



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO

Curso de Engenharia Mecânica

AVINER DE JESUS SOARES DOS SANTOS

**ESTUDO DA USINABILIDADE DO AÇO DE LIVRE CORTE: UMA
AVALIAÇÃO COM BASE NO TESTE DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA A
PARTIR DA VARIAÇÃO DO TEOR DE CARBONO DO AÇO ABNT 12L14.**

SÃO LUÍS/MA

2017

AVINER DE JESUS SOARES DOS SANTOS

**ESTUDO DA USINABILIDADE DO AÇO DE LIVRE CORTE: UMA
AVALIAÇÃO COM BASE NO TESTE DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA A
PARTIR DA VARIAÇÃO DO TEOR DE CARBONO DO AÇO ABNT 12L14.**

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

Orientador: Prof. Dr. Jean Robert P. Rodrigues

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À
VERSÃO FINAL DA MONOGRAFIA
DEFENDIDA PELO (A) ALUNO (A) AVINER
DE JESUS SOARES DOS SANTOS, E
ORIENTADA PELO (A) PROF (A). DR (A)
JEAN ROBERT P. RODRIGUES.

ASSINATURA DO ORIENTADOR

SÃO LUÍS/MA

2017

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

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ESTUDO DA USINABILIDADE DO AÇO DE LIVRE CORTE: UMA
AVALIAÇÃO COM BASE NO TESTE DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA A
PARTIR DA VARIAÇÃO DO TEOR DE CARBONO DO AÇO ABNT 12L14.**

Autor: Aviner de Jesus Soares dos Santos

Orientador: Prof. Dr. Jean Robert P. Rodrigues

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Monografia:

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

Prof. Dr. José Roberto Pereira Rodrigues
Universidade Federal Maranhão

Prof. Me. Clarianne Natali Campos
Universidade Federal do Maranhão

São Luís/MA, 06 de dezembro de 2017.

Dedicatória

Aos meus pais, José de Ribamar Neves e Cledinilde de Jesus Soares dos Santos.

Aos meus amigos que me acompanharam nessa jornada.

E principalmente a Deus.

Agradecimentos

Primeiramente a Deus pelo dom vida, por sua misericórdia e por todo seu amor. E por tudo que fez e tens feito ao longo de minha vida, e não somente nestes anos como universitário, mas em todos os momentos de toda essa jornada até aqui, a ele seja dada toda honra e glória.

Ao meu professor e orientador Dr. Jean Robert Pereira Rodrigues, por ter me aceito como seu orientando e por desempenhar um honrável papel como engenheiro e professor desta universidade, além de um excelente exemplo como profissional.

Aos meus pais José de Ribamar Neves dos Santos e Cledinilde de Jesus Soares dos Santos, por me guiar sempre pelo caminho da honestidade, por me ensinar valores essenciais para a minha formação, por me mostrar o caminho certo a seguir e por ter depositado todos os seus esforços para me educar da melhor maneira possível e sempre confiar em mim, por acreditar no meu sucesso acadêmico e profissional, e por nunca desistir de mim.

À os meus avós Clemente Soares e Eronildes Cutrim por todo o amor e preocupação, pela grande ajuda quem deram na minha criação e que para sempre serei muito grato.

A minha Prima Elisangela dos Santos Soares por todo apoio e companheirismo durante esses anos, meu muito obrigado.

As minhas tias, primas e tios e familiares por sempre em apoiarem até hoje.

A Turma da Engenharia Mecânica 2011.1 uma família maravilhosa a qual tive a grande oportunidade de participar, que me incentivaram e me apoiaram para que eu obtivesse êxito nessa jornada.

Resumo

A usinabilidade é uma propriedade que necessita da interação entre o processo de fabricação e as características do material da peça. No caso dos aços, a composição química e as microestruturas possuem um efeito acentuado na usinabilidade dessa classe de materiais metálicos. Este trabalho tem como objetivo estudar a usinabilidade dos aços de livre corte com base no teste de composição química proposto por Czaplicki, que leva em consideração os elementos químicos residuais que compõem os aços de livre corte, onde será feita uma análise sobre os efeitos examinados de cada elemento que integram a equação do teste de composição química e sua interferência no índice de usinabilidade das amostras analisadas. Em seguida, com os elementos químicos residuais estabelecidos com suas respectivos percentuais que compõem esses metais, foi feito uma tabela para dispor o montante de dados, para a posteriores estudar os efeitos da usinabilidade desses metais. Foi utilizado um software de análise de dados para o auxílio da determinação do índice de usinabilidade devido a necessidade de ter uma maior confiabilidade para os resultados, em seguida foram gerados gráficos com a para uma disposição e interpretação dos resultados obtidos. Ficando claro que os elementos Fósforo, Enxofre, Manganês possuem efeitos positivos na usinabilidade em teores comedidos, e esses dois últimos apresentam esse efeito quando estão combinados e em contrapartida os elementos Carbono e Silício apresentaram-se como prejudiciais quando seus teores são elevados.

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

Abstract

A machinability is a property that requires the interaction between the manufacturing process and the characteristics of the part material. In the case of steels, a chemical composition and as microstructures, a marked effect on the machinability of the metallic materials class. The aim of this work is to study the machinability of the free - cutting steels based on the chemical composition test proposed by Czaplicki, which takes into consideration the chemical elements residues that compose the free cutting steels, where an analysis is made of the effects examined each element that integrates the equation of the test of chemical composition and its interference without index of usability of the samples analyzed. Then, with the residual chemical elements established with their respective percentages that make up these metals, a table was made to arrange the amount of data, for a later study the effects of the machinability of the metals. Data analysis software was used to aid in the determination of the machinability index due to the need to have greater reliability for the results, to generate graphs with an arrangement for the interpretation of the obtained results. It is clear with the elements Phosphorus, Sulfur, Manganese, the positive effects on the machinability at moderate contents, and the latter two, in which they are combined and in contrast the elements Carbon and Silicon have presented themselves as harmful when their contents are high.

Keywords: Free Cut Steel, Machinability Index, Chemical Composition Test.

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Classificação geral dos aços especiais.	22
Figura 2.2 - Exemplos de peças fabricadas de Aço de Corte Fácil.	26
Figura 2.3 - Diagrama da cunha cortante	27
Figura 2.4 - Formação do cavaco: a) cavaco de cisalhamento ou cavaco de ruptura; b) cavaco contínuo.	28
Figura 2.5 - Esquema mostrando as zonas de cisalhamento primária e secundária	29
Figura 2.6 - Cavaco Contínuo.	30
Figura 2.7 - Cavaco de Cisalhamento	30
Figura 2.8 - Cavaco de Ruptura.....	31
Figura 2.9 - Cavaco Segmentado.....	31
Figura 2.10 - Formas do cavaco classificados de acordo com a Norma ISSO 3685.	32
Figura 2.11 - Cavacos formados nos ensaios dos materiais: a) “0-Bi” (sem adições de bismuto); b) “1-Bi” (com 0,026 % de bismuto)	33
Figura 2.12 - Cavacos formados em ensaios de campo: a) material “0-Bi”; b) materiais “1-Bi” e “2-Bi”	33
Figura 2.13 - Influência do avanço na forma do cavaco do aço de corte fácil ABNT 12L14. Condições de corte: $V_c = 141$ m/min e $a_p = 2,0$ mm	35
Figura 2.14 - Condições de interface cavaco-ferramenta: a) Aderência e Escorregamento; b) Aresta Postiça de Corte.....	36
Figura 2.15 - Variação das dimensões da APC (altura “H” e largura “L”) com a velocidade de corte.	38
Figura 2.16 - Presença de chumbo aderido na superfície de saída da ferramenta de metal após usinar latão de corte fácil à velocidade de corte de 180 m/min.....	38
Figura 2.17 - Lista dos materiais para ferramentas de corte	41
Figura 2.18 - Geometria da ferramenta.....	42
Figura 2.19 - Lascamento na aresta de corte.	46
Figura 2.20 - Trincas ou fissuras térmicas na aresta de corte.....	46
Figura 2.21 - Desgaste de flanco na aresta de corte	47
Figura 2.22 - Desgaste de cratera na superfície de saída do cavaco.....	48
Figura 2.23 - Quebra da ferramenta.....	48
Figura 2.24 - Aresta postiça de corte.	50

Figura 2.25 - Sequência de fotografias ao longo da espessura de corte 'b' após usinar a 20,91 m/min e com fluido de corte.	51
Figura 2.26 - Variação das dimensões da APC com a velocidade de corte com identificação dos regimes estável e instável e da velocidade de corte crítica.	52
Figura 2.27 - Componentes da Força de Usinagem no torneamento.....	53
Figura 2.28 - Rugosidade Ra para amostras de aço de corte fácil ao chumbo ABNT 12L14 em função da velocidade de corte, $f = 0,138$ mm/volta e $a_p = 2,0$ mm.	56
Figura 2.29 - Zonas de geração de calor em usinagem.	57
Figura 2.30 - Princípio dos termopares, onde "p" e "q" representam as junções, "A" e "B" representam os materiais: a) corrente termoelétrica "i"; b) circuito termoelétrico onde a junção "q" foi aberta.	58
Figura 2.31 - Esquema geral do método do termopar ferramenta-peça utilizado na medição da temperatura de usinagem.	59
Figura 2.32 - Esquema geral da calibração do sistema termopar ferramenta-peça utilizando chama de maçarico e elemento de aquecimento (pino metálico).....	60
Figura 2.33 - Componentes da conta ponta rotativa modificada para o método termopar ferramenta-peça.	61
Figura 5.1- Índice de Usinabilidade das Amostras.....	77
Figura 5.3 - Relação entre Índice de Usinabilidade x Teor de Silício.....	78
Figura 5.2 - Relação entre Índice de Usinabilidade x Teor de Carbono.....	79
Figura 5.4- Relação entre Índice de Usinabilidade x Teor Enxofre.....	80
Figura 5.5 - Relação entre Índice de Usinabilidade x Teor de Manganês.....	81
Figura 5.6 - Relação entre Índice de Usinabilidade x Teor de Fósforo.....	82

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Composição química dos aços de corte fácil	19
Tabela 2.2 - Usinabilidade de aços de corte fácil	20
Tabela 2.3 - Propriedades mecânicas de aços de corte fácil.	21
Tabela 2.4 - Tipos de inclusões em aços de corte fácil.	23
Tabela 2.5 - Apresenta a composição química do aço resulfurado SAE 12L3 conforme a norma SAE J 403.	24
Tabela 2.6 - Composição química do aço resulfurado com adição de chumbo SAE. ..	25
Tabela 2.7 - Influência dos ângulos de saída e inclinação no torneamento..	43
Tabela 2.8 - Principais parâmetros de rugosidade segundo Norma NBR ISO 4287.	55
Tabela 2.9 - Tipos, composição e propriedades dos fluidos de corte.	63
Tabela 2.10 - Influência de elementos de liga sobre as características fundamentais dos aços para ferramentas.	69
Tabela 4.11 - Composição química do ABNT 12L14 conforme o fabricante.	73
Tabela 4.12 - Composição química do ABNT 12L14 conforme o fabricante e o índice de usinabilidade gerado.	74

Lista de Abreviaturas e Siglas

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

AISI - 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 – toleladas

Dilatação térmica - $\mu\text{m}/\text{m } ^\circ\text{C}$

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1 AÇOS DE LIVRE CORTE	19
2.2 Tipos de Aço de Livre Corte.....	21
2.2.1 Principais Tipos de Aços de Corte Fácil	23
2.3 FORMAÇÃO DE CAVACO.....	27
2.3.1 Tipos e características dos cavacos	29
2.4 INERFACE CAVACO-FERRAMENTA	36
2.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE A FERRAMENTA DE CORTE	39
2.5.1 Requisitos desejados em uma ferramenta de corte	39
2.5.2 Geometria da ferramenta de corte	42
2.5.3 Conceito de vida da ferramenta	43
2.5.4 Desgaste e avarias de ferramenta de corte	44
2.5.5 Tipos de Avarias e Desgaste	45
2.5.6 Causas de desgastes da ferramenta	49
2.6 ARESTA POSTIÇA DE CORTE	49
2.7 FORÇAS DE USINAGEM.....	52
2.8 RUGOSIDADE SUPERFICIAL	55
2.9 TEMPERATURA DE CORTE.....	56
2.9.1 Método do Termopar Ferramenta-Peça	58
2.10 FLUIDOS DE CORTE.....	61
2.10.1 O fluido de corte como refrigerante	63
2.10.2 O fluido de corte como lubrificante	64
2.10.3 Métodos de aplicação dos fluidos de corte	65
2.11 EFEITOS DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA NA USINABILIDADE.....	65

2. 12 TESTES DE USINABILIDADE	69
2. 12. 1 Tipos de ensaio de usinabilidade	70
3 MODELAGEM TEÓRICA.....	72
4 ANÁLISE EXPERIMENTAL	73
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	74
6 CONCLUSÃO.....	81
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	82
REFERÊNCIAS	

1 INTRODUÇÃO

Segundo Evangelista (2007) o mundo integrado tem levado as indústrias a uma busca contínua na redução dos custos de produção. Onde dentro desta filosofia, as indústrias de autopeças e metal-mecânica precisam obter índices internacionais em produtividade, qualidade e custos de fabricação.

Desse modo, há uma contínua preocupação pelas siderurgias em disponibilizar aços que apresentem um desempenho diferenciado na usinabilidade em relação aos seus similares, sem que haja alterações nas propriedades requeridas para sua aplicação (KLUJSZO & SOARES, 2003).

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

Consoante Machado (2011) a usinagem abrange todos os processos de fabricação mecânica onde a peça final é obtida através da remoção de cavacos. Define-se cavaco como a porção de material da peça bruta em excesso, que é removida durante o processo através de ferramentas de corte, sendo um dos mais importantes processos de fabricação da indústria metal-mecânica.

De acordo com Costa (2014) no processo de usinagem, é economicamente interessante atingir maiores taxas de remoção de cavaco, maior vida útil das ferramentas de corte, melhor integridade superficial das peças produzidas, redução dos custos gerais e etc. A busca por estas características tem levado ao desenvolvimento da classe de aços especiais denominados “aços de livre corte” ou “aços de corte livre”.

Para Pimentel (2004) os aços de corte fácil são projetados com o objetivo de obter máximo desempenho em operações de usinagem. Onde sua principal característica é um alto teor de enxofre, que pode ser ainda melhorada por adição de chumbo. Estes aços são predominantemente aplicados na fabricação de peças que possuem poucas exigências

mecânicas, tais como: componentes para bombas, buchas, pistões de pequenos compressores, etc.

Os fatores fundamentais 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.

O objetivo do presente trabalho é o estudo da usinabilidade do aço de livre corte: uma avaliação com base no teste de composição química a partir da variação do teor de carbono do aço ABNT 12L14. Além de definir e caracterizar os aços livre de corte; determinar os tipos de aço livre corte; pesquisar os tipos de composição química existentes em aços de livre corte; analisar os fatores que influenciam na usinabilidade dos aços como: a dureza, as microestruturas, a presença de inclusões, presença de elementos de ligas; analisar os efeitos da composição química na usinabilidade e realizar testes de usinagem; comparar os resultados obtidos com as diferentes percentagens da composição química nos processos de usinagem em aços de livre corte; e analisar os resultados em software de acordo com as porcentagens de elementos químicos de acordo com dados oferecidos pelos fabricantes de aço de livre corte identificando o seu índice de usinabilidade.

Este trabalho montou um banco de dados relacionado ao tema, “Uma avaliação com base no teste de composição química a partir da variação do teor de carbono do aço ABNT 12L14”, para a aplicação da equação de teste de composição química. Em seguida fez-se uma revisão bibliográfica geral sobre o assunto de usinabilidade até desvendar e desenvolver a maneira correta de se calcular o índice de usinabilidade através da equação de teste de composição química. Com base no banco de dados gerado, coletou-se as referências necessárias e a simulação foi feita pela fórmula em uma planilha elaborada em programa de análise de dados. Desse modo foi criada uma tabela com os resultados e também foram gerados os gráficos para melhor comparar os resultados encontrados.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A usinabilidade é uma propriedade que depende da interação entre o processo de fabricação e as características do material da peça. No caso dos aços, a composição química, a microestrutura e os tratamentos térmicos e mecânicos têm um efeito acentuado na usinabilidade dessa classe de materiais metálicos (FERRARESI, 1977).

Entre esses aços especiais têm-se os aços de corte-livre, que são aqueles projetados com o objetivo de obter máximo desempenho em operações de usinagem. Usualmente são adicionados enxofre (para formação de sulfetos de manganês) e chumbo. Estes materiais são considerados aditivos de corte fácil que promovem a melhoria da usinabilidade. De especial importância são os aços de corte fácil baixo carbono que respondem pelo maior volume consumido dentro deste grupo de aços. Verifica-se que as variações na composição química sejam umas das principais responsáveis por estas variações de usinabilidade (LUIZ, 2007).

A usinabilidade dos aços de corte fácil está relacionada diretamente à formação de sulfetos e inclusões metálicas. A formação dos sulfetos apropriados é ocasionada pelo controle do oxigênio ativo durante o processo de fabricação, pela adição de enxofre, telúrio e selênio. As inclusões metálicas são formadas pela adição dos elementos chumbo e bismuto. A adição de alguns aditivos como o boro e o tratamento com o cálcio contribuem para a melhora da usinabilidade dos aços de corte fácil (BARRETOS, 200; BAS, 2000).

As demais características mecânicas como ductilidade, resistência à tração, resposta ao tratamento térmico e outras são consideradas como secundárias para este tipo de aço. Esse tipo de aço possui baixo teor de carbono e alto teor de enxofre, além de um teor de manganês que garanta uma relação manganês-enxofre propícia para a formação de sulfetos de manganês, em vez de sulfetos de ferro. Os aços de corte fácil são caracterizados por boa usinabilidade e por gerarem cavacos facilmente quebráveis (KLUJSZO, 2003; EVANGELISTA, 2004).

2.1 AÇOS DE LIVRE CORTE

Para Almeida (2005) os aços de corte fácil podem ser determinados como aços especialmente desenvolvidos para oferecer os melhores resultados mediante operações com arranque de cavacos. Esse tipo de aço possui baixo teor de carbono e alto teor de enxofre, além de um teor de manganês que garanta uma relação manganês-enxofre propícia para a formação de sulfetos de manganês, em vez de sulfetos de ferro. Estes ainda são caracterizados por boa usinabilidade e por gerarem cavacos facilmente quebráveis.

Os aços-de-corte-fácil são caracterizados por apresentarem baixo teor de carbono ($\leq 0,15\%C$) na sua composição química. A tabela 2.1 mostra a composição química dos aços- de-corte-fácil conforme as normas ABNT-NBR 6006 (ABNT, 1980) e SAE J403 (SAE, 2003). Pode-se verificar que nos aços-de-corte-fácil existe a introdução de fósforo e enxofre além dos teores normais com o intuito de melhorar sua usinabilidade. Esses aços são conhecidos como aços refosforados e resulfurados (CHIAVERINI, 2005).

Tabela 2.1 - Composição química dos aços de corte fácil.

Fonte: ABNT-NBR 6006, 1980; SAE J403, 2003.

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

Segundo Troiani (2004), as composições químicas dos aços de corte fácil não se limitam apenas aos elementos carbono, manganês, fósforo, enxofre e chumbo. Existe também a presença de outros elementos como silício, molibdênio, alumínio, cromo, níquel, cobre e outros elementos chamados residuais. A adição de teores mínimos de telúrio, selênio ou cálcio contribuem para obtenção de inclusões esféricas de MnS que se

transformarão em elipsóides na laminação, a forma elipsóide é a ideal para atuação de tais sulfetos. Procura-se também minimizar a presença de elementos de liga residuais (cromo, níquel, molibdênio, vanádio, tungstênio, etc.) que endurecem o aço, bem como a quantidade de óxidos (silicatos e aluminatos) provenientes da desoxidação do aço líquido, pois são altamente abrasivos.

A tabela 2.2 indica a usinabilidade dos principais tipos de aços de corte fácil tomando-se como referência o aço de especificação ABNT/SAE 1212, assumido como usinabilidade 100 %.

Tabela 2.2 - Usinabilidade de aços de corte fácil.

Fonte: CHIAVERINI, 2005, p.279.

Tipo do aço ABNT/SAE	Usinabilidade (%)	Dureza Brinell (HB)
1117	90	137
1118	85	143
1212	100	-
1213	136	-
1215	136	-
12L14	160	163
12L14 (a)	190	137
12L14 (b)	235	137
12L14 (c)	295	137

(a) Tipo alternativo ao 12L14.
 (b) Tipo alternativo ao 12L14, contendo bismuto.
 (c) Tipo alternativo ao 12L14, contendo bismuto, selênio e telúrio.

