



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

**ESTUDO DA USINABILIDADE DOS AÇOS DE LIVRE CORTE: UMA
AVALIAÇÃO COM BASE NO TESTE DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA.**

Brenno Victor Lima Campos

São Luís
2015

Brenno Victor Lima Campos

**ESTUDO DA USINABILIDADE DOS AÇOS DE LIVRE CORTE: UMA
AVALIAÇÃO COM BASE NO TESTE DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado na Universidade Estadual do Maranhão, UEMA, como requisito parcial para a conclusão do Curso de Engenharia Mecânica.

Orientador:

Prof. Dr. Jean Robert P. Rodrigues

São Luís
2015

Campos, Brenno Victor Lima

Estudo da usinabilidade dos aços de livre corte: uma avaliação com base no teste de composição química /Brenno Victor Lima Campos – São Luis, 2015.

77 f

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

Orientador: Prof. Dr. Jean Robert Pereira Rodrigues

1. Aços de livre corte. 2. Índice de usinabilidade. 3. Teste de composição química. I.Título

CDU: 621.941.025

BRENNO VICTOR LIMA CAMPOS – 1012237

**ESTUDO DA USINABILIDADE DOS AÇOS DE LIVRE CORTE: UMA
AVALIAÇÃO COM BASE NO TESTE DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado 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.

Monografia aprovada em: _____ de _____ de 2015

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Jean Robert P. Rodrigues

Banca Examinadora1: Prof. Dr. Dalmo Inacio Galdez Costa

Banca Examinadora2: Prof. Dr. Adilto Pereira Andrade Cunha

Dedico este trabalho a toda minha família
que sempre me deu apoio nessa
caminhada.

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a Deus, pois tudo o que alcancei foi graças a sua vontade e nada acontece sem sua permissão.

Ao meu professor e orientador Dr. Jean Robert Pereira Rodrigues pelo seu papel fantástico exercido nesta universidade.

Aos meus pais Jorge Antônio Fróz Campos e Katia Maria Lima Campos por sempre me apoiarem nessa caminhada e por sempre estarem ao meu lado em todos os momentos da minha vida e por fazerem sempre o seu melhor por mim.

Aos meus irmãos Brendel Thaylon Lima Campos e Deborah Victoria Lopes Ferreira por todo apoio dado nessa jornada.

Aos meus avós Olegário Viegas Campos, Gercina Fróz Campos e Maria Jose Pereira Lima por todo amor dado e por sempre estarem dispostos a ajudar em todos os momentos.

Aos meus tios Paulo Cesar Jardim e Georgiana Fróz Campos por acolherem a mim e a minha família quando necessitamos.

Aos meus primos, tios e familiares por sempre me apoiarem até hoje.

A minha cunhada Rayssa Vaz pelo seu carinho e ajuda nesses últimos anos.

E aos meus amigos de universidade pelas experiências adquiridas e repassadas nessa jornada.

“Deem graças em todas as circunstâncias, pois esta é a vontade de Deus para vocês em Cristo Jesus”.

(1 Tessalonicenses 5:18)

RESUMO

O termo usinabilidade é bastante usado em pesquisas sobre os diversos tipos de processos de usinagem, pois diz respeito tanto pela ferramenta como também aos parâmetros envolvidos na usinagem dos metais. Este trabalho tem como objetivo estudar a usinabilidade dos aços de livre corte com base no teste de composição química proposto por Czaplicki levando em consideração os elementos químicos residuais presentes nos aços de livre corte e analisando os efeitos observados de cada elemento presente na equação do teste de composição química e sua influencia no índice de usinabilidade dos metais estudados. A partir daí, com os elementos residuais químicos já definidos juntamente com os respectivos teores percentuais presentes nos aços de livre corte pôde-se montar um montante de dados para a análise da usinabilidade desses metais. O teste de composição química utilizado para determinar o índice de usinabilidade dos metais estudados foi gerado em software de análise de dados devido a necessidades de refazer os cálculos diversas vezes e também por poder facilitar a inserção de dados e geração de gráficos, possibilitando então uma maior organização dos resultados, sendo que estes mostraram que os elementos como o carbono e silício tornam-se prejudiciais quando seus teores percentuais estão elevados e o enxofre, manganês e fósforo são benéficos à usinabilidade em teores percentuais controlados.

Palavras-chave: Aços de Livre Corte, Índice de Usinabilidade, Teste de Composição Química.

ABSTRACT

The term machinability is widely used in research on various types of machining processes, as regards both the workpiece and the tool as well as the parameters involved in the machining of metals. This work aims to study the machinability of free cutting steels based on chemical composition test proposed by Czaplicki taking into account the residual chemical elements present in free-cutting steels and analyzing the observed effects of each element present in the test equation chemical composition and its influence on the machinability index of the studied metals. From there, with chemical trace elements already defined along with their percentage levels present in free-cutting steels could be mounted an amount of data to analyze the machinability of these metals. The chemical composition of test used to determine the machinability index of the metals studied was generated in data analysis software because the needs of redo several times calculations and also be able to facilitate data entry and generation of graphics, thus enabling greater organization of results, and these have shown that elements such as carbon and silicon become harmful when their percentage levels are high and sulfur, manganese and phosphorus are beneficial to the machinability in controlled percentage levels.

Keywords: Free Steels Court, Machinability Index, Chemical Composition Test.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1	Representação esquemática de um Forno Panela.....	35
Figura 3.2	Esquema de um forno elétrico a arco	37
Figura 3.3	Denominações para formação de cavaco.....	39
Figura 3.4	Efeito do avanço e da profundidade de corte na forma dos cavacos.....	40
Figura 3.5	Cunha de corte da ferramenta de torneamento.....	43
Figura 3.6	Arestas de corte e superfícies da parte de corte de uma ferramenta de torneamento.....	44
Figura 3.7	Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte.....	45
Figura 3.8	Mecanismos de desgaste.....	46
Figura 3.9	Aresta postiça de corte	48
Figura 3.10	fotografia da APC.....	49
Figura 3.11	Decomposição da Força de Usinagem.....	50
Figura 3.12	Influência das condições de corte na rugosidade superficial.....	54
Figura 3.13	Zonas de geração de calor em usinagem.....	55
Figura 3.14	Representação do calor gerado e o valor atingido pela temperatura	56
Figura 3.15	Direções possíveis de aplicação do fluido de corte	59
Figura 3.16	Influência da forma dos sulfetos sobre o índice de usinabilidade	60
Figura 3.17	Mecanismos de atuação do estanho na usinabilidade.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Tabela de composições químicas para aços carbono de corte fácil resulfurados (11XX) em percentuais em peso.....	32
Tabela 3.2	Composição química de aços de livre corte resulfurados e refosforado (12XX) em percentuais em peso.....	33
Tabela 3.3	Tipos, composição e propriedades dos fluidos de corte.....	57
Tabela 4.1	Aços Resulfurados (série 11XX).....	64
Tabela 4.2	Aços Resulfurados e Refosforado (série 12XX).....	65
Tabela 5.1	Teores da composição química dos aços de livre corte utilizados neste trabalho	70

LISTA DE FÓRMULAS

Fórmula 1	Equação do balanço energético.....	55
Fórmula 2	Equação geral da usinabilidade.....	63
Fórmula 3	Equação do teste de composição química.....	63

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 5.1	Relação entre o índice de usinabilidade e os aços de livre corte.....	66
Gráfico 5.2	Relação entre o teor percentual de carbono nos aços testados e o índice de usinabilidade.....	67
Gráfico 5.3	Relação entre o percentual de silício e o índice de usinabilidade encontrado nos aços de livre corte testado.....	68
Gráfico 5.4	Relação entre o percentual de enxofre e o índice de usinabilidade.....	68
Gráfico 5.5	Relação entre o teor de manganês e o índice de usinabilidade.....	69
Gráfico 5.6	Relação entre o teor de fósforo e o índice de usinabilidade.....	70

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E LEGENDAS

Fu – Força de usinagem (N)

Fc – Força de corte (N)

Ff – Força de avanço (N)

Fp – Força passiva (N)

Vc – Velocidade de corte (mm/min)

Ff(x) – Componente vetorial de Ff no eixo x

Fp(y) - Componente vetorial de Fp no eixo y

Fc(z) – Componente vetorial de Fc no eixo z

Ft - Projeção da força principal de corte que atua na superfície de saída da ferramenta na sua direção tangencial

FN – Força de compressão (N)

Fs - Projeção da força principal de corte sobre o plano de cisalhamento na sua direção tangencial

FNZ - Projeção principal de corte sobre o plano de cisalhamento na sua direção normal

Tc – Tempo de corte

Vb – Vibração mecânica

rn - Raio de ponta da ferramenta (grau)

ap - profundidade de corte (mm)

β - ângulo de cunha da ferramenta (grau)

α, α_0 - ângulo de folga da ferramenta (grau)

χ_r – ângulo de posição da ferramenta (grau)

ϵ_r – ângulo de ponta da ferramenta (grau)

χ_r – ângulo de posição da ferramenta (grau)

t - tempo (s)

γ_0 - ângulo de saída negativo (grau)

λ_s - ângulo de inclinação negativo (grau)

Ra - Rugosidade média aritmética

KT - Profundidade de cratera

VBB - Desgaste de flanco médio

Vbmáx - Desgaste de flanco máximo

Qa1 - Calor gerado na zona de cisalhamento secundário (J)

Qa2 - Calor gerado na zona de interface peça-superfície de folga da ferramenta (J)

Qc - Calor dissipado pelo cavaco (J)

Qf - Calor dissipado pela ferramenta de corte (J)

Qm - Calor dissipado pelo meio-ambiente (J)

Qp - Calor dissipado pela peça (J)

Qz - Calor gerado na zona de cisalhamento primário (J)

Tc = Temperatura do cavaco (°C)

T_{ic} - Temperatura de usinagem medida na interface de corte (°C)

VN e VC – Critérios para o desgaste de entalhe na usinagem de ligas de Ni com ferramentas de metal duro.

APC – Aresta Postiça de Corte

Cr - Cromo

Ni - Níquel

Mo - Molibdênio

Ti - Titânio

Nb - Nióbio

Al - Alumínio

Cu - Cobre

Mn - Manganês

Si - Silício

P - fósforo

S – enxofre

Fe – Ferro

Al₂O₃ - Óxido de alumínio

TiN - Nitreto de titânio

TiAlN - Nitreto de titânio-alumínio

ISO - International Standard Organization

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

SAE - Society of Automotive Engineers

AIISI - American Iron and Steel Institute – Instituto Americano do Ferro e Aço)

HRC - Ensaio de dureza Rockwell

HSS - High Speed Steel – Aço rápido

PVD - Deposição Física por Vapor
CVD - Deposição Química por Vapor
mm - milímetros
mm/rot – milímetros por rotações
m/min – metros por minuto
°C - Grau celsius
LE – Limite de escoamento
LR – Limite de resistência
t – toeladas
Dilatação térmica - $\mu\text{m}/\text{m } ^\circ\text{C}$

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	28
2 OBJETIVOS	30
2.1 OBJETIVO GERAL.....	30
2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	30
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
3.1 AÇOS DE LIVRE CORTE.....	31
3.2 TIPOS DE AÇOS DE LIVRE CORTE.....	32
3.3 PROCEDIMENTO DE PREPARAÇÃO DOS AÇOS.....	34
3.3.1 Forno Panela.....	34
3.3.2 Forno Elétrico a Arco.....	36
3.4 FORMAÇÃO DE CAVACO.....	38
3.5 INTERFACE CAVACO/FERRAMENTA.....	40
3.6 CONSIDERAÇÕES SOBRE A FERRAMENTA DE CORTE.....	41
3.6.1 Requisitos desejados em uma ferramenta de corte.....	41
3.6.2 Geometria da ferramenta de corte.....	42
3.6.3 Conceito de vida da ferramenta.....	44
3.6.4 Desgaste das ferramentas de corte.....	45
3.6.5 Causas de desgastes da ferramenta.....	46
3.6.6 Tipos de avarias.....	47
3.7 ARESTA POSTIÇA DE CORTE.....	48
3.8 FORÇAS DE USINAGEM.....	50
3.9 RUGOSIDADE SUPERFICIAL.....	52
3.10 TEMPERATURA DE CORTE.....	54
3.11 FLUIDOS DE CORTE.....	56
3.11.1 O fluido de corte como refrigerante.....	58
3.11.2 O fluido de corte como lubrificante.....	58
3.11.3 Métodos de aplicação dos fluidos de corte.....	59
3.12 EFEITOS DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA NA USINABILIDADE.....	59
3.13 TESTES DE USINABILIDADE.....	62
3.13.1 Tipos de ensaio de usinabilidade.....	62
4 PROCETIMENTO EXPERIMENTAL	64
4.1 METODOLOGIA.....	64

4.2 MATERIAL ENSAIADO.....	64
5 RESULTADO E DISCUSSÃO.....	66
6 CONCLUSÃO.....	71
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	72
REFERÊNCIAS	

1 INTRODUÇÃO

Conforme Ferraresi (1977), a usinagem pode ser definida de uma forma simples: “Processo de fabricação com remoção de cavaco”. Quando construímos um banco de dados podemos perceber que diferentes definições de usinagem são encontradas. Uma bastante abrangente é a seguinte: “Operação que ao conferir à peça a forma, ou as dimensões, ou o acabamento, ou ainda uma combinação qualquer destes três itens, produzem cavaco”. Seguindo essa informação pode-se entender por cavaco: “Porção de material da peça, retirada pela ferramenta, caracterizando-se por apresentar forma geométrica irregular”.

Já a usinabilidade dos metais pode ser definida como uma grandeza que se expressa por meio de um valor comparativo denominado de índice de usinabilidade, que determina um conjunto de propriedades de usinagem de um determinado material padrão em relação a outro (DINIZ et. al., 2006).

Segundo Trent (1984) a usinabilidade é o jeito como determinado material se comporta em meio a um processo de usinagem, ou ainda uma propriedade que determina o quão a usinagem do material por uma ferramenta de corte possa ser fácil ou difícil (MILLS et. al., 1983).

