



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**ESTUDO DA USINABILIDADE DOS AÇOS COMUM AO CARBONO E DOS AÇOS
LIGA**

RAPHAEL CANTANHEDE E CANTANHEDE

São Luís
2015

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**ESTUDO DA USINABILIDADE DOS AÇOS COMUM AO CARBONO E DOS AÇOS
LIGA**

Raphael Cantanhede e Cantanhede

Orientador: Prof. Dr. Jean Robert P. Rodrigues

Co-orientador: Esp. Eng. Mec. Hércules Araújo Oliveira

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

São Luís

2015

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA DA UNIVERSIDADE
ESTADUAL DO MARANHÃO - UEMA

Cantanhede, Raphael Cantanhede.

Estudo na usinabilidade do aço comum ao carbono e aços liga / Raphael Cantanhede e Cantanhede – São Luís, 2015.

99 f

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

Orientador: Prof. Dr. Jean Robert Rodrigues

Co-orientador: Esp. Eng. Mec. Hércules Araújo Oliveira

1. Usinabilidade. 2. Parâmetros do processo. 3. Aço. 4. Elementos de liga
I. Título

CDU:624.014.2.078.4

RAPHAEL CANTANHEDE E CANTANHEDE

**ESTUDO DA USINABILIDADE DOS AÇOS COMUM AO CARBONO E DOS AÇOS
LIGA**

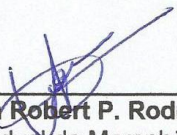
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica e Produção, do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade Estadual do Maranhão – UEMA, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Jean Robert P. Rodrigues

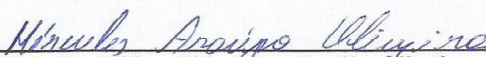
Co-orientador: Esp. Eng. Mec. Hércules Araújo Oliveira

Qualificação aprovada em, 22 de julho de 2015.

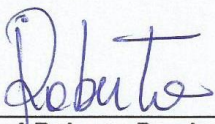
BANCA EXAMINADORA



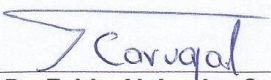
Prof. Dr. Jean Robert P. Rodrigues
Universidade Estadual do Maranhão - UEMA



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



Prof. Dr. José Roberto Pereira Rodrigues
Universidade Federal do Maranhão - UFMA



Prof. Dr. Fabio Alejandro Carvajal Flórez
Universidade Federal do Maranhão - UFMA

AGRADECIMENTOS

Agradeço acima de tudo a Deus, meu refúgio e fortaleza, pelo seu infinito amor e misericórdia. Pois como Ele mesmo disse: “...*eu estou com vocês todos os dias, até o fim dos tempos*”, e é por meio da fé nessa promessa e desfrutando dessa companhia diária que obtive força e capacidade para chegar até aqui, e creio que ainda não é o fim, pois mesmo não sendo merecedor, Ele se mantém fiel. Sou grato por tudo que Tem feito e ainda vai fazer em minha vida, pois está escrito: “*o que ninguém nunca viu nem ouviu, e o que jamais alguém pensou que poderia acontecer, foi o que Deus preparou para aqueles que o amam*”. E a Ele toda HONRA, GLÓRIA, LOUVOR e todo o meu amor.

Ao meu professor Dr. Jean Robert P. Rodrigues, por ter contribuído para minha formação. Por sua paciente e atenção, sempre se mostrando disposto a me orientar, esclarecendo minhas dúvidas e mostrando meios para enriquecer meu trabalho. Pelo seu comprometimento e profissionalismo junto a Universidade Estadual do Maranhão e seus alunos, para que os mesmos se destaquem e alcancem patamares maiores.

Ao meu amigo e co-orientador Eng. Mecânico Hércules Araújo Oliveira por me ajudar nessa caminhada e por sempre está pronto a me ajudar na elaboração desse trabalho, dando apoio, ajudando a esclarecer dúvidas e corrigindo meus erros.

Aos meus pais José Raimundo G. Cantanhede e a minha mãe Maria Lucia C. e Cantanhede por terem me ensinado a andar pelo caminho correto, que me levará a vida. Obrigado pelo incentivo e orientação, pelas orações em meu favor, por sempre me ajudarem em meio as dificuldades e por serem uns pais presentes em minha vida que sempre me criaram em meio ao amor.

E citando uma frase que diz assim: “*quem não nasce para servir, não serve para viver*”, que por muitas vezes ouvir da minha “tia-mãe” Ruth Cantanhede Almeida que demonstro os meus sinceros agradecimentos a você e minha tia Inez Cantanhede Almeida Filha, por terem me acolhido e por me darem suporte e acrescentarem bons valores ao logo da minha formação. Por acreditarem em mim e não terem medido esforços para me educar e me ajudar no que fosse preciso. Meu muito obrigado por contribuírem para que possa ter um futuro promissor. Além disso,

sou grato a vocês por darem total apoio a meus pais e irmãos. E uma coisa é certa enquanto me preservar em vida estarei disposto a servi-lás.

Aos meus irmãos Gabriel e Dhaniel pelo apoio e incentivo. Resumo meus agradecimentos a minha família, dizendo que vocês são presentes de Deus e são essenciais para minha vida!

A todos meus amigos pelo apoio, incentivo e companheirismo.

A Universidade Estadual do Maranhão e ao seu corpo docente, pois através dos mesmos recebi conhecimento necessário ao longo dessa caminhada acadêmica.

Obrigado a todos que mesmo não mencionados aqui, contribuíram para minha formação e realização desse trabalho.

“Tudo que você tiver de fazer faça o melhor que puder, pois no mundo dos mortos não se faz nada, e ali não existe pensamento, nem conhecimento, nem sabedoria. E é para lá que você vai”.

Eclesiastes 9:10

RESUMO

A usinabilidade se relaciona com a facilidade ou a dificuldade em se usinar um material, no entanto o termo usinabilidade vai além desse conceito, pois a mesma é um fator que avalia o desempenho de fatores relacionado a usinagem, como vida da ferramenta, suas geometrias, fluido de corte empregado, entre outras. No setor de usinagem, o aço detém 50% dos custos de produção na fabricação de componentes mecânicos, por isso surge a necessidade de estudo que tornem a usinagem desse material mais fácil e que reduzam os custos associados à sua manufatura. O objetivo desse trabalho é estudar a usinabilidade dos aços carbono e aços liga tendo como base os parâmetros dos processos de usinagem, tais, como: força de corte, temperatura de corte, desgastes das ferramentas de corte, fluidos de corte empregados e acabamento superficial da peça e formação de cavaco. Além disso, será analisado os fatores metalúrgicos (composição química, microestrutura, tratamentos térmicos, entre outros) que causam efeito na usinabilidade dos aços. Os elementos químicos que compõem os aços, assim como os métodos e técnicas que tornam esse material mais fácil de ser usinado, são outros aspectos que serão estudados e como isso pode contribuir para o alcance de melhorias na usinabilidade.

Palavras - chave: Usinabilidade, Aços, Parâmetros do Processo, Elemento de liga.

ABSTRACT

The machinability is related to the ease or difficulty in machining a material, however the term machinability goes beyond this concept, because it is a factor that measures the performance of related factors machining, as a tool of life, their geometries, cutting fluids employed, among others. In the machining industry, steel holds 50% of production costs in the manufacturing of mechanical components, so the need arises to study make the machining of this material easier and to reduce the costs associated with its manufacture. The objective of this work is to study the machinability of carbon steels and alloy steels based on the parameters of machining processes such as: cutting force, cutting temperature, wear of cutting tools, cutting fluids used and surface finish piece and chip formation. Moreover, metallurgical factors will be examined (chemical composition, microstructure, heat treatment, etc.) which cause effects on machinability of steels. The chemical elements that make up the steel, as well as the methods and techniques that make this material easier to be machined, are other aspects to be studied and how it can contribute to achieving improvements in machinability.

Key - words: Machinability, Steels, Process parameters, Alloying element.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Produção mundial do aço bruto em milhões de toneladas.....	24
Figura 3.2 - Parque produtor de aço no Brasil.....	25
Figura 3.3 - Processo de produção do aço.....	28
Figura 3.4 - Consumo per capita do aço em 2013	30
Figura 3.5 - Distribuição Setorial do Consumo do aço	31
Figura 3.6 - Diagrama de fases do sistema Fe-C.....	40
Figura 3.7 - Influência do teor de carbono e da microestrutura na usinabilidade	43
Figura 3.8 - Influência da forma dos sulfetos sobre o índice de usinabilidade	44
Figura 3.9 - Índice de usinabilidade em função do: a) função do teor de cobre e b) teor de cobre e cromo em um aço de corte fácil ($n = n^{\circ}$ de ensaios; $r =$ coeficiente de regressão)	47
Figura 3.10 - Componentes da Força de Usinagem. a) no torneamento; b) no fresamento	54
Figura 3.11 - Forças de corte em função da velocidade de corte na usinagem de ferro puro, aço, cobre e latão	56
Figura 3.12 - Montagem do sistema de medição de forças, ao lado do torno	57
Figura 3.13 - Variação das forças de corte com o avanço para os diversos materiais testados: a) Aço 1020, b) Aço 1045	58
Figura 3.14 - Efeito do uso de fluido de corte sobre a força de corte para: a) Aço 1020, b) Aço 1045.....	58
Figura 3.15 - Resultados obtidos com ferramentas com e sem revestimentos sobre a força de usinagem para as amostras: a) Aço 1020, b) Aço 1045.....	58
Figura 3.16 - Comportamento do material da peça observados para: a) força de corte, b) força de avanço e c) força passiva.....	59
Figura 3.17 - Temperaturas máximas registradas na superfície de saída de diversas ferramentas de aço rápido (HSS) utilizadas na usinagem de várias ligas em função da velocidade de corte	61
Figura 3.18 - Temperatura de usinagem em função de v_c para avanço: a) de 0,138 mm/rot e b) de 0,176 com ferramenta K10.....	62
Figura 3.19 - Temperatura de usinagem em função de v_c para avanço: a) de 0,138 mm/rot e b) de 0,176 mm/rot com ferramenta P30.....	63

Figura 3.20 - Temperatura de usinagem em função V_c e f para as ferramentas K10 e P30 com fluido emulsionável 5% ($a_p = 1$ mm)	64
Figura 3.21 - Tipos de desgaste das ferramentas de corte: a) Desgaste de cratera, b) Desgaste de flanco e c) Desgaste de entalhe	65
Figura 3.22 - Parâmetros utilizados para medir os desgastes das ferramentas de corte	66
Figura 3.23 - Curvas de desgaste para $v_c=180$ m/min, $f=0,08$ mm/rot e $a_p=0,15$ mm.	68
Figura 3.24 - Curvas de vida para as ferramentas A65 e A66N	68
Figura 3.25 - Curvas de desgaste para $v_c=180$ e 250 m/min, $f=0,08$ mm/rot e $a_p=0,15$ mm para a ferramenta BNX20.....	69
Figura 3.26 - Rugosidade da superfície vs. avanço com $v_c = 125$ m/min; $a_p = 0,15$ mm	73
Figura 3.27 - Rugosidade da superfície vs. velocidade de corte em $f = 0,08$ mm/rev; $a_p = 0,15$ mm	74
Figura 3.28 - Rugosidade da superfície vs. profundidade do corte com $v_c=125$ m/min; $f = 0,08$ mm/rev.....	75
Figura 3.29 - Rugosidade da superfície vs. desgaste de flanco com $v_c = 125$ m/min; $f = 0,08$ mm/ ev ; $a_p = 0,15$ mm.....	75
Figura 3.30a: Efeitos da velocidade de corte no campo de controle de cavacos.....	76
Figura 3.31b - Efeitos do fluido refrigerante no campo de controle de cavacos.....	76
Figura 3.32 – Ferramentas de metal duro (Classe P) recomendadas para o torneamento do aço.....	96
Figura 3.33 - Ferramentas de metal duro (Classe P) recomendadas para o fresamento do aço.....	98
Figura 3.34 - Ferramentas de metal duro (Classe P) recomendadas para a furação do aço.....	99