Verifica-se que os aços de corte fácil possuem uma boa usinabilidade e essa peculiaridade pode ser aumentada através da adição de outros elementos como bismuto, selênio e telúrio (CHIAVERINI, 2005). A tabela 2.3 apresenta propriedades mecânicas de alguns aços de corte fácil.

Tabela 2.3 - Propriedades mecânicas de aços de corte fácil.

Fonte: PRADO; PIMENTEL, 2004.

Tipo do aço ABNT/SAE	Dureza (HB)	Tensão de ruptura (kgf/mm²)	Tensão de escoamento (kgf/mm)	Redução (%)	Alongamento
1213	1 1 4	38,6	21,8	58,0	26,3
1213 com Bi	1 1 7	40,8	25,0	59,5	32,9
12L14	1 1 4	40,1	21,3	47,0	27,2

Nos aços-de-corte-fácil também existe uma investigação e desenvolvimento para incrementar a sua resposta à usinagem. Além das soluções citadas anteriormente para melhorar a usinabilidade dos aços, existem as soluções clássicas, como o uso de enxofre ou do chumbo e soluções através de metalurgia secundária, como mencionado acima a adição de Te e Se para controle das inclusões de sulfetos de manganês; ou o tratamento ao cálcio ou controle de alumínio para se ter um total controle da morfologia de inclusões (Machado, 2004).

2.2 Tipos de Aço de Livre Corte

Para Evangelista (2007) todos os aços especiais, e não só os aços de corte fácil, podem sofrer modificações com o objetivo de melhorar a sua usinabilidade. Nos casos dos outros aços especiais que não os de corte fácil, estas modificações não podem, contudo, prejudicar as outras propriedades requeridas para um desempenho satisfatório do material. Quando isso ocorre, o aço é chamado de aço de usinabilidade melhorada. Portanto, aços de usinabilidade melhorada são aqueles em que se procura aumentar marginalmente sua usinabilidade sem, no entanto, prejudicar de forma significativa qualquer outra propriedade como resistência ao impacto, resistência à corrosão, resistência à fadiga, etc.

O conceito de aço especial como matéria-prima disponível no mercado, caracteriza-se pelas propriedades de adequação ao uso das ligas empregadas. Aços especiais são todos os aços projetados para uma aplicação específica, e contêm um conjunto de propriedades químicas e físicas, com destaque para as mecânicas (tanto estáticas quanto dinâmicas) que os fazem adequados para o uso previsto (BAS, 2001).

O diagrama da figura 2.1 apresenta a classificação geral dos aços especiais.

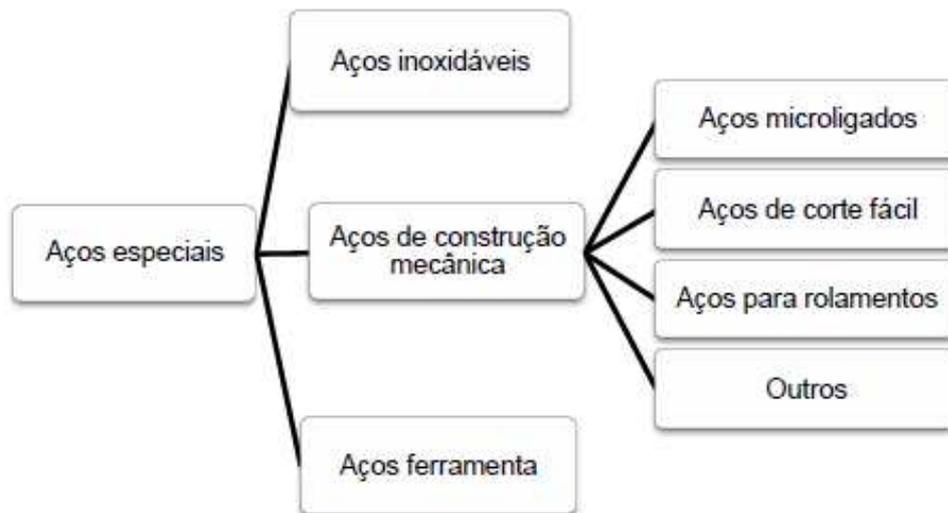


Figura 2.1 - Classificação geral dos aços especiais (COSTA, 2014).

Em sua própria definição estão implícitas as aplicações das famílias, indicando-se também quais as propriedades fundamentais às quais devem atender.

Dentro dos aços especiais de construção mecânica existe a família dos chamados aços de corte livre ou usinagem fácil (free cutting steels), cuja finalidade é o emprego em elementos mecânicos de baixa responsabilidade, e que apresentam propriedades de desenho especialmente adequadas para facilitar a usinagem em primeiro lugar (BAS,2001). Outras características como resposta ao tratamento térmico, resistência à tração, ductilidade, etc. são consideradas nestes aços como aspectos secundários, apesar de serem, em muitos casos determinantes para a sua seleção.

Apple (1989) ao ser inserido inclusões, intencionalmente ou aquelas inerentes ao processo de fabricação, influenciam de alguma forma a usinabilidade. As inclusões devem atuar de uma maneira que facilitem o cisalhamento do cavaco e iniciem a formação de trincas, fragilizando o cavaco. Os tipos de inclusões de maior relevância na

usinabilidade dos aços de corte fácil são mostrados. Na tabela 2.4 será apresentado os tipos de inclusões em aços de baixo carbono.

Tabela 2.4 - Tipos de inclusões em aços de corte fácil.

Fonte: COSTA, 2014.

Tipo de Inclusão	Composição
Sulfetos, selenetos e teluretos	MnS, MnSe, MnTe
Inclusões metálicas	Pb e Bi
Inclusões de óxidos	Silicato de Ca-Al e Silicato de Ca-Al-Mn
Outras inclusões não metálicas	Aluminatos e nitretos

Conforme o sistema SAE/AISI de classificação os aços carbonos de corte fácil são designados como se segue:

- 11xx: aços resulfurados: O teor de enxofre é de no mínimo 0,08%;
- 12xx: aços resulfurados e refosforados: Os teores de enxofre e fósforos são, respectivamente, de no mínimo 0,16% e 0,04%.

Onde “xx” indica o percentual de carbono.

Os aços de corte fácil mais usuais ainda podem ser classificados em baixo e médio carbono. O aço baixo-carbono apresenta teor nominal de carbono inferior ou igual a 0,30%. O aço médio-carbono apresenta teor nominal de carbono superior a 0,30% e igual ou inferior a 0,50% (ABNT, 1986).

2.2.1 Principais Tipos de Aços de Corte Fácil

a) Aços resulfurados

Embora os aços resulfurados baixo-carbono que contêm 0,10, 0,20 e 0,30% de enxofre sejam comumente usados em aplicações de usinagem, os mais usuais são aqueles que contêm nominalmente 0,30% de enxofre.

O enxofre foi o primeiro aditivo a ser usado para melhorar a característica de boa usinabilidade nos aços. Devido a sua eficiência e baixo custo, o enxofre continua a ser

fortemente utilizado até hoje como aditivo que proporciona bom desempenho de usinagem (PIMENTEL, 2006).

Como é bem conhecido, o enxofre tende a aumentar a fragilidade a quente dos aços como um resultado da formação de inclusões de sulfeto de ferro nos contornos de grão, as quais se fundem nas temperaturas de laminação a quente. Os fabricantes de aços eliminam essa fragilidade a quente pela adição suficiente de manganês no aço líquido para garantir a formação de inclusões de sulfeto de manganês, que não se fundem nas temperaturas de laminação a quente. Assim, o enxofre está presente no aço principalmente como inclusões de sulfeto de manganês (PIMENTEL, 2006).

O enxofre tem um efeito benéfico sobre a qualidade interna do aço, pois tende a suprimir a formação de monóxido de carbono pela ação que exerce sobre a atividade química do carbono e/ou oxigênio (CARNEY; RUDOLPHY, 1953). Assim, o enxofre age como um agente “acalmante” e reduz a tendência de formação de bolhas conhecidas como “blowholes”, que se formam durante a solidificação dos aços de corte fácil baixo-carbono. Felizmente, os aços que são utilizados em aplicações que exigem um elevado nível de usinabilidade são elaborados com níveis de enxofre e manganês suficientemente altos. Assim, estes aços já são inerentemente semi-acalmados, não havendo a necessidade de adição de desoxidantes, tais como silício e alumínio, extremamente prejudiciais à usinabilidade. Na tabela 2.5 é apresentado a composição química do aço resulfurado SAE 12L13.

Tabela 2.5 - Apresenta a composição química do aço resulfurado SAE 12L3 conforme a norma SAE J 403 (SAE, 2004).

C (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)
0,13 Max.	0,70 – 1,00	0,07 – 0,12	0,24 – 0,33

b) Aços resulfurados com adição de chumbo

Para Pimentel (2006), os aços resulfurados com adição de chumbo constituem objeto de estudo há mais de 65 anos, entretanto foi somente a partir dos últimos 50 anos que este tipo de aço tornou-se fortemente aceito pelo mercado. Este atraso na aceitação total dos aços resulfurados ao chumbo é atribuído às grandes variações no seu desempenho de

usinagem. De fato, as práticas de fabricação deste aço tiveram que ser melhoradas antes da produção consistente de um material com alta qualidade.

O chumbo como apresenta uma solubilidade limitada e devido a sua maior densidade, este elemento tende a se aglomerar no aço líquido podendo originar uma forte segregação de chumbo. Esse tipo de defeito interno prejudica a usinabilidade do aço. No sentido de detectar a ocorrência de segregação de chumbo, os fabricantes de aço utilizam habitualmente um tipo de ensaio chamado de teste de exudação de chumbo (PIMENTEL, 2006).

Neste tipo de ensaio, uma amostra é retirada no sentido transversal de um tarugo (ou barra) e é aquecida a 700°C por 10 a 20 minutos. A seguir, a amostra é examinada visualmente e nas regiões onde existe segregação surgem “bolhas de chumbo”, que revelam a existência deste tipo de defeito interno (PIMENTEL 2006).

Por muitos anos, acreditou-se que o chumbo existia no aço como uma dispersão sub-microscópica. Entretanto, sabe-se que na verdade o chumbo está presente como pequenas inclusões visíveis ao microscópio e usualmente associadas com inclusões de sulfeto de manganês (CHALFANT, 1960). O chumbo não forma compostos com outros elementos, tais como sulfeto de chumbo, mesmo porque a energia livre de formação do sulfeto de chumbo é muito maior do que a do sulfeto de manganês. O efeito do chumbo sobre a usinabilidade será visto posteriormente. Na tabela 2.6 é representado a composição química do aço resulfurado com adição de chumbo.

Tabela 2.6 - Composição química do aço resulfurado com adição de chumbo SAE.

C (%)	Mn (%)	P (%0	S (%)	Pb (%)
0,15 Max.	0,85 – 1,15	0,04 – 0,09	0,26 – 0,35	0,15 – 0,35

c) Aços resulfurados ao chumbo com aditivos especiais

Segundo Pimentel (2006) diversos outros aditivos, tais como bismuto, selênio e telúrio, podem ser usados em conjunto com chumbo e enxofre para melhorar a usinabilidade dos aços baixo-carbono. Estes aços são utilizados em aplicações, onde a taxa de remoção do metal é maior do que a obtida com aços resulfurados com apenas

adição de chumbo. A quantidade destes elementos presente no aço é em torno de 0,10% e eles se apresentam combinados com as inclusões de chumbo ou de sulfeto de manganês (ou ambas as inclusões).

A figura 2.2 apresenta as aplicações dos aços de corte fácil na fabricação de componentes, por exemplo, componentes de eletrodomésticos, buchas, pistões de pequenos compressores (PRADO & PIMENTEL, 2004).



Figura 2.2 - Exemplos de peças fabricadas de Aço de Corte Fácil (PRADO & PIMENTEL, 2004).

Os aços de corte fácil são largamente utilizados na produção de peças em tornos automáticos multifuso. Para esta aplicação utilizam-se normalmente barras de aços trefiladas com diâmetros iguais ou inferiores que 50 mm, de tal forma que as velocidades de corte raramente ultrapassam 200 m/min (MACHADO, 2004). Por sua vez, é muito utilizado para fabricação de componentes para bombas, buchas, pistões, componentes de aparelhos domésticos, etc. (PRADO & PIMENTEL, 2004).

2.3 FORMAÇÃO DE CAVACO

A figura 2.3 apresenta o diagrama da cunha cortante e a formação de cavaco.

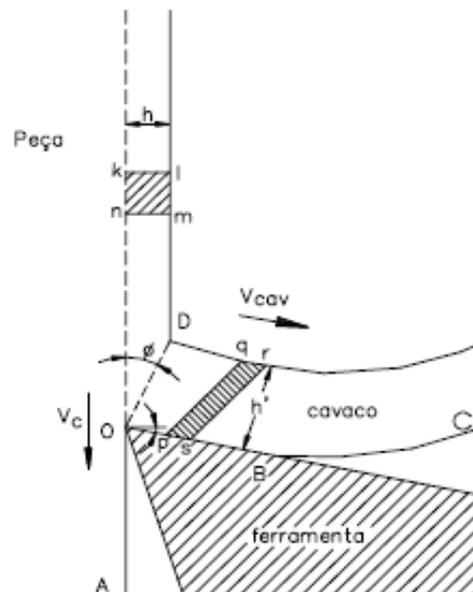


Figura 2.3 - Diagrama da cunha cortante (TRENT; WRIGHT, 2000, p. 22).

Segundo Trent e Wright (2000) a formação de cavaco, nas condições normais de usinagem se processa da seguinte forma:

- Devido à penetração da ferramenta na peça uma pequena porção de material 'klmn' (ainda solidária à peça) é recalcada contra a superfície de saída da ferramenta.
- O material recalcado sofre deformação plástica, a qual aumenta progressivamente, até que as tensões de cisalhamento se tornem suficientemente altas, de modo a iniciar um deslizamento entre a porção de material recalcado e a peça. Este deslizamento realiza-se segundo os planos de cisalhamento dos cristais da porção de material recalcada. Durante a usinagem, estes planos simultâneos irão definir certa região entre a peça e o cavaco, dita zona de cisalhamento primário. Para facilitar o tratamento matemático dado à formação do cavaco, esta região é assemelhada a um plano, dito plano de cisalhamento, definido pelo ângulo de cisalhamento ϕ ;
- Continuando a penetração da ferramenta em relação à peça, haverá uma ruptura parcial ou completa na região de cisalhamento, dependendo da ductilidade do material e das condições de usinagem. Para materiais altamente deformáveis, pode-se originar o

cavaco de cisalhamento ou o cavaco de ruptura como mostra a (figura 2.4 a). Para os materiais altamente deformáveis, a ruptura se realiza somente nas imediações da aresta cortante, o cavaco é denominado cavaco contínuo (figura 2.4 b).

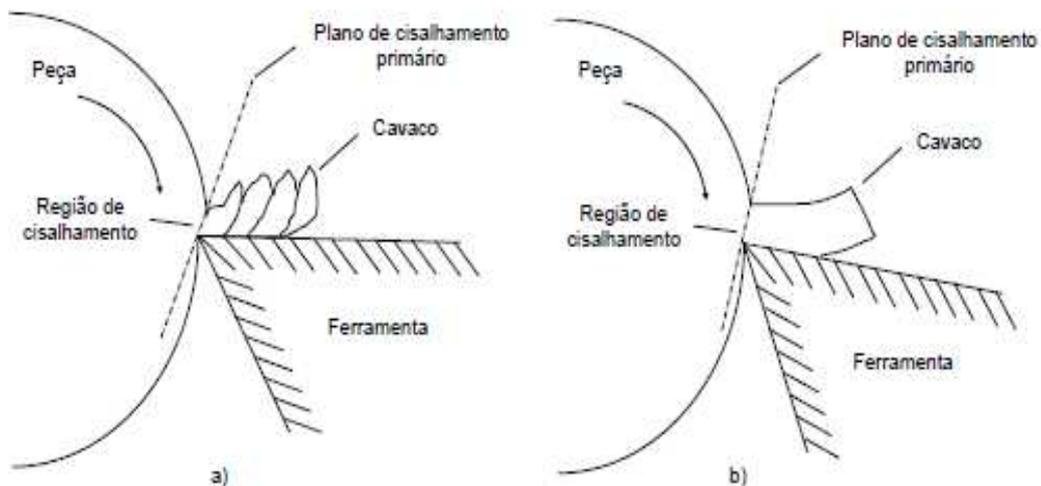


Figura 2.4 - Formação do cavaco: a) cavaco de cisalhamento ou cavaco de ruptura; b) cavaco contínuo (FERRARESI, 1970, p. 90).

- Prosseguindo, devido ao movimento relativo entre a ferramenta e a peça, inicia-se um escorregamento da porção de material deformada e cisalhada (cavaco) sobre a superfície de saída da ferramenta. Enquanto tal ocorre, uma nova porção de material (imediatamente adjacente à porção anterior) está se formando e cisalhando. Esta nova porção de material irá também escorregar sobre a superfície de saída da ferramenta, repetindo novamente o fenômeno (TRENT; WRIGHT, 2000)

Desta forma, conclui-se que o fenômeno de formação do cavaco, nas condições normais de usinagem, é um fenômeno periódico, inclusive a formação do cavaco contínuo. Tem-se alternadamente uma fase de recalque e uma fase de escorregamento, para cada pequena porção de material removido (TRENT; WRIGHT, 2000; MACHADO; DA SILVA, 2004).

A literatura atual admite a formação de uma segunda região de cisalhamento (TRENT; WRIGHT, 2000) (MACHADO; Da SILVA, 2004) localizada na interface cavaco-ferramenta denominada de zona de cisalhamento secundária (fig. 2.4). Nesta região ocorreriam fenômenos como altíssima geração de calor e desgaste por transferência de átomos entre ferramenta e cavaco (RAMANUJACHAR; SUBRAMANIAN, 1996).

A figura 2.5 apresenta um esquema mostrando as zonas de cisalhamento primária e secundária.

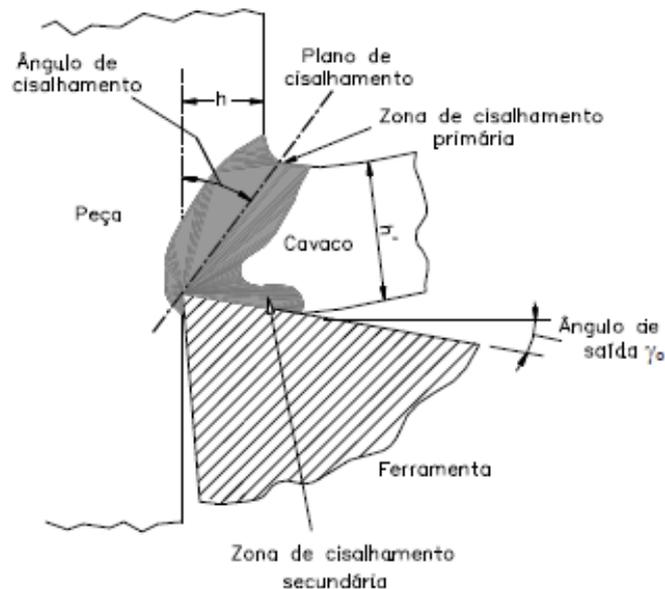


Figura 2.5 - Esquema mostrando as zonas de cisalhamento primária e secundária (MACHADO; Da SILVA, 2004).

2.3.1 Tipos e características dos cavacos

Classificação mais comum dos tipos cavacos consiste na seguinte subdivisão (FERRARESI, 1977; LUIZ, 2007).

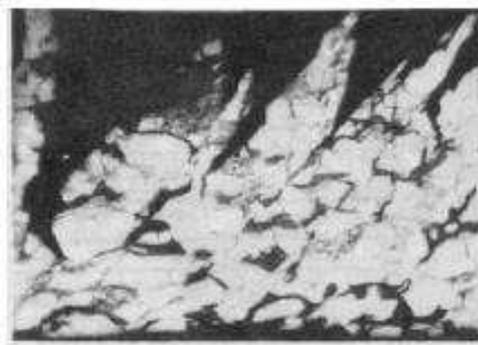
- a) **Cavaco contínuo** - Apresenta-se constituído de lamelas justapostas numa disposição contínua (fig. 2.5). A palavra lamela é usada para definir a camada de material de cavaco constituída pelos grãos cristalinos deformados.

Aos agrupamentos distintos de lamelas, denominam-se grupos lamelares, elementos de cavaco ou escamas. No cavaco contínuo a distinção entre estes grupos lamelares não é tão nítida como nos outros tipos de cavaco. O cavaco contínuo forma-se na usinagem de materiais dúcteis e homogêneos, com pequeno e médio avanço.