Nesses tipos de aços em que se encontra baixa ou média concentração de carbono é conveniente adicionar enxofre e chumbo em sua composição para melhor resultados em processos de usinagem (BAS, 1995). Estes elementos químicos tornam-se necessários para otimizar a usinabilidade dessa liga ferro-carbono e ainda oferecem uma certa lubrificação das ferramentas de corte utilizadas, permitindo ainda uma velocidade de corte aumentada e conseqüentemente um melhor acabamento superficial.

Os principais fatores que influem na determinação da usinabilidade de um material segundo Ferraresi (1977) são: material da peça: composição química, microestrutura, propriedades físicas, químicas e mecânicas; ferramenta de corte: geometria e material da ferramenta; processo/máquina: processo de usinagem adotado, condições de usinagem, condições de refrigeração (fluido de corte), rigidez da máquina, ferramenta e fixação da peça.

Todos os aços especiais, não só os aços de livre corte, podem ser modificados com o objetivo de melhorar a usinabilidade. No entanto, no caso de outros aços especiais do que os aços de livre corte, estas modificações não pode prejudicar as suas principais propriedades mecânicas necessárias para um desempenho satisfatório.

Este trabalho montou um banco de dados relacionado ao tema, “Estudo da usinabilidade dos aços de livre corte: uma avaliação com base no teste de composição química”, para a aplicação da equação de teste de composição química. Em seguida fez uma revisão bibliográfica geral sobre o assunto de usinabilidade até esclarecer a maneira correta de se calcular o índice de usinabilidade através da equação de teste de composição química. A partir do banco de dados gerado, coletou-se os dados necessários e a simulação foi feita pela fórmula em uma planilha elaborada em programa de análise de dados. Assim foi criada uma tabela com os resultados e também foram gerados os gráficos para melhor comparar os resultados encontrados.

2 OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Estudar a usinabilidade de aços de livre corte com base em testes de composição química.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Pesquisar os tipos de composição química existentes em aços de livre corte;
- Descrever e analisar os vários tipos e composições químicas em aços de livre corte e expor como os elementos de liga influenciam sua usinabilidade;
- Comparar os resultados obtidos com as diferentes percentagens da composição química nos processos de usinagem em aços de livre corte;
- Analisar os resultados em software de acordo com as porcentagens de elementos químicos e dados oferecidos pelos fabricantes de aço de livre corte identificando o seu índice de usinabilidade.

3 REVISAO BIBLIOGRÁFICA

3.1 AÇOS DE LIVRE CORTE

O incremento de novos maquinários e de ferramentas empregadas em usinagem, juntamente com os requisitos de melhores desempenhos na usinabilidade dos metais (melhoria da qualidade das peças, redução dos custos, prazos, e estoques) tem determinado uma parte importante das pesquisas metalúrgicas para a melhoria da usinabilidade dos aços especiais (BAS, 2001).

Inovações como “Usinagem em altíssimas velocidades” e “Usinagem a seco ou com mínima quantidade de fluido (MQF)” (MACHADO; DA SILVA, 2000) mudam o cenário da indústria e demandam adequações dos materiais de peças usinadas.

Ultimamente a pressão pelo uso de tecnologias limpas, de menor impacto ambiental, tem influenciado grandemente linhas de pesquisa e desenvolvimento de novos produtos, chegando até a limitar e proibir o uso de alguns aços já consolidados mundialmente, como é o caso dos aços de corte fácil ao chumbo (BERTRAND; SOLAR, 1998).

Até o começo do século XX não existia virtualmente nenhum aço projetado para facilitar a usinabilidade. O primeiro elemento usado para melhorar a usinabilidade foi o enxofre. O efeito geral do enxofre na melhoria da usinabilidade é conhecido desde 1879, embora seu efeito negativo sobre a ductilidade (a frio e a quente) seja conhecido desde 1814 (NAYLOR, 1990). O aumento de produtividade através da adição de enxofre pode ser da ordem de 50%, quando se compara um aço ao carbono comum com outro com adição de enxofre.

Os aços de livre corte são os tipos de aço mais facilmente usináveis que qualquer outro aço de composição equivalente referente aos elementos presentes em seu arranjo. Este aço é caracterizado por conter adições propositas de vários elementos químicos que lhe proporcionam uma melhor usinabilidade, esses elementos podem ser: enxofre, fósforo, chumbo, cobre, entre outros. Os aços de corte fácil podem ser classificados em dois tipos:

- Série 11XX (aço de corte fácil resulfurado): Com teor de enxofre mínimo de 0,08%;
- Série 12XX (aço de corte fácil resulfurado e refosforado): Com teores de enxofre e fósforo de 0,16% e 0,04% respectivamente.

3.2 TIPOS DE AÇOS DE LIVRE CORTE

São aços que contêm uma variação de enxofre em sua composição que variam de 0,10 a 0,30%, porém são mais utilizados aqueles que contêm 0,30% de enxofre em sua composição. O enxofre foi o primeiro elemento de liga a ser empregado para melhoramento da usinabilidade dos aços de livre corte, pois devido ao seu baixo custo e eficiência o tornam fortemente utilizados nos dias atuais.

A adição de enxofre ocasiona certa fragilidade à quente dos aços como o resultado da formação de inclusões de sulfeto de ferro no contorno de grão do aço, o que ocasiona uma fundição em temperaturas de laminação a quente, contudo pode-se eliminar tal fragilidade adicionado porções suficiente de manganês no aço ainda em estado líquido causando a formação de inclusões de sulfeto de manganês que não se fundem nas temperaturas de laminação a quente (PIMENTEL, 2006).

Tabela 3.1 – Tabela de composições químicas para aços carbono de corte fácil resulfurados (11XX) % em peso. Adaptado de ASM Handbook (1990).

Designação SAE-AISI	Faixas e limites de composição química			
	%C	%Mn	%P máx.	%S
1108	0,08-0,13	0,50-0,80	0,040	0,08-0,13
1110	0,08-0,13	0,30-0,60	0,040	0,08-0,13
1117	0,14-0,20	1,00-1,30	0,040	0,08-0,13
1118	0,14- 0,20	1,30-1,60	0,040	0,08-0,13
1137	0,32-0,39	1,35-1,65	0,040	0,08-0,13
1139	0,35-0,43	1,35-1,65	0,040	0,13-0,20
1140	0,37-0,44	0,70-1,00	0,040	0,08-0,13
1141	0,37-0,45	1,35-1,65	0,040	0,08-0,13
1144	0,40-0,48	1,35-1,65	0,040	0,24-0,33
1146	0,42-0,49	0,70-1,00	0,040	0,08-0,13
1151	0,48-0,55	0,07-1,00	0,040	0,08-0,13

Ainda segundo Pimentel (2006) a adição de enxofre em aços de livre corte traz certo melhoramento na qualidade interna do aço, pois tende a extinguir a formação de monóxido de carbono e reduzem a tendência de desenvolvimento de bolhas que se

formam durante sua solidificação dos aços de livre corte. Deste modo estes aços não tem a necessidade de adição de desoxidantes como o silício, alumínio, sendo estes prejudiciais à usinabilidade dos próprios.

Com relação aos elementos cobre, níquel e cromo a norma SAE J40 (SAE, 2000) especifica os valores máximos permitidos como segue:

- Cu = max. 0,35%;
- Ni = max. 0,25%;
- Cr = max. 0,20%;

A partir da classificação exposta verifica-se que os aços de corte fácil são ligas ferrocabono (com baixo ou médio teor de carbono) às quais se adicionam, basicamente, enxofre (S) e manganês (Mn) que formam no aço o sulfeto de manganês (MnS). Este composto tem a propriedade de melhorar a usinabilidade, ou seja, aumentar a vida das ferramentas, diminuir o esforço de corte, aumentar as velocidades de trabalho e melhorar o acabamento (rugosidade) das superfícies usinadas (TROIANI, 2005).

Quanto à sua aplicação, os aços de corte fácil são usados extensivamente para produção em massa de peças em tornos automáticos. Para este tipo de usinagem é utilizado normalmente barras de aço trefilado com diâmetros iguais ou menores que 50 mm e sua velocidade de corte dificilmente excedem aos 200 m/min (WISE; MILOVIC, 1988). Na tabela 3.2 se observa a composição química de aços carbono de livre corte resulfurados e refosforado.

Tabela 3.2 – Composição química de aços de livre corte resulfurados e refosforado (12XX) % em peso. Adaptado de ASM Handbook (1990).

Designação SAE-AISI	Faixas e limites de composição química				
	%C máx.	%Mn	%P	%S	%Pb
1211	0,13	0,60-0,90	0,07-0,12	0,10-0,15	-
1212	0,13	0,07-1,00	0,07-0,12	0,16-0,23	-
1213	0,13	0,07-1,00	0,07-0,12	0,24-0,33	-
1215	0,09	0,75-1,05	0,04-0,09	0,26-0,35	-
12L14	0,15	0,85-1,15	0,04-0,09	0,26-0,35	0,15-0,35

3.3 PROCEDIMENTO DE PREPARAÇÃO DOS AÇOS

3.3.1 Forno Panela

Este equipamento siderúrgico teve sua primeira unidade de produção estava operando no ano de 1965. O número de 200 instalações em funcionamento no mundo, incluindo aquelas com vácuo e transformado de fornos elétricos a arco, foi superado 22 anos depois (AMBLARD; LEGRAND, 1988).

Estes fornos, inicialmente existentes apenas na Europa, tiveram crescimento, em número, no Japão a partir da década de 70. Nos anos 80, na América do Norte e resto do mundo, o número de unidades ainda era proporcionalmente pequeno, indicando possibilidades de crescimento nos anos 90.

Segundo Pimentel (2006) no Brasil foram introduzidos em 1969, mas a evolução desse equipamento por aqui só aconteceu a partir da década de 80. O forno panela nada mais é que um forno elétrico a arco, cuja carga é o aço líquido em uma panela, proveniente do forno primário.

Pelo seu motivo de aceitar o aquecimento do aço líquido, o forno panela atribui alta flexibilidade a uma aciaria, facilitando extraordinariamente operações de refino do aço líquido como as adições de ligas, mesmo em grandes quantidades, troca e controle da escória, atmosfera não oxidante, agitação eletromagnética ou com gases (PIMENTEL, 2006).

De uma forma geral, as principais vantagens do forno panela são a possibilidade de ajuste estreito da temperatura do aço (permitindo melhoria da qualidade de lingotes), adequação estreita da composição química (permitindo estabilidade das características entre corridas) e melhor limpeza dos aços (por meio da desoxidação, dessulfuração e remoção de inclusões). A Figura 3.1 apresenta o esquema de um forno panela com seus componentes principais.

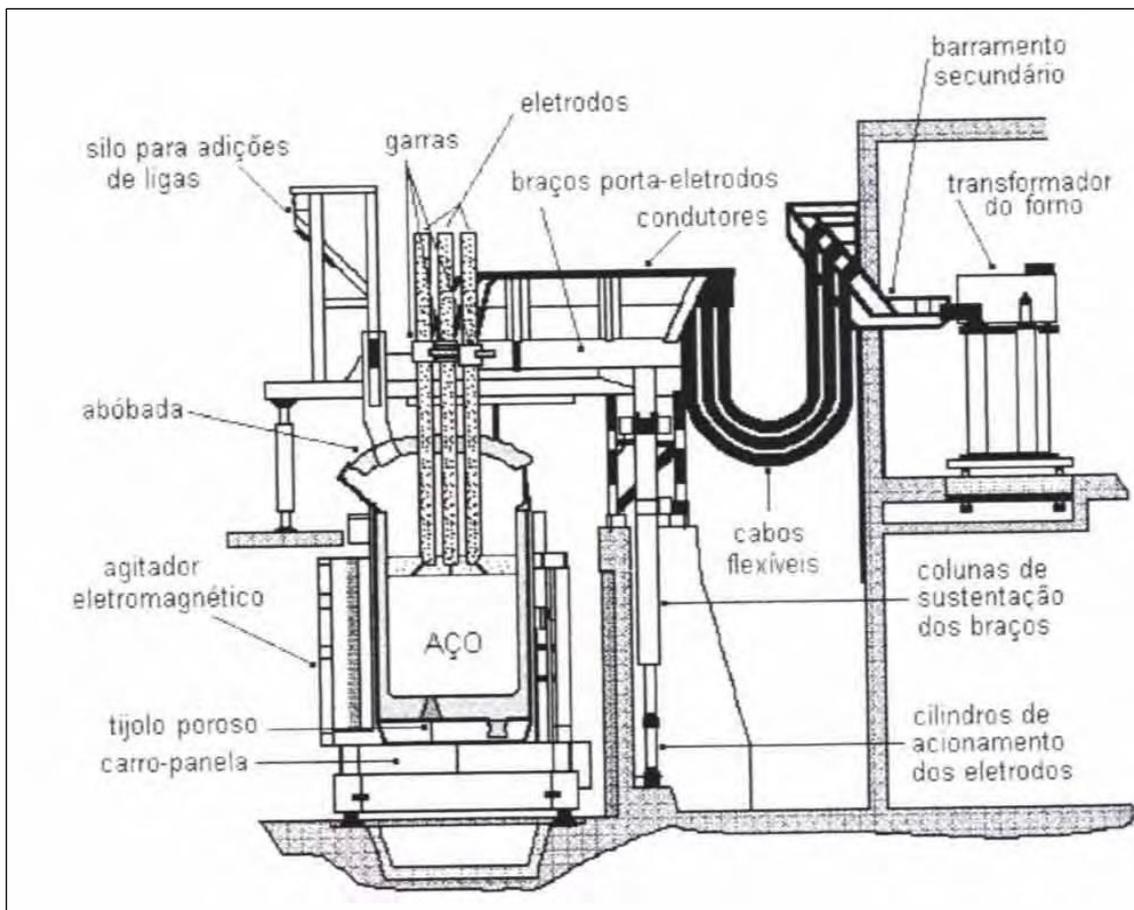
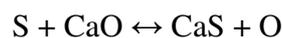


Figura 3.1 - Representação esquemática de um Forno Panela.
Fonte: adaptada de (AMBLARD; LEGRAND, 1988).