LISTA DE TABELA

Tabela 3.1 - Consumo das principais matérias-primas e insumos utilizados na produção do aço.....	26
Tabela 3.2 - Sistema SAE e AISI de classificação dos aços.....	33
Tabela 3.3 - Efeito das inclusões na usinabilidade.....	48
Tabela 3.4 - Tecnologias aplicadas para melhoria da usinabilidade dos aços-de-corte-fácil.....	50
Tabela 3.5 - Velocidades de corte recomendadas para o torneamento de aços de diferentes durezas.....	51
Tabela 3.6 - Materiais da peça, fluido de corte e ferramentas empregados nos experimentos.....	57
Tabela 3.8 - Fluidos de corte recomendados para algumas operações de usinagem	70
Tabela 3.7 - Tipos, composição e propriedades dos fluidos de corte.....	70
Tabela 3.9 - Composição química do aço X38CrMoV5-1.....	73
Tabela 3.10 - Condições de controle de cavacos no torneamento de aço.....	76
Tabela 3.11: Parâmetros e variações utilizados nos testes.....	78
Tabela 3.12 - Formas dos cavacos e condições de corte do aço ABNT 1045 para ferramentas sem revestimento	79
Tabela 3.13 - Formas dos cavacos e condições de corte do aço ABNT 1045 para ferramentas revestidas.....	80

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

IABR - Instituto Aço Brasil

L.D. - Linz e Donavwitz

BOF – Basic Oxigen Furnance

CIMM - Centro de Informação Metal Mecânica

WSA - World Steel Association

SICETEL - Sindicato Nacional das Indústrias de Trefilação e Laminação de Metais Ferrosos

PWC – PricewaterhouseCoopers

CSN - Companhia Siderúrgica Nacional

EAF - Forno Elétrico a Arco

ABM - Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração

AISI - American Iron and Steel Institute (Instituto Americano do Ferro e Aço)

SAE - Society of Automotive Engineers

ASTM - American Society of Testing and Materials (Sociedade Americana de Testes e Materiais)

ISO - International Organization for Standardization

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

HRC - Ensaio de dureza Rockwell

TECEM - TECNOLOGIA EMPRESARIAL LTDA

HSS - High Speed Steel – Aço rápido

HSM - High Speed Machining

C – Carbono

Si – Silício

Mn – Manganês

Ni – Níquel

Mo – Molibdênio

Cr – Cromo

P – Fosforo

S – Enxofre

Pb – Chumbo

Bi – Bismuto

Fe – Ferro

Ca – Cálcio
Al - Alumínio
APC – Aresta Postiça de Corte
HB - Dureza Brinell
HV – Dureza Vickers
mm – milímetros
HRC – Dureza Rockwell
mm/rev – milímetros por revolução
m/min – metros por minuto
CV – Cavalo-vapor
t – toneladas
 μm – Micrómetro
mm/rot – milímetros por rotações
 $^{\circ}\text{C}$ - Grau Celsius
MnS - Sulfetos de Manganês
 Al_2O_3 - Óxido de alumínio
TiN - Nitreto de titânio
TiAlN - Nitreto de titânio-alumínio
TiC – Carbonetos de titânio
AlTiN - nitreto de alumínio-titânio
MD – Metal Duro
WO - Carboneto de tungstênio
TaC - Carboneto de Tântalo
NbC - carbeto de nióbio
SiC - carboneto de silício
Fu – Força de usinagem
Fc – Força de corte
Ff – Força de avanço
Fp – Força passiva
vc – Velocidade de corte
 $F_f(x)$ – Componente vetorial de Ff no eixo x
 $F_p(y)$ - Componente vetorial de Fp no eixo y
 $F_c(z)$ – Componente vetorial de Fc no eixo z
rn - Raio de ponta da ferramenta

a_p - profundidade de corte

f - avanço

β - ângulo de cunha da ferramenta

α_o - ângulo de folga da ferramenta

χ_r - ângulo de posição da ferramenta

ϵ_r - ângulo de ponta da ferramenta

t - tempo

γ_o - ângulo de saída negativo

λ_s - ângulo de inclinação negativo

R_a - Rugosidade média aritmética

R_z - profundidade de rugosidade média

R_t - rugosidade total

K_T - Profundidade de cratera

VB_B - Desgaste de flanco médio

$VB_{m\acute{a}x}$ - Desgaste de flanco máximo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	OBJETIVOS	20
2.1	OBJETIVOS GERAIS	20
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1	GENERALIDADES	21
3.2	HISTÓRIA DOS AÇOS COMUM AO CARBONO E DOS AÇOS LIGA	22
3.3	ABUNDÂNCIA E OBTENÇÃO.....	24
3.3.1	Produção e Reserva	24
3.3.2	Fabricação do Aço.....	26
3.4	IMPORTÂNCIA E APLICAÇÕES.....	29
3.5	CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS COMUM AO CARBONO E DOS AÇOS LIGA.....	32
3.5.1	Aços Carbono	33
3.5.2	Aços Liga.....	35
3.6	FATORES INFLUENTES NA USINABILIDADE DO AÇO	36
3.6.1	Propriedades do material.....	36
3.6.2	Influência de alguns elementos da composição química na usinabilidade dos aços	42
3.6.3	Inclusões.....	47
3.7	AÇO DE USINABILIDADE MELHORADA: AÇOS DE CORTE FÁCIL	48
3.8	FERRAMENTAS DE CORTE EMPREGADAS NA USINAGEM DOS AÇOS COMUM AO CARBONO E DOS AÇOS LIGA	50
3.8.1	Metal Duro	50
3.8.2	Cerâmicas.....	52
3.8.3	Nitreto cúbico de boro sintético monocristalino (CBN) e Nitreto cúbico de boro sintético policristalino (PCBN)	53
3.9	EFEITOS DA USINAGEM DOS AÇOS COMUM AO CARBONO E DOS AÇOS LIGA NOS PARÂMETROS DO PROCESSO	54
3.9.1	Força de corte.....	54
3.9.2	Temperatura de corte	60
3.9.3	Desgaste da ferramenta de corte	65

3.9.4	Fluidos de Corte	69
3.9.5	Acabamento Superficial da Peça	72
3.9.6	Formação de Cavaco	75
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	81
5	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	82
	REFERENCIAS	83
	ANEXOS.....	95

1 INTRODUÇÃO

De modo geral, o aço detém vários campos de aplicação, tornando-se a liga metálica mais importante na indústria mecânica, devido suas boas propriedades mecânica, a abundância de matéria prima necessária à sua produção e por apresentar preços competitivos em relação a outras ligas metálicas (PANNONI, 2009). Encontra-se no mercado atual, desde aços de livre-corte, de boa usinabilidade, até aços-ferramentas de difícil usinagem. Dentre os principais problemas envolvidos na usinagem dos aços, podemos citar a produção de cavacos longos e contínuos, fator que dificulta a usinagem desse material (MACHADO et al., 2004; TRENT, 2000).

De acordo com (YANARDAG, 2004) a grande exigência por parte das indústrias em busca de aços a serem usinados em forma, dimensão e qualidade superficial desejada, motivou o desenvolvimento de vários tipos de aço, que através da adição de elementos químicos a sua composição resultou em melhores propriedades buscando atender certo uso específico. Por conta disso, investimentos em pesquisa no setor de usinagem do aço, são cada vez maiores, tanto pelo grande uso do processo na manufatura desse material, quanto pela busca de novas técnicas que visem obtenção de melhores resultados de usinabilidade, que consequentemente influenciaria na redução dos custos de produção dos produtos que usam o aço como matéria-prima.

Segundo (PIMENTEL et al., 2004), a usinagem do aço, na produção de componentes mecânicos representa 50% dos custos de produção. A usinabilidade de um material sofre influência de parâmetros do processo (velocidade de corte, avanço, ferramenta de corte, lubrificação, entre outros), no entanto, os vários tipos de aço, apresentam resultados diferentes em relação ao tipo de usinagem empregado no processo. Logo, a busca por melhores resultados de usinabilidade e redução de custos acarreta na produção de aços diferenciados que são usados para melhores índices de produtividade na fabricação de produtos através do processo de usinagem.

O trabalho seguirá a metodologia teórica, vivenciados pela comunidade científica e acadêmica, em busca de técnicas inovadoras e desenvolvimento de práticas atuais, no âmbito de melhorias na usinabilidade dos aços carbonos e dos aços-ligas. Para isso será feito um estudo e coleta de dados como suporte a

avaliação dos parâmetros do processo (força de corte, temperatura de corte, acabamento superficial, entre outros), como também uma abordagem sobre a influência dos elementos de liga na composição dos aços, assim como seus efeitos para obtenção de resultados positivos de usabilidade.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS GERAIS

Estudar e avaliar os efeitos da usinagem referente a utilização do aço comum ao carbono e aços ligas, nos parâmetros dos processos. Tendo como base de estudo os principais processos de usinagem convencionais.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar os efeitos dos parâmetros do processo (Força de Corte; Temperatura de Corte; Desgastes das Ferramentas de Corte; Fluidos de corte empregados; e Acabamento superficial das peças) na usinagem;
- Buscar técnicas que tornam a usinagem do aço mais simples e econômica;
- Discutir sobre os processos de usinagem que facilitam a usinagem dos aços, como também apresentar as ferramentas de corte empregada na usinabilidade desse material;
- Discutir sobre os fatores influentes na usabilidade dos aços, como também estudar os efeitos dos elementos químicos presentes nesse material e suas influencias para melhoria da usinabilidade.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 GENERALIDADES

O ciclo da usinagem é definido por (FERRARESI, 1977; KÖENIG, 1981) como um processo de fabricação que tem por objetivo conferir forma, dimensões e acabamento em um material bruto por meio da ação de uma ferramenta pela remoção controlada.

(BAPTISTA, 2002), descreve processo de usinagem de um metal, da seguinte forma: no início do corte, a ferramenta penetra no material da peça, e este se deforma elástica e plasticamente. Após ultrapassar a tensão máxima de cisalhamento do material, este começa a escoar. Em dependência da geometria da cunha de corte, o material deformado passa a formar um cavaco que desliza sobre a face da cunha de corte. O desempenho do material frente a este trabalho de usinagem, vai caracterizar a usinabilidade do mesmo.

De acordo com (MATSUMOTO et al., 2005) a usinabilidade está relacionada ao grau de dificuldade em se usinar um material. Como inúmeros fatores são envolvidos ao se aferir o índice de usinabilidade, a avaliação quantitativa desses resultados é um problema a ser considerado (RODRIGUES et al., 2007).

(FERRARESI et al., 1977), comenta sobre alguns fatores que influenciam na usinabilidade dos materiais, são eles:

- I. Em relação ao material da peça:
 - ✓ Composição química;
 - ✓ Microestrutura;
 - ✓ Dureza;
 - ✓ Propriedades das tensões e deformações;
 - ✓ Resistência mecânica e ductilidade.

- II. Em relação aos processos mecânicos e condições de usinagem os fatores que mais influem, são:
 - ✓ Material e geometria da ferramenta;
 - ✓ Condições de usinagem (velocidade de corte, avanço, profundidade de corte);

- ✓ Rigidez do sistema máquina-ferramenta e dispositivo de fixação-peça;
- ✓ Tipos de trabalhos executados pela ferramenta (operação empregada, tipo de corte).
- ✓ Fluidos de corte.

A usinabilidade de um material pode ser entendida como uma resposta do sistema de usinagem. Considerando que os mais variados tipos de aços apresentam respostas distintas para determinado sistema de usinagem torna-se difícil o estudo da usinabilidade dessa classe de material. No entanto, diversas técnicas têm sido desenvolvidas em busca de facilitar a usinagem do aço e consequentemente reduzir os custos envolvidos nesse processo (PIMENTEL et al., 2004). Essas técnicas variam desde um controle apurado do processo de fabricação/transformação, passando pela adição de elementos químicos que promovam a fragilização do cavaco e/ou lubrificação da ferramenta de corte até mesmo a engenharia ou modificação das inclusões de óxidos resultantes do processo de desoxidação (KLUJSZO, 2004).

3.2 HISTÓRIA DOS AÇOS COMUM AO CARBONO E DOS AÇOS LIGA

A origem do aço se deu em função da evolução do ferro, material predominante na composição dessa liga metálica. No entanto, a fronteira entre o ferro e o aço iniciou-se por volta da Revolução Industrial com a invenção de fornos que permitiam não só corrigir as impurezas do ferro, como adicionar propriedades para resistência ao desgaste, ao impacto, à corrosão, etc. (IABR, 2014).