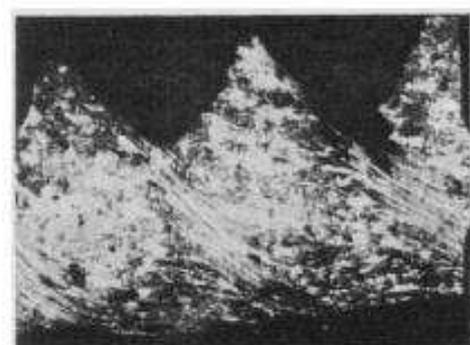


Figura 2.6 - Cavaco Contínuo (FERRARESI, 1997; LUIZ,2007).

b) Cavaco de cisalhamento ou parcialmente contínuos – Apresenta-se constituído de grupos lamelares bem distintos e justapostos. Estes elementos de cavaco foram cisalhados na zona primária de cisalhamento e parcialmente soldados em seguida, fig. 2.6 a e fig. 2.6 b. Formam-se quando houver diminuição da resistência do material no plano de cisalhamento devido ao aumento de temperatura, à heterogeneidade da microestrutura do material, ou a vibrações externas que conduzem às variações de espessura de cavaco. Este tipo de cavaco também se forma usando-se grandes avanços, velocidades de corte geralmente inferiores a 100 m/min e ângulo de saída pequeno.



a)



b)

Figura 2.7 -Cavaco de Cisalhamento (FERRARESI, 1997; LUIZ,2007).

c) Cavaco de ruptura ou descontínuos - Apresenta-se constituído de fragmentos arrancados da peça usinada (fig. 2.7). Há uma ruptura completa do material em grupos lamelares (na zona de cisalhamento primário), os quais permanecem separados. Forma-se na usinagem de materiais frágeis ou de estrutura heterogênea, tais como o ferro fundido e o bronze.

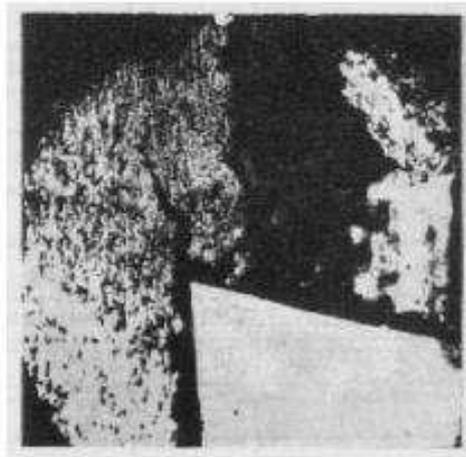


Figura 2.8 - Cavaco de Ruptura (FERRARESI, 1997; LUIZ,2007).

d) Cavacos segmentados – Caracterizado por grandes deformações continuadas em estreitas bandas entre segmentos com muita, ou quase nenhuma deformação no interior destes segmentos. É um processo totalmente diferente da formação do cavaco contínuo, sendo característico a certos materiais com pobres propriedades térmicas, como o titânio e suas ligas (figura 2.9).

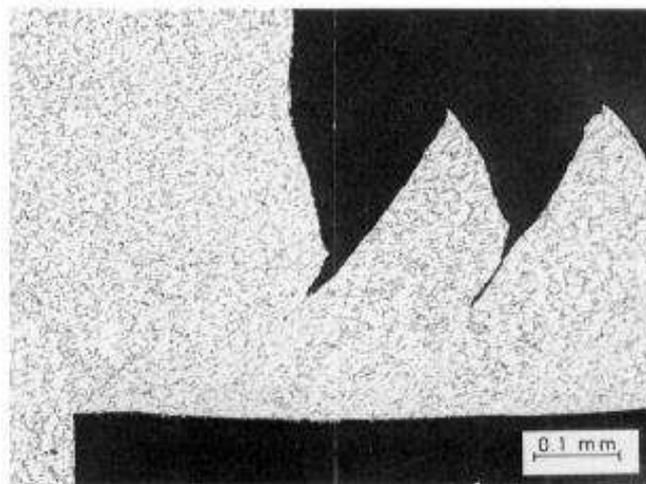


Figura 2.9 - Cavaco Segmentado (FERRARESI, 1997; LUIZ,2007).

Quanto à forma dos cavacos, os mesmos são classificados em fita, helicoidal, espiral, lascas ou pedaços (FERRARESI, 1970; LUIZ,2007). Entretanto, a Norma ISSO 3685 classifica a forma dos cavacos segundo as formas básicas apresentadas na figura 2.10.

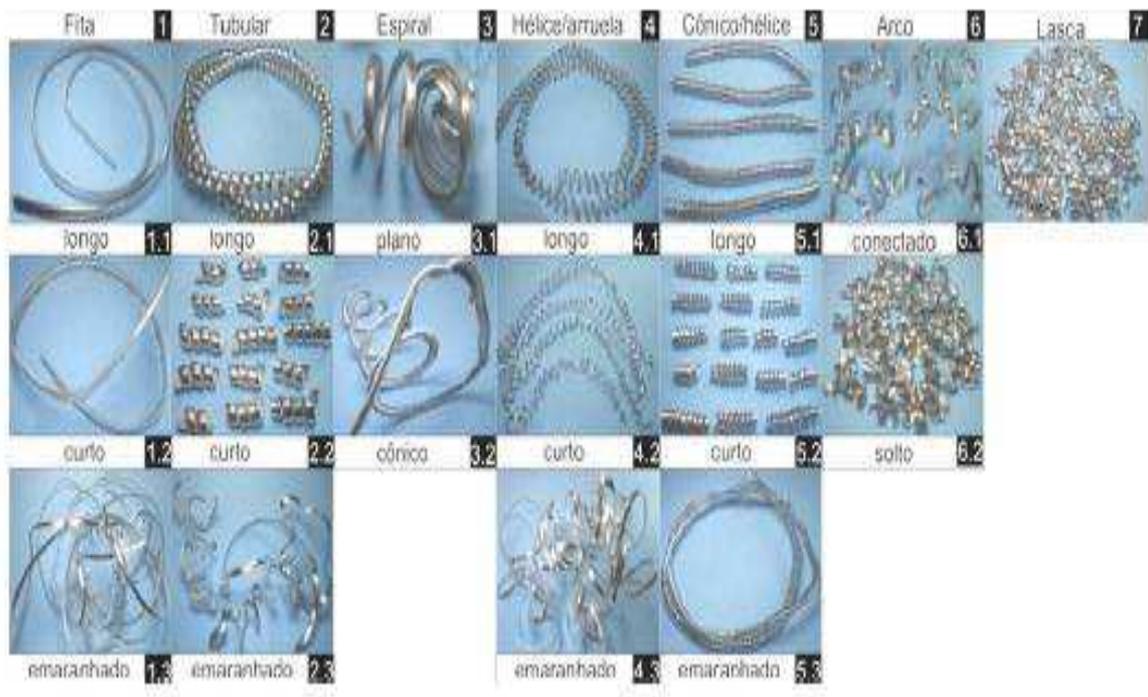


Figura 2.10 - Formas do cavaco classificados de acordo com a Norma ISO 3685 (SANTOS JR., 2012).

Dois fatores contribuem de maneira decisiva para a forma do cavaco: a plasticidade do material da peça e a configuração geométrica do sistema de corte (peça, cavaco e ferramenta). Some-se a isto, a influência das condições de usinagem.

Para Costa (2014) a forma do cavaco é um aspecto significativo na usinagem, pois o cavaco em forma de fita carrega consigo muitos inconvenientes, como:

- Dificuldade no manejo e armazenagem.
- Risco à segurança do operador.
- Danos à ferramenta e à peça, uma vez que o cavaco em forma de fita pode se enrolar a peça, danificando seu acabamento superficial.
- Afetar na vida da ferramenta devido à interação do cavaco com a aresta de corte, e em consequência, afetar a força de corte e a temperatura de usinagem.
- Podem impedir o acesso regular do fluido de corte (“efeito guarda-chuva”).

O formato do cavaco pode ser controlado através de alterações no material da peça, onde está se apresenta como uma das vantagens dos aços de corte fácil. A influência da adição de bismuto sobre a usinabilidade do aço DIN-20MnCr5 foi verificada utilizando três amostras: material “0-Bi” sem o elemento Bi, material “1-Bi” com percentual de

0,026 % Bi e material “2-Bi” com percentual de 0,046 % Bi. Após usinagem das amostras, os materiais “1-Bi” e “2-Bi” apresentaram melhor controle do cavaco, resultante da formação de cavaco na forma de pequenos espirais cônicos (figura 2.10; GRANDO, 2012).

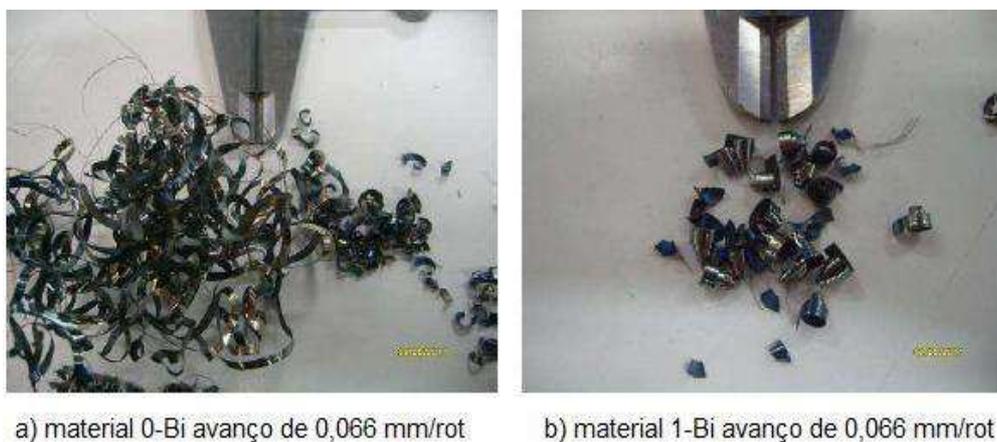


Figura 2.11 - Cavacos formados nos ensaios dos materiais: a) “0-Bi” (sem adições de bismuto); b) “1-Bi” (com 0,026 % de bismuto) (GRANDO, 2012).

Bem como, foram realizados ensaios de campo, comparando o material “0-Bi” com os materiais “1-Bi” e “2-Bi”. Constatou-se a formação de cavacos em forma de fita em maior quantidade para o material “0-Bi” e de cavacos em forma de lascas para os materiais “1-Bi” e “2-Bi”, comprovando a eficiência das adições de bismuto no controle do cavaco (figura 2.11).

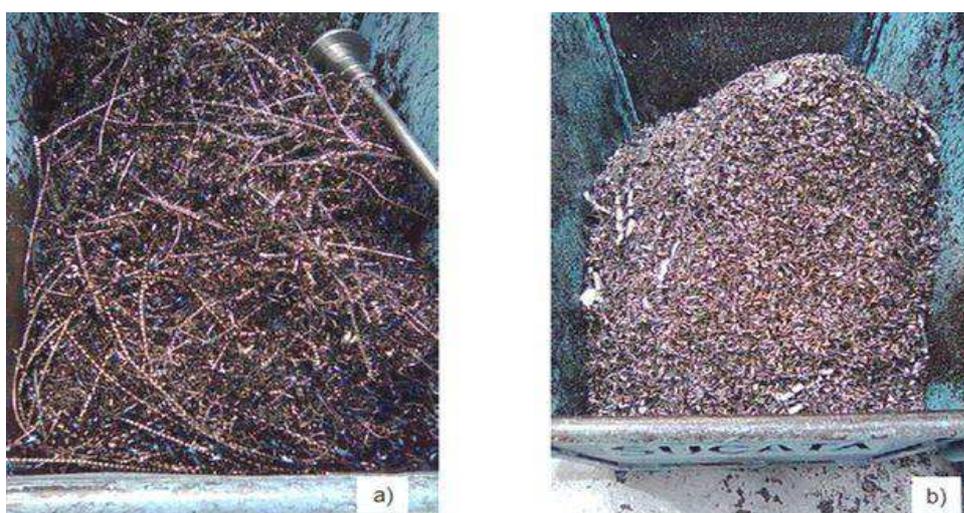


Figura 2.12 - Cavacos formados em ensaios de campo: a) material “0-Bi”; b) materiais “1-Bi” e “2-Bi” (GRANDO, 2012).

Evangelista (2007) catalogou a forma dos cavacos gerados na usinagem do aço de corte fácil ao chumbo ABNT 12L14 empregando nove amostras com diferentes níveis dos elementos residuais cobre, níquel e cromo. A figura 2.12 exhibe os cavacos obtidos na usinagem com ferramenta de metal duro (classe ISO K15 sem quebra-cavaco) em cargo do avanço, o parâmetro de usinagem mais influente na forma dos cavacos.

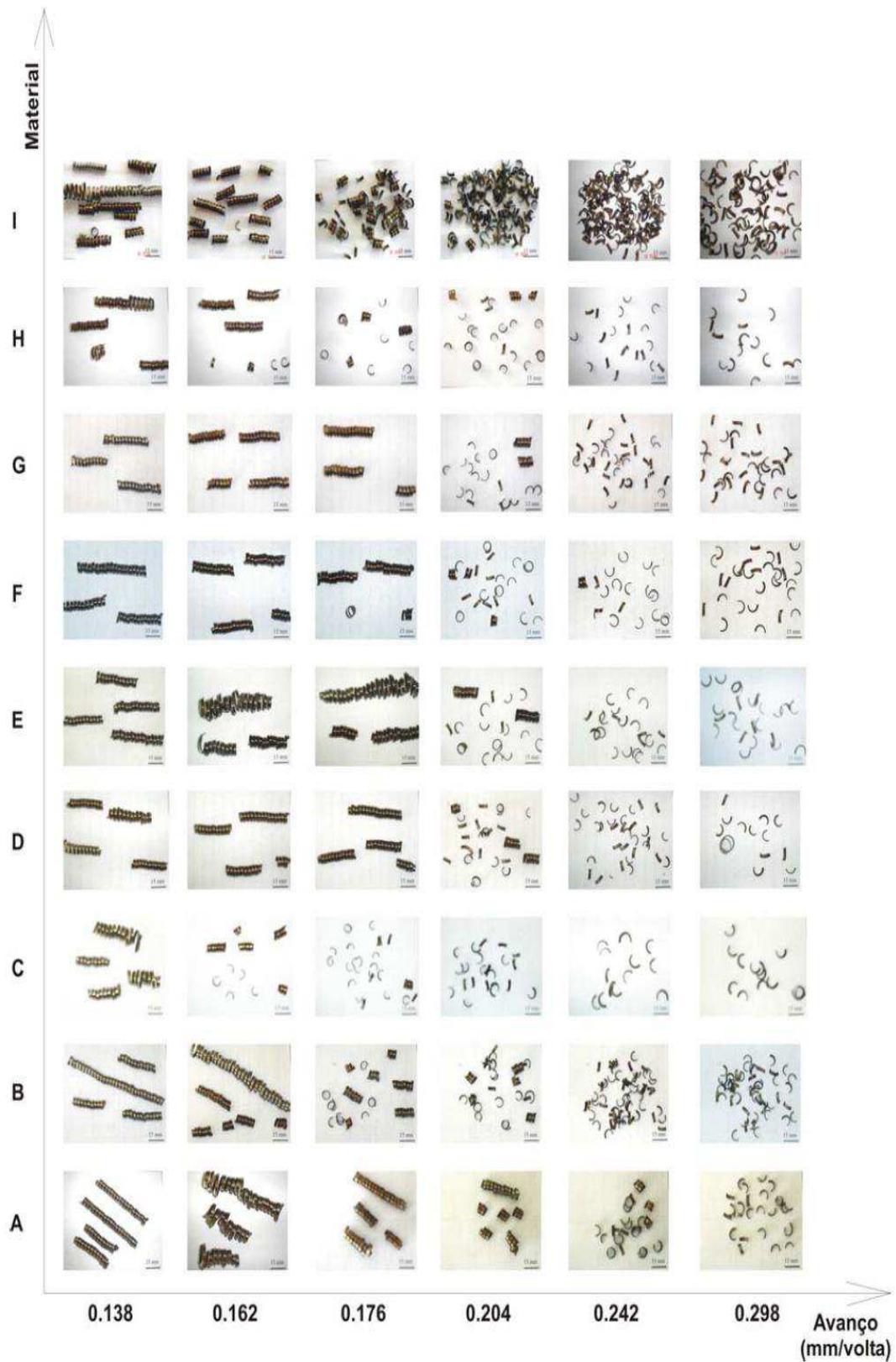


Figura 2.13 - Influência do avanço na forma do cavaco do aço de corte fácil ABNT 12L14. Condições de corte: $V_c = 141$ m/min e $a_p = 2,0$ mm (EVANGELISTA LUIZ, 2007).

2.4 INRERFACE CAVACO-FERRRAMENTA

Para Machado (2011) o movimento da fração de cavaco sobre a superfície de saída da ferramenta tem atuação marcante em todo o processo de usinagem, especialmente no próprio mecanismo de formação de cavaco, na força de usinagem, no calor gerado durante o corte, nas temperaturas de usinagem e nos mecanismos e taxas de desgastes das ferramentas de corte.

Segundo Trent e Wright (2000), na usinagem dos metais pelo menos três condições de interface cavaco-ferramenta podem ser encontradas:

- a. Aderência e escorregamento;
- b. Escorregamento;
- c. Aresta postiça de corte (APC).

Conforme a figura 2.14a, a zona de aderência se estende da aresta de corte para dentro da superfície de saída da ferramenta, sendo característica a forte ligação atômica entre os materiais devido às altas taxas de deformação, às altas tensões de compressão e à elevada temperatura no local. O movimento na interface cavaco-ferramenta ocorre por cisalhamento dentro do material do cavaco formando uma zona de cisalhamento intenso próximo, mas não na interface, denominada zona de fluxo. A zona de escorregamento acontece após a zona de aderência, em que devido às ligações mais fracas entre o material da peça e o da ferramenta, o cavaco escorrega sobre a superfície de saída (TRENT; WRIGHT, 2000).

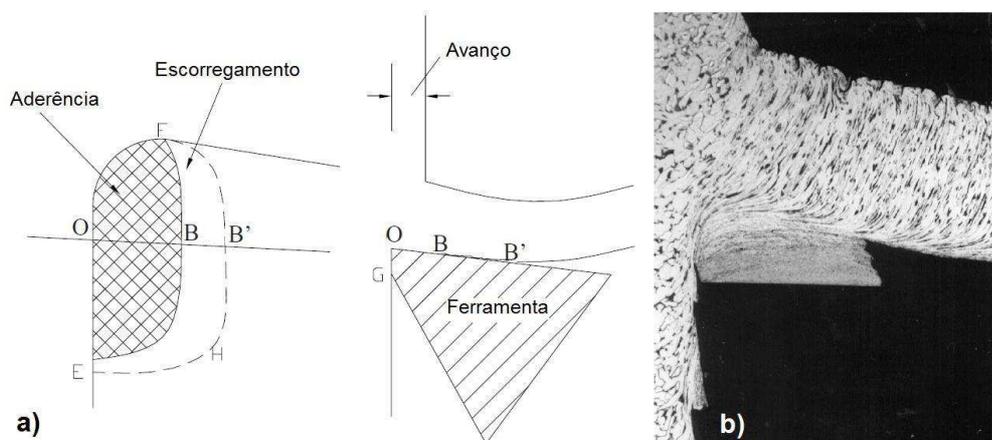


Figura 2.14 - Condições de interface cavaco-ferramenta: a) Aderência e Escorregamento; b) Aresta Postiça de Corte (TRENT; WRIGHT, 2000, pp.40, 44).

Além das condições de aderência e escorregamento, pode ocorrer na interface cavaco-ferramenta, quando a usinagem ocorre a baixas velocidades de corte, a formação da aresta postiça de corte, chamada de APC, conforme figura 2.13b.

Conforme Trent e Wright (2000), a APC é formada ao se usinar ligas com mais de uma fase presente em suas microestruturas. Durante o corte, o material da peça encruado se acumula sobre a cunha, aderindo ao redor da aresta de corte e sobre a superfície de saída da ferramenta, privando o cavaco de um contato direto com a ferramenta. A APC mostra-se indesejável devido ao acabamento irregular da superfície usinada, afetado principalmente por pequenas partículas de material que podem ser deslocadas da APC e da instabilidade do processo de corte nessa condição.

No momento em que o material da peça é aquecido, o amolecimento originado pela temperatura elimina o encruamento necessário para a formação e crescimento da APC. Assim sendo, com o aumento da velocidade de corte, a APC desaparece. Ao valor de velocidade de corte no qual a APC é eliminada, denomina-se “velocidade de corte crítica, $V_{critica}$ ” (MACHADO; DA SILVA, 2004).