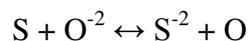
A desoxidação em forno panela baseia-se em um processo em que a inserção de certos elementos promove a redução do teor de oxigênio dissolvido no aço para garantir a integridade interna e superficial dos produtos sendo facilmente obtida pela inserção de carbono, silício, alumínio e titânio em algumas situações especiais.

A desoxidação é beneficiada pelo aumento da atividade do metal e diminuição da atividade do óxido formado (FRUEHAN, 1985).

A dessulfuração é representada, molecularmente, por (FRUEHAN, 1985):



Ou, ionicamente, por:



As condições para uma boa dessulfuração segundo Fruehan (1985) serão, portanto:

- Escória de alta basicidade (alto CaO ou O^{-2});
- Aço desoxidado (baixo FeO ou O);

- Alta temperatura (~1660°C).

Adicionam-se, então, desoxidantes (Al, Fe-Si e outros) e nova escória, aquecendo-se o aço para a temperatura de dessulfuração. O processamento sob escória redutora, entretanto, favorece a absorção de gases (hidrogênio e nitrogênio) pelo aço líquido, de forma que, para produção de aços de qualidade, torna-se necessária a desgaseificação posteriormente.

Na desgaseificação ocorre que o aço líquido é exposto a um vácuo médio (0,5-2 mmHg) e agitado. O objetivo deste processo é retirar os gases dissolvidos no aço líquido, principalmente o hidrogênio.

Os defeitos causados pelo hidrogênio nos aços são conhecidos há bastante tempo. Entretanto, por força do altíssimo coeficiente de difusão do hidrogênio e sua baixa solubilidade no ferro, a correta caracterização do teor de hidrogênio associado à ocorrência de defeitos é, até hoje, motivo de discussão (PIMENTEL, 2006).

O principal efeito do hidrogênio no ferro e suas ligas é a fragilização que, associada à segregação e tensões (por exemplo, durante o tratamento térmico) pode causar o aparecimento de trincas internas, chamadas “flocos” (STEUBER, 1982).

3.3.2 Forno Elétrico A Arco

Inúmeros modelos de fornos utilizam a eletricidade como fonte de energia tem sido desenvolvidos, sendo que o forno a arco e o forno de indução são os mais comuns. Especificamente, em aciaria, quase 100% da tonelagem produzida em fornos elétricos provém de fornos a arco. Como o emprego de escória no forno de indução é difícil (em função da dificuldade para seu aquecimento), estes fornos encontram maior emprego em fundições (CANDIDO, 2008).

Segundo Pimentel (2006) o forno elétrico a arco é, sem dúvida, um dos instrumentos mais versáteis na produção de aço, e sendo também um dos mais eficientes. Algumas das importantes vantagens do forno elétrico a arco é permitir produzir praticamente qualquer tipo de aço, em função do controle do aquecimento virtualmente independente de reações químicas, também é um aparelho extremamente versátil, no que tange a carga, podendo ser operado com totalidade de carga sólida e admite uma operação intermitente e mudanças rápidas na produção e ainda possui uma ótima eficiência energética.

O número crescente de fornos a arco instalados e a tendência de utilização de fornos cada vez maiores (de 200-250 t) são uma clara evidência da importância deste processo. Isto se deve, também, ao aumento do emprego de aços ligados, mais economicamente produzidos no forno a arco (CANDIDO, 2008).

A Figura 3.2 mostra o esquema de um forno a arco moderno. Onde os eletrodos de grafite são ligados às três fases do secundário de um transformador de tensão variável de 100-300 V. O arco elétrico é constituído entre os eletrodos e a sucata ocasionando radiação emitida por este arco responsável pela fusão da carga.

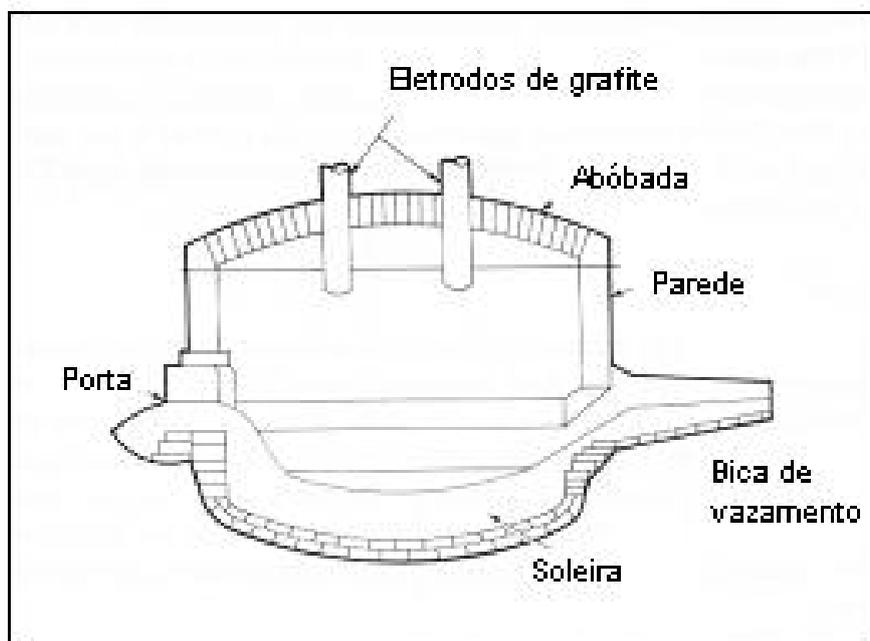


Figura 3.2 - Esquema de um forno elétrico a arco.

Fonte: adaptada de (AMELLING et al., 1986).

A partir de 1983 Amelling et al., (1986), fornos com vazamento pelo fundo - EBT e OBT (válvula gaveta instalada excentricamente no fundo do forno) – foram desenvolvidos. Com este sistema, é possível vazar o aço completamente livre de escória do forno, inconveniente para o refino no forno panela. Além disto, o ângulo de basculamento do forno é muito reduzido, o que permite a instalação segura de painéis refrigerados à água até muito próximo da linha de escória e reduz significativamente a complexidade e os custos da parte mecânica do forno.

As novas tecnologias desenvolvidas ou em andamento para os fornos elétricos a

arco são (CHEVRAND, 2003):

- Uso de queimadores/injetores de oxigênio e combustíveis ou outros materiais;
- Substituição da energia elétrica por energia fóssil;
- Injeção de gás inerte pela soleira do forno;

Segundo Pimentel (2006) a carga do forno a arco é composta de sucata devido à necessidade de se aproveitar os elementos de liga contidos na sucata e se evitar a presença de elementos indesejáveis em determinados aços, exige-se do operador de forno elétrico – especialmente nas usinas de aços especiais – uma cuidadosa separação e armazenamento da sucata. Normalmente, a sucata é armazenada em grupos para que, ao ser empregada, possa ser prevista, com segurança, a composição química a ser obtida.

Por outro lado, o aspecto físico da sucata é também muito importante. Como a sucata pode ter densidade aparente muito baixa, é importante balancear corretamente a carga, para se evitar a necessidade de muitos carregamentos que comprometam a produtividade. Além da sucata, são empregados ferro-ligas ou metais puros para compor a carga desejada para cada aço. Normalmente se evita carregar ferro-ligas de elementos oxidáveis (como cromo, vanádio) juntamente com a sucata para diminuir as perdas (CANDIDO, 2008).

Há ligas de alto teor de carbono ou baixo teor de carbono, ligas de baixo fósforo e enxofre e ligas de alto teor de residuais. Obviamente, o operador deve realizar um balanço econômico das opções disponíveis para atingir determinada especificação de aço, escolhendo a opção que apresentar melhor equilíbrio econômico-operacional.

3.4 FORMAÇÃO DE CAVACO

A formação de cavaco é extremamente discutida nos processos de usinagem porque tange aspectos econômicos e de qualidade da peça, a segurança do operador, a utilização adequada da máquina-ferramenta, produtividade, entre outros. É também responsável por 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. (LUIZ, 2007). Na figura 3.3 é esquematizado movimento relativo entre a ferramenta e a peça, inicia-se um escorregamento da porção de material (cavaco) deformada e cisalhada sobre a superfície de saída da ferramenta.

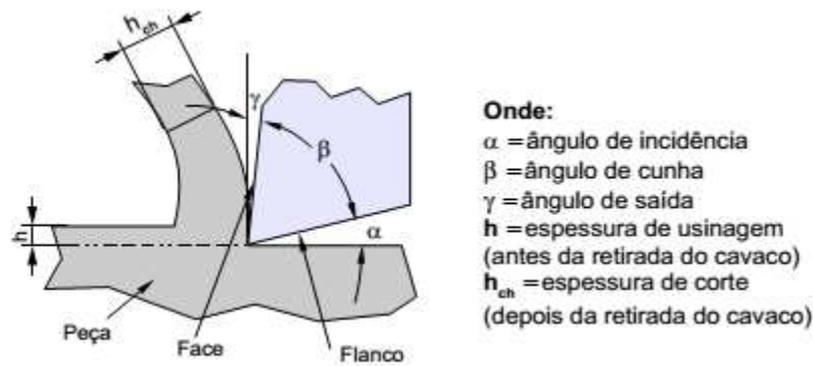


Figura 3. 3 - Denominações para formação de cavaco
 Fonte: (DE AMORIM, 2002)

De acordo com a CIMM (2014), a classificação dos tipos de cavaco depende muito da ductilidade (ou fragilidade) do material da peça e das condições de corte. Quanto aos tipos existem pelo menos três possibilidades:

- Cavacos contínuos;
- Descontínuos;
- Segmentados.

Quanto à forma, os cavacos podem ser classificados:

- cavaco em fita;
- helicoidal;
- espiral;
- cavaco em lascas ou em pedaços.

Quanto às condições de corte, em geral, um aumento da velocidade de corte, uma redução no avanço ou um aumento no ângulo de saída, tende a produzir cavacos em fita (ou contínuos, quanto ao tipo).

Em baixa velocidade de corte, os cavacos tendem a quebrar com mais facilidade, mas o que ocorre normalmente é o oposto, para que haja maior produtividade, trabalhamos com grande velocidade corte, pois o objetivo é produzir rapidamente as peças de um lote, para obter lucro no fim da produção, por isso aumentamos também a profundidade de corte, em consequência, aumentam as taxas de remoção de material, e novamente buscamos a utilização de insertos com quebra-cavaco eficiente (DE OLIVEIRA, 2015)

A mudança das condições de usinagem, com o fim específico de se obter uma forma adequada do cavaco, deve ser o tanto quanto possível evitada, pois estas são fixadas levando-se em consideração requisitos técnicos e econômicos do processo (DINIZ, 2006).

A Figura 3.4 mostra como as formas dos cavacos são afetadas pelo avanço e pela profundidade de corte.

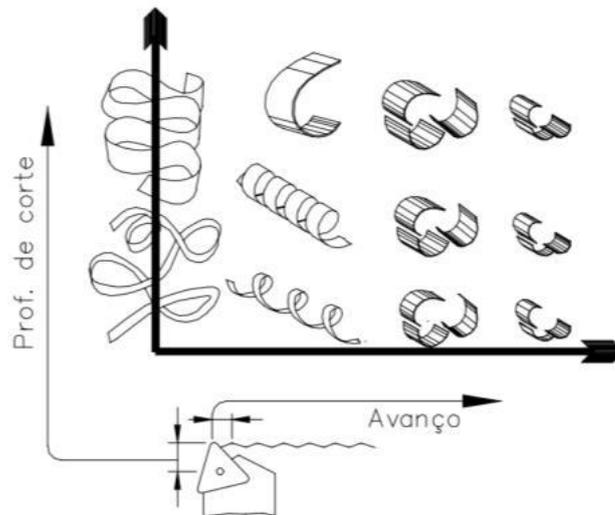


Figura 3.4 - Efeito do avanço e da profundidade de corte na forma dos cavacos

Fonte: (MACHADO, 2009).

3.5 INTERFACE CAVACO/FERRAMENTA

O movimento do cavaco extraído da peça sobre a superfície de saída da ferramenta tem influência determinante nos processos de usinagem das peças, e principalmente na própria estrutura de formação de cavaco, na força de usinagem, no calor gerado durante o processo de usinagem, nas temperaturas de usinagem e taxa de desgaste das ferramentas de corte utilizadas no processo de usinagem (MACHADO; Da SILVA, 2004).

As condições existentes da interface cavaco-ferramenta têm sido analisadas constantemente nas últimas décadas por vários estudiosos, porém ainda não se tem definições detalhadas da geometria do contato (RAMAN et al., 2002). A causa de não se ter tais detalhes deve-se pelas dimensões reduzidas e das velocidades altíssimas empregadas na usinagem. A maioria dos estudos publicados procede após o corte ter

sido parado (dispositivos quick-stop) e de testes de deformações e temperaturas naquela região (MACHADO; Da SILVA, 2004).

3.6 CONSIDERAÇÕES SOBRE A FERRAMENTA DE CORTE

Nos processos de usinagem, a ferramenta de corte é fundamental para o processo, por isso o material empregado em sua fabricação deve atender exigências de esforços, temperaturas e fatores de corte. Dentre a problemática de escolher o material para ferramenta de corte, o maior deles é o balanço entre dureza e tenacidade, pois uma elevação na dureza é associada a uma baixa tenacidade, e vice-versa, o que causa um desafio para os fabricantes (OLIVEIRA, 2014).

Segundo Oliveira (2014) há varias considerações a serem estudadas antes da escolha de uma ferramenta de corte, que são:

- 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 sistema de fixação pouco rígido, exigem ferramentas mais tenazes.

3.6.1 Requisitos desejados em uma ferramenta de corte

Sobre as características que se faz necessário que uma ferramenta deve ter, podemos citar essas citadas por (DINIZ, et al., 2006):

- Resistência à compressão;

- Resistência ao cisalhamento;
- Dureza;
- Resistência à flexão e tenacidade;
- Resistência a quente;
- Resistência à oxidação;
- Resistência à abrasão;
- Boas propriedades térmicas e mecânicas em altas temperaturas;
- Resistência ao choque térmico;
- Resistência ao impacto.