De acordo com (MALYNOWSKYJ et al., 2000) no período da revolução Industrial, iniciada na Inglaterra no início do século XIX o ferro passou a ser ainda mais importante para a humanidade. No entanto, a grande mudança ocorreu com a descoberta do aço em 1856, através do processo criado por Henry Bessemer, que permitiu a conversão do ferro-gusa em aço através do sopro de oxigênio, que provocou uma grande melhora na qualidade do produto, pois diminuiu o excesso de carbono (C), silício (Si) e manganês (Mn) do gusa líquido. Mais tarde, essa técnica foi associada ao processo Thomas, criado por Sydney Gilchrist Thomas que elimina o excesso de fósforo, promovendo melhoras na qualidade dos aços e viabilizou sua

ampliação no processo industrial, através da fabricação de máquinas de vapor e uso no transporte ferroviário.

Anos depois, a invenção do processo Siemen-Martin, em 1868, foi outro momento importante na siderurgia do aço, pois permitiu sua fabricação a partir de sucata, viabilizando outra fonte de matéria-prima influenciando no preço do custo de produção. Em 1952, o aço passou a ser fabricado com custo reduzido e com maior produtividade se comparados com o processo Siemen-Martin, tudo isso foi possível pela criação do processo conversor a oxigênio ou processo Linz e Donawitz (L.D.), na Áustria (ALVES, 2006).

Segundo (BRAGA, 1980), a história do aço está atrelada a evolução dos processos presentes na siderurgia a partir do século XIX e pode ser resumida da seguinte forma:

- I. *“Século XIX – Em 1828, o pré-aquecimento do ar injetado nos altos-fornos é aplicado com sucesso na Escócia, permitindo sensível economia de combustível. Na França e Inglaterra ocorrem as primeiras experiências de injeção de combustíveis auxiliares (carvão e alcatrão). Em 1856 foi inventado o processo Bessemer, na Inglaterra, que passou a ser usado em escala industrial por volta de 1858, permitindo que a produção mundial de aço tivesse grande crescimento a nível mundial. Em 1879 as pesquisas destinadas a melhorias de processo deram origem ao processo Thomas, que permitiu a melhoria na composição química da carga metálica, e em 1864 foi criado o processo Siemens Martin. O forno elétrico, desenvolvido por Heurtot em 1900, completa as inovações do século XIX.*
- II. *Século XX – O processo Bessemer vai pouco a pouco sendo substituído pelos processos Thomas e, sobretudo, Siemens-Martin. No final da década de 30, mais de 75% do aço mundial era produzido em aciarias Siemens-Martin. Após a II Guerra Mundial a utilização do oxigênio puro como elemento de fusão e refino veio a revolucionar a siderurgia. Próximo de 1952 as pesquisas em torno da utilização de oxigênio permitiram a criação das primeiras aciarias a oxigênio (BOF – basic oxygen furnace) nas siderúrgicas austríacas de Linz e Donawitz (Processo LD) ”.*

Atualmente a evolução de novas técnicas e a incorporação de novos mecanismos associadas a adição de elemento de liga, permitem a fabricação do aço em diferentes composições químicas, microestruturas e com propriedades químicas e mecânicas que adequem as mais complexas necessidades imposta pelo mercado atual (ALVES, 2006).

3.3 ABUNDÂNCIA E OBTENÇÃO

3.3.1 Produção e Reserva

A produção mundial do aço está em constante evolução, nos últimos 5 anos esse crescimento foi de 19,8%, chegando a marca 3,1% apenas no ano de 2013 com 1606 milhões de toneladas (fig. 3.1). Existe atualmente no mundo um excedente de capacidade de produção do aço superior a 600 milhões de toneladas, e esses números deverão aumentar nos próximos dois anos (WSA, 2014).

Em 2013, a indústria brasileira do aço foi responsável por 2,1% da produção mundial, isso equivale a 34 milhões de toneladas, tornando o Brasil o nono maior produtor de aço do mundo. A China se encontra no topo do ranking como o maior produtor mundial de aço, com 779 milhões de toneladas produzidas no ano de 2013, a produção chinesa equivale a 48, 5% da produção mundial (SICETEL, 2014).

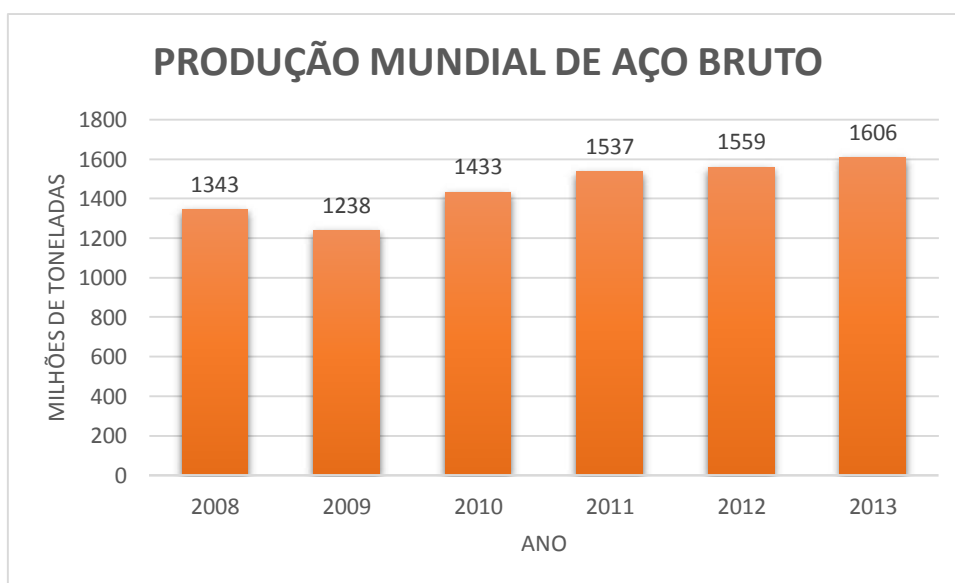


Figura 3.1 - Produção mundial do aço bruto em milhões de toneladas (Adaptado WSA, 2014).

O Instituto Aço Brasil, possui 11 grupos empresariais associados e, operavam em 29 usinas com sua maioria na região sudeste (fig. 3.2), responsável por 93,1% da produção nacional em 2013 (IABR, 2012). Onde o maior estado produtor de aço é Minas Gerais com 34% de participação, seguido pelo Rio de Janeiro com 30% (SICETEL, 2014).

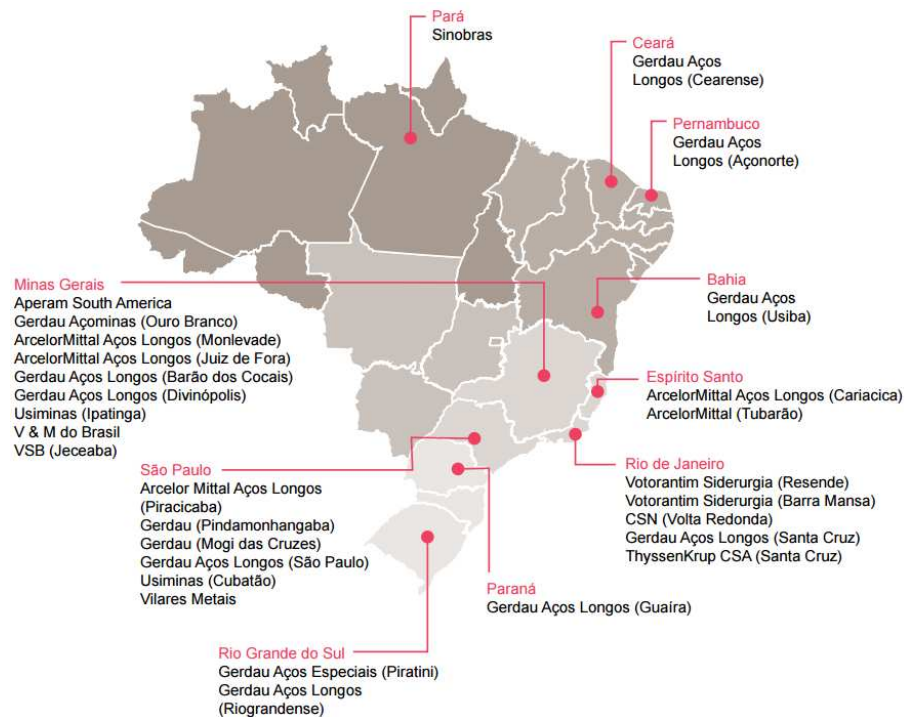


Figura 3.2 - Parque produtor de aço no Brasil (PWC, 2013).

Os três maiores produtores de aço no Brasil no ano de 2013, são (SICETEL, 2014):

- ✓ Grupo Gerdal – 8,6 milhões de toneladas, no entanto sua produção mundial chega a 19 milhões, fazendo da mesma a 16ª produtora mundial de aço (WSA, 2014);
- ✓ Usiminas – 6,859 milhões de toneladas;
- ✓ CSN (Companhia Siderúrgica Nacional) - 4,457 milhões de toneladas.

A metalurgia do ferro que é mais conhecida por siderurgia é o processo de obtenção do aço a partir, principalmente, de minérios de ferro. Conforme (DE JESUS, 2014) as reservas conhecidas de minério de ferro no mundo totalizam 170 bilhões de toneladas, sendo que as reservas brasileiras representam 13,6% das reservas mundiais. Os principais estados brasileiros detentores de reserva de mineiro de ferro são: Minas Gerais (72,5% das reservas e teor médio de 46,3% de Fe), Mato Grosso do Sul (13,1% e teor médio de 55,3%) e Pará (10,7% e teor médio de 64,8%). No entanto, por conta da grande quantidade de sucata proveniente dos resíduos de fabricação industrial, a mesma tem sido a maior matéria-prima para produção do aço (GUIMARÃES, 2009).

3.3.2 Fabricação do Aço

Os processos de fabricação utilizados pela indústria siderúrgica são intensivos levando em consideração o consumo de matérias primas e insumos, no entanto, por volta da metade do século XX, os constantes avanços tecnológicos proporcionaram grandes melhorias no setor, como: o aumento da eficiência energética, a redução do consumo de matéria prima, o reaproveitamento dos gases e resíduos do processo e a maximização da recirculação da água (IABR, 2012). O consumo das principais matérias-primas e insumos utilizados na produção do aço pode ser observado na tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Consumo das principais matérias-primas e insumos utilizados na produção do aço (Adaptado IABR, 2012).

CONSUMO DE MATÉRIA PRIMA		
Consumo em milhares de t	2010	2011
Cal calcítica / dolomítica	2.091	2.307
Calcário cru	3.518	4.108
Carvão mineral / antracito	13.005	13.687
Carvão vegetal	1.380	1.342
Coque	8.110	9.362
Coque de petróleo	767	1.023
Dolomita crua	1.380	1.346
Ferro-gusa	22.236	24.669
Ferroligas	488	509
Minério de ferro*	29.856	33.589
Minério manganês	223	589
Sinter	20.716	24.337
Sucata de ferro e aço	8.458	9.117
Total	112.227	125.985

Segundo (OLIVEIRA, 2000) a produção de aço é feita por meio de dois sistemas principais: a usina integrada, que utilizam alto-fornos e aciarias LD no processo de fabricação e a usina semi-integrada ou mini-mills, que recicla o aço em fornos elétricos a arco (EAF). Mundialmente, a maior parte da produção de aço é via

rota integrada a coque, compreendendo 70% da produção mundial, sendo os outros 30% produzidos pela rota semi-integrada.

3.3.2.1 Processo de produção do aço: Rota Integrada e Semi-integrada

(ALVES, 2006) comenta que o sistema de rota integrada para a produção do aço, são as que transformam o minério de ferro em produtos acabados ou semi-acabados. Nesse tipo de rota é habitualmente utilizado coqueiras, altos-fornos, acarias e laminadores. E o processo se resume em algumas fases que são: preparação da carga, redução, refino, lingotamento e laminação. Já o processo que utiliza o sistema de rota semi-integrada é praticamente uma redução do sistema integrado, pois compreende as fases de refino e laminação. As siderúrgicas que utilizam esse processo utilizam o ferro gusa, ferro esponja ou sucata metálica para transforma-los em aços, por meio das aciarias elétricas e laminação.