Consoante Costa (2014) o comportamento das dimensões da APC em função da velocidade de corte é mostrado na figura 2.14. A APC cresce até atingir um valor máximo, a partir do qual começa a diminuir até o valor de velocidade de corte crítica, onde a APC desaparece completamente. Em velocidades de corte menores, à esquerda do valor de dimensão máxima, a APC se encontra em “regime estável”, enquanto em valores de velocidades de corte maiores, à direita do valor de dimensão máxima, ela se encontra em “regime instável”.

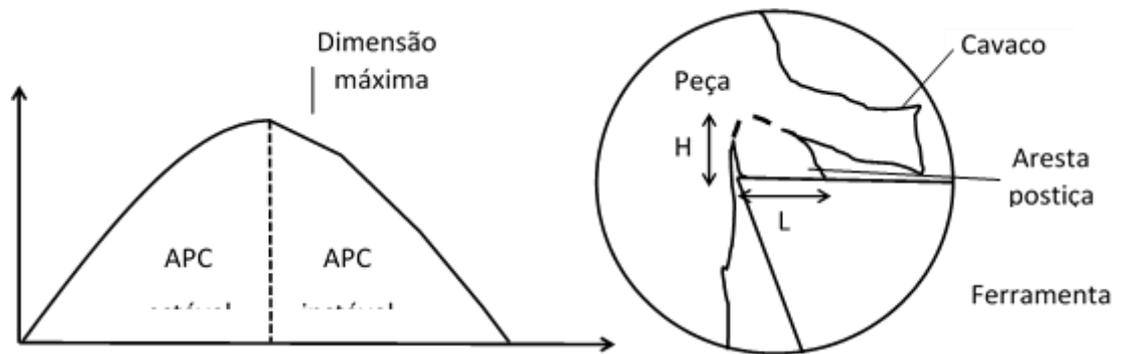


Figura 2.15 - Variação das dimensões da APC (altura “H” e largura “L”) com a velocidade de corte (MACHADO; DA SILVA, 2004, p.75; SANTOS; SALES, 2007, p.56).

As condições de interface cavaco-ferramenta são influenciadas pelos aditivos de corte fácil, tais como, Pb, Se, Bi, Te, MnS. Durante a usinagem, estes aditivos funcionam como lubrificantes internos e podem restringir a formação da zona de aderência. Trent e Wright (2000) explicam que a zona de aderência não desaparece, mas é substituída por uma zona de fluxo formada por material de corte fácil aderido na interface.

A figura 2.16 evidencia a presença de chumbo aderido na superfície de saída de uma ferramenta de metal duro após usinagem de latão com aditivos de corte fácil.

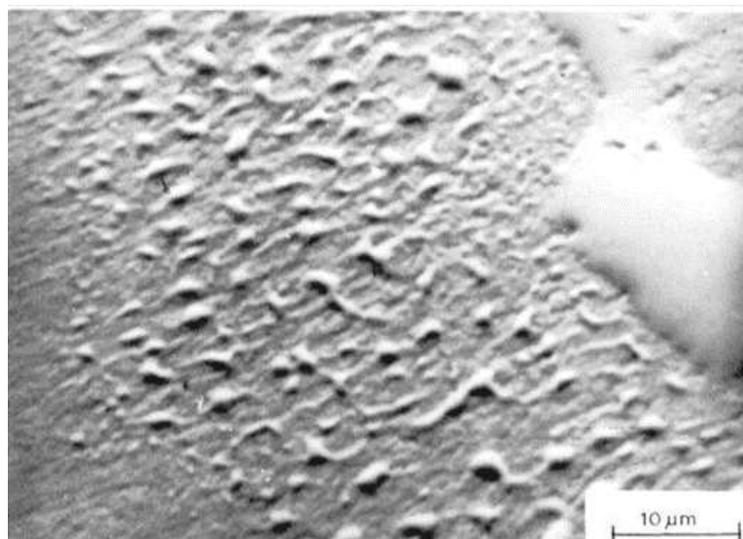


Figura 2.16 - Presença de chumbo aderido na superfície de saída da ferramenta de metal após usinar latão de corte fácil à velocidade de corte de 180 m/min (TRENT; WRIGTH, 2000, p.265).

Evangelista (2007), analisou as condições de interface na usinagem de aços de corte fácil ABNT 12L14 através de ensaios de parada-rápida (quick-stop), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de energia dispersiva (EDS, da língua inglesa Energy Dispersive Spectroscopy). O pesquisador observou que a condição de APC predominou até a velocidade de corte de 70 m/min. Além disso, para todas as condições ensaiadas, houve a presença de Mn e S na superfície de saída da ferramenta evidenciando uma película formada pelo sulfeto de manganês sobre a ferramenta. A presença do chumbo, em contrapartida, foi detectada em quantidades muito pequenas.

2.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE A FERRAMENTA DE CORTE

2.5.1 Requisitos desejados em uma ferramenta de corte

A escolha correta do material da ferramenta deve ser feita com muito cuidado para não comprometer o processo de usinagem. Para isso alguns critérios de seleção devem ser respeitados e foram apresentados por Shaw (1984); Trent (1991), Diniz et al., (2003) e Machado & Silva (2004):

- Dureza do material a ser usinado;
- Processo de usinagem, ou seja, se possui corte interrompido (fresamento), corte contínuo (torneamento), uso ou não de refrigeração/lubrificação do corte, tipo de operação (desbaste ou acabamento), tempo de ciclo;
- Forma e dimensão da ferramenta;
- Tipo de cavaco gerado pelo material a ser usinado;
- Parâmetros de usinagem como velocidade de corte, avanço e profundidade de corte;
- Condições da máquina operatriz: rigidez (sem folgas/vibrações), potência, controles durante o processo, sistema de refrigeração da ferramenta;
- Conciliar custo/benefício da ferramenta;
- Atender as características finais do produto como qualidade superficial e dimensional requerida.

Para que a escolha da ferramenta seja ainda mais correta deve-se observar se a ferramenta de corte escolhida possui as propriedades a seguir:

- Alta dureza, principalmente a quente;
- Tenacidade suficiente para evitarem falhas por rupturas;
- Alta resistência ao desgaste;
- Alta resistência à compressão e ao cisalhamento;
- Boas propriedades mecânicas e térmicas, este fator é muito importante principalmente para a dureza a quente do material;
- Alta condutividade térmica;
- Baixo índice de expansão volumétrica;
- Alta resistência ao choque térmico;
- Ser inerte quimicamente.

Essas propriedades não estão listadas em ordem de importância, devido à variação do processo de usinagem, como material a ser usinado e condições de corte. No entanto, pode-se dizer que as propriedades mais significativas dos materiais das ferramentas de corte é a dureza e a tenacidade (Machado & Silva, 2004).

Conforme Machado (2004), um material idealizado para ferramenta de corte teria que ter a dureza do diamante natural, a tenacidade do aço-rápido e a inércia química da alumina. Como isso não é possível cabe ao engenheiro de processos analisar as propriedades já citadas e escolher aquele material que melhor atende o tipo de aplicação exigida.

Os materiais para ferramentas mais usados nas indústrias metal-mecânica são do grupo dos aços-rápidos e do metal duro com ou sem cobertura. Para melhor compreender este fato vamos dar uma melhor definição destes grupos de materiais na figura 2.17 que apresenta uma lista de materiais para ferramenta de corte.

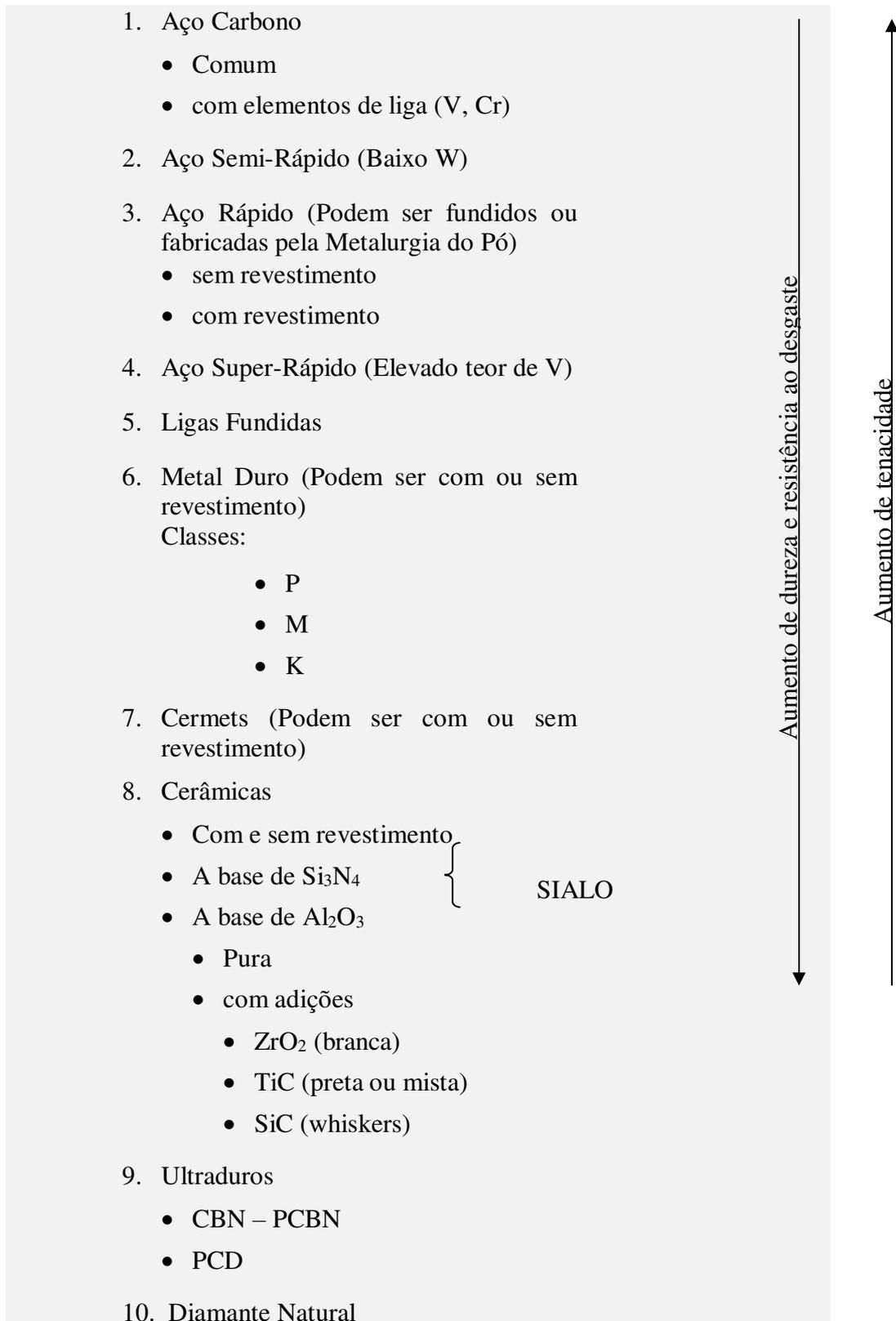


Figura 2.17 - Lista dos materiais para ferramentas de corte (Machado & Silva, 2004).

2.5.2 Geometria da ferramenta de corte

De acordo com Diniz (2000), uma ferramenta deve ser empregada apenas para o processo a que foi considerada, pois qualquer mudança na geometria da peça ou material da peça podem fazer com que os seus ângulos tenham que ser modificados e estudados novamente. A formação de cavacos, a saída dos cavacos, as componentes da força de usinagem e o desgaste da ferramenta são consideravelmente influenciados pela geometria da ferramenta. Do mesmo modo, alterando o raio de quina (r_s) não exercerá nenhuma influência significativa sobre as forças, enquanto for obedecida a exigência: $ap \geq 2 * r_e$ (conforme figura 2.17(a)). Souza (2004), também cita que quanto maior o ângulo de saída (γ_0), conforme figura 2.17(b)), menores serão a deformação e o trabalho de separação do cavaco da peça e, por consequência, menores serão: a temperatura, a pressão específica de corte (K_s) e o desgaste da ferramenta.

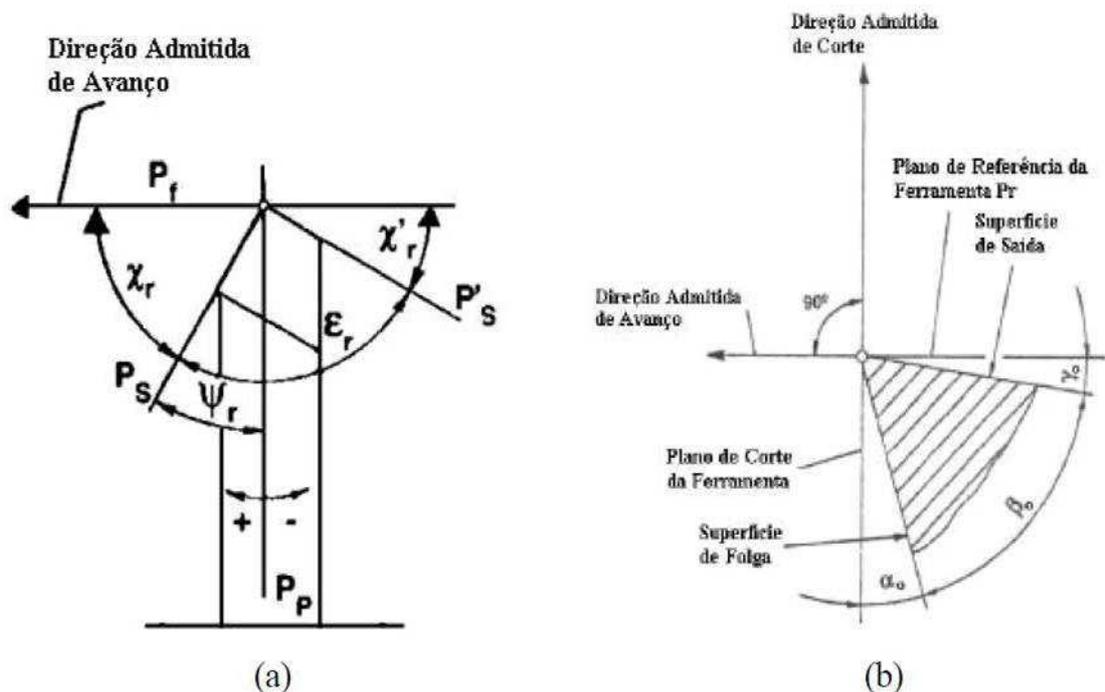


Figura 2.18 - Geometria da ferramenta. (DINIZ, 2000).

Sabe-se que com o aumento do ângulo de saída o gume da ferramenta torna-se mais frágil e passível de quebra. Quando usina-se materiais dúcteis o ângulo de saída tende a ser positivo, fazendo com que o cavaco escoe sobre a superfície de saída da ferramenta. Já em materiais frágeis esse ângulo tende a ser o contrário, ou seja, negativo, fazendo

com que haja a quebra do cavaco. Com a utilização do ângulo de saída negativo forças de corte maiores são registradas e um consequente aumento de potência necessária também, conforme mostra a tabela 2.7 (DA SILVA, 2011).

Tabela 2.7 - Influência dos ângulos de saída e inclinação no torneamento.

Fonte: de König, 1997.

Fatores de Influência		Mudança nas componentes da força de usinagem para cada grau de ângulo alterado					
			Força de avanço (F _f) [N]		Força passiva (F _p) [N]		Força de corte (F _c) [N]
Diminuição ▼	Ângulo de saída (γ)	(γ) ▲	5,00%	▲	4,00%	▲	1,50%
	Ângulo de inclinação (λ)	(λ) ▲	1,50%	▲	10,00%	▲	1,50%
Aumento ▲	Ângulo de saída (γ)	(γ) ▼	5,00%	▼	4,00%	▼	1,50%
	Ângulo de inclinação (λ)	(λ) ▼	1,50%	▼	10,00%	▼	1,50%

2.5.3 Conceito de vida da ferramenta

A vida da ferramenta está ligada a muitos fatores do processo de usinagem. Pode-se citar as características da peça a ser usinada, o tipo de ferramenta especificada, as condições de corte e da máquina e o fluido de corte (Machado & Silva, 2004):

- Os fatores relativos à peça que afetam a vida da ferramenta são:
 - Composição química;
 - Tamanho de grão e microestrutura;
 - Fusão e processo de fundição;
 - Ao tipo de fabricação: fundido, forjado, laminado, trefilado.
 - Ao tipo de tratamento térmico: recozimento, normalização, têmpera, revenimento.
 - A propriedades mecânicas: resistência à tração, ductilidade, dureza, encruabilidade.
 - Dimensões e forma;
- Os fatores relativos à ferramenta de corte que afetam a vida da ferramenta são:
 - Composição química da ferramenta;

- Tratamento térmico;
- Dureza e resistência ao desgaste;
- Geometria;
- Tenacidade.
- Os fatores relativos às condições de corte e à máquina que afetam a vida da ferramenta são:
 - Velocidade de corte;
 - Avanço;
 - Profundidade de corte;
 - Tipo de máquina;
 - Rigidez da máquina.
- Os fatores relativos ao fluido de corte que afetam a vida da ferramenta são:
 - Propriedades refrigerantes;
 - Propriedades lubrificantes;
 - Forma de aplicação.

Conforme Machado & Silva (2004), para aproveitar o maior potencial da vida de uma ferramenta deve-se agregar todos os fatores citados acima. Entretanto, durante o processo de usinagem, levando-se em conta as condições de corte, o fator que é mais significativo para a vida da ferramenta é a velocidade de corte, pelo fato de ser ela a principal causadora da progressão do desgaste. Em seguida tem-se o avanço e por último a profundidade de corte.

2.5.4 Desgaste e avarias de ferramenta de corte

Compreender os processos de destruição das ferramentas de corte é muito significativo. Pois através desse estudo podem-se encontrar soluções coerentes e eficazes para aumentar a vida da ferramenta. A destruição da ferramenta ocorre através de três formas: avaria, desgaste e deformação plástica (MACHADO & SILVA, 2004).

- **Avarias:** processo de destruição da ferramenta de corte que ocorre de maneira repentina e inesperada, causado pela quebra, lasca ou trinca da ferramenta de corte. A avaria proporciona a perda de massa da ferramenta em muitos casos.
- **Desgaste:** tal qual a Norma ISO 3685 (1993) o desgaste em ferramentas de corte ocorre quando há mudança de sua forma original durante o corte, resultante da perda gradual de material. No desgaste ocorre a perda de massa de maneira contínua e progressiva, e em proporções pequenas.
- **Deformação plástica:** é a mudança da geometria da ferramenta de corte pela locomoção de massa, ocasionado pelo cisalhamento devido às altas tensões atuantes nas superfícies das ferramentas de corte. Está também pode ser considerada como uma forma de desgaste, visto que ambos promovem a mudança da geometria da ferramenta, que podem acarretar a destruição total da aresta de corte (TRENT & WRIGHT, 2000). Para contê-la, deve-se selecionar uma classe de ferramenta com maior dureza e reduzir a velocidade de corte.

2.5.5 Tipos de Avarias e Desgaste

De acordo com Diniz (2003) os principais tipos de avarias e desgaste são:

Lascamento: é um tipo de avaria da ferramenta. Partículas grandes de material são retiradas de uma só vez (figura 2.19). Acontece principalmente em ferramentas com material frágil e/ou quando a aresta de corte é pouco reforçada. Afetam o acabamento superficial da peça e pode levar até a quebra da ferramenta se continuar a crescer. No sentido de, evitar o lascamento, pode-se trabalhar com uma ferramenta mais tenaz, aumentar o raio de ponta e/ou o ângulo de cunha, suavizar o primeiro contato de ferramenta com a peça;

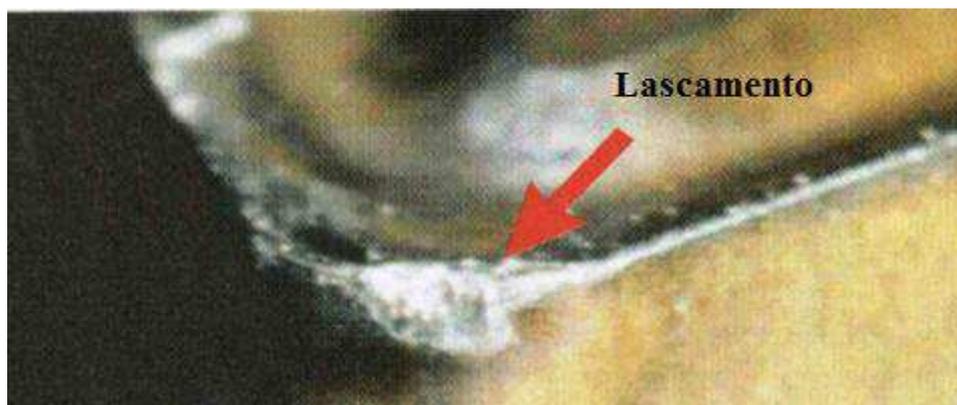


Figura 2.19 - Lascamento na aresta de corte (SANDVIK, 2005).

