudo estabeleceu um trabalho para um ensaio de usinabilidade de 60min a equação (13) fica,

$$V_{C60} = \frac{0,003529 \text{ ft}}{\text{min. } ^\circ F} \quad (14)$$

É necessário que se faça uma multiplicação da equação (14) por uma temperatura mínima de trabalho. Como as propriedades adotadas para este trabalho foram caracterizada na temperatura de 300°F e a faixa de temperatura que se faz necessária observar é entre 300°F e 1000°F.

Multiplicando,

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

Logo,

$$V_{C60} = \frac{1,0587 \text{ ft}}{\text{min}} \quad (15)$$

Dessa forma, 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. para valor de V_{C60} em m/min é necessário que se multiplique o valor achado na equação (15) pelo fator de conversão (0,3048) como foi dito no quadro 4.5:

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

$$V_{C60} = \frac{0,3227 \text{ m}}{\text{min}} \quad (16)$$

Então, pode-se concluir que todos os metais ensaiados na equação geral de usinabilidade proposta por HENKIN (1962) podem ser multiplicados 0,3227 e encontrados na unidade de velocidade m/min.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir dos elementos catalogados no banco de dados criado nos direcionamos então para o uso da equação geral de usinabilidade proposta por HENKIN (1962), determinados os parâmetros como é observado no QUADRO 4.4, a condutividade térmica como já foi mencionado foi determinada através de interpolação para uma temperatura de referência de (300°F), Dureza (HB) e Redução de área foram identificados em pesquisas realizadas e por último o comprimento característico "L" que foi determinado pelas manipulações da equação (8) para efeito de explicação o valor de "L" é função da profundidade de corte "t" e largura de corte "w".

Dessa forma, Com os materias já selecionados e alocados no banco de dados, dar-se então sequência a elaboração, logo, inseriu-se os metais, estado de tratamento e as propriedades física no software gerenciador de dados para efeito de compilação do ensaio de usinabilidade proposto por HENKIN (1962) para ilustrar os processo. Os resultados se encontram na tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Resultado de usinabilidade com base em teste de propriedades físicas de aços inoxidáveis (recozido)

Aço	Vc60		
	Resultado do teste	ft/min	m/min
430	73,2158	77,5197	23,6280
442	109,0847	115,4971	35,2035
431	40,8536	43,2551	13,1842
414	45,3442	48,0097	14,6334
303	58,1624	61,5815	18,7700
304	45,8751	48,5718	14,8047

Fonte: Próprio autor

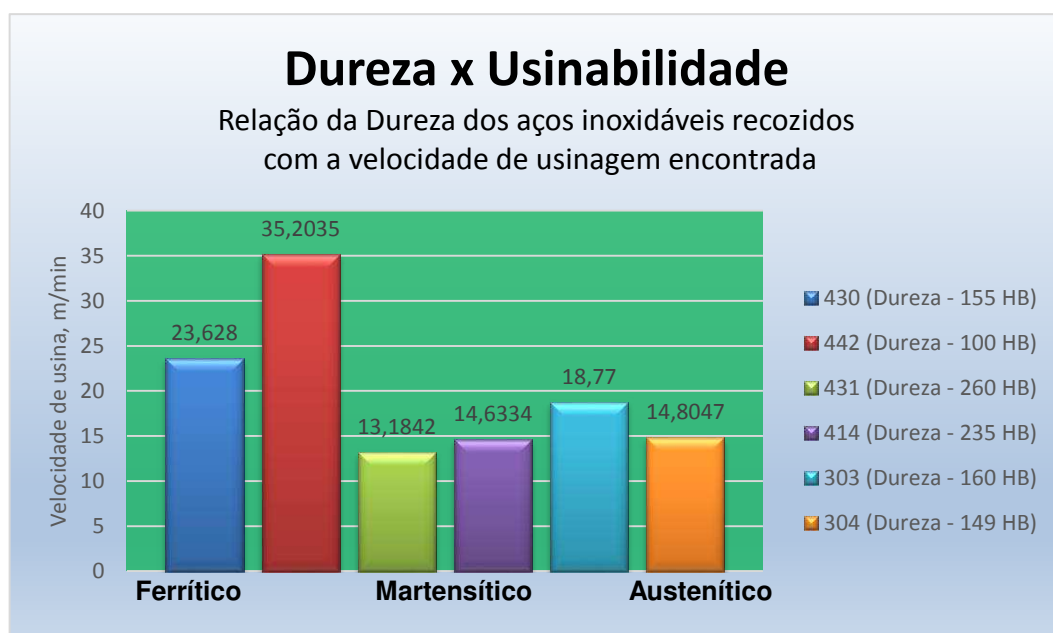
Os resultados de velocidades obtidos foram distribuídos em 4 (quatro) Coluna sendo a primeira designada pelos aços e por conseguinte resultado do teste, velocidades em ft/mim e m/min Como já foi mencionado anteriormente os valores de velocidade são multiplicados por 1,0587 para se ter a Velocidade (Vc60) em ft/min