A principal diferença entre os dois sistemas é a matéria prima utilizada no processo produtivo. Enquanto na rota integrada predomina o minério de ferro, com pouca quantidade de sucata, as usinas semi-integradas, usam predominantemente a sucata. No entanto, além desses processos, existem unidades produtoras, denominadas de não integradas, que utilizam apenas uma das fases do processo, o processamento (laminação ou trefilas) ou redução para fabricação do aço (IABR, 2012).

De acordo com (COSTA et al., 2007), o processo produtivo do aço é composto de cinco etapas, descritas abaixo e ilustrada na figura 3.3.

- I. **Preparação do minério e do carvão:** Essa etapa o minério de ferro em pó, é aglomerado por meio da sinterização e pelletização, transformando o minério in natura em sinter e pelotas que serão utilizadas juntos com o minério de ferro de tamanho maiores, como carga dos alto-fornos.
O carvão mineral também utilizado no processo é transformado em coque por meio de seu aquecimento em fornos (coqueiras). Esse aquecimento é necessário para retirar do carvão mineral elementos indesejáveis no processo de produção do aço.
- II. **Redução do minério de ferro:** Nessa etapa é feita a eliminação do oxigênio contido nos óxidos do minério, esse processo é feito nos altos-fornos, e o

carvão mineral ou coque faz o papel de agente redutor. O ferro gusa (liga de ferro e carbono) é o produto resultante do processo descrito anteriormente, no entanto, o mesmo ainda possui impurezas como sílica, enxofre e fósforo.

- III. **Refino:** A principal função dessa etapa é a diminuição do teor de carbono, adição de outros elementos de liga na proporção necessária para a obtenção das propriedades desejadas e a redução das impurezas contida no ferro-gusa, até atingir níveis aceitáveis. Aciarias elétricas ou LD é onde o ferro-gusa é transformado em aço.
- IV. **Lingotamento:** o aço é solidificado em forma de lingotes, por meio do vazamento em lingoteiras, ou em máquinas de lingotamento contínuo, após isso é cortado na forma de produtos semiacabados (placas, blocos ou tarugos).
- V. **Laminação:** Após o lingotamento, os produtos passam por processos de fabricação, como: laminação, forjamento, entre outros processos, onde são transformados em grande variedade de produtos acabados (barras, bobina, máquina, etc.).

PROCESSO DE PRODUÇÃO DO AÇO

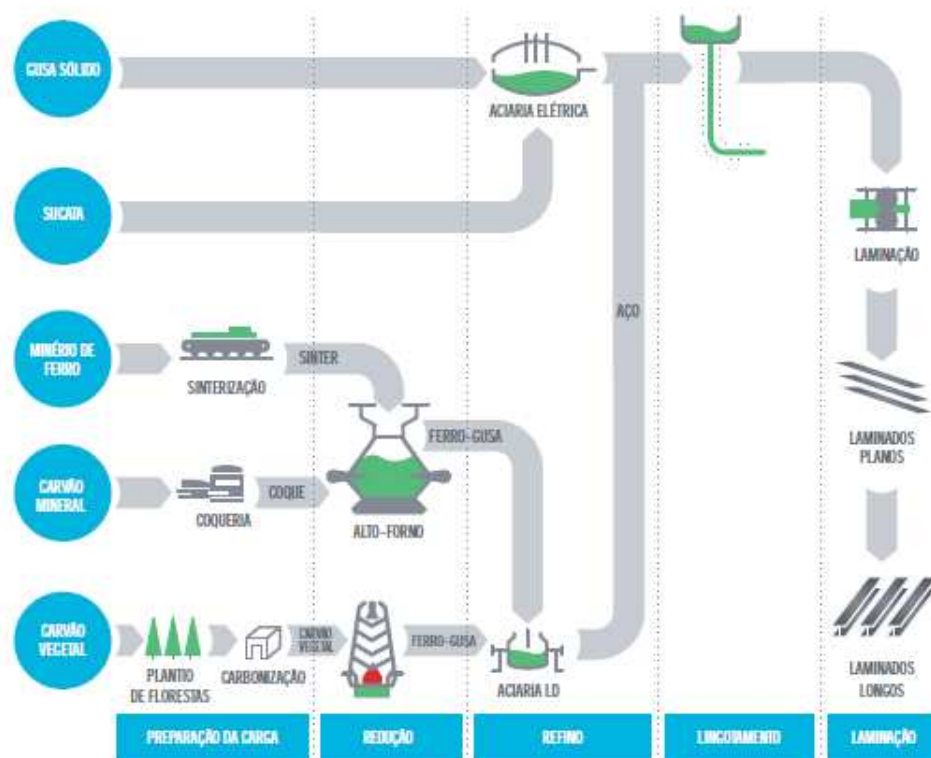


Figura 3.3 - Processo de produção do aço (IABR, 2012).

A produção do aço brasileiro é feita 77% pela rota integrada e 23% pela semi-integrada, entretanto, usa-se carvão vegetal em substituição do coque em 11% da produção do aço feita pela rota integrada (IABR, 2012). Vale lembrar que a reciclagem está entre as características mais sustentáveis do aço, pois contribui diminuindo significativamente os impactos causados pela produção desse material. Atualmente os produtos de aço tem 99% de recuperação, pois em média 11% são reutilizados na mesma função estrutural e 88% são usados na reciclagem (SIEBERS, et al., 2012).

(KIRSIS et al., 2004) comentam que o grande responsável por manter as usinas siderúrgicas competitivas, são as melhorias nas qualidades dos produtos, pois, apresentam excelentes características dimensionais, qualidade superficial, espessura, resistência e ductibilidade. Destacando a grande ascensão do aço no mercado de construtores, por apresentar variedades em seus tipos e formas, e facilidade de se adequar as necessidades impostas, o que promove o domínio do aço nas aplicações automotivas.

3.4 IMPORTÂNCIA E APLICAÇÕES

Segundo (PANNONI, 2009) o aço, representa atualmente a mais importante das ligas metálicas, pois é um material fundamental para o desenvolvimento da sociedade. E tem forte presença no cotidiano da raça humana, pois, está presente na maioria dos utensílios utilizados atualmente, como exemplo: nos veículos, ônibus, trens, nas construções civis, máquinas, e entre outros. A figura 3.4, ilustra a importância dessa liga metálica, levando em consideração o seu consumo per capita em alguns países do mundo.

Estima-se que existem mais de 3500 tipos diferentes de aço e que 75% deles foram desenvolvidos nas últimas duas décadas. Por meio desses dados pode-se observar a evolução do setor no cenário atual (ABM, 2008). E o Brasil, é o nono colocado dentre os 100 países produtores de aço no mundo, sendo parte significativa no avanço da trajetória do aço ao longo dos tempos (PANNONI, 2002).

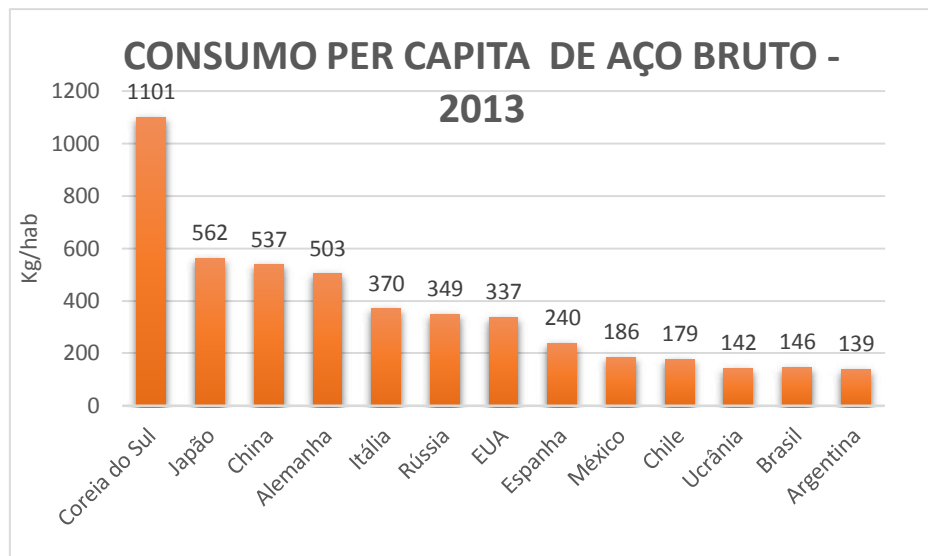


Figura 3.4 - Consumo per capita do aço em 2013 (Adaptado WSA, 2014).

Levando em consideração o uso e a importância do aço no setor de manufatura, (TRENT et. al., 2000), comenta que anualmente 10% de toda produção de aço passam pelo processo de usinagem, e em países industrializados, a transformação de material em cavaco é responsável por significativos gastos pelo setor. Como exemplo o Estados Unidos que gasta cerca de US\$ 250 bilhões com processos de usinagem.

Por apresentar boas propriedades, por ser um material que apresenta relativamente custos baixos, apresentar grande número de fontes e fornecedores mundiais e, por ter um apreciável histórico técnico-científico de projetos e utilização, o aço tem uma ampla aplicação em diversos setores industriais e comerciais. Os principais tipos de aços carbono e aços liga classificados pela sua aplicação, são expostos abaixo (CHIAVERINI, 1986):

- ✓ Aços para fundição: são utilizados para fundição de peças empregadas em máquinas operatrizes, indústria automobilística, indústria ferroviária, indústria naval, implementos agrícolas, entre outras;
- ✓ Aços estruturais: são aços empregados principalmente em construção civil e em equipamento de transporte: veículos em geral, equipamento rodoviário, ferroviário, naval etc.;
- ✓ Aços para chapas: chapa galvanizada; chapas finas laminadas a quente, barras laminadas, etc.;

- ✓ Aços para arames, fios e molas: arames, arames achatados; molas helicoidais; fabricação de pregos; cordas de piano, molas para cabo de elevador e guindastes, etc.;
- ✓ Aços de usinagem fácil: empregado na produção de peças em máquinas automáticas no processo de produção em massa;
- ✓ Aços para cementação e nitretação: pinos, pequenas engrenagens, roletes, eixos de comando; mancais;
- ✓ Aços para tubos: tubos; tubos estruturais, tubos para oleodutos;
- ✓ Aços para fins especiais: motores e transformadores; resistentes a altas temperatura; resistentes a baixas temperaturas, etc.;

Segundo (FURTADO, 2013), a construção civil (pesada e habitacional) é a maior responsável pelo consumo de aço no mundo (fig. 3.5) e estima-se que sua participação crescerá 52% na distribuição setorial no mundo em 2021. Outros setores que apresenta grande destaque é o de máquinas e equipamentos mecânicos, produtos metálicos e o automotivo. A demanda é maior por aços chamados estruturais de média e alta resistência, pois essa linha de produto se adequa as necessidades de carregamento, no qual os elementos da construção estão sujeitos. Isso é explicado devido a sua resistência, ductibilidade e outras propriedades mecânicas.