Trincas: outro tipo de avaria da ferramenta. São causadas pela variação da temperatura e/ou pela variação dos esforços mecânicos. As trincas que ocorrem perpendicularmente à aresta de corte são de origens térmicas e quando ocorrem paralelas à aresta de corte são de origens mecânicas (figura 2.20). O crescimento da trinca leva a quebra da ferramenta. Para se evitar a formação das trincas de origem mecânica pode-se escolher uma ferramenta mais tenaz, reduzir o avanço, aumentar a estabilidade da usinagem; para se evitar trincas de origens térmicas não utilizar fluido de corte e escolher também uma ferramenta mais tenaz.

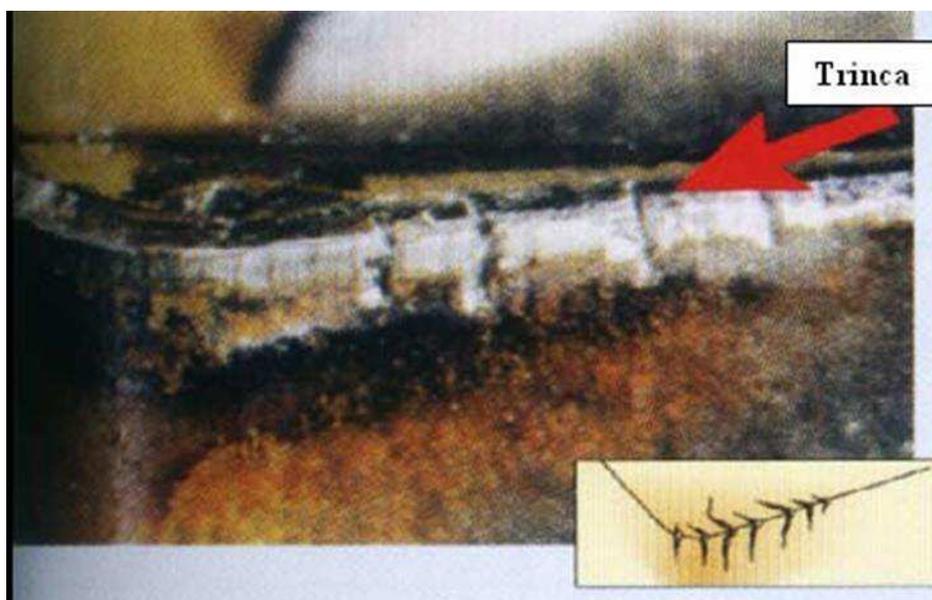


Figura 2.20 - Trincas ou fissuras térmicas na aresta de corte (SANDVIK, 2005).

Desgaste de flanco: verifica-se na superfície de folga da ferramenta de corte, causado pelo contato entre a ferramenta e a peça (figura 2.21). Esse tipo de desgaste ocasiona deterioração do acabamento superficial da peça e, por modificar totalmente a forma da aresta de corte original, faz com que a peça mude de dimensão, podendo sair de sua faixa de tolerância. O desgaste é acelerado com velocidade de corte muito alta ou muito baixa na presença da aresta postiça de corte (APC), com resistência insuficiente da ferramenta com o fenômeno da abrasão. Para minimizar o desgaste deve-se trabalhar com velocidades adequadas e selecionar uma ferramenta que resista mais ao desgaste.



Figura 2.21 - Desgaste de flanco na aresta de corte (SANDVIK, 2005).

Desgaste de cratera: é o tipo de desgaste que ocorre na superfície de saída da ferramenta de corte, causado pelo atrito entre ferramenta e cavaco, principalmente através do fenômeno da difusão (figura 2.22). O crescimento do desgaste de cratera resulta na quebra da ferramenta, quando tal desgaste se encontra com o desgaste de flanco. Para evitar esse tipo de desgaste recomenda-se utilizar ferramentas de metal duro revestido ou ferramentas cerâmicas (DINIZ, 2003).



Figura 2.22 - Desgaste de cratera na superfície de saída do cavaco (SANDVIK, 2005).

Quebra: é o resultado final da continuação das avarias e desgaste ou da soma dos dois (figura 2.23). A quebra da ferramenta ocasiona não somente dano na ferramenta, mas também no porta-ferramenta e na própria peça. A quebra da ferramenta também pode ser resultante de uma má especificação da ferramenta ou das condições de trabalho.



Figura 2.23 - Quebra da ferramenta (SANDVIK, 2005).

2.5.6 Causas de desgastes da ferramenta

Os principais fenômenos causadores dos desgastes segundo Diniz et al (2003):

Abrasão mecânica: a abrasão (ou atrito) mecânica é uma das principais causas de desgaste da ferramenta. Tal o desgaste de flanco quanto o desgaste de cratera pode ser gerado pela abrasão, entretanto ela atua mais no desgaste de flanco, já que a superfície de folga atrita com um elemento rígido, que é a peça, enquanto que a superfície de saída atrita com um elemento flexível, que é o cavaco. O desgaste pela abrasão é incentivado por partículas duras presentes no material da peça e pela temperatura de corte.

Difusão: a difusão entre ferramenta e cavaco é ativada pela temperatura na zona de corte. A difusão no estado sólido consiste na transferência de átomos de um metal a outro. Ela também depende da duração do contato e da afinidade físico-química dos metais envolvidos na zona de fluxo.

Oxidação: altas temperaturas e a presença de ar e água, contida nos fluidos de corte, geram oxidação para a maioria dos metais. O tungstênio e o cobalto durante o corte formam filmes óxidos porosos sobre a ferramenta, que são facilmente removidos pelo atrito causando o desgaste. O desgaste gerado pela oxidação se forma especialmente nas extremidades do contato cavaco-ferramenta devido ao acesso do ar nesta região, sendo esta uma possível explicação para o surgimento do desgaste de entalhe.

2.6 ARESTA POSTIÇA DE CORTE

A aresta postiça de corte (APC) é um acúmulo de material encruado da peça que pode se formar na superfície de saída da ferramenta de corte durante a usinagem. Sua ocorrência está intimamente ligada às condições de corte e às características microestruturais do material da peça (LUIZ, 2007).

Em harmonia com Trent (1963), no momento em que se usina em baixas velocidades de corte, a aresta postíça de corte pode se formar. Encontram-se 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 escoa (TRENT, 1963). A figura. 2.23 mostra um desenho esquemático da APC, evidenciando ser está um corpo solidário ao material da peça e do cavaco. A figura. 2.24 mostra micrografias de aresta postíça de corte de um aço de corte fácil baixo carbono confirmando o desenho esquemático da figura anterior

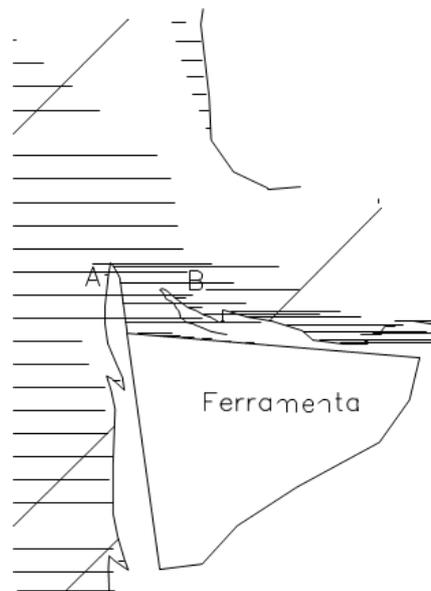


Figura 2.24 - Aresta postíça de corte.

Fonte: (TRENT, 1963).

A literatura explica a ocorrência da aresta postíça de corte da seguinte forma (TRENT; WRIGHT, 2000): 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. 2.24). O encruamento sucessivo de camadas do material faz com que estes pontos se afastem da superfície de saída da ferramenta. Um dos problemas da APC é que ela pode não ser estável e alguns fragmentos podem ser arrancados da mesma e passarem entre a superfície de folga e a peça (o que piora o acabamento superficial) ou arrastarem-se sobre a superfície de saída aumentando o desgaste da ferramenta.

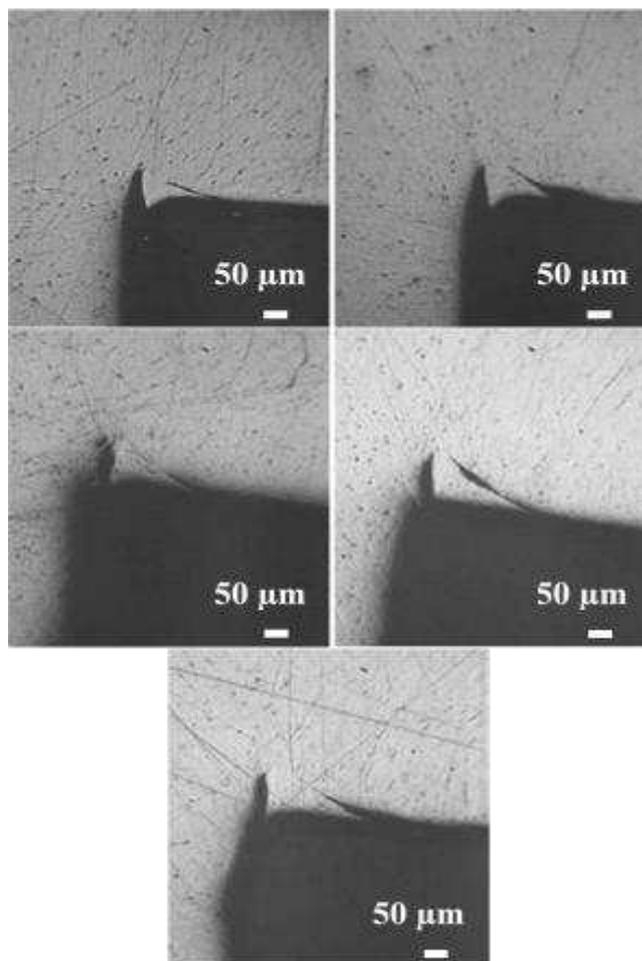


Figura 2.25 - Sequência de fotografias ao longo da espessura de corte 'b' após usinar a 20,91 m/min e com fluido de corte.

Fonte: (REIS et al., 2007).

APC são medidos em amostras obtidas em ensaios quick-stop (REIS et al., 2007) (MACHADO; Da SILVA, 2004) (FERRARESI, 1977). Embora esta seja a abordagem mais utilizada, já existem estudos que tentam modelar matematicamente a geometria da aresta postiza de corte. Para tanto, estes estudos se utilizam da teoria da plasticidade com modelagem das regiões de deslizamento através de slip-lines (FANG; DEWHURST, 2005). A justificativa para estes estudos é que a geometria da APC afeta diretamente a flutuação das forças de corte.

A velocidade de corte é o parâmetro de maior influência na formação da APC. Para velocidades de corte muito baixas não há formação de APC e o cavaco simplesmente desliza sobre a superfície de saída da ferramenta. Com o aumento da velocidade de corte a APC começa a se formar e irá aumentar de tamanho conforme a mesma aumenta. O

tamanho da APC atinge um máximo e então começa a diminuir até desaparecer. Esta característica é ilustrada na figura 2.26.

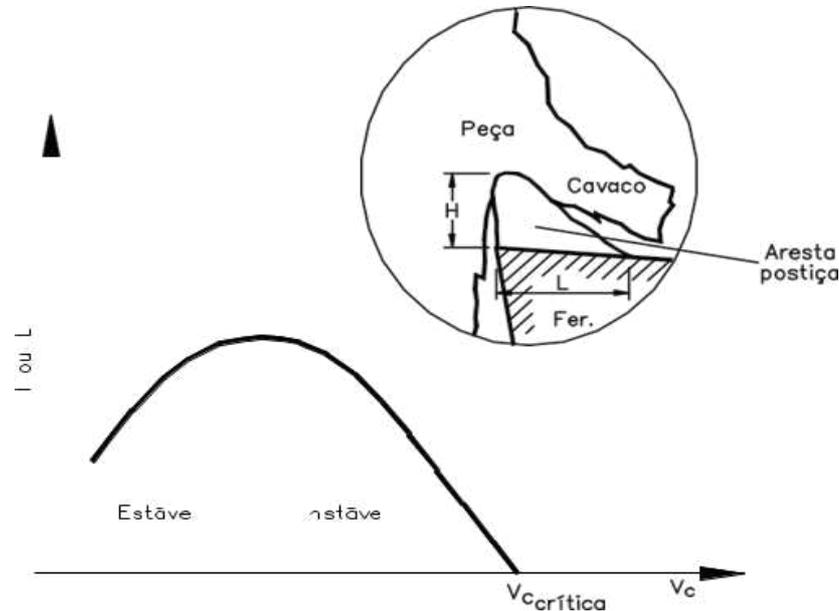


Figura 2.26 - Variação das dimensões da APC com a velocidade de corte com identificação dos regimes estável e instável e da velocidade de corte crítica.

Fonte: (FERRARESI, 1977; LUIZ, 2007).

Um aumento do avanço leva a um aumento da APC. Já a profundidade de corte não tem nenhum efeito. A geometria da ferramenta afeta a formação da APC, sendo o ângulo de saída o mais influente. Com aumento do ângulo de saída a curva da figura 2.26 se desloca para esquerda (FERRARESI, 1977; LUIZ, 2007).

2.7 FORÇAS DE USINAGEM

Para Luiz (2007) a força de usinagem é a força total que atua sobre a cunha cortante durante a usinagem e é considerada agindo em direção e sentido sobre a ferramenta.

Tal qual Diniz (2000), o conhecimento do comportamento e da ordem de grandeza dos esforços de corte nos processos de usinagem é de fundamental importância, pois eles afetam a potência necessária para o corte, a capacidade de obtenção de tolerâncias

apertadas, a temperatura de corte, o desgaste da ferramenta, além de servirem como parâmetros para o projeto de máquinas-ferramenta.

Algumas definições são necessárias antes do estudo das forças de usinagem e as apresentadas a seguir são baseadas na norma DIN 6584 (DIN, 1963) e no trabalho de Luiz (2007).

A constituinte da força de usinagem num plano ou numa direção qualquer é obtida mediante a projeção da força de usinagem (F_u) sobre esse plano ou direção, ou seja, mediante uma decomposição ortogonal. Têm importância prática aquelas componentes que estão contidas no plano de trabalho e no plano efetivo de referência (figura 2.27).

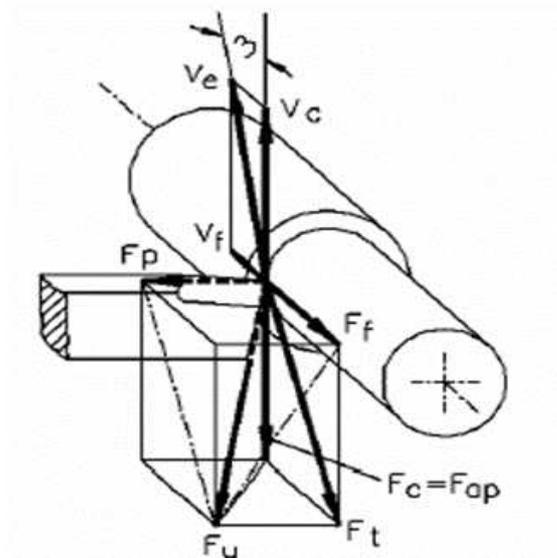


Figura 2.27 - Componentes da Força de Usinagem no torneamento (FERRARESI, 1977).

Nesta Figura, além das componentes F_c e F_f e F_p , aparecem também as componentes F_t (Força ativa = projeção de F_u sobre o plano de trabalho) e F_{ap} (Força de apoio = projeção de F_u sobre a perpendicular à direção de avanço, situada no plano de trabalho). No caso do torneamento, o ângulo da direção de avanço é 90° , e a força F_{ap} confunde-se com F_c .

No caso específico deste trabalho são importantes as seguintes componentes da força de usinagem: força de corte, força de avanço e força passiva.

A força de corte (F_c) e a força de avanço (F_f) são as componentes da força de usinagem (F_u) no plano de trabalho e contribuem para potência de corte. Conceitualmente a força de corte F_c é a projeção da força de usinagem sobre a direção de corte e a força de avanço F_f é a projeção da força de usinagem sobre a direção de avanço.

A força passiva (F_p) é a projeção da força de usinagem sobre uma direção perpendicular ao plano de trabalho. Esta componente não contribui para a potência de usinagem, pois é perpendicular aos movimentos, porém, é importante que se estude seu comportamento e o seu valor, pois ela é responsável pela dificuldade de obtenção de tolerâncias de forma e de dimensão apertadas.

Em geral as componentes das forças de usinagem variam com as condições trabalho (material da peça, condições de corte, geometria da ferramenta, etc.). Asthakov (1998) afirma que os materiais com menor deformação final na fratura são os que consomem menor energia durante o corte e, portanto, apresentam valores de força de usinagem menor.

Um aumento do ângulo de saída provoca uma diminuição nas componentes da força de usinagem. O avanço e a profundidade de corte agem na direção oposta, ou seja, aumentando-os as componentes da força de usinagem aumentam.

A velocidade de corte tem comportamento distinto dependendo dos valores considerados. Para pequenos valores de velocidade de corte, a força de corte inicialmente diminui podendo assumir um comportamento aleatório na região de formação da aresta postiça de corte. Além dessa região a força de corte tende a atingir um patamar de estabilização, o qual se deve principalmente ao equilíbrio entre o aumento de resistência devido ao aumento da taxa de deformação e à diminuição de resistência devido ao aumento de temperatura.

Em profundidades de corte extremamente pequenas, a importância relativa da força passiva tende a aumentar. Este comportamento é devido à diminuição do ângulo de posição primário efetivo. Esta diminuição de ângulo ocorre porque o raio de ponta da ferramenta passa a ter maior participação, em termos relativos, na aresta efetiva de corte (NAVES, 2005).

2.8 RUGOSIDADE SUPERFICIAL

Conforme Machado (2011), a rugosidade de uma superfície é composta de irregularidades finas ou de erros microgeométricos decorrentes da ação inerente ao processo de corte: marcas de avanço, aresta postiça de corte, desgaste da ferramenta, etc. Ela depende de vários parâmetros, como a rigidez da máquina-ferramenta, propriedades do material da peça, geometria e material da ferramenta, operação de usinagem.

A usinabilidade de um material também pode ser avaliada pela rugosidade obtida em determinado processo de usinagem. A rugosidade pode ser medida por vários parâmetros, a tabela 2.8 - Apresenta os parâmetros utilizados nesta dissertação, de acordo com a Norma NBR ISO 4287 (ABNT, 2002a).

Tabela 2.8 - Principais parâmetros de rugosidade segundo Norma NBR ISO 4287.

Fonte: (ABNT, 2002).

Símbolo	Nome	Definição
R_a	Desvio aritmético médio do perfil avaliado	Média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de amostragem
R_q	Desvio quadrático médio do perfil avaliado	Raiz quadrada da média dos valores das ordenadas no comprimento de amostragem
R_t	Altura total do perfil avaliado	Soma da maior altura de pico do perfil e da maior profundidade do vale do perfil no comprimento de avaliação
R_z	Altura máxima do perfil avaliado	Soma da altura máxima dos picos e a maior das profundidades dos vales no comprimento

Evangelista Luiz (2007) avaliou o parâmetro de rugosidade R_a no torneamento do aço de corte fácil ao chumbo ABNT 12L14 em amostras com diferentes níveis dos elementos residuais cobre níquel e cromo. A figura 2.28 apresenta a rugosidade na usinagem com ferramenta de metal duro (classe ISO K15 sem quebra-cavaco) em função da velocidade de corte.

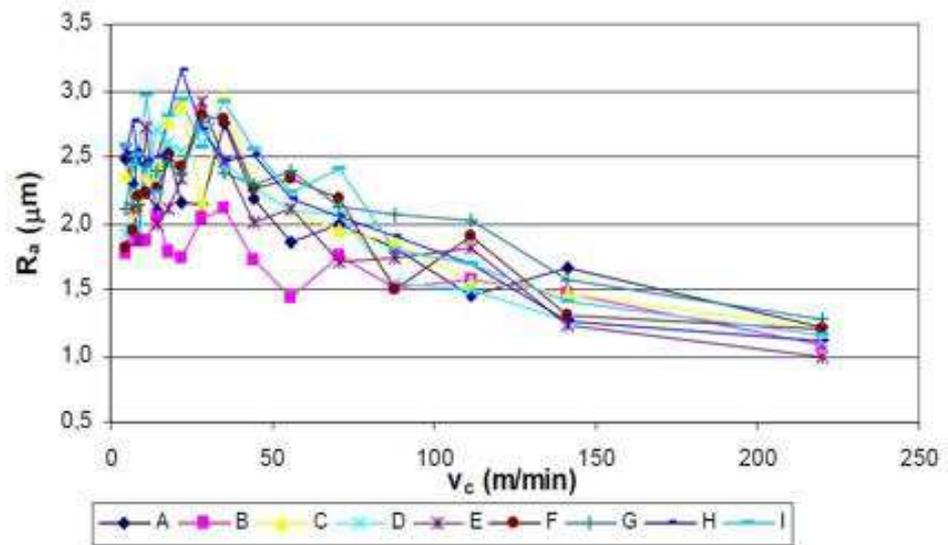


Figura 2.28 - Rugosidade R_a para amostras de aço de corte fácil ao chumbo ABNT 12L14 em função da velocidade de corte, $f = 0,138$ mm/volta e $a_p = 2,0$ mm.