em seguida multiplicado por 0,3048 para se obter valores de Velocidade (V_{c60}) em m/min.

Dessa maneira, para se entender melhor a comparação dos resultados obtidos no ensaio de usinabilidade com base em propriedades físicas dos metais, Montou-se no GRAF. 5.1 uma relação da influência da dureza dos metais no resultado de velocidade de usinagem; em seguida, no GRAF. 5.2, a relação de influência da condutividade térmica dos metais no resultado de velocidade de usinagem.

Os resultados da plotagem se encontram abaixo, os valores acima das colunas indicam as velocidades de usinabilidade encontrada no teste de ensaio teórico pela equação geral proposta por (HENKIN, 1962), ao lado das colunas estão identificados os metais e suas durezas e condutividades térmicas.

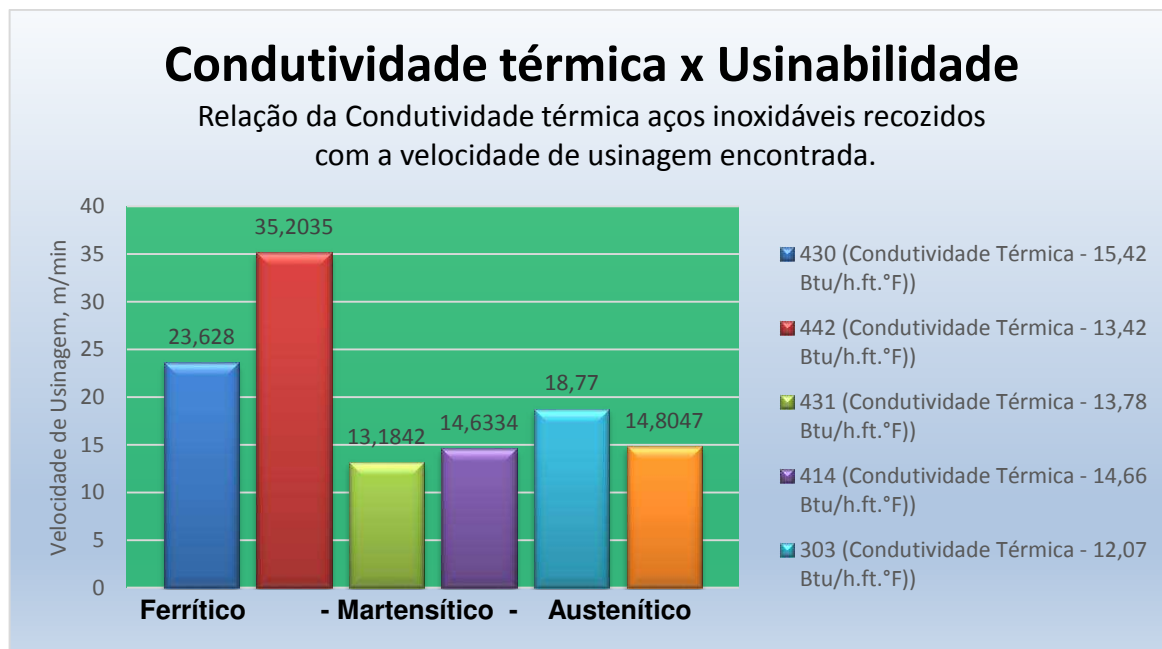
GRÁFICO 5.1 - Dureza x Usinabilidade, Aços inoxidáveis recozido.