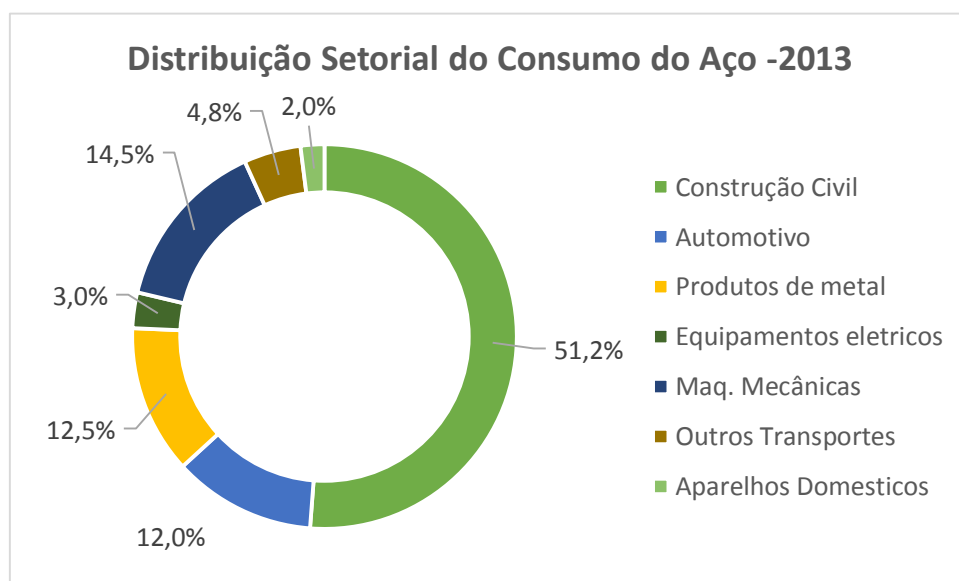


Figura 3.5 - Distribuição Setorial do Consumo do aço (Adaptado WSA, 2014).

3.5 CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS COMUM AO CARBONO E DOS AÇOS LIGA

O aço em sua essência é uma liga de ferro-carbono, com presença de alguns elementos residuais, já no caso dos aços-liga existe também a presença de elementos de liga em sua composição. (CHIAVERINI, 2008), apresenta uma definição para o aço, onde ele diz: *“Aço é a liga ferro-carbono contendo geralmente 0,008% até aproximadamente 2,11% de carbono, além de certos elementos residuais, resultantes do processo de fabricação.”*

Pela grande variedade de tipos de aço presentes no mercado, foram criados sistemas para determinar suas classificações que constantemente são submetidos a revisões. Esses materiais podem ser classificados em grupos levando em consideração, base de propriedades comuns (INFOMET, 2015):

- ✓ Composição: como aços-carbono e aços-liga;
- ✓ processo de acabamento: como aços laminados a quente ou aços laminados a frio;
- ✓ forma do produto acabado: como barras, chapas grossas, chapas finas, tiras, tubos ou perfis estruturais;
- ✓ aplicações: como aços para ferramentas, aços para construção civil, entre outros (IABR, 2014).

A classificação de maior utilização é a que leva em consideração a composição química, e por ser a utilizada como tema desse trabalho, utilizaremos a mesma para estudo. Dentre os sistemas mais conhecidos, os mais utilizados são os da AISI (*American Iron and Steel Institute*), SAE (*Society of Automotive Engineers* e *American Society of Testing and Materials* (ASTM)). Os sistemas utilizam quatro algarismos (ABXX) para identificar o tipo de aço, os dois primeiros números indicam o tipo e o teor médio de elementos de liga, e os dois últimos indicam a porcentagem de teor de carbono, como exemplo o aço SAE 1023, significa que é um aço-carbono com 0,23% de carbono (AQUINO, 2006).

No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas, (ABNT) também criou um sistema de classificação dos aços (tab. 3.2) para a construção mecânica, baseado nos sistemas americanos SAE e AISI (CHIAVERINI, 2008).

Tabela 3.2 - Sistema SAE e AISI de classificação dos aços (Adaptado TECEM, 2013).

Designação		TIPO DE AÇO
SAE	AISI	
10XX	C10XX	Aços carbono comuns
11XX	C11XX	Aços de usinagem (ou corte) fácil, com alto S
12XX	C12XX	Aços de usinagem (ou corte) fácil, com alto P e S
13XX	13XX	Aço manganês com 1,75% de Mn
23XX	23XX	Aços Níquel com 3,5% de Ni
25XX	25XX	Aços Níquel com 5,0% de Ni
31XX	31XX	Aços Níquel Cromo com 1,25% de Ni e 0,65% de Cr
33XX	E33XX	Aços Níquel Cromo com 3,5 % de Ni e 1,55 Cr
40XX	40XX	Aços Molibdênio com 0,25% de Mo
41XX	41XX	Aços Cromo Molibdênio com 0,50% ou 0,90% de Cr e 0,12% ou 0,20% de Mo
43XX	43XX	Aços Níquel cromo com molibdênio com 1,80% de Ni e 0,20% ou 0,25% de Mo
46XX	46XX	Aços Níquel Molibdênio com 1,55% ou 1,80% de Ni e 0,20% ou 0,25% de Mo
47XX	47XX	Aços Níquel Cromo Molibdênio com 1,05% de Ni, 0,45% de Cr e 0,20 de Mo
48XX	48XX	Aços Níquel Molibdênio com 3,5 % de Ni e 0,25% de Mo
50XX	50XX	Aços cromo com 0,28% ou 0,65% de Cr
50BXX	50BXX	Aços cromo boro com baixo teor de Cr e no mínimo 0,0005% de B
51XX	51XX	Aços cromo com 0,80 a 1,05% de Cr
61XX	61XX	Aço cromo vanádio com 0,8 ou 0,95% de Cr a 0,1% ou 0,15% de v
86XX	86XX	Aços níquel molibdênio com baixos teores de Ni, Cr e Mo
87XX	87XX	Idem
92XX	92XX	Aço silício manganês com 0,85% de Mn e 2,0% de Si
93XX	93XX	Aços silício manganês com 3,25% de Ni, 1,20% de Cr e 0,12% de Mo
94BXX	94BXX	Aço níquel cromo molibdênio com baixos teores de Ni, Mo e no mínimo 0,0005% de B
98XX	98XX	Aço níquel cromo molibdênio com 1,0% de Ni, 0,80 de Cr e 0,25% de Mo

3.5.1 Aços Carbono

Para (CHIAVERINI, 2008), a definição do aço carbono não é tão simples, e são ligas de natureza complexas, pois os aços comercializados não são ligas binárias. O ferro e o carbono são os elementos de liga principais na composição do aço. No entanto, apresenta outros elementos em sua composição, como: fósforo, enxofre, silício e manganês. Dessa forma o aço carbono é uma liga ferro-carbono, geralmente composta por 0,008% até 2,0% de carbono, além dos demais elementos residuais, como exemplo, níquel, molibdênio, boro, cromo, entre outros.

(DE SOUZA, 2008), comenta que de modo geral os aços carbonos não podem apresentar mais que, 1,65% Mn, 0,30% Si, 0,040% P e 0,050% S. Caso, a

porcentagem desses elementos de liga forem maior que os apresentados anteriormente, serão considerados aços liga, que dará funções especiais ao aço, atribuindo ao mesmo propriedades específicas.

Os aços são classificados de três maneiras, por meio da composição química, levando em consideração o teor de carbono que compõe a liga. Os três tipos de aço carbono são (SOUZA, 2001):

- ✓ Aços baixo carbono: possuem no máximo 0,30% de carbono;
- ✓ Aços médio carbono: possuem entre 0,30% e 0,60% de carbono;
- ✓ Aços alto carbono: possuem 0,60% a 1,00% de carbono.

Os aços com baixo teor de carbono geralmente não são submetidos a tratamentos térmicos. Apresentam alta tenacidade e ductibilidade, no entanto possuem baixa resistência e dureza; além disso, são bastante usináveis e soldáveis e apresentam baixo custo de produção. Esses tipos de materiais são geralmente utilizados em perfis estruturas, construção civil, chapas utilizadas em carros, placas para fabricação de tubos, entre outras (TEDESCO, 2007).

Conforme (CHIAVERINI 1986), os aços com médio teor de carbono, são submetidos a tratamentos térmicos, como: têmpera e revenido, pois, apresentam teores de carbono suficiente para realização desse processo. No entanto, para que esses tratamentos térmicos sejam efetivos, deveram ser realizados com taxas de resfriamento elevadas e em seções finas. Se comparadas as propriedades mecânicas dos aços médios carbonos com os de baixo carbono, observa-se que o primeiro possui maiores resistência e dureza e menores tenacidade e ductilidade em relação ao segundo. Estes aços são mais difíceis de serem usinados, e são geralmente encontrados com durezas superiores a 35 HR_C (CALLISTER, 2006). São aplicados em rodas e equipamentos ferroviários, e em componentes de elementos de máquinas, como exemplo, engrenagens, virabrequins e outras peças que necessitam de alta resistência mecânica e resistência ao desgaste e tenacidade (INFOMET, 2015).

Por último, os aços de alto teor de carbono, possui baixa ductibilidade, no entanto, apresentam alta resistência e dureza. São de baixa usinabilidade quando comparados com os outros tipos de aço, ou seja, no estado endurecido há grande dificuldade de usinagem. Nestes casos, a escolha da operação de usinagem a ser

utilizada é um fator crítico para manufatura do componente (CALLISTER, 2006). São utilizados na fabricação de talhadeiras, facas, martelo e folhas de serrote, na maioria das vezes no estado temperado ou revenido (CIMM, 2015).

(SALDARRIAGA, 2008) resume que o aço comum ao carbono tem uma grande faixa de usinabilidade, dependendo das propriedades mecânicas desse material. Se o mesmo apresentar alta ductibilidade, pode ocorrer a formação de APC produzido pela formação de cavaco, o que gera um ruim acabamento superficial. Se o aço tiver alta resistência mecânica, a presença de carbonetos de aço, pode gerar uma diminuição da vida da ferramenta de corte, por meio de desgaste abrasivo. Em termos gerais, o trabalho a frio provoca a melhoria da usinabilidade na maioria dos aços, que endurece o material e reduz a probabilidade de ocorrência da formação de aresta postiça de corte.

3.5.2 Aços Liga

Em busca de melhores propriedades mecânicas, visando a necessidade das mais variadas aplicações, quantidade de elementos de liga podem ser adicionados ao aço carbono. A introdução desses elementos de liga nos aços carbono é feita quando se deseja alcançar os seguintes efeitos (CHIAVERINI, 2008):

- ✓ aumentar a dureza e resistência mecânica;
- ✓ conferir resistência uniforme através de toda a secção em peças de grandes dimensões;
- ✓ diminuir o peso (como consequência do aumento da resistência);
- ✓ conferir resistência à corrosão;
- ✓ aumentar resistência ao calor;
- ✓ aumentar a resistência ao desgaste;
- ✓ aumentar a capacidade de corte;
- ✓ melhorar as propriedades elétricas e magnéticas.

Dessa forma são gerados os chamados aços-liga, que de acordo com a porcentagem de elementos inseridos em sua composição podem ser classificados como: aços de baixa, média ou alta liga (DE SOUZA, 2008).

Nessa classificação de aço podem ser inseridos os seguintes componentes: manganês, silício, níquel, cromo, molibdênio, vanádio, nióbio, boro, alumínio, titânio, tungstênio, cobalto, cobre, zircônio, chumbo, etc. A introdução desses elementos acrescentam a liga alterações de propriedades mecânicas e a forma diferenciada. As principais alterações de propriedades são: aumento de resistência, aumento da dureza, melhoria da temperabilidade, melhoria na tenacidade e usinabilidade e aumento da resistência à oxidação, à corrosão e à abrasão (MEI et al., 1981).

Os aços ligas submetidos a tratamentos térmicos possuem características melhoradas quando comparada a classe dos aços carbono, essencialmente melhor endurecibilidade, e podem promover alta resistência e boa tenacidade, principalmente em seções mais grossas. No entanto, os elementos de liga podem trazer algumas desvantagens, como: baixa soldabilidade, em alguns casos, maior dificuldade de tratamentos térmicos e geralmente tornam o aço mais caro que os aços carbono e os aços de alta resistência e baixa liga (DE SOUZA, 2008).

3.6 FATORES INFLUENTES NA USINABILIDADE DO AÇO

3.6.1 Propriedades do material

3.6.1.1 Dureza e Resistência mecânica

Sabe-se que a grandeza que indica o grau de facilidade de se remover cavaco de um material, pode ser chamado de usinabilidade. Segundo (YANARDAG, 2004; DINIZ et al, 2003), a dureza de um aço é considerada como sendo um bom parâmetro relativo a usinabilidade. Geralmente considera-se que, aços com níveis muito elevados de dureza têm menor usinabilidade, mas caso contrário não é verdadeiro, pois aços com menor níveis de dureza, também pode apresentar dificuldade de usinagem, por conta de outros fatores envolvidos no processo, como exemplo: ductibilidade, condutividade térmica, o encruamento, a microestrutura, a quantidade das inclusões e aditivos e a quantidade de partículas duras.