3.6.2 Geometria da ferramenta de corte

Segundo De Souza (2011), a ferramenta de corte é comumente designada para realizar uma operação específica de usinagem, a geometria (ângulos) desta ferramenta deve ser estudada para então usa-la com exatidão.

De acordo com Diniz (2006) a cunha de corte (ou gume de corte) é definida como a parte da ferramenta na qual o cavaco se origina, através do movimento relativo entre a ferramenta e a peça. As arestas que limitam as superfícies de corte são arestas de corte. A seguir são descritas as principais partes construtivas de uma ferramenta de corte:

- 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;
- Superfícies de Saída ($A\gamma$) – 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;
- Superfície Principal de Folga ($A\alpha$) – é a superfície da cunha de corte da ferramenta que contém sua aresta principal de corte e que defronta com superfície em usinagem principal;

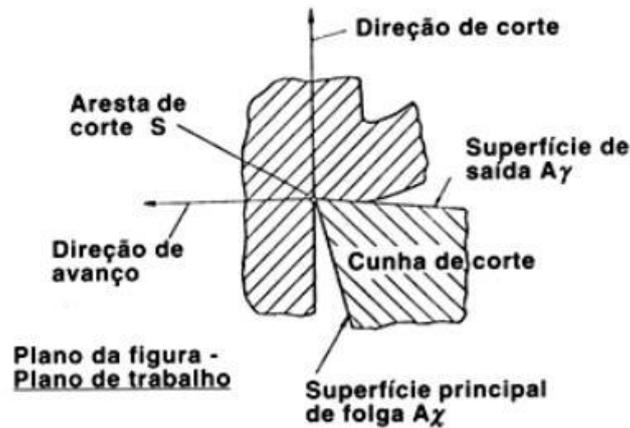


Figura 3.5 - Cunha de corte da ferramenta de torneamento.

Fonte: (DE SOUZA, 2011).

- 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 (fig. 3.6);
- 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;
- 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.
- 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.

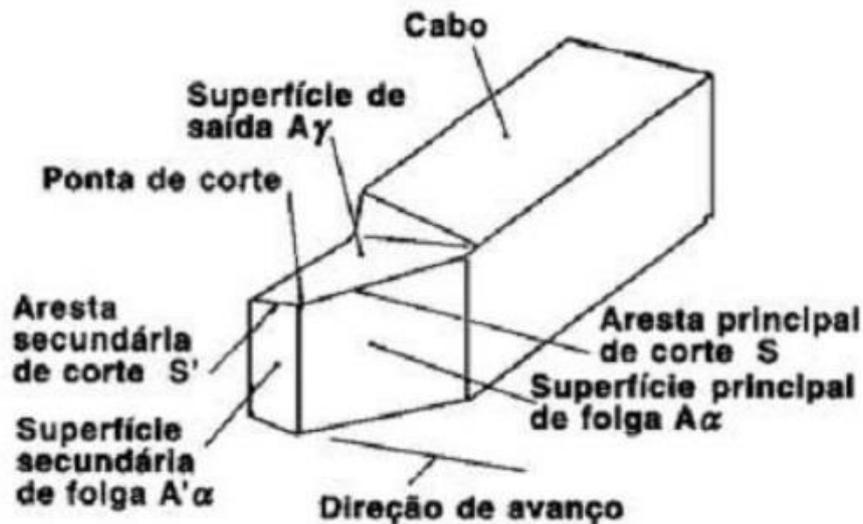


Figura 3.6 - Arestas de corte e superfícies da parte de corte de uma ferramenta de torneamento.

Fonte: (FERRARESI, 2000).

3.6.3 Conceito de vida da ferramenta

Segundo Stoeterau (2004), o conceito de vida da ferramenta pode ser entendido como o tempo no qual uma ferramenta pode ser mantida usinando economicamente e com precisão satisfatória.

Deve se levar em consideração as tolerâncias dimensionais, geométricas e a qualidade da peça.

Seguindo por essa definição podemos utilizar uso dos critérios que são utilizados para determinar quando uma ferramenta tem que ser substituída no processo. Esses critérios são relacionados ao nível de desgaste na ferramenta, e suas implicações diretas são citadas por (MACHADO, et al., 2009):

- Desvios nas tolerâncias dimensionais;
- Desvios nas tolerâncias geométricas;
- Perda de qualidade superficial da peça;
- Aumento no nível de vibrações no processo;
- Aumento no nível de esforços no processo;
- Aumento do custo de reafiação da ferramenta.

Segundo também Machado (2009) se faz necessário citar fatores que determinam o fim da vida de uma ferramenta, são eles:

- Falha da ferramenta;
- Desgaste de flanco ou de cratera;
- Vibrações (monitoramento);
- Acabamento superficial ruim;
- Rebarbas;
- Alterações nos cavacos;
- Aumento nas temperaturas.

3.6.4 Desgastes das ferramentas de corte

O desgaste das ferramentas de corte é um tema bastante discutido no setor da usinagem e está diretamente relacionado à vida de uma ferramenta que pode ser definido como sendo o tempo em que esta trabalha efetivamente, de certa forma que ela não perca suas características de corte. Sua vida está relacionada com o tempo em que a ferramenta alcança o seu fim precisamente estabelecido, levando em consideração o cuidado com a alteração na sua geometria, pois ela pode comprometer o acabamento superficial da peça gerando assim um aumento nas forças de corte podendo resultar em vibrações, quebra e etc (TRENT et. al., 2000).

A Figura 3.7 apresenta as principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte, sendo eles: (a) desgaste de cratera, (b) desgaste de flanco, (c) desgaste de entalhe.

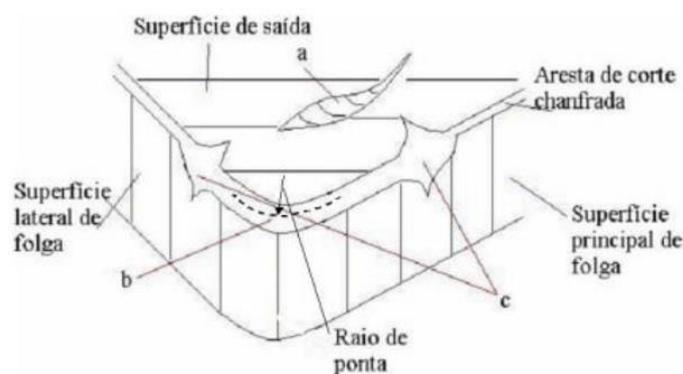


Figura 3.7 – Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte.

Fonte: (TRENT et. al., 2000).

A Figura 3.7 apresenta exemplos de ferramentas desgastadas onde se pode identificar claramente as três formas básicas de desgaste definidas anteriormente. Na Figura 3.7, a letra (a) indica a área onde há a formação do desgaste de flanco. Normalmente, esta forma de desgaste é a principal na avaliação da vida de uma ferramenta de corte. No desgaste de flanco há uma perda do ângulo de folga, promovendo um aumento dos níveis de contato entre a ferramenta e a peça e consequentemente, crescimento nos níveis de atrito e todos os problemas por ele causados. Na Figura 3.7 a letra (b) indica a área onde há a formação do desgaste de cratera e na letra (c) indica a área onde há a formação do desgaste de entalhe. O desgaste de entalhe ocorre principalmente na usinagem de materiais resistentes a altas temperaturas. Normalmente ocorre na aresta principal de corte, mas também pode aparecer na aresta secundária de corte com dimensões mais reduzidas.

3.6.5 Causas de desgaste da ferramenta

Segundo Ferraresi (2000) as danificações do gume devido a solicitações são por: adesão; abrasão mecânica, oxidação e difusão.

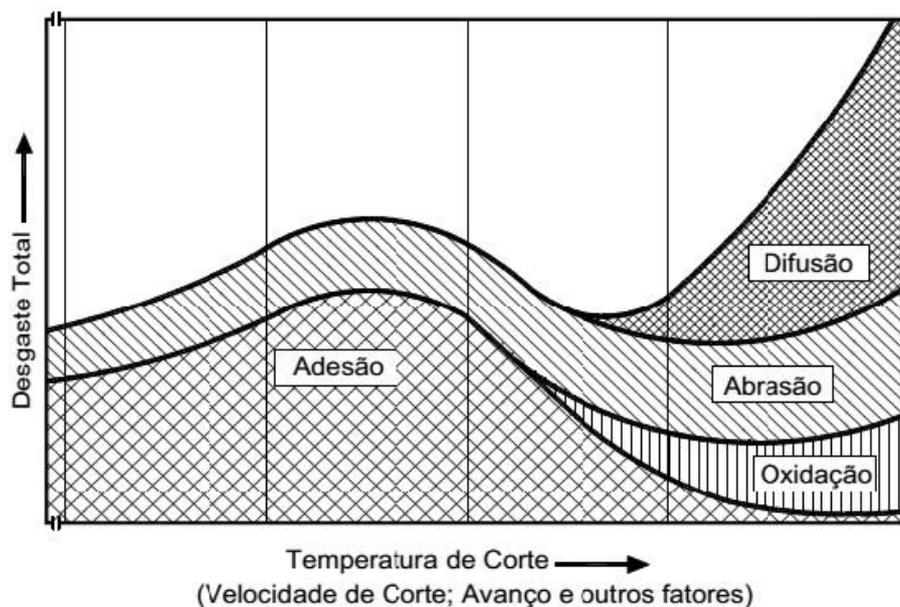


Figura 3.8 - Mecanismos de desgaste.

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

3.6.6 Tipos de avarias

Os tipos e explicações de avarias são citados abaixo segundo De Souza (2011):

- 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 frontais 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. Este último ocorre porque o coeficiente de dilatação térmica do metal duro é aproximadamente a metade do coeficiente do aço, que é o material do porta-ferramentas. Assim, quando a interface pastilha-porta-ferramentas atinge temperatura alta, que tenta dilatar os dois corpos, o aço se dilata mais que o metal duro, gerando tensões na interface que levam à trinca do material mais frágil, o metal duro. O crescimento das trincas leva à quebra da ferramenta. 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.

3.7 ARESTA POSTIÇA DE CORTE

A aresta postiça de corte (APC) nada mais é que um acúmulo de material encruado da peça e que pode se formar na superfície de saída da ferramenta de corte durante a usinagem. Seu evento está fortemente atrelado às condições de corte e às características microestruturais do material da peça. Em baixas velocidades de corte é onde se forma a aresta postiça de corte. Existem evidências de que a APC é contínua com o material da peça e do cavaco, ao invés de ser um corpo separado de material encruado, sobre o qual o cavaco se escoo (TRENT, 2000). A figura 3.9 mostra um desenho esquemático da APC, evidenciando ser esta um corpo solidário ao material da peça e do cavaco. A figura. 3.10 mostra micrografias de aresta postiça de corte de um aço de livre corte complementado a figura anterior.

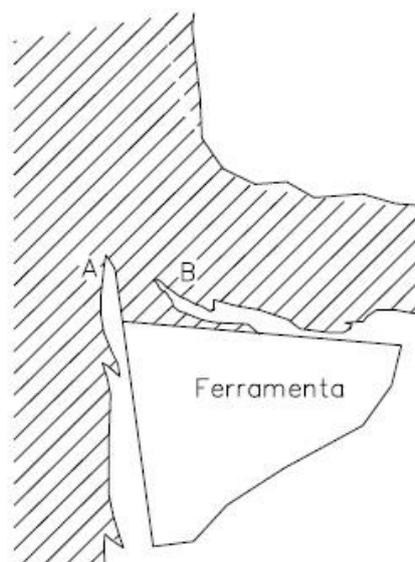


Figura 3.9 – Aresta postiça de corte.

Fonte: adaptado de (TRENT et. al., 2000).

Segundo Trent; Wright (2000) a APC pode ocorrer do seguinte modo: devido às altas tensões de compressão desenvolvidas durante o corte o escorregamento do cavaco sobre a superfície de saída da ferramenta não é mais possível e o cavaco se forma por deformação plástica acima dos pontos A e B (Fig. 3.9). O encruamento que se acumula das camadas do material usinado contribui para o afastamento desses pontos, afastando-se da superfície de saída da ferramenta. Uma das características não desejadas da APC é que ela normalmente não é estável e algumas lascas podem ser arrancadas da mesma e passarem entre a superfície de folga e a peça (prejudicando o acabamento superficial) ou arrastarem-se sobre a superfície de saída aumentando o desgaste da ferramenta.

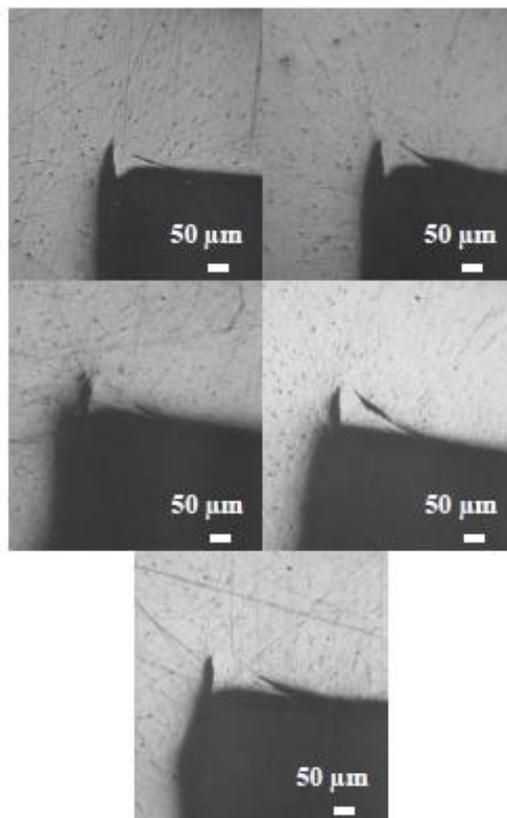


Figura 3.10 – Fotografias da APC
Fonte: adaptado de (REIS et al., 2007).

Segundo Bandyopadhyay (1984) a APC pode ser extinta pelo simples processo de aquecer a ferramenta de corte, eliminando o encruamento que se necessita para sua formação. Conseqüentemente explica-se o não aparecimento da APC em altas velocidades de cortes, pois as temperaturas são maiores.