Fonte: (EVANGELISTA LUIZ, 2007).

2.9 TEMPERATURA DE CORTE

Em usinagem praticamente toda a energia mecânica associada à formação do cavaco se transforma em energia térmica (calor). As fontes geradoras de calor no processo de usinagem são: a deformação e o cisalhamento do cavaco no plano de cisalhamento, o atrito do cavaco com a ferramenta e o atrito da ferramenta com a peça (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008). A figura 2.29 mostra três zonas distintas onde o calor pode ser gerado em usinagem.

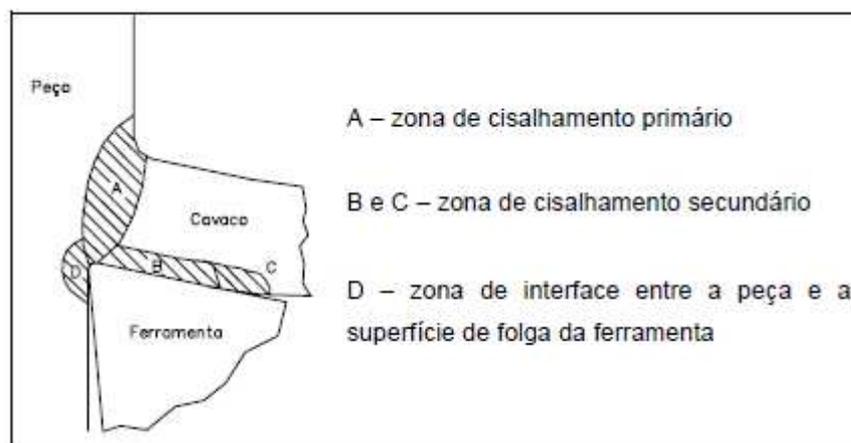


Figura 2.29 - Zonas de geração de calor em usinagem. (MACHADO; DA SILVA, 2004, p.99).

Grande parte deste calor gerado é dissipada pelo cavaco, uma pequena percentagem é dissipada pela peça e outra pelo ambiente. O restante vai para a ferramenta de corte (MACHADO, 2011). Entretanto, como a região da ferramenta que recebe esse calor (região de contato ferramenta-peça e cavaco-ferramenta) é reduzida e não muda com o tempo, como ocorre com a peça, desenvolvem-se ali altas temperaturas (até 1200 °C), que muito contribui para o desgaste da ferramenta (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008).

De acordo com Machado & Silva (2004), um forte indicador das temperaturas nos cavacos de aço é a coloração apresentada por eles, quando a usinagem ocorre sem fluido de corte. Essa coloração, comumente marrom ou azul, é promovida pela formação de uma fina camada de óxido poucos segundos após o corte. A hematita (Fe_2O_3), cuja dureza à temperatura ambiente atinge 1050 HV, é predominante até temperaturas da ordem de 200 °C, mantendo a cor cinza do aço; a magnetita (Fe_3O_4), cuja dureza à temperatura ambiente é da ordem de 540 HV, se forma entre as temperaturas de 200 °C e 570 °C, mudando a cor para marrom; a wustita (FeO), cuja dureza à temperatura ambiente é da ordem de 460 HV, se forma em temperaturas acima de 570 °C, mudando a coloração para azul.

A zona de cisalhamento secundário é a principal fonte de calor na usinagem, responsável pelas temperaturas da ferramenta de corte. Deste modo, as temperaturas na superfície de saída da ferramenta são as maiores do sistema. Uma interpretação para este comportamento é devido a uma combinação de grande quantidade de calor gerado na

interface cavaco-ferramenta com o calor gerado na zona de cisalhamento primário, o qual é conduzido em sua grande parte pelo fluxo de cavacos (MACHADO; DA SILVA, 2004; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008).

A medição de temperatura em usinagem é um desafio experimental. Pois muitos métodos experimentais já foram desenvolvidos ao longo do tempo e, talvez o mais utilizado seja o método do termopar ferramenta-peça. Mediante ser o método utilizado na etapa experimental desta dissertação, o método do termopar ferramenta-peça será apresentado com mais detalhes a seguir.

2. 9. 1 Método do Termopar Ferramenta-Peça

O método do termopar ferramenta-peça, mede a temperatura média da interface cavaco ferramenta por meio de um fenômeno físico conhecido como efeito “Seebeck” (Borchardt & Gomes, 1979). Segundo este efeito a presença de dois materiais diferentes conectados em um circuito, conforme representado na figura 2.30, com suas extremidades submetidas a temperaturas diferentes, gera-se no circuito uma força eletromotriz, cuja a grandeza dependerá dos materiais e da diferença de temperatura entre as juntas (Borchardt & Gomes, 1979).

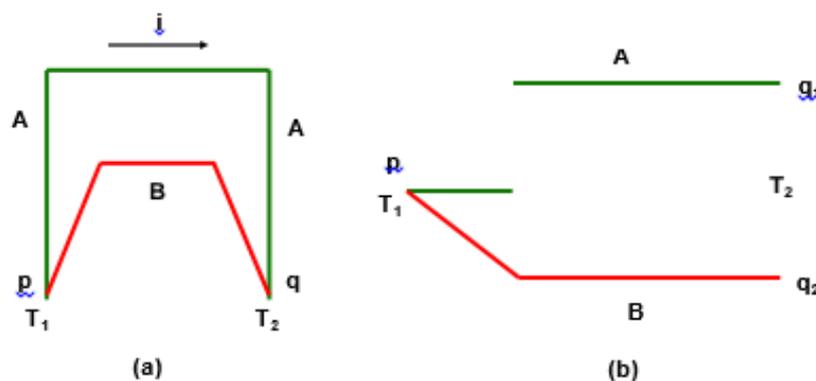


Figura 2.30 - Princípio dos termopares, onde “p” e “q” representam as junções, “A” e “B” representam os materiais: a) corrente termoelétrica “i”; b) circuito termoelétrico onde a junção “q” foi aberta.

Fonte: (BORCHARDT; GOMES, 1979, p.11).

Consoante Machado (2011), a figura 2.31 mostra um esquema geral do método do termopar ferramenta-peça. O ponto “Q”, de contato da peça com a ferramenta, representa a junta quente. Os pontos “F1”, “F2”, “F3” e “F4” representam as juntas frias. A cuba é preenchida com mercúrio até que seja estabelecido o contato elétrico do disco de contato com o elemento “E”, garantindo desta forma o fechamento do circuito. Os fios “A1” e “A2” fazem a conexão do sistema com o milivoltímetro “V” que indica o valor da tensão elétrica gerada.

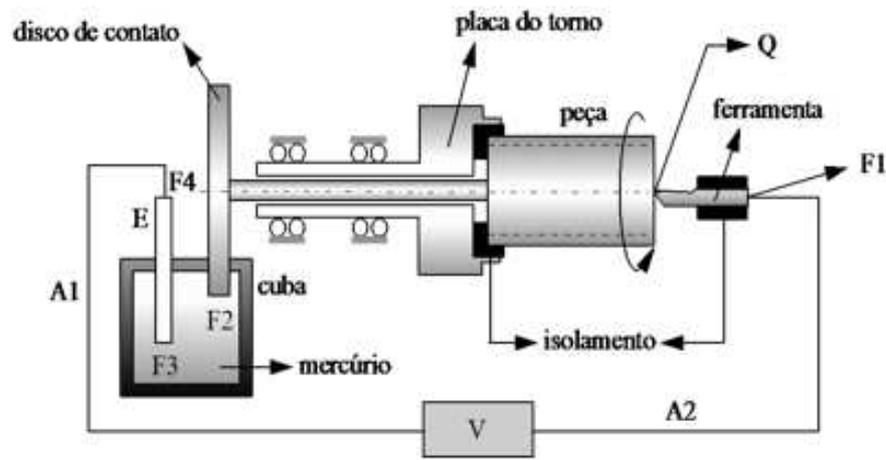


Figura 2.31 - Esquema geral do método do termopar ferramenta-peça utilizado na medição da temperatura de usinagem.

Fonte: (MACHADO, 2011, p.165).

A associação entre a força eletromotriz gerada pelo termopar ferramenta-peça e a temperatura da junta é obtida através da calibração do sistema. Esta calibração é realizada para cada par de materiais e em faixas de temperaturas a que estes materiais estarão submetidos na usinagem. Um sistema de aquisição de dados é utilizado para medição da força eletromotriz e da temperatura gerada na junta quente, para posteriormente obter a curva de calibração.

Segundo Kaminise (2012), a calibração do sistema termopar ferramenta-peça também pode ser realizada através de um aquecimento produzido por chama de maçarico a gás oxiacetileno. Onde o princípio usado é semelhante à calibração utilizando banho de sal aquecido por resistência elétrica, no entanto, a calibração com maçarico a gás oxiacetileno pode ser realizada na própria máquina-ferramenta, com os mesmos elementos usados em

um ensaio de usinagem: ferramenta de corte, porta-ferramenta, corpo de prova e o elemento de aquecimento (pino metálico do material da peça ou cavaco).

A figura 2.32 indica a representação do processo de calibração com maçarico a gás oxiacetileno. Em seu trabalho, Kaminise (2012) empregou uma contra ponta rotativa específica para a mensuração de temperatura.

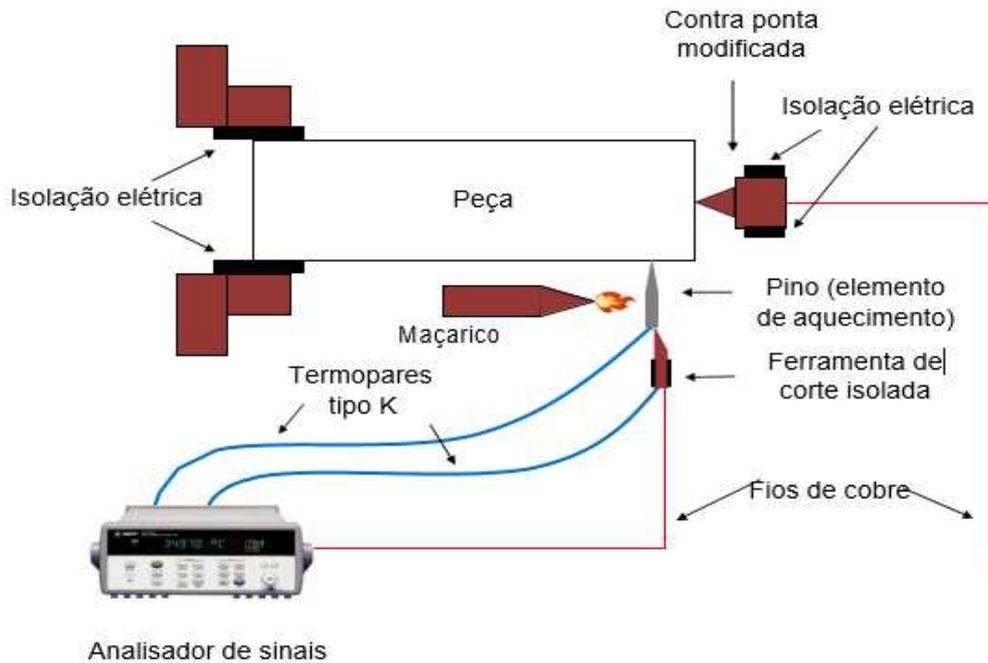


Figura 2.32 - Esquema geral da calibração do sistema termopar ferramenta-peça utilizando chama de maçarico e elemento de aquecimento (pino metálico).

Fonte: (KAMINISE, 2012).

A contra ponta utilizada por Kaminise (2012) foi modificada especialmente para conferir isolamento elétrico do corpo da máquina-ferramenta e permitir a continuidade do circuito elétrico, sem comprometer a sustentação do corpo de prova na usinagem. A sucessão elétrica do circuito foi obtida através do alojamento de uma cápsula de Teflon® com armazenamento de mercúrio no interior do cone morse da contra ponta. A figura 2.33 expõe os elementos da contra ponta rotativa modificada.

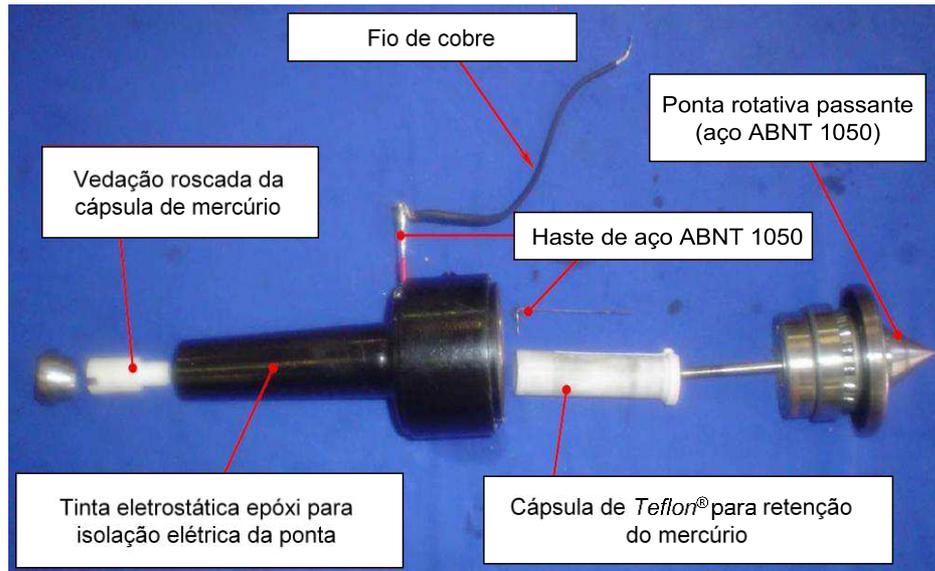


Figura 2.33 - Componentes da conta ponta rotativa modificada para o método termopar ferramenta-peça.

Fonte: (adaptado de KAMINISE, 2012).

Conforme Kaminise (2012), a ponta rotativa e a haste metálica da figura 2.33 fazem contato com o mercúrio retido na cápsula de Teflon®, uma vez que ambos foram confeccionados com aço SAE 1050, a junta formada é de mesmo material. Dessa maneira, não há força eletromotriz adicional no sistema termopar ferramenta-peça proveniente desta junta. O cone morse foi isolado eletricamente através de pintura eletrostática à base de resina epóxi e o fio de cobre soldado à haste metálica da conta ponta fecha o circuito elétrico.

2.10 FLUIDOS DE CORTE

O termo usinagem é aplicado a todos os processos de fabricação onde ocorre a retirada de material – cavaco – pela ferramenta, conferindo à peça: forma, dimensão e acabamento (DIN 8580, 2009 APUD SOUZA, 2011). Durante essa retirada de material é gerada uma grande quantidade de calor, devido ao atrito que ocorre entre a ferramenta-peça e cavaco-ferramenta. Este calor pode desgastar a ferramenta além do normal e aumentar as

dimensões da peça (dilatação térmica). Para diminuir e/ou extrair da ferramenta e da peça o calor, usam-se os fluidos de corte como lubrificantes e/ou refrigerantes.

Taylor (1890), foi o primeiro que averiguou e mediu a influência dos fluidos de corte na usinagem dos materiais. Sua constatação se deu por meio da utilização de água para resfriar a ferramenta, reduzido os indesejáveis efeitos de alta temperatura na mesma. Além disso, tal feito conseguiu aumentar a velocidade de corte em 33% sem prejudicar a vida útil da ferramenta. Logo depois, Taylor utilizou uma solução água e sabão para impedir a peça e/ou a ferramenta de enferrujar.

Segundo Pereira (2005) 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 prejudicam o meio ambiente.

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.

Encontram-se 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 2.9 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 2.9 - Tipos, composição e propriedades dos fluidos de corte.

Fonte: (FERRARESI, 1977).

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.

2.10.1 O fluido de corte como refrigerante

Consoante Stoeterau (2004) as condições que um fluido de corte deve possuir para retirar eficientemente o calor da região de corte, da peça e da ferramenta, são:

- Baixa viscosidade a fim de que flua facilmente;
- Capacidade de “molhar” bem o metal para estabelecer um bom contato térmico;
- Alto calor específico e alta condutividade térmica.

Eventualmente, 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.

2.10.2 O fluido de corte como lubrificante

De acordo com Machado (2004) 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. Portanto, para que um fluido seja bom lubrificante é necessário que ele possua as seguintes características estabelecidas por:

- 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.

Para mais 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

2. 10. 3 Métodos de aplicação dos fluidos de corte

Ferraresi (1977) afirma que os fluidos sólidos podem ser aplicados “diretamente na superfície de saída da ferramenta, antes da operação de usinagem”, ou como “aditivo metalúrgico”. Os fluidos de corte líquidos e gasosos “são aplicados diretamente sobre região de corte”.

Em geral, para que o fluido de corte desempenhe suas funções deve ser aplicado próximo da aresta de corte, nas interfaces peça/ferramenta/cavaco. No entanto, não há um consenso em relação à melhor direção de aplicação de fluido.

Ao definir a forma de aplicação deve-se considerar, além do tipo do fluido de corte empregado e as direções do jato, o tipo de operação de usinagem, a pressão e o volume do fluido.

2. 11 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.

Conforme Pimentel (2006) a 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. Comumente são adicionados aos aços de livre corte os seguintes elementos: enxofre, chumbo, carbono, silício, fósforo, nitrogênio, cobre e estanho. Esses elementos são adicionados para melhorar suas características de usinabilidade.

Será feita uma breve explicação acerca do efeito dos principais elementos presentes nos aços.

Carbono: elemento de liga com forte influência nas propriedades mecânicas e tecnológicas do aço. Ele aumenta, em primeiro lugar, o limite de resistência e a dureza (LESKOVAR; GRUM, 1986). Com o aumento do teor de carbono do aço, a quantidade de carbonetos de ferro (cementita) também aumenta. Como a cementita é extremamente dura, ela acelera o desgaste da ferramenta. Isto significa que a vida da ferramenta depende muito do teor de carbono do aço. Aços com teores muito baixos de carbono têm baixa usinabilidade devido à sua alta ductilidade (considera-se aqui os aços sem aditivos especiais para melhorar a usinabilidade), com o aumento dos teores de carbono a fragilidade do aço é aumentada, o que beneficia a usinagem. Acima de aproximadamente 0,20 % de carbono ocorre novamente queda de usinabilidade (ECHEVARRÍA; CORCUERA, 1987) (MURPHY; AYLWARD, 1973).

Manganês: é adicionado ao aço com duas finalidades: melhorar suas propriedades mecânicas e promover, juntamente com o enxofre, a formação de sulfetos de manganês (LESKOVAR; GRUM, 1986). Conforme Echevarría e Corcuera (1987) o manganês presente no aço se divide em vários constituintes:

- Parte está presente como sulfeto de manganês tipo alfa de estrutura cúbica;
- Parte forma solução sólida com a matriz ferrítica do aço;
- E por fim, uma pequena porcentagem de Mn pode participar da composição de carbonetos (cementita) ou de óxidos produzidos durante a desoxidação do aço.

Os dois últimos constituintes descritos são de certa forma desfavoráveis à usinagem, de maneira que o teor de manganês adicionado deve atender a um valor ótimo. Se a quantidade de manganês for muito baixa, haverá pouco sulfeto de manganês. Caso for muito alta, ocorrerá o endurecimento excessivo da ferrita além da participação do manganês nos carbonetos e óxidos.

Silício: forma uma solução dura de sílico-ferrita ou carbonetos (LESKOVAR; GRUM, 1986). Em ambos os casos ele estimula a formação de inclusões de sulfetos. Então devido à ação do silício pode ocorrer:

- Ação abrasiva dos óxidos de silício que reduzem muito a vida da ferramenta (ECHEVARRÍA; CORCUERA, 1987);
- Influência no tipo e forma das inclusões de sulfetos formados.

Alumínio: produz um efeito similar ao silício, mas com maior intensidade. Forma aluminatos muito abrasivos que são bastante prejudiciais à vida da ferramenta (BAS, 1995). Prejudica principalmente a vida das ferramentas nas condições em que o mecanismo de desgaste por abrasão é mais pronunciado.