(DE AMORIM, 2002), também comenta dizendo que altos valores de dureza e resistência mecânica diminuem a usinabilidade, pois materiais com tais características, provocam resistência ao processo de corte. No entanto, valores

muito baixos dessas propriedades em baixas velocidades de corte, também diminuem a usinabilidade, pois favorecem a formação de APC. Isso é explicado, pelo motivo do material se deformar muito antes de romper, aumentando a superfície de contato cavaco-ferramenta, o que gera um aumento das forças de corte devido ao atrito na formação de saída.

Pelos motivos descritos acima é preciso tomar muito cuidado quanto a dureza do material, recomenda-se, sempre que possível a utilização de materiais com valores intermediários. (DINIZ et al. 2003) comenta que a variação de dureza, próximo ao ponto médio de 200HB, tanto para mais ou para menos, gera valores negativos em um ou mais critérios de usinabilidade.

(YANARDAG, 2004), ao comparar vários aços com dureza superior a 250 HB, percebeu que na maioria das vezes a usinabilidade varia inversamente com a dureza. Por outro lado, aços com dureza menor que 250HB nem sempre seguem esta regra, por influência de outros fatores como: composição química, microestrutura e ductibilidade. Esse autor ainda sugere que aços com dureza próximos a 180HB apresentam melhor usinabilidade. Abaixo desse ponto o material em questão apresenta elevada ductibilidade, resultando em maiores tendências no aparecimento de APC em ferramentas. A velocidade de corte é outro ponto a ser analisado, pois a mesma deve ser controlada para evitar queima da ferramenta e acabamento superficial indesejável. A usinagem de aços com dureza abaixo de 160HB necessita de muito cuidado, já que grande número de problemas relativos a usinabilidade são encontrados na usinagem desse material.

Para (LANE et al., 1967) o limite de dureza para usinagem de aços é muitas vezes considerado como cerca de 350HB, acima desse valor os aços, são classificados por alguns autores como comercialmente difíceis de se usar. Isso não quer dizer disser que os aços com maior dureza não são usinados, mas que por esse motivo as velocidades devem ser reduzidas a um ponto em que os custos de usinagem se tornar excessiva. A partir disto, pode-se dizer que, que o carbono é o principal elemento que aumenta a dureza, em seguida, um aumento no conteúdo desse elemento provoca mudanças profundas na usinabilidade, embora outros fatores, como a microestrutura, têm certos efeitos limitantes.

3.6.1.2 Ductibilidade

Em relação a ductibilidade, baixos valores são geralmente benéficos a usinabilidade, e facilitam a formação de cavacos curtos, o que provoca menor perda de energia com o atrito cavaco-superfície de saída da ferramenta. Consegue-se uma ótima usinabilidade, através de uma boa relação entre ductibilidade e dureza, já que baixa ductibilidade provoca alta dureza, e vice-versa (DINIZ et al., 2003).

3.6.1.3 Condutividade Térmica

A relação dessa propriedade com bons valores de usinabilidade, se dá quando o material da peça apresenta alta condutividade térmica o que significa que o calor gerado no processo é retirado com facilidade da interface peça-ferramenta, logo, a ferramenta não é superaquecida, retardando seu desgaste. A condutividade térmica também pode afetar na estrutura superficial da peça, assim, alta condutividade térmica do material atua de forma positiva, pois retém parte do calor gerado, sendo necessária uma boa refrigeração, com a finalidade de evitar dilatação térmica excessiva, mantendo a estrutura superficial da peça dentro da tolerância permitida. Por outro lado, baixos valores de condutividade térmica, também podem facilitar a usinagem do material, pois, provocam altas temperaturas na interface cavaco-ferramenta, causando diminuição na resistência ao cisalhamento do material, facilitando seu corte (DE AMORIM, 2002).

3.6.1.4 Taxa de Encruamento

O encruamento, ocorre quando os metais são deformados plasticamente, alta taxa dessa propriedade significa um aumento na resistência do material. O que quer dizer muita energia para formação do cavaco, e que acarretará em um substancial aumento de dureza numa fina camada da superfície usinada, facilitando a formação de APC o que torna o material de baixa usinabilidade. (DINIZ et al., 2003).

3.6.1.5 Microestrutura

Por conta da transformação da microestrutura do aço, sem alterar a composição química, a mesma é um fator de grande influência na usinabilidade. Os elementos da microestrutura alteram características como: ductibilidade, quantidade e forma, fragilidade em função da sua presença, promovendo algumas condições particulares de quebra de cavaco, abrasividade, força e temperatura de corte. A presença de fases aciculares tipo bainita e martensita, resultante do efeito abrasivo, também são indesejáveis na usinagem (FERRARESI, 1977).

Através do diagrama Fe-C (fig. 3.9) pode-se entender como a quantidade de teor de carbono presente nos aços se relaciona com constituintes microestruturais, fatores esses que influenciam diretamente na usinabilidade desse material. (SALDARRIAGA, 2008; ASM, 1991d), caracterizam a usinabilidade do aço em função da microestrutura, da seguinte maneira:

- ✓ Aços com um teor de carbono baixo (até 0,2%) por conta de fatores econômicos, são usinados em estado laminado. No entanto, sua usinabilidade apresenta melhora em condições de encruamento, quando as tensões internas são aliviadas. Isso é explicado em função do encruamento provocar um aumento de dureza e produção de um grão ferrítico pequeno;
- ✓ Aços médio carbono com teor de carbono entre 0,2% e 0,3% apresentam melhor usinabilidade quando contem estrutura perlítica em seções acima de 75 mm de diâmetro (obtidas por laminação). Para seções abaixo de 75 mm uma melhora na microestrutura é obtida no tratamento térmico de normalização;
- ✓ Aços médio carbono com teor de carbono entre 0,3% e 0,4% possuem boa usinabilidade quando apresentam uma microestrutura perlítica grosseira com um mínimo de ferrita (obtida por recozimento);
- ✓ Os aços de médio e alto carbono com teor de carbono entre 0,4% e 0,6% apresentam melhor usinabilidade quando sua microestrutura é perlítica lamelar e esferoidizada;
- ✓ Os aços de alto carbono (acima de 0,6%) apresentam melhor usinabilidade com estrutura esferoidizada;

- ✓ A inclusão de elementos não metálicos, assim como a adição controlada de metais moles e com baixa solubilidade (exemplo, chumbo e bismuto), melhora apreciavelmente a usinabilidade.

DIAGRAMA DE FASES DO SISTEMA Fe-C

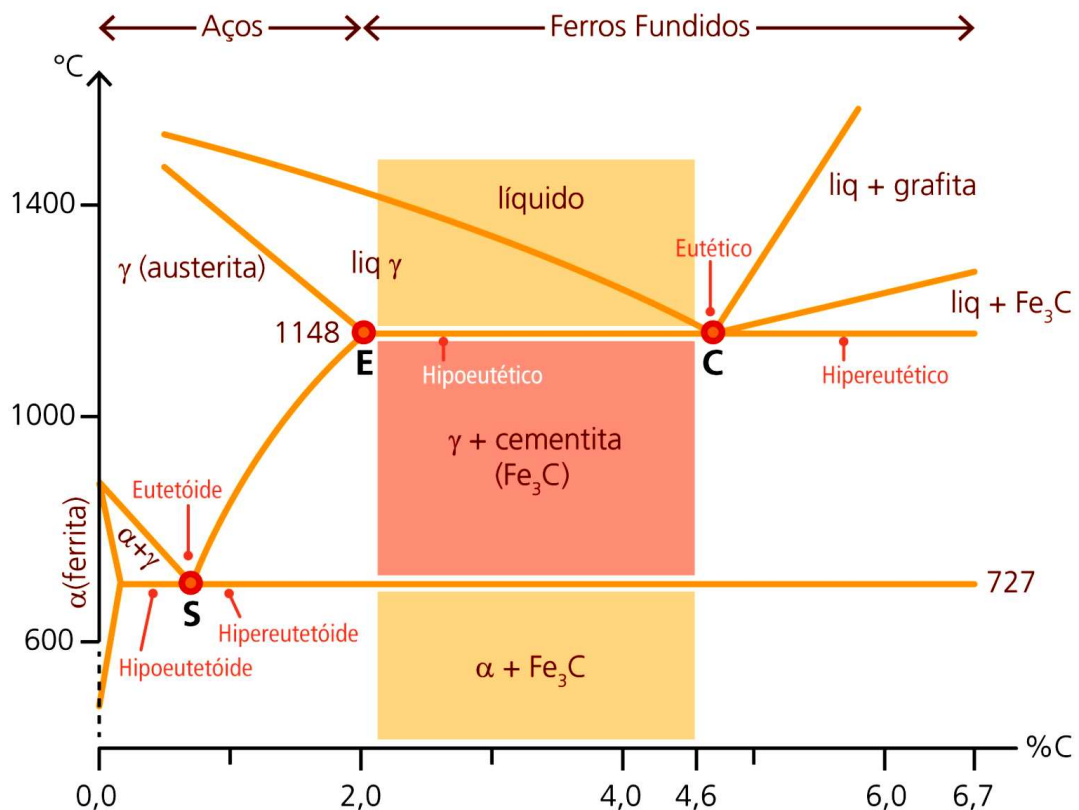


Figura 3.6 - Diagrama de fases do sistema Fe-C (ZOLIN, 2010).

Em relação a melhora da usinabilidade dos aços pela adição de elementos de liga, devem ser analisados os possíveis efeitos negativos que os mesmos podem provocar nas propriedades mecânicas do material da peça. O tamanho de grão é outro parâmetro a ser analisado, pois o mesmo precisa ser controlado, em função do efeito de fragilização do cavaco, produzido quando se usina estruturas de grãos grosseiros. No entanto, aços com uma estrutura mais refinada, menores são as fronteiras intergranulares e maiores são os contatos de natureza química e eletrostática, melhorando o comportamento da ferramenta de corte, além disso, grão menores são preferíveis para a obtenção de um melhor acabamento superficial (BAPTISTA, 2002).

3.6.1.6 Composição Química

A composição química pode influenciar a usinabilidade de três maneiras: quando os elementos que aumentam a proporção de perlita diminuem o teor de carbono no ponto eutetóide causando endurecimento por solução sólida. A segunda é quando os elementos atuam na fragilização da ferrita. Uma terceira maneira é quando os elementos residuais, provenientes da fusão/vazamento, podem promover efeitos diversos, além da presença de inclusões (ARFELD et al., 1977; AMARO, 1982).

Segundo (OLIVEIRA, 1987), a adição de elementos de liga provoca modificações microestruturais, conduzindo a um endurecimento, que influi nas propriedades mecânicas e sobre a usinabilidade, dependendo quantidade, da forma e distribuição dos mesmos. Partículas duras e abrasivas que prejudicam a usinabilidade também podem serem formada pela inclusão de elementos de liga (TESSLER et al., 1993).

3.6.1.7 Tratamentos Térmicos

Conforme (KÖNIG et al., 2002) os tratamentos térmicos podem influenciar, na usinabilidade e principalmente na formação de cavaco e desgaste da ferramenta, dependendo da composição química do aço. Eles geram bons resultados de usinabilidade, pois provocam uma transformação na estrutura do material, em relação à quantidade, forma e distribuição das segregações, o que também geram boa influência na resistência do material.

(DA SILVA et al., 2012) comenta que o tratamento térmico por recozimento de esferoidização, que pode ser feito aquecendo o material até uma temperatura especificamente menor que 727 °C e após manter a temperatura por um longo período, resfriar lentamente. Tem a função de alterar a morfologia da rede lamelar de cementita em carbonetos mais ou menos esféricos ou esferoiditas. O que provoca melhora na usinabilidade, e na ductibilidade dos aços com médio e alto teor de carbono. Esse tratamento térmico objetiva principalmente, o aumento da usinabilidade e a capacidade de conformação a frio dependendo do aço. Já os aços de baixo carbono, na maioria não são submetidos ao processo de esferoidização para melhorar a usinagem, pois os mesmos ficam muitos macios produzindo

cavacos muitos longos, o que pode prejudicar a usinagem. Os mesmos só são submetidos a esse processo quando uma alta deformação plástica a frio for necessária.