3.8 FORÇAS DE USINAGEM

O conhecimento da força de usinagem F_u ou de suas componentes: força de corte F_c , força de avanço F_f e da força passiva F_p , é a base segundo (FERRARESI, 2000):

- Para o projeto de uma máquina ferramenta (dimensionamento das estruturas, acionamentos, fixações, etc.);
- Para a determinação das condições de corte em condições de trabalho;
- Para a avaliação da precisão de uma máquina ferramenta, em certas condições de trabalho (deformação da ferramenta, máquina e peça);
- Para a explicação de mecanismos de desgaste.

A força de usinagem é também um critério para a determinação da usinabilidade de um material de peça. Os componentes da força de usinagem (F_c , F_f e F_p) diminuem com o aumento da velocidade de corte V_c devido à diminuição da resistência do material com o aumento da temperatura (FERRARESI, 2000).

A força de usinagem é por ventura uma soma vetorial ($F_u = F_f(x) + F_p(y) + F_c(z)$) de todas as forças que são propiciadas durante o processo de usinagem, ela depende diretamente das forças de avanço (F_f), passiva (F_p) e de corte (F_c), as quais atuam consideravelmente na ferramenta de corte, nas direções de avanço, ortogonal ao plano de trabalho e de corte, respectivamente. A decomposição da força de usinagem está ilustrada na Figura 3.11 (SÁNCHEZ & TRENT, 2002).

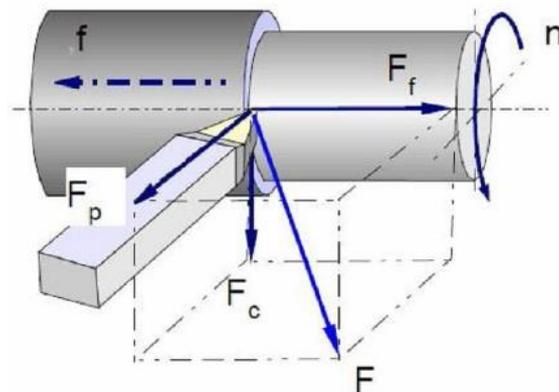


Figura 3.11 – Decomposição da Força de Usinagem.

Fonte: (STOETERAU, 2007).

Segundo Casagrande (2004) vários fatores influenciam os esforços de corte resultante, ou aumentando, ou diminuindo, sendo alguns desses fatores podem ser citados abaixo:

- Material da peça: a composição química do material tem grande influência sobre os esforços de corte. À medida que aumenta o teor de carbono, 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 mostraram, 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 ferramenta;
- 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.
- Profundidade de usinagem (a_p):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 conseqüentemente 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.

3.9 RUGOSIDADE SUPERFICIAL

Os parâmetros que mais influem na rugosidade superficial são: vibrações da máquina ferramenta, vibrações inerentes ao processo de corte (formação do cavaco), condições de corte (avanço, profundidade e velocidade de corte) e material da peça segundo (SANCHEZ, 2002).

De acordo com Akasawa *et. al.* (2003), que afirmaram que a maior rugosidade encontrada em aços resulfurados é devida à presença de sulfetos de manganês. Eles estudaram a usinabilidade de aços austeníticos com e sem adição de elementos para melhoria da usinabilidade (Bi, S, Cu e Ca). Ao analisar a textura das superfícies usinadas com microscopia eletrônica verificaram uma maior ocorrência de

micro-fendas em todas as velocidades de corte analisadas (12,5 a 100 m/min) nos aços resulfurados. A análise por EDS permitiu verificar a ocorrência de inclusões de sulfetos de manganês no fundo das micro-fendas. A fratura ocorre na interface entre o material da matriz altamente deformado e as inclusões.

Com o aumento da população e do tamanho das inclusões a quantidade de micro-fendas aumenta o que aumenta também a rugosidade superficial. (JIANG et al., 1996) afirmam que a rugosidade superficial em aços resulfurados, quando usinados dentro da região da aresta postiça de corte (APC), depende principalmente da dimensão da APC. APCs menores proporcionam melhor acabamento superficial. Já o tamanho da APC depende da distribuição das inclusões no material. Quanto maior a quantidade de inclusões e quanto mais finamente dispersas na matriz, melhor é o acabamento superficial. Estes autores também explicam que as micro-cavidades originadas na interface matriz/inclusão podem ser fechadas na zona de cisalhamento terciária se a ductilidade da inclusão for alta o suficiente. Isto também ajudaria na diminuição da rugosidade superficial.

Segundo Katayama e Hashimura (1990) que fizeram uma investigação sobre a influência do teor de carbono, nitrogênio e fósforo sobre a força de usinagem e a rugosidade superficial do aço baixo carbono. Eles chegaram à conclusão que amostras com elementos que formam segunda fase (carbono) ou se precipitam em contorno de grão (fósforo) apresentaram maior rugosidade superficial que amostras com elementos que permanecem em solução sólida (nitrogênio). Em contrapartida, partículas de segunda fase e precipitados proporcionam menores forças de usinagem. Estes efeitos microestruturais têm forte correlação com a formação de aresta postiça de corte. Os autores identificaram que a projeção da APC em direção à superfície da peça (no caso do efeito do carbono) e o enfraquecimento do contorno de grão (no caso do fósforo) são os elementos chave que afetam a rugosidade superficial.

Quanto às condições de corte a que mais influi é o avanço. De maneira geral um aumento no avanço acarreta um grande aumento na rugosidade superficial (JIAO et al., 2004). As contribuições da velocidade de corte e da profundidade de corte são marginais, a não ser na região da formação da aresta postiça de corte. Nesta região o acabamento superficial piora muito. Uma vez acima da velocidade crítica, aumentos na velocidade de corte levam a um ligeiro declínio da rugosidade superficial, (Fig. 3.12).

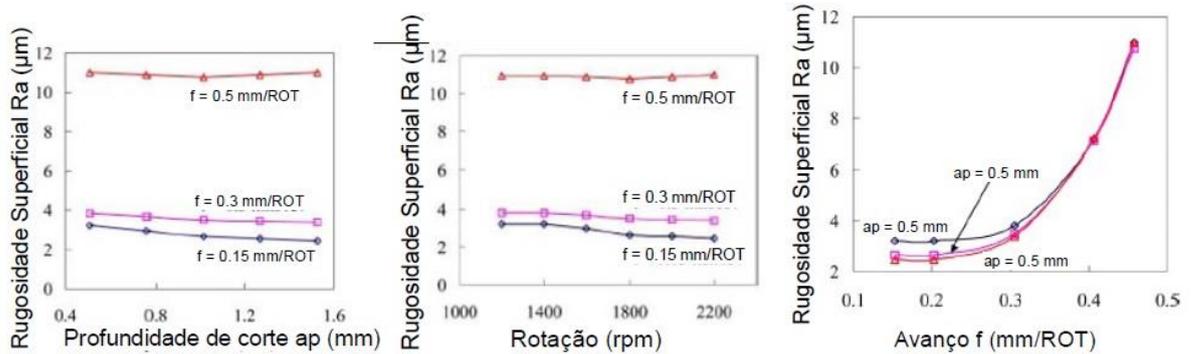


Figura 3.12 - Influência das condições de corte na rugosidade superficial. Adaptado de (JIAO et al., 2004)

3.10 TEMPERATURA DE CORTE

Praticamente toda energia mecânica associada a formação de cavacos se transforma em energia térmica (calor). Este calor acelera o processo de desgaste da ferramenta e causa problemas técnicos e econômicos nas indústrias, pois o calor excessivo causa alta temperatura indesejada na ferramenta, diminuindo sua dureza, acelerando o desgaste e levando a inutilização da mesma (SACLAM; YALDIZ; UNSACAR, 2006).

Medir a temperatura de corte não é uma tarefa fácil, tendo em vista as condições dinâmicas do processo. A interface cavaco-ferramenta é praticamente inacessível o que torna os processos de medição um tanto imprecisos. Na Figura 3.13 são representadas as três zonas distintas de geração de calor durante a usinagem, são elas:

- Zona de cisalhamento primário, zona A;
- Zona de cisalhamento secundário, zona B;
- Zona de interface entre a peça e a superfície de folga da ferramenta, zona C (também denominada por alguns autores como zona terciária);

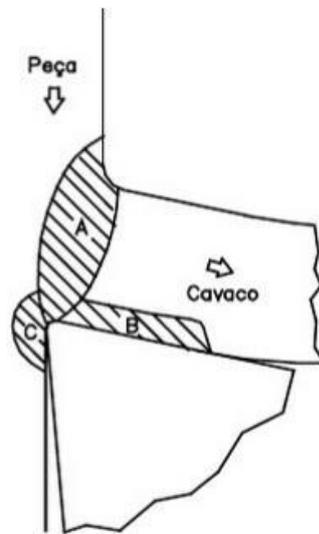


Fig 3.13 – Zonas de geração de calor em usinagem

Fonte: (MACHADO E DA SILVA, 2004)

Grande parte do calor gerado é dissipado pelo cavaco, uma pequena porcentagem é dissipada pela peça e uma outra para o meio ambiente. O restante vai para a ferramenta de corte. Apesar de a parcela do calor que é transmitida à ferramenta representar apenas 8 a 10% do total, ela é responsável pela elevação da temperatura, que pode chegar a 1100°C, o que compromete fortemente a resistência da ferramenta. E de acordo com (RODRIGUES, 2015) a equação de balanço energético fica:

$$Q_z + Q_{a1} + Q_{a2} = Q_c + Q_p + Q_{ma} + Q_f \quad (1)$$

Onde:

Q_z = Calor gerado na zona de cisalhamento primário.

Q_{a1} = Calor gerado na zona de cisalhamento secundário.

Q_{a2} = Calor gerado na zona de interface peça-superfície de folga da ferramenta.

Q_c = Calor dissipado pelo cavaco.

Q_p = Calor dissipado pela peça.

Q_{ma} = Calor dissipado pelo meio-ambiente.

Q_f = Calor dissipado pela ferramenta de corte.

Essa distribuição da temperatura se dá por vários fatores, a depender do tipo de material utilizado, das condições de corte entre outros itens; a seguir a figura 3.14 representa a porcentagem de calor gerado e o valor atingido pela temperatura para um tipo específico de material segundo (RODRIGUES, 2015):

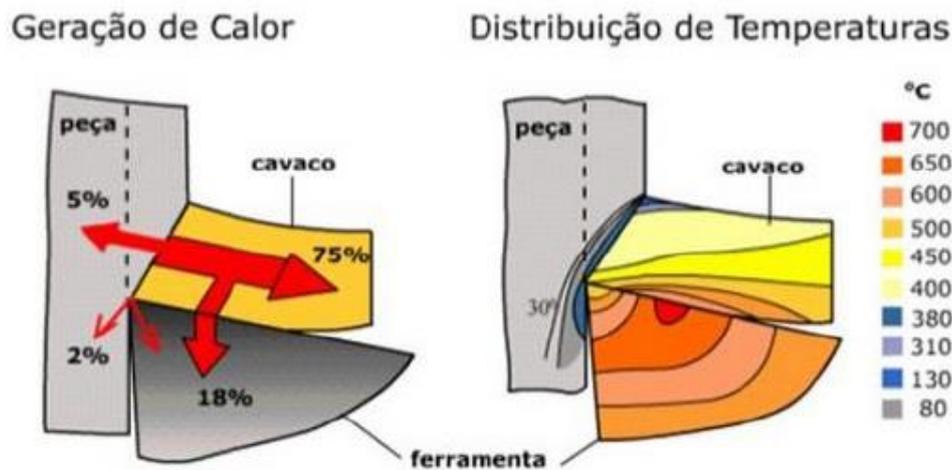


Figura 3.14 – Representação do calor gerado e o valor atingido pela temperatura.

Disponível em: (<http://assets.cimm.com.br/usinagem/con-996.gif>), acesso em 29/09/2015.

A dificuldade da obtenção da temperatura na interface cavaco-ferramenta mesmo para condições de corte simples, requer, por sua vez, a utilização de métodos distintos que podem ser aplicados a depender da situação que envolve cada componente do processo.

3.11 FLUIDOS DE CORTE

Até há pouco tempo, os fluidos de corte eram descartados no meio ambiente sem restrições. Atualmente, esta prática é dificultada não apenas pelo rigor das leis e da fiscalização, como em virtude do padrão de produção com a adoção do “selo verde”, que indica se os processos utilizados para a produção de uma determinada peça não prejudica o meio ambiente (PEREIRA, et al., 2005).

Outros fatores importantes e que precisam ser levados em consideração são os custos operacionais da produção e a preservação da saúde do ser humano (MACHADO e DINIZ, 2000). Ao longo do tempo, vários experimentos foram realizados e novos meios-refrigerantes surgiram (óleos graxos, óleos minerais, combinação de óleos e aditivos, óleos emulsionáveis). Neste cenário, tendências tecnológicas e de aplicação visam à redução ou à eliminação do uso dos fluidos de corte nos processos de usinagem.

Existem diversas formas de classificar os fluídos de corte e não há uma padronização única estabelecida entre as empresas fabricantes. A classificação dos fluidos de corte segundo Machado Diniz (2000) é colocada abaixo; posteriormente será demonstrado na tabela 2.3 a representação de alguns dos tipos, composição e propriedades dos fluidos de corte segundo (DINIZ et. al., 2006):

- Ar: Pouco utilizado, aplica-se principalmente na usinagem de ferro fundido cinzento;
- Água: Primeiro fluído a ser utilizado. Foi substituído por óleos integrais e óleo emulsionáveis devido a sua alta taxa de evaporação, deficiência em lubrificar e também provocar corrosão em materiais ferrosos;
- Emulsões: É uma solução de água com partículas de óleo solúvel dispersas em seu interior;
- Óleos: Em operações na qual o calor gerado pelo atrito é muito grande, recomenda-se o uso de óleo puro que são divididos em minerais, graxos, compostos, de extrema pressão e óleos de uso múltiplo.

Tabela 3.3 – Tipos, composição e propriedades dos fluidos de corte.