Oxigênio: Sua ação depende da forma como o mesmo se apresenta no aço: pode melhorar a usinabilidade por favorecer a formação de sulfetos mais globulares. Por outro lado, piora a usinabilidade se estiver na forma de silicatos ou aluminas (ECHEVARRÍA; CORCUERA, 1987).

Enxofre: é conhecido que a boa usinabilidade nos aços baixo-carbono é obtida pelo aumento do teor de enxofre para valores acima de 0,40% (GARVEY; TATA, 1965). Devido ao fato de não ser um aditivo caro, o enxofre é o elemento mais extensivamente usado para melhorar a usinabilidade dos aços ao carbono. Em quase todos os tipos de aço comercialmente produzidos, o enxofre se apresenta, geralmente, combinado com o manganês na forma de inclusões de sulfeto de manganês, MnS. As características desse tipo de inclusões, tais como tamanho, morfologia, frequência e distribuição, exercem notadamente grande influência sobre a usinabilidade dos aços de corte fácil.

Fósforo e Nitrogênio: o fósforo beneficia a usinabilidade dos aços de corte fácil baixo-carbono pela melhoria da qualidade superficial da peça usinada e por meio da contribuição à formação de cavacos frágeis (BAS, 2000). Adições moderadas de nitrogênio também atuam de uma maneira similar (GARVEY; TATA, 1965).

Molibdênio: Este elemento é um substituto parcial do tungstênio, formando também o carboneto duplo com o Fe. Como o peso atômico do molibdênio é cerca da metade do peso atômico do tungstênio, a mesma porcentagem em peso produz o dobro de átomos para ligar-se no aço. Assim, para substituir 18% de W, necessita-se apenas de ~9% em peso de Mo. Devido ao menor ponto de fusão, os aços ao Mo são temperados em temperaturas inferiores aos do tipo ao W. Nos aços ao Mo a austenita residual é menos estável que nos aços ao W, resultando em temperaturas de revenimento inferiores. Do mesmo modo, as durezas a quente são também inferiores.

Vanádio: Aparece em teores que variam de 1 a 5 %. É desoxidante, mas forte formador de carboneto. Este carboneto é o mais duro encontrado nos aços-rápidos (~84,2

HRC para o VC em aço rápido de alto C e alto V, contra 82,5 HRC do WC nos metais duros e 75,2 HRC do carboneto de Fe-W-Mo nos aços rápidos). Toda vez que se eleva o teor de vanádio nos aços-rápidos deve se elevar também o teor de carbono pois caso contrário, ele promove a ferritização do aço, diminuindo a dureza apreciavelmente. O vanádio aumenta a dureza a quente dos aços, aumentando a eficiência no corte. Os carbonetos se alojam nos contornos de grão, impedindo o crescimento do mesmo, durante o tratamento térmico, produzindo, portanto, aços mais tenazes. Os aços-rápidos de alto teor de carbono e alto teor de vanádio são conhecidos como aços super-rápidos, possuindo maior resistência ao desgaste e, portanto, maior eficiência no corte.

Cromo: Aparece em teores sempre em torno de 4%. Juntamente com o carbono, são responsáveis pela elevada temperabilidade dos aços-rápidos. Ele também diminui a oxidação do aço durante o tratamento térmico.

Cobalto: Aumenta significativamente a dureza a quente, aumentando a eficiência das ferramentas em operações de altas temperaturas, como é o caso de corte de desbaste e em corte a altas velocidades. O Co se dissolve grandemente na matriz, proporcionando, por conseguinte, uma dureza média mais elevada, tanto à temperatura ambiente, como a altas temperaturas. O ponto de fusão da liga é aumentado e ele proporciona, também, uma queda na taxa de difusão dos elementos de liga, inibindo, por conseguinte, a coalescência de carbonetos secundários. Isto permite temperaturas de tempera mais elevadas sem o risco de problemas sérios de crescimento de grão. Maiores temperaturas de tempera permitem maior quantidade de elementos de liga entrarem em solução e, por conseguinte aumentar a dureza a quente. O cobalto aumenta ainda a condutividade térmica do aço-rápido. Os aços com Co produzem grandes quantidades de austenita retida na têmpera, resultando em maiores endurecimentos secundários no revenimento.

Tabela 2.10 - Influência de elementos de liga sobre as características fundamentais dos aços para ferramentas.

Fonte: (FERRARESI, 1970).

Características	Elementos de liga
Dureza a quente	W, Mo, Co (com W ou Mo), V, Cr, Mn
Resistência ao desgaste	V, W, Mo, Cr, Mn
Profundidade de endurecimento	B, V, Mo, Cr, Mn, Si, Ni
Empenamento mínimo	Mo (com Cr), Cr, Mn
Aumento da tenacidade pelo refino do grão	V, W, Mo, Mn, Cr

2. 12 TESTES DE USINABILIDADE

Segundo Mills e Redford (1983) os ensaios de usinabilidade podem ser classificados da seguinte forma:

- Ensaios que demandam usinagem;
- Ensaios que não demandam 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.

2. 12. 1 Tipos de ensaio de usinabilidade

Machado (2004) afirma que 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, abaixo:

- **Teste de microestrutura:** proposto por Zlatin (1950) e mencionado por (MILLS et. al., 1983) analisa-se a usinabilidade através da investigação microestrutural relacionando-se à dureza e velocidade;
- **Teste de pressão constante (Ff):** proposto por Boulger (1951), este teste consiste explica-se em aplicar uma força de avanço (Ff) constantemente e medir o tempo para se furar uma chapa de espessura padrão ou ainda determinar um tempo e medir o percurso do avanço;
- **Teste de faceamento rápido:** 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:** proposto por Heginbotham (1966) este teste consiste em utilizar uma ferramenta de perfil cônico e usa-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;
- **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 descrita pela equação vista abaixo;

$$V_{c60} = \frac{B}{L.HB} \sqrt{1 - \frac{A_r}{100}} \quad (1)$$

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:

$$V_{60} = 161.5 - 141.4 \times \%C - 42.4 \times \%Si - 39.2 \times \%Mn - 179.4 \times \%P + 121.4 \times \%S$$

(2)

3 MODELAGEM TEÓRICA

Logo após a escolha do tema “Estudo da usinabilidade dos Aços de Livre Corte: uma avaliação com base no teste de composição química a partir da variação do teor de carbono do aço ABNT 12L14” foi feita uma análise de acordo com os estudos propostos de CZAPLICKI (1962) e MILLS (1983).

Com o propósito de relacionar os diferentes tipos de composição química dos aços de livre corte bem como suas propriedades para realização de ensaios que demonstrem a usinabilidade dos materiais empregados para este estudo com base na equação proposta para esse tipo de teste, onde ao se conhecer a composição química do material, pode-se relaciona-la a uma medida de usinabilidade.

Foram confrontados a composição do material, à V_{60} (velocidade de corte que acarreta uma vida de ferramenta de 60 min) e o índice de usinabilidade de 0 a 100%, respectivamente. As normas desenvolvidas para usinagem com ferramenta de aço rápido garantem uma exatidão de 8% em relação aos valores obtidos de ensaios de usinabilidade com usinagem (Evidente que dentro de uma variedade de materiais, e considerando tratamentos térmicos restritos) para aços (CZAPLICKI, 1962).

A relação utilizada para a velocidade de corte de para uma vida de 60 min no torneamento de aços:

$$V_{60} = 161.5 - 141.4 \times \%C - 42.4 \times \%Si - 39.2 \times \%Mn - 179.4 \times \%P + 121.4 \times \%S \quad (2).$$

Podemos mensura-los de acordo com as quantidades percentuais dos elementos químicos presentes em sua composição e em conformidade com seu índice de usinabilidade.

4 ANÁLISE EXPERIMENTAL

Para análise experimental fez-se o uso de dados disponíveis no artigo: “Influência do teor de carbono na usinabilidade do aço de corte-fácil ABNT 12L14”. Onde o pesquisador, utilizou o material fornecido pela “Aços Villares” em forma de barras cilíndricas com 1000 mm de comprimento e diâmetro de 52,9 mm. E a partir desse ponto formou-se um banco de dados com a Tabela 4.11 que mostra a composição química dos 9 materiais analisados neste trabalho e sua aplicação nos testes de usinabilidade.

Os aços analisados para o estudo da usinabilidade com base no teste de sua composição química foram os aços carbonos, pois apresentam dados correspondentes com a equação a ser utilizada.

A tabela 4.11 exibe os dados da composição química das amostras de aços frágeis analisados, e que foi retirada do artigo: “Influência do teor de carbono na usinabilidade do aço de corte-fácil ABNT 12L14” apresentado no V Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. (SAMPAIO, et al. 2009).

Tabela 4.11 - Composição química do ABNT 12L14 conforme o fabricante.

Fonte: SAMPAIO, et al. 2009.

Material	% C	%Si	%Mn	%P	%S
A	0,09	0,03	1,24	0,046	0,273
B	0,14	0,03	1,2	0,045	0,28
C	0,072	0,02	1,21	0,044	0,284
D	0,085	0,02	1,25	0,047	0,272
E	0,077	0,02	1,24	0,05	0,277
F	0,084	0,02	1,23	0,048	0,297
G	0,078	0,03	1,25	0,051	0,273
H	0,077	0,02	1,22	0,045	0,295
I	0,078	0,03	1,25	0,052	0,279

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme a composição química proposta por CZAPLICKI (1962), e utilizando a correspondência entre a velocidade de corte para uma vida de 60 min no torneamento dos aços e os dados da composição química dos metais testados, adotou-se um valor correspondente de acordo com o percentual de cada elemento da equação, houve necessidade de utilizar o software MATLAB para o cálculo do índice de usinabilidade e um outro software de processamento de dados para a criação dos gráficos e o obter um melhor entendimento de como a composição química influiria na usinabilidade e nas propriedades químicas de cada metal. A tabela 4.12 apresenta a composição química das amostras utilizadas e valor quantitativo encontrado do índice de usinabilidade de cada material analisado.

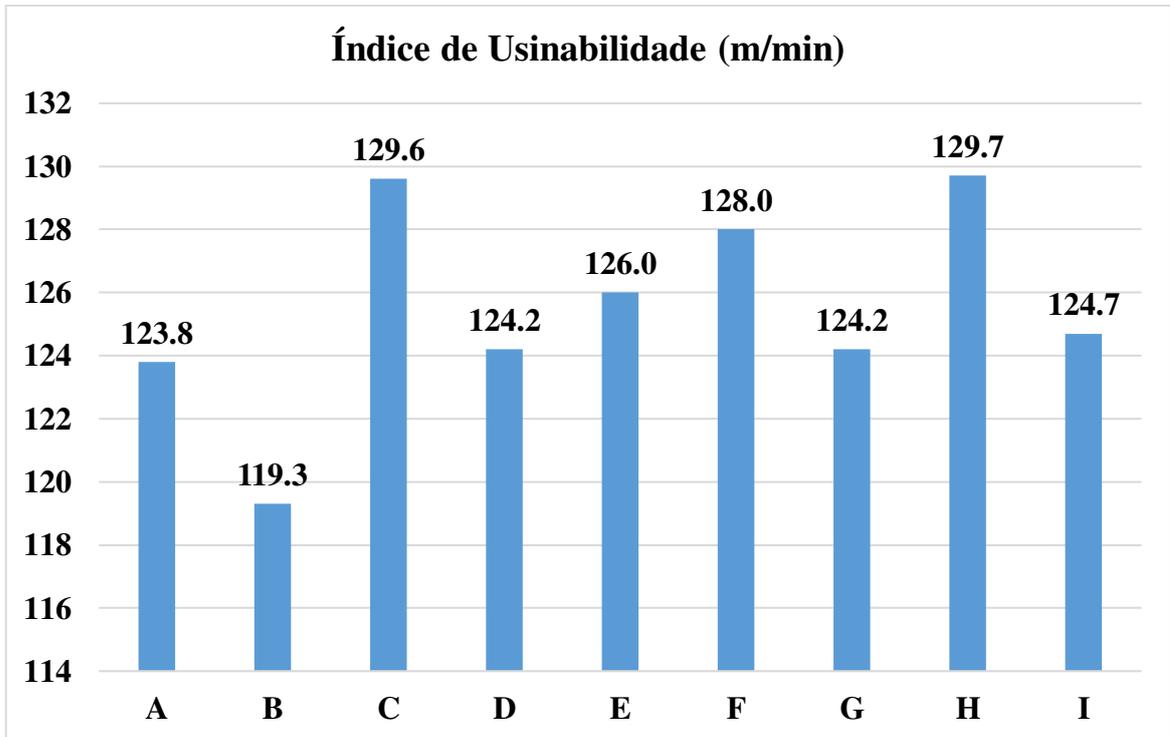
Tabela 4.12 - Composição química do ABNT 12L14 conforme o fabricante e o índice de usinabilidade gerado.

Fonte: Do Autor.

Material	% C	%Si	%Mn	%P	%S	Usinabilidade (m/min)
A	0,09	0,03	1,24	0,046	0,273	123,8
B	0,14	0,03	1,2	0,045	0,28	119,3
C	0,072	0,02	1,21	0,044	0,284	129,6
D	0,085	0,02	1,25	0,047	0,272	124,2
E	0,077	0,02	1,24	0,05	0,277	126,0
F	0,084	0,02	1,23	0,048	0,297	128,0
G	0,078	0,03	1,25	0,051	0,273	124,2
H	0,077	0,02	1,22	0,045	0,295	129,7
I	0,078	0,03	1,25	0,052	0,279	124,7

No gráfico da figura 5.1, são apresentados, os resultados dos ensaios de composição química relacionados com os componentes químicos da equação, juntamente com o índice de usinabilidade de cada amostra.

Figura 5.1- Índice de Usinabilidade das Amostras.

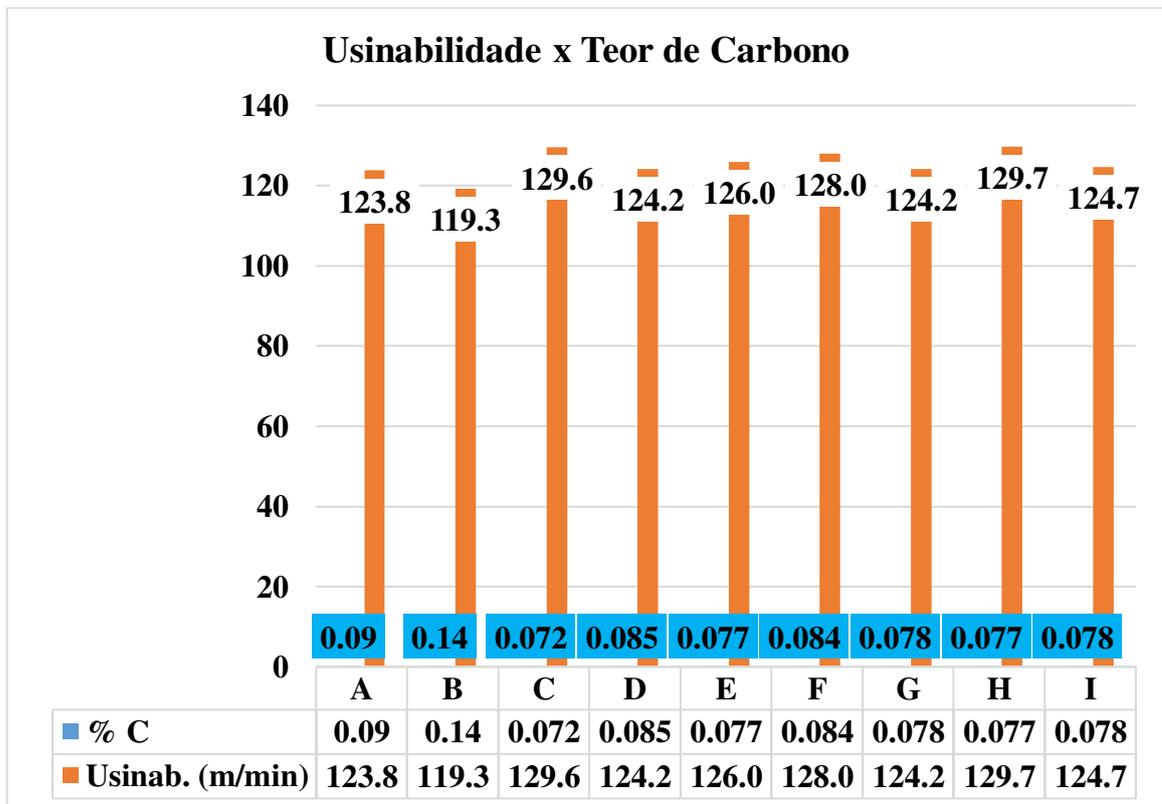


Fonte: Do Autor.

Com base nos valores encontrados no gráfico da figura 5.1, verifica-se que o índice de usinabilidade de acordo com os dados obtidos da tabela 4.11, onde observamos certa diferença entre os resultados dos índices de usinabilidade dos aços carbono, devido às diferenças encontradas nos teores percentuais dos elementos presentes na equação que determina este índice, o que indica a formação de elementos de liga que podem trazer ao material efeitos positivos ou negativos para sua usinabilidade; onde será demonstrado a partir da análise de cada gráfico a seguir como dar-se essa influência.

No gráfico da figura 5.2, percebe-se que quanto maior for o percentual de carbono, menor será o índice de usinabilidade nos metais testados, pois o aumento do teor de C aumenta a formação de carbonetos complexos o que representa maior dureza e resistência ao desgaste. O maior teor de carbono, também, levará a maior retenção de austenita na tempera, exigindo maiores tempos e temperaturas de revenimento. Portanto, o carbono age dificultando a usinabilidade dos aços proporcionando mais resistência à usinagem.

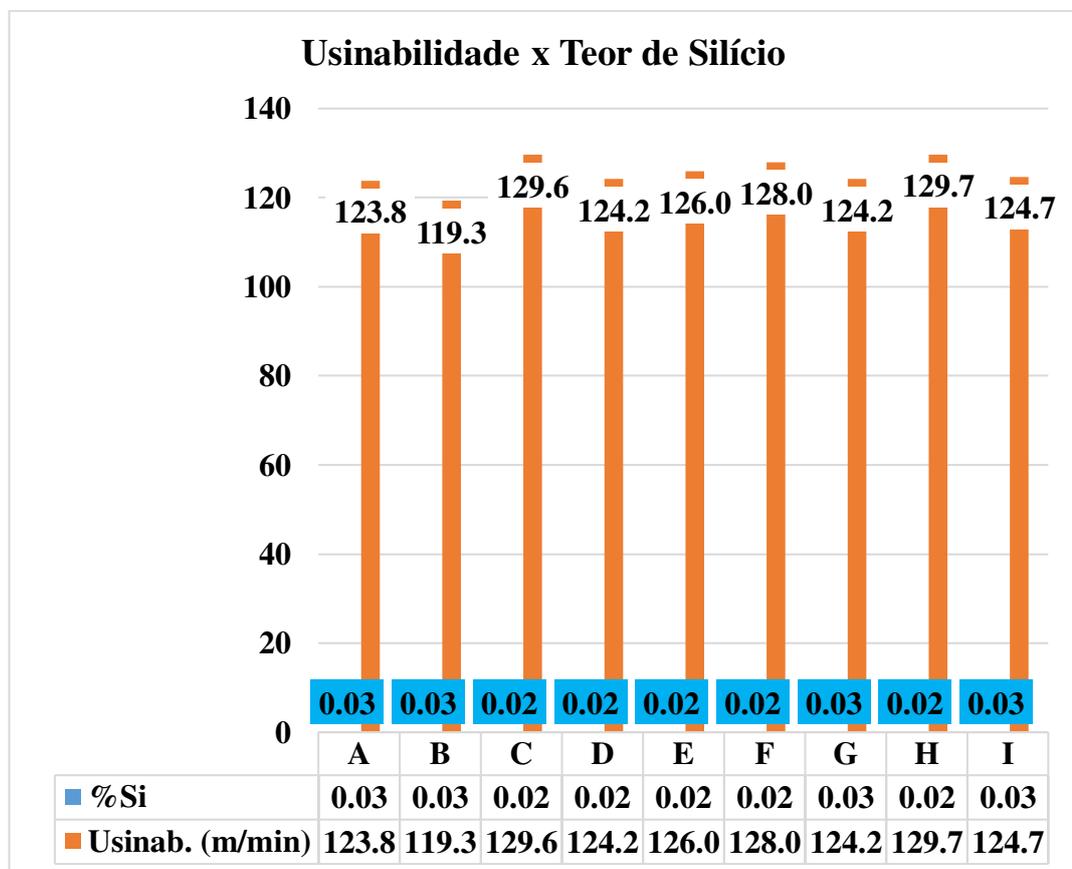
Figura 5.2 - Relação entre Índice de Usinabilidade x Teor de Carbono.