3.6.2 Influência de alguns elementos da composição química na usinabilidade dos aços

Segundo (DE AMORIM; 2002) os elementos de liga presentes no aço possuem função de controle sobre as propriedades do material, sendo que algumas vezes são acompanhados de outras variáveis, como tratamentos térmicos e mecânicos. As adições de algum desses elementos são mais estudadas, devido ao seu uso na maioria dos projetos, como também a busca por tipos de aços que aumentem a usinabilidade e consequentemente diminuam o custo de manufatura desse material.

Os principais elementos presentes no aço e seus efeitos para a usinabilidade são mencionados a seguir (LUIZ, 2007; DE AMORIM, 2002):

- ✓ **Carbono:** é um dos principais elementos que influencia nas propriedades mecânicas e tecnológicas do aço. O teor de carbono tem um efeito dominante na usinabilidade de aços de carbono, principalmente porque governa resistência, dureza e ductilidade, além disso, um aumento do teor de carbono de aço aumenta o potência e unidade de consumo de energia para o corte (LESKOVAR et al., 1986).

O teor de carbono causa influência na microestrutura e na usinabilidade dos aços (fig. 3.7). O aumento desse elemento na composição do aço, provoca o aumento da quantidade de cementita (carbonetos de ferro), como esses carbonetos apresenta elevada dureza, ela acelera o desgaste da ferramenta. Por isso, a vida útil da ferramenta de corte tem direta relação com o teor de carbono que compõe o material (LUIZ, 2007).

A baixa usinabilidade também se associa a aços com teores de carbono muito baixos, pois os mesmos apresentam alta ductibilidade (considera-se aqui os aços sem aditivos especiais para melhorar a usinabilidade), e nesse caso um acentuado aumento na concentração de carbono, beneficia a usinagem por conta do aumento da fragilidade desses tipos de aço. No entanto, um

aumento nos teores de carbono aproximadamente 0,20% pode gerar novamente queda na usinabilidade (ECHEVARRÍA et al., 1987; MURPHY et al., 1973).

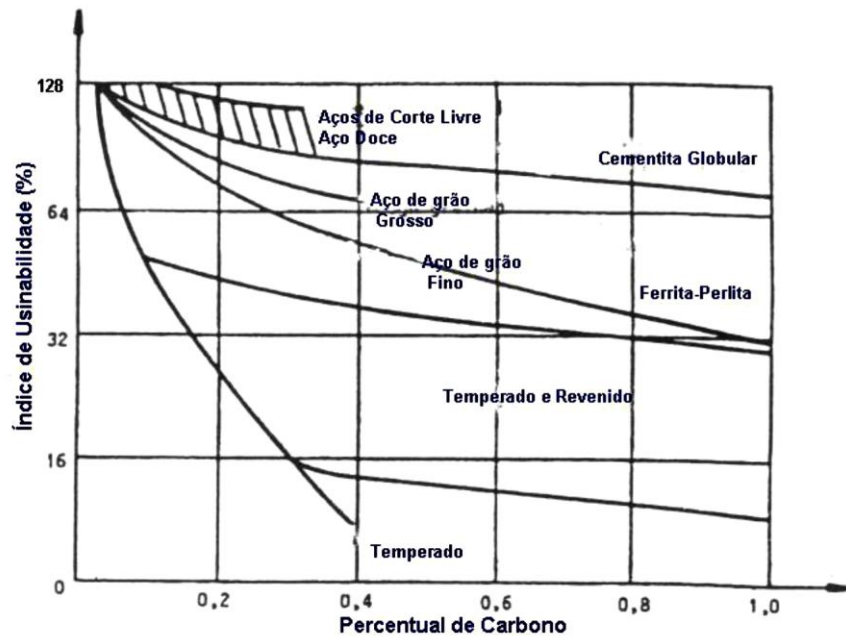


Figura 3.7 - Influência do teor de carbono e da microestrutura na usinabilidade (LESKOVAR et al., 1986).

✓ **Enxofre:** presentes no aço em teores que geralmente variam entre 0,08% e 0,13% em unidade de massa, podendo chegar até 0,35% em alguns tipos de aço. No entanto, o enxofre só causa aumento na usinabilidade quando se combina com o manganês formando os sulfetos de manganês (MnS). Que causa um aumento da usinabilidade devido a alguns fatores, como (TRENT et al., 2000):

- I. Formação de uma camada de MnS, que adere na superfície de saída da ferramenta, provocando a redução das forças de corte pela diminuição do atrito na interface cavaco-ferramenta;
- II. O MnS protege a aresta de corte e a superfície de saída, gerando um aumento da vida útil da ferramenta, por meio, da diminuição do desgaste abrasivo e difusivo;
- III. A diminuição da resistência ao cisalhamento do material, promovendo a redução das forças de corte.

Segundo (KATO et al., 1981), o sulfeto de manganês, pode exercer efeito sobre a usinabilidade do aço, através da distribuição e geometria de suas partículas de inclusão. Por meio de experimento verificou-se que partículas mais arredondadas (com fator de forma tendendo a um ($L/B \rightarrow 1$)) tendem a conferir uma melhor usinabilidade ao aço (Fig. 3.8).

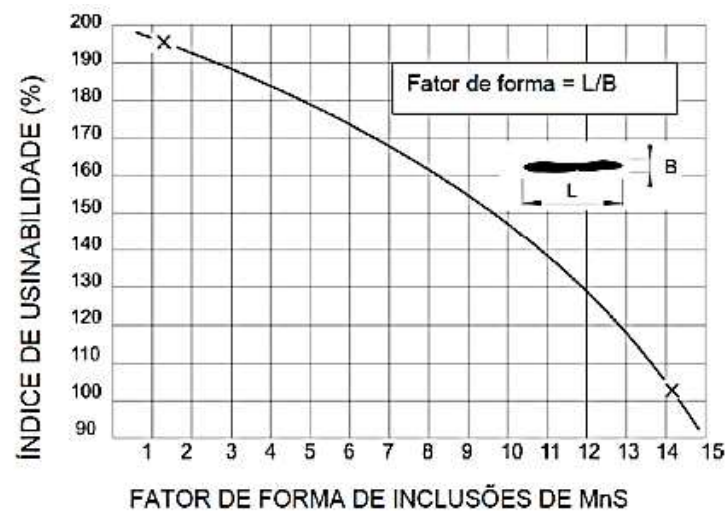


Figura 3.8 - Influência da forma dos sulfetos sobre o índice de usinabilidade (LESKOVAR et al., 1986).

Dos aditivos usados para aumentar os índices de usinabilidade, o enxofre é o de maior viabilidade econômica e um dos mais utilizados. No entanto, seu uso apresenta malefícios ao material usinado, como, a deteriorização das propriedades mecânicas, plasticidade a quente e resistência mecânica a corrosão. Então, seu uso se condiciona principalmente a uma análise detalhada de custos de usinagem (DE AMORIM, 2002).

- ✓ **Chumbo e Bismuto:** O chumbo é adicionado ao aço em teores que variam entre 0,1 a 0,35 em massa, essa substância promove melhores índices de usinabilidade através da formação de inclusões que facilitam a quebra do cavaco, a lubrificação que este gera na superfície de saída da ferramenta e a proteção física da superfície de ferramentas potencialmente desgastadas. (MILLS et al., 1983).

Em relação as propriedades do aço, a inclusão de chumbo causa uma suave alteração nas tensões de escoamento e ruptura, assim como na ductibilidade e resistência a fadiga. No entanto, o uso do chumbo como aditivo na usinabilidade de materiais tem diminuído, pois apresenta elevada toxicidade, e

cada vez mais as leis ambientais restringe a produção de aços que conte chumbo em sua composição (DE AMORIM, 2002).

Já o bismuto vem sendo utilizado para substituir o chumbo. A influência positiva desse material na usinabilidade é explicado por conta de sua insolubilidade do estado sólido, e por não ser tóxico (DE AMORIM, 2002).

Segundo (YAGUCHI et al., 1990), a inclusão metálica (Pb e Bi) são utilizadas a algumas décadas e seu beneficiamento na usinabilidade dos aços, é amplamente discutida no meio científico. Entre seus benefícios estão:

- I. Efeito lubrificante entre o cavaco e a aresta de corte da ferramenta;
 - II. Quando líquidas fragilizam o aço, reduzindo a resistência ao cisalhamento aparente, ocorrendo a formação de micro trincas a partir do metal líquido fragilizante;
 - III. As propriedades mecânicas diferentes entre as inclusões metálicas de Pb e Bi versus a matriz, promovem um efeito de concentração de tensões. Este argumento sugere um efeito semelhante à formação de vazios na interface, reduzindo a resistência aparente ao cisalhamento (efeito de entalhe) do MnS que está envolvido pelas inclusões metálicas. Adicionalmente sugere-se que as inclusões metálicas que estão em pequenas adições, acomodariam as deformações, reduzindo a energia necessária para obter a deformação total.
- ✓ **Manganês:** é adicionado ao aço com a finalidade de melhorar as propriedades mecânicas, quando interage com o enxofre, através da formação de sulfeto de manganês (LESKOVAR et al., 1986). No entanto, sem o enxofre, prejudica a usinabilidade, pois aumenta a dureza do material.
 - ✓ **Silício:** gera uma solução de carbonetos ou silício-ferrita de elevada dureza (LESKOVAR et al., 1986). Nos dois casos citado anteriormente, ele estimula a formação de inclusão de sulfetos, no entanto, pode reduzir a vida da ferramenta, por conta da ação abrasiva dos óxidos de silício.
 - ✓ **Alumínio:** tem características similar ao silício, mas com maior intensidade. Gera aluminatos que provoca diminuição da vida da ferramenta, principalmente nas condições em que o mecanismo de desgaste por abrasão é mais pronunciado. (BAS, 1995).

- ✓ **Cálcio:** é utilizado principalmente em aços estruturais por apresenta benefício não encontrado em outros aditivos (não altera as propriedades do material). Influencia a usinabilidade de forma positiva através da desoxidação do aço com cálcio durante a fundição. Além disso, controla a morfologia de inclusões duras e forma uma capa protetora de oxido na região cavaco ferramenta durante o processo de usinagem, que diminui o desgaste da ferramenta em altas velocidades de corte (YAMANE,1991). Quando usinando com ferramentas de metal duro com revestimento de *TiN*, ferramentas de *WC* contendo alta quantidade de *TiC* (MILAN, 1999), aço rápido revestido de *TiN* (KANKAANPÄÄ, 1987) e cermet (TÖNSHOFF et al., 1993).
- ✓ **Oxigênio:** Age com relação a forma como se apresenta no aço, pode beneficiar a usinagem por favorecer a formação de sulfetos mais globulares. No entanto, pode piorar a usinabilidade, caso esteja na forma de silicatos ou aluminas (ECHEVARRÍA et al., 1987).
- ✓ **Nitrogênio:** gera um melhor acabamento superficial e aumenta a força de usinagem, pelo endurecimento por solução solida (LUIZ, 2007).
- ✓ **Fósforo:** torna o controle de grão frágil, facilitando a usinagem (LUIZ, 2007).
- ✓ **Selênio e Telúrio:** é adicionado ao aço em proporções entre 0,004% a 0,05% em massa, são geralmente utilizados com enxofre e chumbo. Induzem a geração de inclusões esféricas de sulfetos, eliminando as influências negativas causadas pelos mesmos nas propriedades mecânicas. (BOULGER, 1990). Por conta do custo elevado, aços contendo esses elementos não são geralmente encontrados.

3.6.2.1 Influência dos elementos químicos residuais na usinabilidade dos aços

Os elementos residuais que compõem os aços são aqueles que já se fazem presente na liga ferro-carbono, ou seja, não são adicionados intencionalmente durante a fabricação do aço. Praticamente é inviável a eliminação total essas impurezas através dos processos metalúrgicos, entre esses elementos estão: o cromo, o níquel, o molibdênio, o cobre e o estanho, entre outros (LUIZ, 2007). Os estudos voltados para a influência dos elementos residuais na usinabilidade, são mínimos e em sua maioria contraditórias. A seguir observaremos a opinião de alguns autores sobre a influência desses elementos.