Classificação dos fluidos de corte	Sólido	Líquido			Gasoso
		Óleos puros	Óleos emulsionáveis	Fluidos químicos	
Principais composições	Grafite e bissulfeto de molibidênio.	Óleo mineral e/ou óleo graxo (Agentes EP: cloro, enxofre e fósforo).	Óleos, água e emulsificadores (Agentes EP, antioxidantes e umectantes).	Água, sais orgânicos e inorgânicos, (Agentes EP, anticorrosivos, antioxidantes, biocidas e umectantes).	Ar, dióxido de carbono, nitrogênio e vapor.
Principais propriedades	Lubrificação.	Lubrificação, Extrema-pressão, Anticorrosão.	Boa Refrigeração, Boa antioxidação, Baixa lubrificação, Boa anticorrosão, Extrema-pressão.	Excelente Refrigeração, Baixa lubrificação, Boa anticorrosão e antioxidação, Fácil remoção, Extrema-pressão.	Refrigeração.

fonte: Adaptado de (FERRARESI, 1977).

3.11.1 O fluido de corte como refrigerante

Os requisitos que um fluido de corte deve possuir para retirar eficientemente o calor da região de corte, da peça e da ferramenta, segundo Stoeterau *et al.* (2004), são:

- Baixa viscosidade a fim de que flua facilmente;
- Capacidade de “molhar” bem o metal 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 resfriá-lo. Mesmo assim, em alguns destes casos, o fluido refrigerante é utilizado 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., 2004):

- 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, de acordo com (MACHADO, et al., 2004):

- 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 Métodos de aplicação dos fluidos de corte

As direções básicas definidas para a aplicação dos fluidos lubrificantes figura 3.15 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), (DE SOUZA, 2011). A escolha da melhor direção de aplicação depende de uma série de fatores inerentes ao processo como, por exemplo, o tipo de material a ser cortado. Além da direção de aplicação, outro fator importante na utilização do fluido de corte é a forma com que este fluido é aplicado. Assim, diferentes formas e direções de aplicação têm sido usadas para conduzir o fluido de corte mais próximo possível da aresta cortante, de tal forma que ele possa exercer suas funções, principalmente a lubrificante de acordo com (DE SOUZA, 2011).

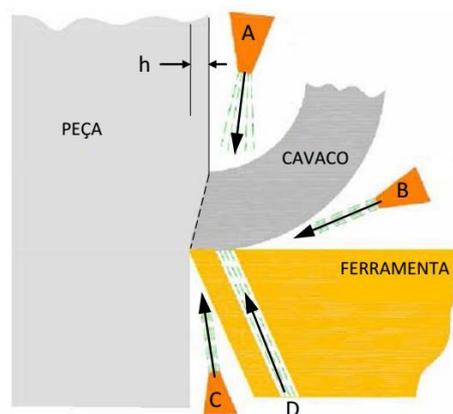


Figura 3.15 - Direções possíveis de aplicação do fluido de corte (DE SOUZA, 2011).

3.12 EFEITOS DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA NA USINABILIDADE

Segundo De Amorim (2002), os elementos de liga permitem certo controle sobre as propriedades do material e algumas características ou efeitos decorrentes da adição de alguns desses elementos nas propriedades dos aços são mais analisados e expressados, por causa de ser usado em grande quantidade nas indústrias.

No caso do efeito da adição de elementos de liga na usinabilidade dos aços de livre corte que tem como objetivo de produzir um máximo desempenho nos meios de usinagem. Geralmente são adicionados aos aços de livre corte os seguintes elementos: enxofre, chumbo, carbono, silício, fósforo, nitrogênio, cobre e estanho. Esses elementos são adicionados para aperfeiçoar suas características de usinabilidade de acordo com (PIMENTEL, 2006).

Sobre a presença de enxofre nos aços de livre corte é vista uma melhora em sua usinabilidade em uma concentração acima de 0,4%, além de ter um valor comercial relativamente barato aos demais aditivos serem comumente combinado ao manganês na forma de inserções de sulfeto de manganês (GARVEY; TATA, 1965).

Segundo Kato *et al.* (1981) que fizeram um estudo sobre o efeito que a distribuição e a geometria das partículas de inclusões, especialmente o sulfeto de manganês, exerciam sobre a usinabilidade. Eles constataram experimentalmente que o formato e distribuição das inclusões influenciam diretamente na usinabilidade, forjamento a frio e resistência à fadiga por contato rolante. Verificou-se que partículas mais arredondadas tendem a conferir uma melhor usinabilidade ao aço (Fig. 3.16).

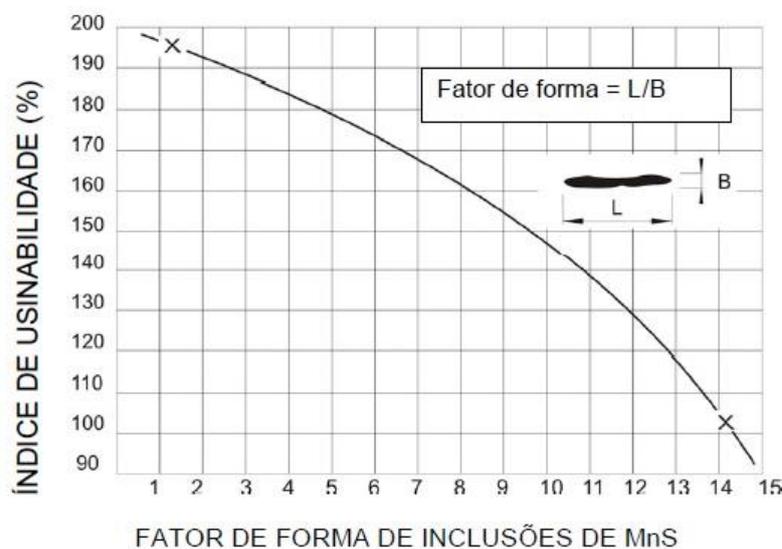


Figura 3.16 - Influência da forma dos sulfetos sobre o índice de usinabilidade (LESKOVAR;GRUM, 1986)

Já nos aços de livre corte em quem é adicionado carbono em sua composição é notável que se contenha um valor abaixo de 0,10%, pois abaixo desse valor encontram-se os índices mais elevados de usinabilidade de aços de livre corte, quanto ao silício que, prejudica a usinabilidade dos aços de corte livre seria necessário mantê-lo a um valor de 0,003% pois à medida que aumenta sua concentração diminui-se

seu índice de usinabilidade, diminuindo tempo de vida da ferramenta de corte e diminuindo a proporção de sulfeto de manganês (GARVEY; TATA, 1965). Por outro lado Catoniu *et. al.* (2002) defende que a presença de silício é benéfica a aços de livre corte desde que seus valores fiquem em torno de 0,20%, melhorando assim sua usinabilidade.

A adição de fósforo em aços de livre corte torna-se boa desde que seus valores situem-se próximos a 0.018% porque nota-se uma melhoria no acabamento superficial de peças usinadas e contribui ainda para a formação de cavacos frágeis (BAS, 2000). Para o nitrogênio com valor percentual de 0,003% demonstra características semelhantes ao fósforo. Porém um aumento de seus níveis torna-se prejudicial, pois diminuía vida útil das ferramentas de usinagem (GARVEY; TATA, 1965).

Alguns elementos em pequenas quantidades apresentam um resultado favorável quando adicionados em solução sólida com a ferrita, como o cobre, desde que seu valor varie de 0,09% a 0,40%, valores mais altos, porém, prejudicam a usinabilidade de aços de livre corte e influenciam diretamente no encurtamento de ferramentas de corte de acordo Murphy e Aylward (1971), e o estanho, com valores percentuais entre 0,04% e 0,08% dá um efeito fragilizante ao aço, quando este se localiza em seus contornos de grãos segundo Garcia *et. al.*, (2002), promovendo a quebra de cavaco e diminuindo as forças de usinagem. Na imagem abaixo se pode observar a disposição de moléculas de sulfeto de manganês e locais das trincas causadas pela inserção de estanho causando fatura intergranular no aço observada na figura 3.17.

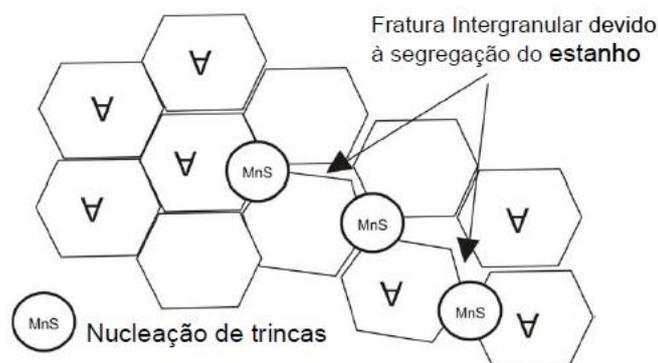


Figura 3.17 - Mecanismos de atuação do estanho na usinabilidade (DEARDO, 2002).

3.13 TESTES DE USINABILIDADE

Os testes de usinabilidade são descritos e classificados da seguinte forma, segundo (MILLS; REDFORD, 1983):

- Ensaio que requerem usinagem;
- Ensaio que não requerem usinagem.

Sendo que estes dois tipos de ensaios podem ser classificados em relação ao tempo de duração do teste:

- Curta duração (ranking testes);
- Longa duração (testes absolutos).

Em outro estudo citado por De Amorim (2002) foi definido o conceito do ranking testes e testes absolutos:

- Ranking Testes: são classificatórios e indicam a usinabilidade relativa para uma condição de corte definida.
- Testes Absolutos: indicam os méritos relativos de duas ou mais condições de pares ferramentas-peça para uma dada faixa de condição de corte.

3.13.1 Tipos de ensaio de usinabilidade

Os ensaios de usinabilidade que não necessitam de usinagem são sempre os dos tipos Ranking Testes e necessariamente de curta duração, sendo mais simples a execução em relação a outros do tipo que necessitam de usinagem. Estes ensaios são vantajosos, pois concedem uma resposta instantânea ao que se espera conhecer sobre o material em questão. Alguns desses ensaios são citados por (MACHADO et. al., 2004):

- Teste de microestrutura: analisa-se a usinabilidade através da análise microestrutural relacionando-se à dureza e velocidade. Este teste foi proposto por Zlatin (1950) e mencionado por (MILLS et. al., 1983);
- Teste de pressão constante (F_f): este teste consiste explica-se em aplicar uma força de avanço (F_f) constantemente e medir o tempo para se furar uma chapa de espessura padrão ou ainda determinar um tempo e medir o percurso do avanço. Este teste foi proposto por (BOULGER, et. al., 1951);

- Teste de faceamento rápido: Este teste consiste em facear um disco do centro à extremidade com a utilização comum de uma ferramenta de aço rápido, aumentando a velocidade constantemente, até acontecer o colapso da ferramenta, esse colapso pode ser notado pelo tempo necessário para a ferramenta falhar, ou pelo percurso do avanço até atingir a falha;
- Teste de torneamento cônico: este teste consiste em utilizar uma ferramenta de perfil cônico e usá-la no torneamento, iniciando no diâmetro menor até o maior diâmetro do cone. Este método permite um aumento contínuo da velocidade de corte, contribuindo então para o fim da vida da ferramenta. Este teste foi proposto por (HEGINBOTHAM, et. al., 1966);
- Teste de propriedades físicas: leva em considerações propriedades físicas e mecânicas para aplicação da equação geral da usinabilidade. Esta técnica foi proposta por Henkin *et. al.*, (1963) e pode ser descrita pela equação vista abaixo;

$$V_{C60} = \frac{B}{L \cdot HB} \sqrt[2]{1 - \frac{Ar}{100}} \quad (2)$$

Onde:

B = Condutividade térmica do material;

L = Um comprimento característico;

HB = Dureza Brinell do material;

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

- 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.
- 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, sendo descrita pela fórmula:

$$V_{C60} = 161.5 - 141.4 \times \%C - 42.4 \times \%Si - 39.2 \times \%Mn - 179.4 \times \%P + 121.4 \times \%S \quad (3)$$

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 METODOLOGIA

Após a escolha do tema “*Estudo da usinabilidade dos Aços de Livre Corte: Uma avaliação com base no Teste de Composição Química*” foi feita uma análise de acordo com os estudos propostos de Czaplicki (1962) e Mills *et. al.*, (1983) com o intuito de relacionar os diversos tipos de composição química dos aços de livre corte e suas propriedades para realização de ensaios que demonstrem a usinabilidade dos materiais utilizados para o estudo de acordo com a equação proposta por este tipo de teste, indica que ao se conhecer a composição química do material, pode-se relaciona-la a uma medida de usinabilidade. De acordo Czaplicki (1962), que encontrou a seguinte relação para a velocidade de corte para uma vida de 60 min no torneamento de aços:

$$V_{c60} = 161.5 - 141.4 x \%C - 42.4 x \%Si - 39.2 x \%Mn - 179.4 x \%P + 121.4 x \%S \quad (3)$$

Com as quantidades percentuais dos elementos químicos presentes nos metais, podemos então, quantificá-los de acordo com seu índice de usinabilidade.

4.2 MATERIAL ENSAIADO

Nos ensaios buscou-se certa quantidade de materiais disponíveis e que atendessem as necessidades requeridas. A maior parte dos materiais que foram usados neste trabalho foram encontrados/cedidos por “*Aços Villares*” e “*ASM Metals Handbook Desk Edition 2001*” e partir desse ponto formou-se um banco de dados e selecionados os aços de livre corte de acordo com sua classe e mostrados nas tabelas 4.1 e 4.2.