Fonte: Próprio autor

O que se observa no graf.5.1 é uma relação de dureza e usinabilidade e pode ser concluído empiricamente que analisando isoladamente por tipo de material as variáveis são diretamente proporcionais, no entanto analisando pelo conjunto não se pode assumir tal conclusão.

GRÁFICO 5.2 - Condutividade térmica x Usinabilidade, Aços inoxidáveis recozido.



Fonte: Próprio autor

O que se observa no GRAF.5.2 é uma relação de condutividade térmica e usinabilidade e pode ser concluído uma relação instável entre o conjunto dos aços.

A análise do ensaio de usinabilidade no aspecto das propriedades físicas dos aços inoxidáveis selecionados se fez em concordância ao trabalho realizado na dissertação de HENKIN (1962) a simulação seguiu em concordância a fórmula(5) proposta em seu estudo e as análises foram então postas em prática no gerenciador de processamento de dados. Em relação aos seus materiais adotados, é imprescindível que seja feita comparação em coincidência aos estudados neste trabalho.

Dessa forma, os materiais trabalhados neste estudo foram os aços inoxidáveis Ferríticos 430 e 442, Martensítico 431 e 414 e Austenítico 303 e 304. Sendo que os aços 430 e 303 foram trabalhados no estudo de HENKIN (1962) e foram adotados aqui para efeito de comparação.

Os resultados no ensaio Para o aço inoxidável Ferrítico 430 Foram observados Valores de velocidade de 77,5197ft/min sendo que nos testes de Henkin se teve 64 ft/min e para o aço Austenítico 303 uma velocidade de 61,5815 ft/min e

no de Henkin 64ft/min. a diferença de 13,5197 para o aço 430 e -2,4185 para o aço 303, dá-se pela diferença nos valores adotados de dureza e condutividade térmica de sendo que para o aço 430 se usou 128 (HB) enquanto que neste estudo foi 155(HB) e 14,4 (Btu/h.ft.°F) enquanto neste estudo se adotou 15,42 (Btu/h.ft.°F) e para o aço 303 foram usados 144(HB) enquanto no estudo em questão 160 (HB) e 11,9 (Btu/h.ft.°F) enquanto neste se usou 12,07(Btu/h.ft.°F) .

Os valores de usinabilidade obtidos para os aço 442, 431, 414 e 304 não foram encontrados estudos específicos para ensaios com base no teste de propriedades físicas, pelo fato do campo literário ser escasso, ficando dessa forma os resultados obtidos para esse elementos tão somente descobertas parciais de valores do índice de usinabilidade para esses materiais.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho realizou-se a investigação de um referencial teórico sobre o estudo da usinabilidade dos aços inoxidáveis a partir da variação dos parâmetros de corte: uma avaliação com base no teste de propriedades físicas do material onde é analisado os parâmetros de corte e propriedades que influenciam a usinabilidade para então fazer ensaios de usinabilidade e estabelecer índices de usinabilidade dos materiais metálicos ensaiados através dos valores de velocidade de corte.

Os materiais trabalhados neste estudo teórico foram os aços inoxidáveis Ferríticos 430 e 442, Martensítico 431 e 414 e Austenítico 303 e 304 os aços 430 e 303 foram estudados por Henkin (1962) e foram adotados aqui para efeito de comparação e como medida de confiabilidade dos resultados.

Classificando os índice de usinabilidade pelos valores de velocidade de corte obtidos temos o aço 442 (115,4971ft/min) com melhor usinabilidade seguido pelo aço 430 (77,5197 ft/min), 303 (61,5815 ft/min), 304 (48,5718ft/min), 414 (48,0097 ft/min) e por último o 431(43,2551 ft/min).

Considerações para o aço inoxidável ferrítico 430 foi observado valores de velocidade de 77,5197 ft/min sendo que nos testes de Henkin (1962) se teve 64 ft/min a diferença de 13,5197ft/min é justificada uma vez que o material usado foi recozido e assim é um material com maior usinabilidade.

Considerações gerais para o aço inoxidável austenítico 303 temos de valores de 61,5815 ft/min e em Henkin (1962) 64ft/min. a diferença nesse aço é de 2,4185 ela é justificada pelas mesmas razões do aço 430, no entanto, a redução de área se mostra como um diferencial significativo nos resultados.