Fonte: Do Autor.

Nota-se no gráfico da figura 5.3, que à medida que aumenta a concentração do silício diminui-se o índice de usinabilidade dos aços carbono, isso ocorre devido ao silício dissolver na ferrita, atuando como elemento endurecedor. Desse modo aumenta a temperatura de transformação e reduz a variação de volume gama-alfa. O que gera a diminuição do tempo de vida da ferramenta de corte. O silício aumenta o limite de resistência à tração e o limite de escoamento dos aços, com pequena diminuição da tenacidade, ele também diminui a condutividade térmica.

Figura 5.3 - Relação entre Índice de Usinabilidade x Teor de Silício.

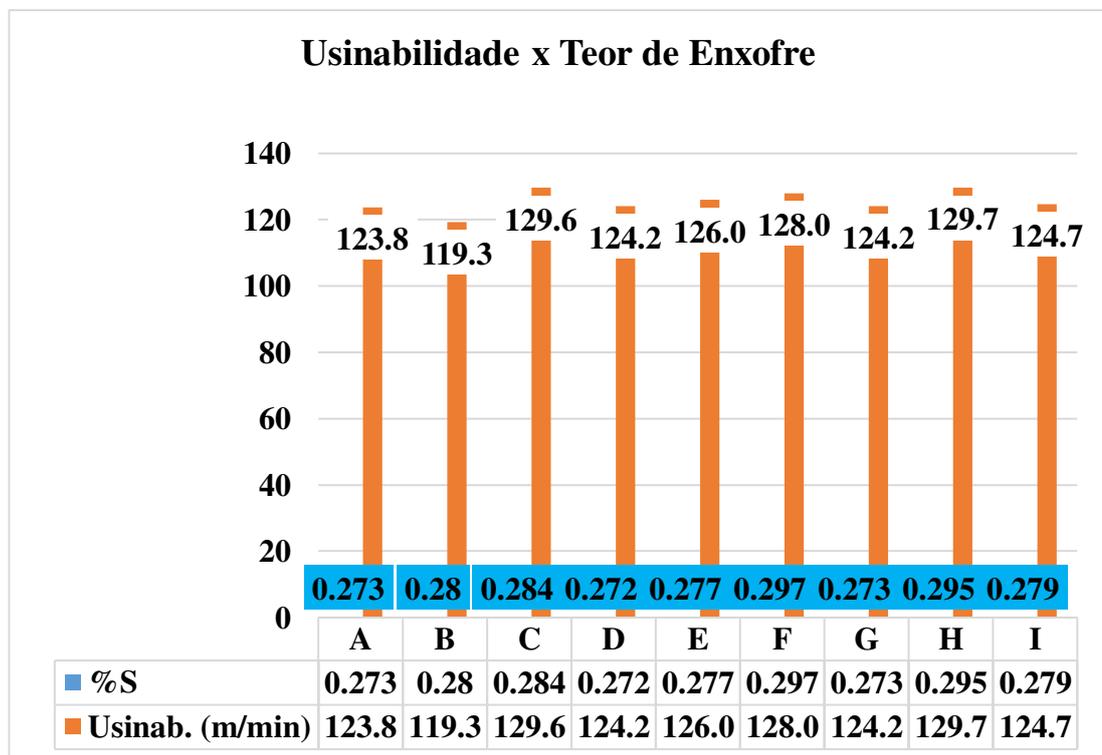


Fonte: Do Autor.

Ao analisar o gráfico da figura 5.4, verificamos que o enxofre favorece a usinabilidade dos metais. Pois, ao ser incluído aos aços de livre corte lhes trazem muitas melhorias, proporcionando uma redução de atrito entre a ferramenta e o metal usinado, comumente, combinado com o manganês na forma de inclusões de sulfeto de manganês onde possibilita 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%.

Outro fator importante é o fato do Enxofre não ser um aditivo tão caro, o que o torna um elemento muito utilizado, pois além dessas características citadas, ele pode reduzir as forças de usinagem e conseqüentemente provocar uma diminuição do desgaste da ferramenta.

Figura 5.4- Relação entre Índice de Usinabilidade x Teor Enxofre.

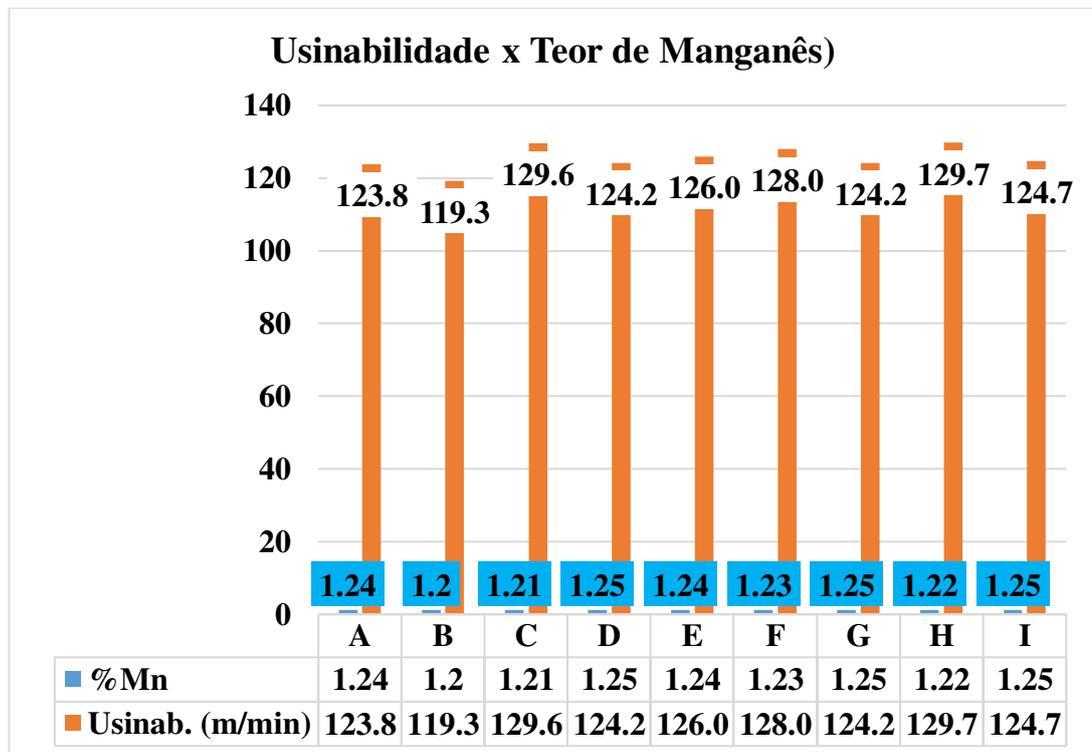


Fonte: Do Autor.

Ao examinar o gráfico da figura 5.5, verifica-se que o Manganês favorece a usinabilidade dos metais, tão somente quando está em combinação com o Enxofre, quando forma o sulfeto de manganês (MnS), do qual já fora expresso anteriormente. Contudo, 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 da usinabilidade, pois apesar de causar melhores índices quando associado ao enxofre sem ele o resultado não seria tão satisfatório.

Em alguns aços ligas (especialmente em aços austeníticos) o manganês substitui parcialmente o Níquel com a finalidade de redução de custos de produção.

Figura 5.5 - Relação entre Índice de Usinabilidade x Teor de Manganês.



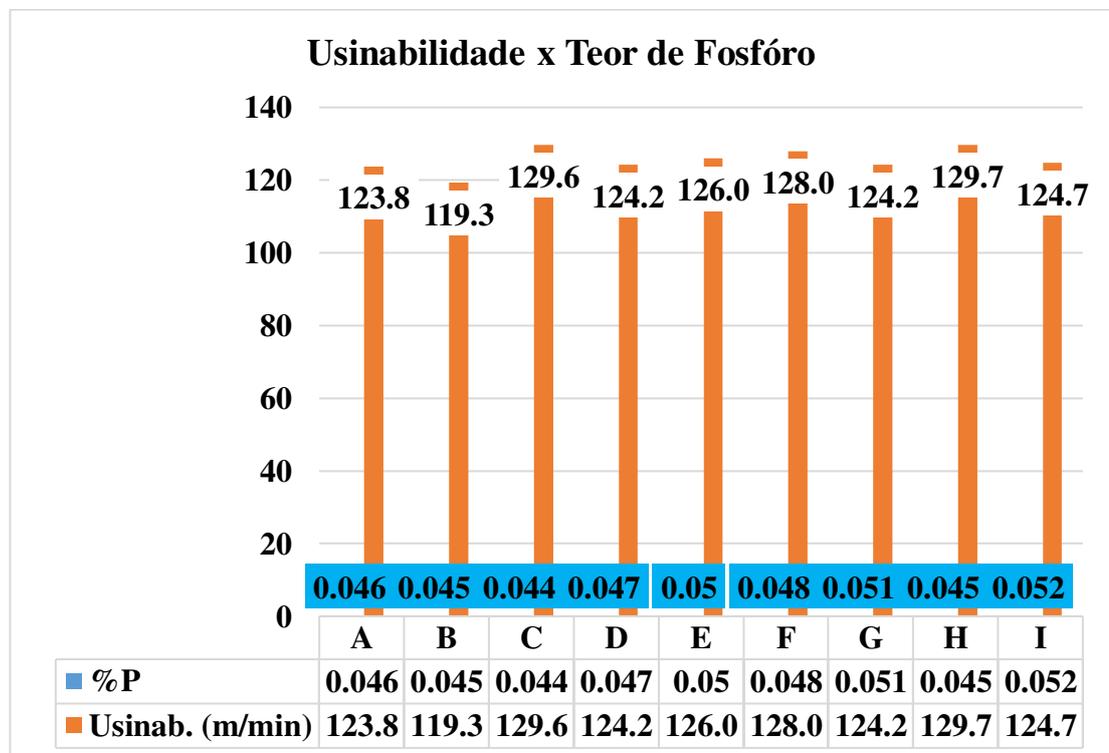
Fonte: Do Autor.

A seguir, tem-se o gráfico da figura 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 fosforo presente para determinação do índice de usinabilidade.

O fósforo é considerado um elemento prejudicial, resultante do processo de produção. Pois torna o aço frágil, efeito que se acentua com o aumento do teor de carbono. Assim, os teores máximos permitidos devem ser controlados com rigor em aços para aplicações estruturais ou críticas.

Não gráfico da figura 5.6 a adição de fósforo em aços de livre corte tona-se boa desde que seus valores se situem próximos a 0,044% porque nota-se uma melhoria no acabamento superficial de pecas usinadas e contribui ainda para a formação de cavacos frágeis, por isso neste gráfico nota-se que à medida que os teores de fosforo vão além de 0,045% as melhorias causadas por ele já não se apresentam tão boas e chegam até ser prejudiciais.

Figura 5.6 - Relação entre Índice de Usinabilidade x Teor de Fósforo.



Fonte: Do Autor.

6 CONCLUSÃO

O trabalho proposto realizou os testes com base na equação proposta por CZAPLICKI, (1962) onde verifica-se a importância dessa prática para empresas que trabalham com metalurgia e fabricação, por garantir a determinação do índice de usinabilidade de um material a partir do estudo da composição química deste e de forma prática poder mensura-lo.

O estudo alcançou resultados satisfatórios dos índices de usinabilidade dos materiais ensaiados quanto ao estudo dos elementos de liga e pode demonstrar que os mesmos possuem efeitos positivos na usinabilidade em se tratando do enxofre que favorece a usinabilidade do aço por proporcionar uma redução de atrito entre a ferramenta e o metal usinado.

O fósforo apresentou uma boa usinagem desde que seus valores se situem próximos a 0,04% (MACHADO, Á. R.; Da SILVA, 2004); um outro elemento químico que apresentou um efeito positivo para a usinabilidade é o manganês, tão somente quando está em combinação com o enxofre, resulta na formação de precipitados de sulfeto de manganês (MnS) que causa o aumento da usinabilidade dos materiais.

Por outro lado, quando acrescentados em teores mais elevados tornam - se prejudiciais temos Carbono e Silício elementos formadores de carbonetos que diminui o índice de usinabilidade dos aços carbono, por diminuir a vida da ferramenta de corte e aumentar a resistência do material.

A formação química do aço determina boa parte de suas características, onde os testes deverão ser realizados para definir as propriedades finais do aço e garantir o cumprimento das normas.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar a usinabilidade dos aços carbono uma análise com base no teste de propriedades físicas;
- Avaliar o efeito de teores de carbono acima de 0,08% na usinabilidade do aço SAE 12L14;
- Avaliar o custo de produção dos aços através do seu índice de usinabilidade;
- Utilizar simulação numérica para prever a usinabilidade de um aço de corte fácil.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, M. C., (2005), Study of the Effect of the Residuals Elements (Cr, Ni e Cu) on the Turning of Free-Machining Steel ABNT 12L14, 126P. msc. Dissertation in Project and Manufacture – Institute of Engineering Mechanics, Federal University of Itajubá.

Apple, C. A. The Relationship between Inclusions and the Machinability of Steel. Mechanical Working and Steel Processing Proceedings, pp 415-429, 1989.

BARRETOS, M. S. Influência das inclusões metálicas de bismuto na tenacidade e fadiga de um aço SAE 1045 com usinabilidade melhorada. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

BAS, J. A usinabilidade dos aços especiais. Relatório Interno Gerdau S. A. Charqueadas, RS 1995.

BAS, J. Aços especiais de usinabilidade melhorada. Anais do USINAGEM 2000, FEIRA E CONGRESSO, Aranda Eventos, São Paulo, 2000.

BARRETOS, M.; MACHADO, S.; EVANGELISTA, N.; BAS, J. Influência das inclusões nas propriedades dos aços de construção mecânica de usinabilidade melhorada. In: Anais do 55º CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E E MATERIAIS. [CDROM]. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2000. 2133 2143p.

BERTRAND, C., DEL SOLAR, M., (1998) Can we survive without Leaded Steels ?.pp 123-132. 4th Intenacional Conference on Behaviour of Materials in Machining: Opportunities an Propects for Improved Operations. IOM Communications Ltd. ISBN 1-86125-086-X. London.

Borchardt, I. G. & Gomes, A. F., 1979, Termometria Termoelétrica – Termopares, Ed. Sagra, Porto Alegre.

BOULGER, F. W. et al. Force relationships in the machining of low-carbon steels of different Sulphur contents. Transactions ASME, New York, v. 79, n. 1, p. 1155-1164, 1957.

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

COSTA, I. S. Usinabilidade do Aço de Corte Fácil Baixo Carbono ao Chumbo ABNT 12L14. 2014. 112f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal d Uberlândia, Uberlândia.

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.

DINIZ, A.E.; MARCONDES, F.C.; e COPPINI. N.L. Tecnologia da Usinagem dos Metais. Art. Líber Editora. 2^a Edição. São Paulo, ISBN 8587296019. 2000. 242p.

DINIZ, A.E.; MARCONDES, F.C.; e COPPINI. N.L. Tecnologia da Usinagem dos Materiais. Artliber Editora, 5^a ed. São Paulo, 2005. 244p.

DINIZ, A.E.; MARCONDES, F.C.; COPPINI. N.L. Tecnologia da Usinagem dos Materiais. São Paulo, Artliber Editora, 2008, 6^a edição, 262p.

DA SILVA, M. B. Lubrication in Metal Cutting Under Built-up Edge Conditions. Tese de Doutorado. University of Warwick. Warwick, Inglaterra, 1998.

DA SILVA, A. M. Estudo da Influência da Adição de Nitreto de boro hexagonal na Usinabilidade de Liga de Aço Rápido Sinterizado. Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS, São Leopoldo, 2011.

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

ECHEVARRÍA, E.; CORCUERA, P. M. Influencia de la Composición Química en la Maquinabilidad. Acenor Aceros Especiales, 1987.

ECHEVARRÍA, E.; CORCUERA, P. M. PR-2/1 - Influencia de los elementos residuales en la maquinabilidad y el coste de los aceros de fácil maquinabilidad. Acenor Aceros Especiales, 1987b.

EVANGELISTA LUIS, N.; MACHADO, A.R., Investigaçãõ com vistas ao desenvolvimento de açõs de corte livre alternativos sem adiçãõ de chumbo. Rede de Pesquisa de Materiais Avançados de Usinabilidade Melhorada – Sub-Projeto Tema 1, Campinas, 2004.

EVANGELISTA LUIZ, N. Usinabilidade do Aço de Corte Fácil Baixo Carbono ao Chumbo ABNT 12L14 com Diferentes Níveis de Elementos Químicos Residuais (Cromo, Níquel e Cobre). 2007. 191f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

FERRARESI, D. Fundamentos da Usinagem dos Metais, Editora Edgard Blucher Ltda, São Paulo, 1977, 751 p.

FERRARI, A. V. F. A evolução dos tornos automáticos: do came ao CNC. Material didático

produzido sob o patrocínio da Ergomat Ind. e Com. Ltda. 2003. 24p. Disponível em: <http://www.ergomat.com.br/maquina_frameset.htm> Acesso em: 28 set. 2005.

GARVEY, T. M.; TATA, H. J. Factors affecting the machinability of low-carbon free-machining steels. Mechanical Working of Steel, New York, v. 2, n. 26, p. 99-132, 1965.

GRANDO, G. C. S. Estudo da Influência do Bismuto Sobre a usinabilidade de Aços DIN-20MnCr5. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre-RS, 2012.

HOYLE, G., (1988). High speed steels. London: Butterworth & Co. ISO (International Standard Organization). Geometrical product specification (GPS). Surface texture. Profile method. Terms, definitions and surface texture parameters, ISO 4287. 2000.

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.

ISO (International Standard Organization). Tool Life Testing with Single-Point Turning Tools.

ISO 3685, 1993.

ISO (International Standard Organization) "Tool Life Testing with Single-Point Turning Tools",

ISO 3685, 1977.

KAMINISI, A. K. Estudo da Influência do Material do Porta-Ferramenta sobre as Temperaturas de Usinagem no Torneamento. 2012, 105 f., Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

KLUJSZO, L. A. C. et. al. Novos desenvolvimentos de aços de usinabilidade melhorada. Revista Máquinas e Metais, Abril. 2003.

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

Luiz, Nelis Evangelista, 1972- Usinabilidade do aço de corte-fácil baixo carbono ao chumbo ABNT 12L14 com diferentes níveis de elementos químicos residuais (cromo, níquel e cobre) / Nelis Evangelista Luiz, 2007. 190 f.: il.

MACHADO, Á. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; DA SILVA, M. B. Teoria da Usinagem dos Materiais. São Paulo: Blucher, 2011, 2º Edição, 397p.

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.

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. ° 2026-653. 1973.

NAVES, V. T. G. et al. Influência dos elementos químicos residuais (Cr, Cu e Mo) e das condições de corte nas componentes das forças de usinagem quando da usinagem de aços de livre corte ao Pb e ao Bi. V ENCONTRO INTERNO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA. IX SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA. Universidade Federal de Uberlândia. 2005.

PIMENTEL, M. F. Influência da composição química e da microestrutura na usinabilidade do aço de corte fácil com adição de chumbo (SAE 12L14), 2006. 120P. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) –Faculdade de Engenharia, *Campus* de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2006.

PIMENTEL, M. F. et.al. Usinabilidade de aços de corte fácil baixo-carbono. Revista Siderurgia Brasil, GriP Editora, Ano 5, n. 20 Set. /Out. 2004.

ROBERTS, G.A.; CARY, R. A., (1980). Tool steels. Metals Park: ASM, 4. Ed., 1980, p.627-772.

RAMANUJACHAR, K.; SUBRAMANIAN, S. V. Micromechanisms of tool wear in machining free cutting steels. Wear. n. 197, p. 45-55, 1996.

SAMPAIO, et al. Influência do teor de carbono na usinabilidade do aço de corte-fácil ABNT 12L14. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 5., 2009, Belo Horizonte/MG, 2009. Disponível em: <http://www.abcm.org.br/anais/cobef/2009/busca/artigos/011071261.pdf>. Acesso em: 13 jun. 2017.

SUBRAMANIAN, S. V.; KAY, D. A. R. Microstructural engineering for enhanced machinability. 38th MWSP conf. Proc., pp. 124-132, ISS, Vol. XXXIV, 1997.

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

TROIANI, F. Aços Ressulfurados de Corte Fácil. Revista “O mundo da Usinagem”. Publicação da Divisão Coromant da Sandvik do Brasil, ISSN 1518-6091, pp. 19-20, 2004. Disponível em: <<http://www.omundodausinagem.com.br/pdf/17.pdf>>.

WRIGHT, P.K.; HORNE, J.G.; TABOR, D. Boundary conditions at the tool–chip interface in machining: comparison between seizure and sliding friction, Wear 54 (1979) 371–390.