Tabela 4.1 - Aços Ressulfurados (série 11XX) % em peso. Aços Villares (2015)

Designação SAE-AISI	C %	S%	Si%	Mn%	P%
1110	0,105	0,129	0,201	0,30	0,031
1118	0,173	0,110	0,216	0,41	0,032
1137	0,371	0,097	0,228	0,44	0,035
1144	0,476	0,089	0,233	0,56	0,037

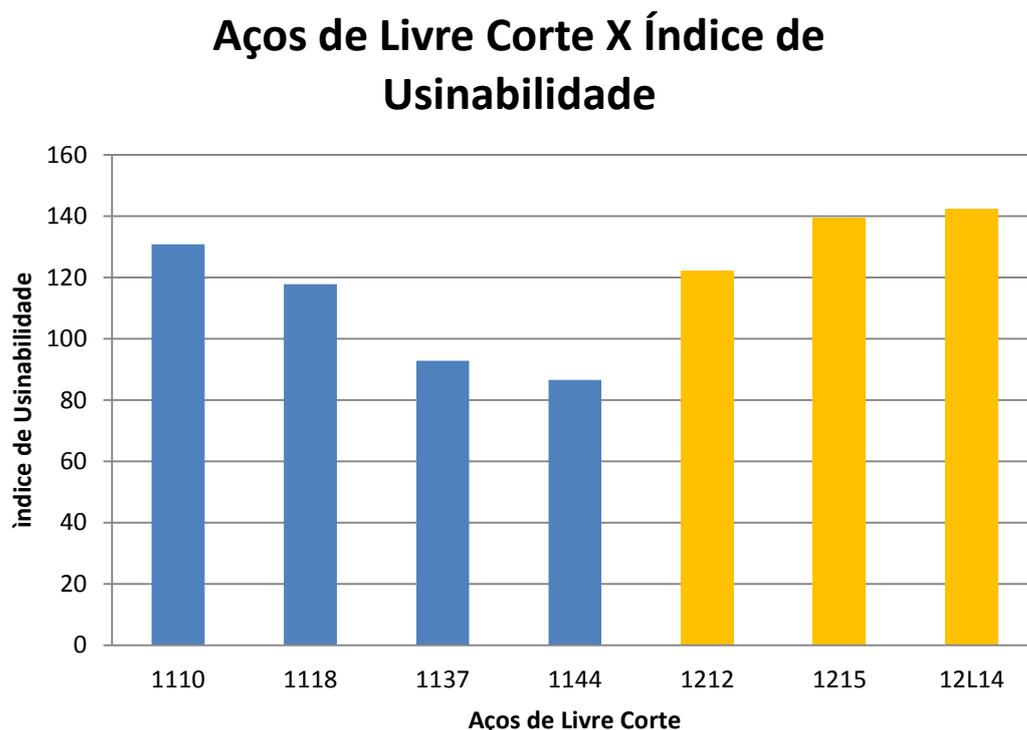
Tabela 4.2 – Aços Ressulfurados e Refosforado (série 12XX) % em peso. Aços Villares (2015)

Designação SAE-AISI	C%	S%	Si%	Mn%	P%	Pb%
1212	0,095	0,212	0,031	0,94	0,077	-
1215	0,088	0,265	0,0252	0,75	0,05	-
12L14	0,078	0,289	0,0226	0,69	0,052	0,220

5 RESULTADO E DISCURSÃO

Depois da definição da equação que determina o índice de usinabilidade de acordo com a composição química do material proposta por (CZAPLICKI, 1962) encontrou a seguinte relação para a velocidade de corte para uma vida de 60 min no torneamento de aços e já estar sabendo a composição química dos metais testado de acordo com o percentual de cada elemento da equação fez-se necessário fazer gráficos em software de processamento de dados para melhor entendimento e compreensão de como a composição química influencia na usinabilidade dos aços de livre corte. Nos gráficos abaixo se pode observar os resultados dos testes de composição química relacionados com os componentes químicos da equação juntamente com o índice de usinabilidade de cada metal.

Gráfico 5.1 – Relação entre o índice de usinabilidade e os aços de livre corte

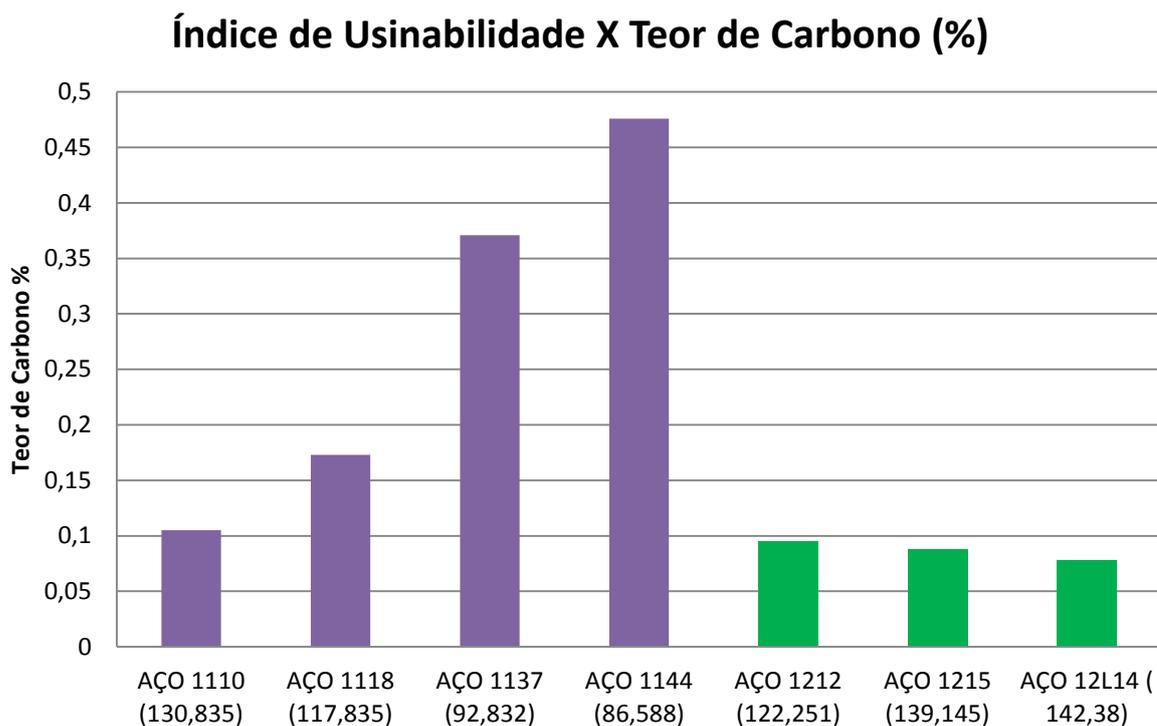


Os valores encontrados acima demonstram o índice de usinabilidade e abaixo mostra-se o material que foi feito teste de composição química na qual retirou-se os dados de sua composição na tabela 4.1 e 4.2 no gráfico 5.1 acima observamos certa

diferença entre os resultados dos índices de usinabilidade entre os aços de livre corte estudados. Isso ocorre devido às diferenças encontradas nos teores percentuais encontrados nos elementos presentes na equação que determina este índice. Podemos afirmar que tais diferenças entre a composição química são bem notadas nos teores de carbono e silício (deixando claro que quanto maior for o teor percentual destes elementos, mais eles contribuem para o desgaste da ferramenta de corte), ou ainda melhoradas devida a adição de enxofre que é bastante benéfico à usinabilidade .

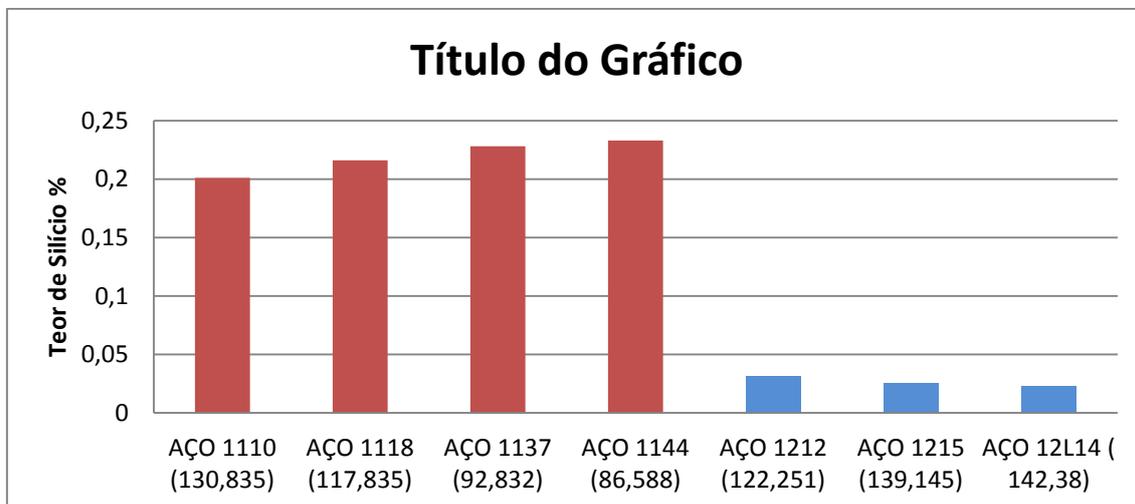
No gráfico a seguir é demonstrado o gráfico 5.2 a quantidade percentual do carbono presente nos aços de livre corte utilizados no teste relacionando com o índice de usinabilidade exposta.

Gráfico 5.2 – Relação entre o teor percentual de carbono nos aços testado e o índice de usinabilidade.



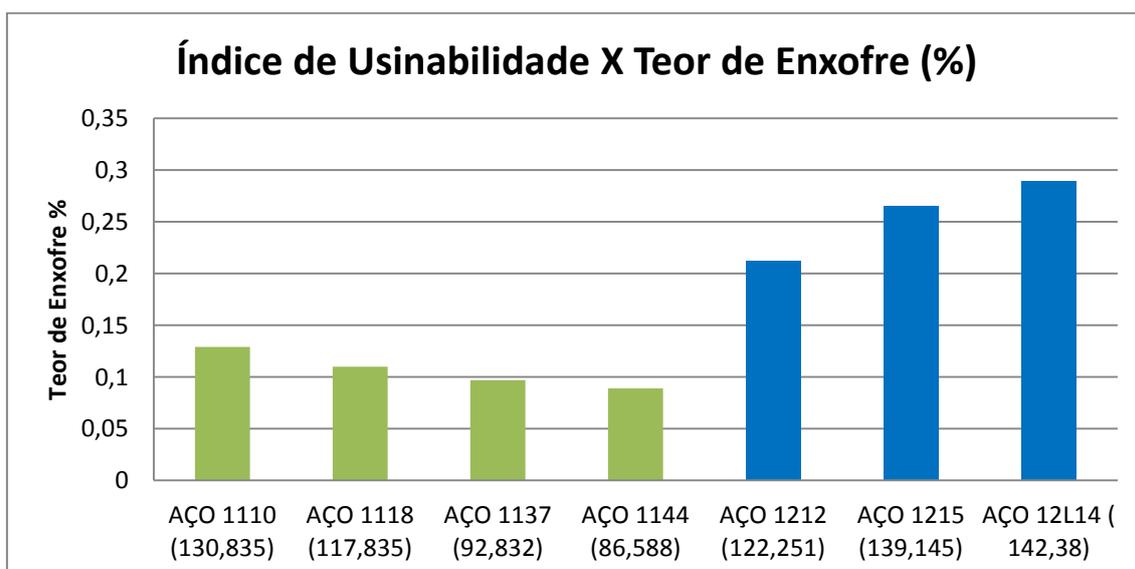
Neste gráfico 5.2 se percebe que quanto maior for o percentual de carbono menor será o índice de usinabilidade nos metais testados, pois o carbono age dificultando a usinabilidade dos aços proporcionando mais resistência à usinagem. No gráfico 5.3 observado abaixo é evidenciado a relação dos aços de livre corte resulfurado a relação entre a porcentagem do silício encontrado nos metais e o índice de usinabilidade deles.

Gráfico 5.3 – Relação entre o percentual de silício e o índice de usinabilidade encontrado nos aços de livre corte testado.



Nota-se neste gráfico, pois à medida que aumenta sua concentração do silício diminui-se seu índice de usinabilidade dos aços de livre corte, diminuindo tempo de vida da ferramenta de corte e diminuindo a proporção de sulfeto de manganês. Abaixo, no gráfico 5.4, observam-se os teores de enxofre em relação ao índice de usinabilidade para os aços de livre corte analisados neste trabalho.

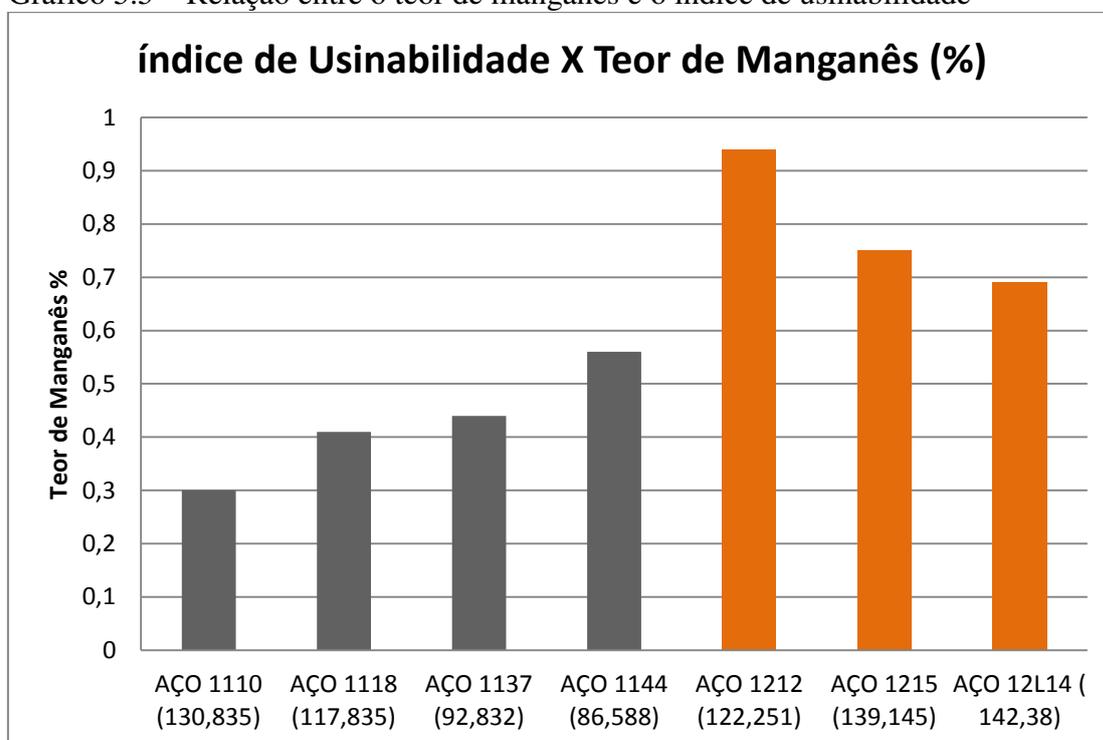
Gráfico 5.4 – Relação entre o percentual de enxofre e o índice de usinabilidade.