Para os aços 442, 431,414 e 304 que foram ensaiados nas propriedades físicas, não se obteve resultados na literatura para se estabelecer comparação, no entanto são materiais que se vem para referencias futuras de teste de usinabilidade para as propriedades físicas.

Não se pode tão somente restringir o estudo da velocidade a condutividade térmica e a dureza dos metais, pois, não apresentam uma relação direta ou inversa, essas características são alteradas a partir de propriedades químicas e físicas como: composição, fabricação e tratamento desses metais.

Os testes observados neste trabalho seguiram fielmente ao trabalho de dissertação de doutorado de HENKIN (1962) é de grande importância para as indústrias, principalmente a metalurgia e empresas voltadas para a fabricação e usinagem. Dessa maneira, conseguimos alcançar valores satisfatórios dos índices de usinabilidade dos materiais metálicos selecionados, em valores de velocidade (ft/min e m/min). Conseguiu-se observar, através do ensaio, as fluências das propriedades dos metais.

7 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

- ▶ Estudar a usinabilidade dos aços inoxidáveis a partir da aplicação dos fluidos de corte: uma avaliação com base no teste de rosqueamento;
- ▶ Estudo da usinabilidade dos aços inoxidáveis ferrítico: Com base no teste de microestrutura.
- ▶ Estudo da usinabilidade dos aços inoxidáveis martensíticos: Com base no teste de microestrutura.

8 REFERENCIAS

Akasawa T, Et al. 2003 Effects of free-cutting additives on the machinability of austenitic stainless steels. J. Mater. Process Technol. 143–144: 66–71

AMORIM E Heraldo Usinabilidade dos Metais // Processos de Fabricação por Usinagem Parte 4. - Porto Alegre : [s.n.], 2003.

Anthony X. M e Adithan M. Determining the influence of cutting fluids on tool wear and surface roughness during turning of AISI 304 austenitic stainless steel. J. Mater. Process Technol. 209: 900–909

ASM HANDBOOK Properties and Selection: Irons Steels and High Performance [Livro]. - [s.l.] : Metals Handbook, 1990. - Vol. 1.

ASM HANDBOOK Welding Brazing and Soldering [Livro]. - [s.l.] : Metals Handbook, 1993. - Vol. 6.

ASM Metals Handbook Desk Edition [Livro]. - [s.l.] : ASM International, 2001. - Vol. 1.

BANDYOPADHYAY B. P. Precision Engineering // Mechanism of Formation of Built-up Edge. - 1984. - Vol. 6.

BOULGER F. W., Moorhead H. e Gavey T. M. Superior Machinability of MX Steel Explained [Livro]. - [s.l.] : Iron Age, 1951.

Bouttreil Coutinho, C., Materiais Metálicos para Engenharia. Belo Horizonte: QFCO, 1992.

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

Costa, R.S., Estudo da corrosão do aço inox AISI 304 em álcool etílico hidratado combustível, 120 f. Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas. foi defendida em ,18/04/2012, Campinas, 2012.

CZAPLICKI L. "L'usinabilite Et al Coupe des Metaux" [Livro]. - [s.l.] : Res. Soc. Roy. Belge Ingeniere, 1962.

DA SILVA G.e Batista B. Ciências e Engenharia de Materiais em Laboratório [Relatório]. - São Paulo : [s.n.], 2008.

DE AMORIM H. J. Usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro // Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro. - Porto Alegre : [s.n.], 2002.

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

DINIZ A. E., Marconde F. C. e Coppini N. L. Tecnologia da Usinagem dos Metais [Livro]. - São Paulo : Artliber, 2000.

DINIZ A. E. e Et al. Tecnologia da Usinagem dos Materiais [Livro]. - São Paulo : Artliber, 2006.

DKI. Recommended machining parameters for copper and copper alloys. Monograph i.18. German Copper Institute, Düsseldorf, Germany. 2010.

Evangelista L. N. Usinabilidade do Aço de corte-fácil baixo carbono // Usinabilidade do Aço de Corte-Fácil Baixo Carbono ao Chumbo ABNT 12L14 com diferentes níveis de elementos químicos residuais. - Uberlândia : [s.n.], 2007

FANG N e Dewhurst P. Slip-line modeling of built-up edge formation in machining [Entrevista]. - [s.l.] : International Journal of Mechanical Sciences, 2005.

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

HENKIN A. e Datsko J. Machinability [Entrevista]. - [s.l.] : Journal of Engineering for Industry, November de 1963.

HENKIN Alexander Machinability of Metals // The Influence of some Physical Properties on Machinability of Metals. - [s.l.] : The University of Michigan, 1962. - Vol. 1.

HEGINBOTHAM W. B. e Pandey P. C. // Taper Turning Tests Produce Reliable Tool Life equation. - [s.l.] : MTD, 1966. - Vol. 1.

IAMS Machining Data Handbook. - Cincinnati, USA : Institute of Advanced Manufacturing Sciences, 1980. - Vol. 2.

ISO Tool Life Testing with Single Point Turning // ISO 3685. - 1993.

JANITZKI E. J. Machinability // Machinability of Plain Carbon Alloy and Austenitic Steels and its Relation to Yield Stress Ratios when Tensile Strengths. - [s.l.] : Trans. A.S.M.E., 1944.

KANKAANPÄÄ H., Pöntinen H. e Korhonen A. S. Machinability of Calcium Treated Steels Using TiN Coated High Speed Tools [Livro]. - [s.l.] : Materials Science and Technology, 1987. - Vol. 3.

KRAUS C. E. e Weddel R. R. // Determining the Tool Life Cutting Speed Relationship by Facing Cuts. - Pennsylvania : A.S.M.E. Fall Meeting, 1937.

LORENZ G. // Determination of Comprehensive Machinability Equations by Means of Rapid Facing Tests. - [s.l.] : S.M.E. MR, 1970.

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

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

MACHADO Á. R. [Et al.] Teoria da Usinagem dos Metais [Livro]. - Uberlândia : Blucher LTDA, 2009.

MILAN J. C. G. Usinabilidade de Aços para Moldes Plásticos // Dissertação de Usinabilidade. - Uberlândia : [s.n.], 1999.

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

MILOVIK R. e Wallbank J. The Machinability of Engineering Materials // The Machining of low Carbon Free Cutting Steels with High Speed Steel Tools. - [s.l.] : ASM, 1983.

PECKENER, D.; Bernstein, I. M., 1977, "Handbook of Stainless". USA. McGraw Hill, Cap. 24.

PEREIRA, J. A.; FERREIRA, Camila Corrêa Martins; DA SILVA, Márcio Bacci. Análise do torneamento do aço inoxidável abnt 304 através da temperatura do cavaco.

RAMANUJACHAR K. e Subramanian S. V. Micromechanisms of tool wear in machining free cutting steels. [Livro]. - [s.l.] : Wear, 1996.

REIS L. L. G, Et al. Machining Steel [Entrevista]. - 2007.

RUFFINO R. T., Et al. Teoria da Usinagem dos Materiais [Livro]. - São Paulo : Blucher LTDA, 2009.

SHAW M. C. Metal Cutting Principles [Livro]. - Great Britain : [s.n.], 1984.

SHAW, M. C. Metal Cutting Principles. Oxford: Oxford Science Publications, Clarendon Press, 2005.

STEMMER C. E. Ferramentas de Corte I [Livro]. - Florianópolis : Da UFSC, 1995. - Vol. 1.

STOETERAU, R. L. Et al. Processos de Usinagem // Fabricação por Remoção de Material. - Florianópolis : [s.n.], 2004.

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, 1993. - Vol. 49.

TRENT E. M. Cutting Steel and Iron with Cemented Carbide Tools [Entrevista]. - [s.l.] : Journal of the Iron and Steel Institute, November de 1963.

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

WEINGAERTHER W. L., Et al. Processos de Usinagem // Fabricação por remoção de material. - 2003.

WILLIAMS J. E. e Rollanson E. C. Metallurgical and Practical Machining Parameters Affecting Built-up Edge Formation in Metal Cutting [Livro]. - [s.l.] : J. Inst. Metals, 1970. -Vol. 98.

YAMANE Y.,Et al. Free Cutting Cast Irons Based on Non-Metalic Inclusions [Conferência] // Second International Conference on the Behavior of Materials in Machining. - 1991. - Vol. 1.

ZLATIN N. Field, M. Evaluation of Rolled Steels, Forging and Casting Irons [Livro]. - Cleveland, USA : Machining Theory and Practice, 1950.