O enxofre adicionado aos aços de livre corte lhes traz muitas melhorias, proporcionando uma redução de atrito entre a ferramenta e o metal usinado, geralmente, combinado com o manganês na forma de inclusões de sulfeto de manganês onde proporciona os melhores índices de usinabilidade dos metais de livre corte, este elemento pode ser adicionado ao aço em teores que costumam variar entre 0,08 e 0,13% em massa, podendo chegar, em algumas classes de aço, a 0,35%.

Devido ao fato de não ser um aditivo tão caro, o enxofre é o elemento mais utilizado, pois além dessas características já citadas o enxofre ainda reduz as forças de corte e conseqüentemente uma diminuição do desgaste da ferramenta. A seguir, no gráfico 5.5 mostra-se a relação do manganês em relação ao índice de usinabilidade.

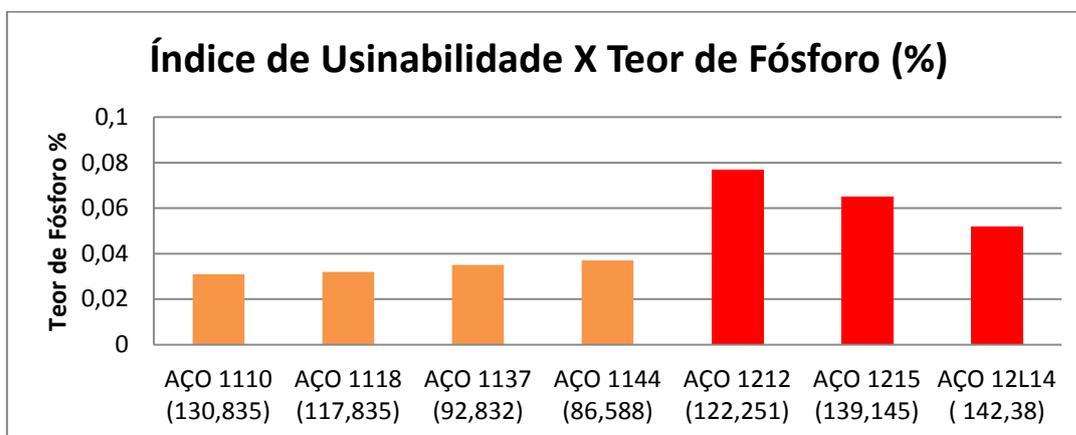
Gráfico 5.5 – Relação entre o teor de manganês e o índice de usinabilidade



É de conhecimento que o manganês quando adicionado em combinação com enxofre, forma o sulfeto de manganês (MnS), cujo resultado foi descrito anteriormente. Porém, na ausência de enxofre, causa diminuição na usinabilidade devido ao aumento causado na dureza do material, daí deve-se tomar cuidado ao adicionarmos o manganês para maior desempenho para a usinabilidade, pois apesar de causar melhores índices quando associado ao enxofre sem ele o resultado não seria tão satisfatório. A seguir, tem-se o gráfico 5.6, o último elemento analisado de acordo com a equação proposta por Czaplicki (1962) onde é relacionado o índice de usinabilidade

com os teores percentuais de fósforo presente para determinação do índice de usinabilidade.

Gráfico 5.6 – Relação entre o teor de fósforo e o índice de usinabilidade.



A adição de fósforo em aços de livre corte tona-se boa desde que seus valores situem-se próximos a 0.018% porque nota-se uma melhoria no acabamento superficial de peças usinadas e contribui ainda para a formação de cavacos frágeis, por isso no gráfico 5.6 nota-se que à medida que os teores de fósforo vão além de 0,018% as melhorias causadas por ele já não são tão boas e chegam até ser prejudiciais. Na tabela 5.1 abaixo notamos a diferença entre a composição química dos aços de livre corte estudado neste trabalho.

Tabela 5.1 – Teores da composição química dos aços de livre corte utilizados neste trabalho.

DESIGNAÇÃO SAE-AISI	%C	%S	%Si	%Mn	%P	Índice de Usinabilidade
1110	0,105	0,129	0,201	0,3	0,031	136,46
1118	0,173	0,11	0,216	0,4	0,032	119,81
1137	0,371	0,097	0,228	0,44	0,035	87,62
1144	0,476	0,089	0,233	0,55	0,037	66,92
1212	0,095	0,212	0,031	0,94	0,077	121,82
1215	0,088	0,265	0,0252	0,75	0,065	139,09
12L14	0,078	0,289	0,0226	0,69	0,052	148,22

6 CONCLUSÃO

Este trabalho instituiu uma linha de estudo bem determinada no estudo da usinabilidade de aços de livre corte baseada no teste de composição química, além de também estudar parâmetros e principalmente as propriedades que influenciam a usinabilidade. Deste modo pode-se fazer ensaios de usinabilidade estabelecendo os seus índices de usinabilidade dos materiais metálicos através do teste de composição química. Neste trabalho foram selecionados sete tipos de aços de livre corte resulfurados e refosforados para o teste de composição química para determinação do índice de usinabilidade dos metais testados através do valor de velocidade utilizada.

A realização do teste de composição química através da relação dos teores dos elementos presentes na equação proposta por (CZAPLICKI, 1962) é seguramente de uma importância muito grande para empresas que trabalham com fabricação de peças e na metalurgia, pois se sabe que este é um teste prático e rápido para determinar o índice de usinabilidade e para se estabelecer uma faixa de velocidade de usinagem de um determinado material, economizando assim, tempo e recurso para práticas de ensaios da usinabilidade dos materiais.

Os resultados se mostraram satisfatórios dos índices de usinabilidade dos materiais ensaiados através do teste de composição química dos metais e a influência dos teores de todos os elementos químicos.

Pode-se então perceber que alguns elementos tornam-se prejudiciais como o carbono e silício em grandes quantidades, pois diminuem a vida da ferramenta de corte e aumentam a resistência do material, conseqüentemente diminuem a usinabilidade deles.

Já o enxofre, manganês e fósforo atuam como facilitadores desde que estes estejam no intervalo permitido nas normas AISI-SAE, pois promovem melhorias como a redução de atrito entre a ferramenta e o metal usinado, redução das forças de corte, melhoria no acabamento superficial e aumento da vida da ferramenta de corte.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudo da usinabilidade dos aços liga: com base nos teste de propriedades físicas;
- Estudo da influência da Aresta Postiça de Porte (APC) na usinagem em baixas velocidades;
- Estudo da influencia dos elementos residuais Níquel e Cobre nos aços resulfurados e refosforado (12XX);
- Estudo da usinabilidade dos aços de livre corte com base nos testes de propriedades físicas.

REFERENCIAS

AÇOS VILLARES, acessado <http://www.villaresmetals.com.br/pt> em 13/10/2015.

AKASAWA, T.; SAKURAI, H.; NAKAMURA, M.; TANAKA, T.; TAKANO, K.
Effects of freecutting additives on the machinability of austenitic stainless steels.
Journal of Materials Processing Technology. p. 143–144, 2003, 66–71.

AMELLING, D. et al. Stahl und Eisen, v.106, n.1, p. 35, 1986.

ASM Handbook: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys, 1990, Volume 1.

BANDYOPADHYAY, B. P. Mechanism of Formation of Built-up Edge, Precision Engineering. v. 6(3), p. 148-151, Jul. 1984.

BAS, J. Aços especiais de usinabilidade melhorada. Máquinas e Metais. Editora Aranda. Ano XXXVII, nº 442. Março de 2001.

BERTRAND, C., DEL SOLAR, M. - Can We Survive Without Leaded Steels? - 4th. International Conference on Behaviour of Materials in Machining – UK – 1998.

CANDIDO, M. R. Aplicação da Transformada Wavelet na análise da qualidade de energia em fornos elétricos, 2008.

CANTANHEDE, R. C. Estudo da usinabilidade dos aços comum ao carbono e dos aços liga, 2015.

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

CHEVRAND, J. L. S. Aciaria elétrica. São Paulo: ABM, 2003. 308p.

CZAPLICKI, L. “L’usinabilite et al Coupe de Metaux”, Res. Soc. Roy. Belge Ingeniere, 12, 1962, pp 708-736.

DE ALMEIDA, Marcos César. Estudo do Efeito dos Elementos Residuais (Cr, Ni e Cu) no Torneamento do Aço-de-Corte-Fácil ABNT 12L14. Itajubá - MG, 2005.

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

DeARDO, A. J. et al. Free-machining steels containing tin antimony and/or arsenic. United States Patent. March 13, 2001.

DeARDO, A. J. Lecture V: New Machinability-Enhanced Bar and Rod Steels. University of Pittsburgh, 2002.

DeARDO, A. J.; GARCIA, C. I. TIN-Bearing Free-machining Steel. United States Patent nº 5961747. Oct. 5, 1999.

DINIZ Anselmo Eduardo e et al. Tecnologia da Usinagem dos Materiais [Livro]. – São Paulo : Artliber, 2006.

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

FERRARESI, D. Fundamentos da Usinagem dos Metais. 4 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1977. 751p / ANSELMO, E. D., et al. Tecnologia da Usinagem dos Materiais. 1 ed. São Paulo: Art Liber, 2000. 244p.

FRUEHAN, R. J. Ladle metallurgy principles and practices. The Iron and Steel, 1985.

GARVEY, T. M.; TATA, H. J. Factors affecting the machinability of low-carbon free-machining steels. Mechanical working of steel II. 1965. p 99-132.

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

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

JIANG, L.; CUI, K.; HÄNNINEN, H. Effects of the composition, shape factor and área fraction of sulfide inclusions on the machinability of re-sulfurized free-machining steel. Journal of Materials Processing Technology. n. 58, p. 160-165, 1996.

JIAO, Y.; LEI, S.; PEI, Z.J.; LEE, E.S. Fuzzy adaptive networks in machining process modeling: surface roughness prediction for turning operations. International Journal of Machine Tools & Manufacture. n. 44, p. 1643–1651, 2004.

KATAYAMA, S.; HASHIMURA, M. Effect of carbon, phosphorus and nitrogen contents in steel on machined surface and cutting force. ISIJ International. v.. 30, n. 6, p. 457-463, (1990).

KATO, et al. Free cutting steel containing sulfide inclusion particles with controlled aspect, size and distribution. United States Patent 4,279,646. July 21, 1981.

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.

LESKOVAR, P.; GRUM, J. The metallurgical aspects of machining. CIRP reports and news, pp. 537-550. Annals of the CIRP vol. 35/2/1986.

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

LUIZ, Nelis Evangelista 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.

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

MACHADO, Á. R.; Da SILVA, M. B. Usinagem dos Metais. Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem. Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Uberlândia. Versão 8. Abril de 2004. 257p.

MACHADO, A. R.; SILVA, M. B. Usinagem dos Metais. Apostila didática, 7ª versão. UFU, Uberlândia, 2009.

MACHADO, Álisson Rocha [et al.] Teoria da Usinagem dos Metais [Livro]. - Uberlândia : Blucher LTDA, 2009.

MILLS, B.; REDFORD, A.H. “Machinability of Engineering Materials”, Applied Science Publishers, London, 1983.

MURPHY, D. W.; AYLWARD, P. T. Machinability of Steel. Bethlehem Steel Corp., publicação n.º 2026-653. 1973.

NAYLOR, D. J. Free Machining Steels. 1990.

OLIVEIRA, H. A. Estudo de usinabilidade dos materiais metálicos: uma avaliação com base no teste de propriedades físicas, 2014.

DE OLIVEIRA, Vagner Gonçalves. A influência do cavaco no processo de usinagem com ferramentas de corte em torno CNC. Disponível em <
<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAamgAG/a-influencia-cavaco-no-processo-usinagem-com-ferramentas-corte-torno-cnc?part=2#>> Acesso em: 03 de Dezembro de 2015.

PIMENTEL, Marcelo Francisco. Influência da Composição Química e da Microestrutura na Usinabilidade do Aço de Corte Fácil com Adição de Chumbo SAE 12L14. Guaratinguetá – SP, 2006

RAMAN, S.; LONGSTREET, A.; GUHA, D. A fractal view of tool–chip interfacial friction in machining. Wear. n. 253, p. 1111–1120, 2002.

REIS, L. L. G.; SILVA Jr., W. M. S.; MACHADO, A. R. Effect of Cutting Speed and Cutting Fluid on the BUE Geometry of a SAE 12L14 Free Machining Steel. *Journal of The Brazilian Society of Mechanical Science and Engineering*. 2007.

RODRIGUES, M. V. R. Estudo dos diferentes métodos práticos empregados para medição da temperatura de corte gerada durante o processo de usinagem por torneamento, 2015.

SÁNCHEZ CARRILERO, Manuel. Estudo da rugosidade da usinagem da liga Al-Cu AA 2024. p. 283- 288, 2002.

STEUBER, J. E. Current solutions to hydrogen problems in steels. ASM – Metal

STOETERAU, Rodrigo Lima. Fabricação por Remoção do Material//Apostila elaborada em 2004.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. *Metal Cutting*. 4th Edition, Butterworth-Heinemann. ISBN 0-7506-7069-X. 446, 2000. 446p.

TRENT, E.M. “Cutting Steel and Iron with Cemented Carbide Tools - Part II: Conditions of Seizure at the Tool/Work Interface”, *Journal of the Iron and Steel Institute*, Nov. 1963, pp. 923-932.

TROIANI, F. Aços resulfurados de corte fácil. Disponível em: <
http://www.usinagembrasil.com.br/construtordepaginas/htm/1_1_3511.htm> Acesso em:
27 set. 20015.

WISE, M. L. H., MILOVIC, R. Ranges of Application of free-cutting steels and recommended tool materials. *Materials and Science Technology*. v. 4, p. 933, October 1988.