Estudos feitos por (HUNDY, 1963), resultam na afirmação que esses elementos residuais não exercem nenhuma influência na usinabilidade dos aços de corte fácil com baixos teores de carbono.

Já, (FISCHER, 1978) tem opinião contrária, ele afirma que na usinagem de aços de corte fácil os elementos residuais, prejudicam a usinabilidade, pois endurecem o aço e conseqüentemente aceleram o desgaste da ferramenta. Segundo ele a soma dos teores de níquel, cobre e cromo necessitam ser inferiores a 0,5%, para que o aço tenha boa usinabilidade.

Alguns elementos residuais podem influenciar na remoção de cavaco da peça, por conta de um endurecimento da matriz. No entanto, se o aço tiver alta ductibilidade, se apresentar um rápido aumento no teor de carbono até 0,8% ou uma adição de nitrogênio e/ou fosforo ou um endurecimento por trefilação, nesses aços melhoram os índices de usinabilidade (GARVEY et al., 1965; MURPHY, 1964; KLAUS, 1965).

Conforme (GIANFRANCESCO et al., 1979), mostram nas figuras 3.9 os elementos residuais, principalmente o cobre e o cromo causam um grande efeito prejudicial na usinabilidade.

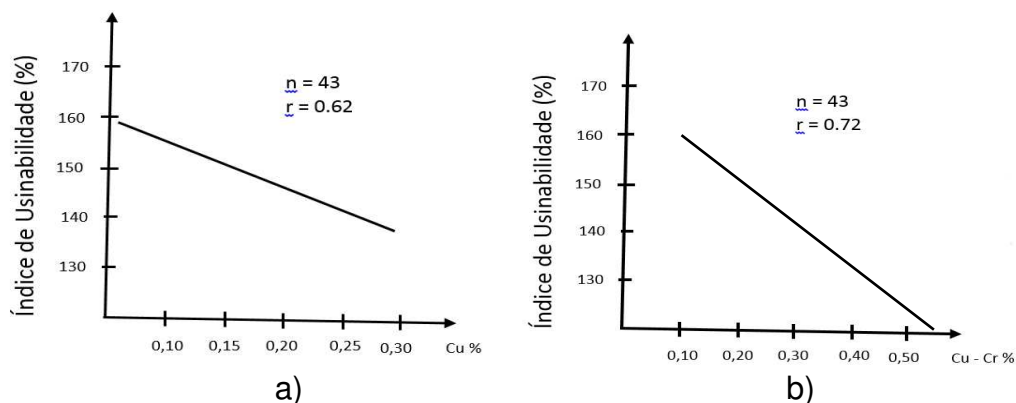


Figura 3.9 - Índice de usinabilidade em função do: a) função do teor de cobre e b) teor de cobre e cromo em um aço de corte fácil (n = nº de ensaios; r = coeficiente de regressão) (GIANFRANCESCO et al., 1979).

3.6.3 Inclusões

O fato de alguns aços apresentarem partículas que não se dissolvem no material e que interrompem a continuidade da matriz, pode causar efeitos benéficos e maléficos a usinagem, dependendo de sua dureza, forma e contribuição. As inclusões consistem em um dos mais importantes nucleadores de danos no interior

dos materiais metálicos, podendo causar poros e trincas no momento da deformação do material. Tal defeitos geram uma heterogeneidade na espessura do material, o que seriam causadores de estricções localizadas, ocorrendo com maior intensidade próximo a superfície do material, favorecendo o trabalho de corte (BAPTISTA, 2002).

A tabela 3.3 mostra um resumo dessas inclusões ocasionadas pela adição dos elementos de ligas (comentadas anteriormente), e seus efeitos na usinabilidade dos aços.

Tabela 3.3 - Efeito das inclusões na usinabilidade (Adaptado Almeida, 2005).

CATEGORIA	EFEITO	EXEMPLO	FORMA DE PRESENÇA NO AÇO
Sulfetos e teluretos MnS MnSe Mn(S,Te) Mnte	Positivo	MnS	Até aprox. 2% em aços ressulfaturados. Tamanho depende da taxa de solidificação. O tipo é controlado pela forma de desoxidação.
Metálicas Pb Bi	Positivo	Pb	Até 0,24% vol. em aços ao chumbo. Presente como partículas alongadas em produtos laminados a quente ou em caudas de sufetos.
Oxidos Plásticos Silicato Ca-Al Silicato Ca-Al-Mn	Positivo*	Anortita	Menor que 1% vol. em aços tratados com cálcio, inclusões esféricas ou alongadas podendo ser envolvidas por CaS
Não-Metálicos Duros Aluminitos Nitretos	Negativo	Al ₂ O ₃	Menor que 0,05% vol. em aços desoxidados com Al. Presentes isoladamente ou em esfrias, com partículas < 5 µm.

(*) dependente das condições de Usinagem

3.7 AÇO DE USINABILIDADE MELHORADA: AÇOS DE CORTE FÁCIL

A melhoria da usinabilidade do aço tem sido motivada pela evolução de máquinas e ferramentas empregadas na usinagem, assim, como a melhoria de fatores que tragam melhoria na manufatura desses materiais (melhoria da qualidade das peças, redução dos custos, prazos e estoques) (BAS, 2001). A descoberta de novas técnicas como “Usinagem em altíssimas velocidades” e “Usinagem a seco ou com mínima quantidade de fluído (MQF)” trazem desenvolvimento da manufatura e demandam adequações dos materiais e peças usinadas (MACHADO et al, 2004).

Em busca desses benefícios e necessidades, surgiram os aços especiais, que podem sofrer alterações com o objetivo de melhorar a usinabilidade, sendo que essas alterações não prejudiquem propriedades requeridas para um bom desempenho desse material. Quando isso ocorre damos o nome de aços com

usinabilidade melhorada, ou seja, esses tipos de aço são os que se procura facilitar o processo de usinagem, sem prejudicar de forma significativa outras propriedades, como: resistência ao impacto, resistência à corrosão, resistência à fadiga, etc. A classificação desses aços é feita em três grandes grupos (BAS, 2001):

- ✓ Aços de Construção Mecânica (*Engineering Steels*);
- ✓ Aços Inoxidáveis (*Stainless Steels*);
- ✓ Aços Ferramenta (*Tool Steels*).

Daremos ênfase aos aços de construção mecânica, como exemplo os aços de corte fácil, no qual faremos um breve comentário apresentando sua definição e o motivo pelo qual é considerado um material de boa usinabilidade. No entanto, deve-se destacar, que a maioria das soluções metalúrgicas adotadas para uma boa usinabilidade dos aços (discutido no item 3.6.2 e 3.6.3), como exemplo os aços de corte fácil, também são aplicadas nos outros tipos de aços de usinabilidade melhorada e vice-versa (LUIZ, 2007).

Segundo (ALMEIDA, 2005) a definição dos aços de corte fácil, é a seguinte: “ *são aqueles aços especialmente desenvolvidos para oferecer os melhores resultados mediante operações com arranque de cavacos.* ” Outras características mecânicas como: ductilidade, resistência à tração, resposta ao tratamento térmico, são menos importantes do que as relacionadas ao arranque de cavaco, para esse tipo de aço.

Aços de corte fácil geralmente possuem baixo teor de carbono e alto teor de enxofre, além de manganês, que proporciona juntamente com o enxofre a formação de sulfetos de manganês, e não sulfetos de ferro. Como já foi dito em itens anteriores, este composto tem propriedades que facilitam a usinagem. Aumentando a vida das ferramentas, diminuindo o esforço de corte, aumentar as velocidades de trabalho e gerando superfícies usinadas com um bom acabamento (rugosidade) (TROIANI, 2004). Além disso, um outro motivo para os aços-de-corte-fácil apresentarem boa usinabilidade é a geração cavacos facilmente quebráveis (KLUJSZO, 2003; MACHADO et al., 2004). As melhorias de usinabilidade geradas por algumas tecnologias aplicadas na formação dos aços-de-corte-fácil podem ser observadas na tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Tecnologias aplicadas para melhoria da usinabilidade dos aços-de-corte-fácil (Adaptada Almeida, 2005).

APLICAÇÃO	CARACTERÍSTICAS	RESULTADOS
Controle no nível de atividade do oxigênio no aço líquido	Controlar a morfologia dos sulfetos de Manganês durante a solidificação do aço	Aumento da Usinabilidade. Vc baixas/médias
Enxofre	Formação de sulfetos de Manganês	Aumento da Usinabilidade. Vc baixas/médias
Tratamento ao cálcio	Óxidos Controlados	Aumento da Usinabilidade. Vc altas
Pb/Bi Inclusões Metálicas	Formar inclusões metálicas	Aumento da Usinabilidade. Vc baixas
Se/Te/B Aditivos	Sulfetos controlados. Oxidos vico-plasticos	Aumento da Usinabilidade. Vc baixas/médias

3.8 FERRAMENTAS DE CORTE EMPREGADAS NA USINAGEM DOS AÇOS COMUM AO CARBONO E DOS AÇOS LIGA

Em um processo de usinagem, a ferramenta de corte é fundamental para o processo, por isso o material empregado em sua fabricação deve atender exigências de esforços, temperaturas e fatores de corte. Dentre os desafios em se escolher o material para ferramenta de corte, o maior deles é o balanço entre dureza e tenacidade, pois uma elevação na dureza é associada a uma baixa tenacidade, e vice-versa, o que causa um desafio para os fabricantes de ferramentas de corte. (OLIVEIRA, 2014; ALMEIDA, 2005). O material das ferramentas de corte, indicados na literatura, para a usinagem aço e dos aços ligas são os aços rápidos (HSS), metal duro, cerâmicas, CBN e PCBN. As ferramentas revestidas também tem obtido grande sucesso na usinagem dos aços.

3.8.1 Metal Duro

Segundo (TRENT et al.,2000) as ferramentas de aço-rápido são utilizadas em aços com dureza até 300HV, no entanto quando se utiliza essa ferramenta uma cratera é gerada por difusão e cisalhamento plástico superficial. A partir de 300 HV, até cerca de 500HV os aços devem ser usinados com ferramentas de metal duro. Pois, os insertos de MD apresentam boa combinação de dureza à temperatura ambiente, dureza a quente, resistência ao desgaste e tenacidade, e por isso é a

ferramenta de corte mais utilizadas nas indústrias, alcançando 50% das aplicações. No torneamento do aço as ferramentas de MD podem ser usadas em maiores velocidades de corte se comparadas com as ferramentas de aço-rápido, mas quanto maior for a dureza do material menores velocidades de corte são recomendadas para o corte (tab. 3.5) (DINIZ et al., 2003).

Tabela 3.5 - Velocidades de corte recomendadas para o torneamento de aços de diferentes durezas (Adaptado/reduzida TRENT et al., 2000).

Hardness (HV)	Ferramentas de aço-rápido		Ferramenta de Metal duro	
	Velocidade de Corte (m min^{-1})		Velocidade de Corte (m min^{-1})	
	Avanço de 0,5 mm/rev	Avanço de 0,25 mm/rev	Avanço de 0,5 mm/rev	Avanço de 0,25 mm/rev
90-125	40	55	180	205
125-160	34	46	155	180
160-210	27	35	130	160
210-250	21	30	115	140
250-300	18	24	100	130
300-350	15	18	85	115
350-400	---	---	70	85
400-450	---	---	45	60
450-500	---	---	35	45

O metal duro é classificado, segundo a Norma ISO, em seis classes, P, M, K, N, S e H. A fabricante de ferramentas de corte Sandvik Coromant e algumas literaturas comentam que a principal classe de ferramentas de metal duro usada para usinagem de aços carbono e aços liga são as classes P utilizada na maioria dos aços com dureza até 45 HRC, no entanto a classe Classe H é utilizada quando se necessita usinar aços endurecidos e temperados com durezas de 45 HRC a 68 HRC. Além dessas classes já citadas alguns autores também associam as Classes M e K para usinagens de alguns tipos de aços (FERRARESI, 1977). Para melhor compreensão das classes de ferramentas recomendadas pela Sandvik Coromant para usinagem dos aços de acordo com o processo de usinagem utilizado ver (ANEXO I).

As ferramentas de metal duro também podem conter revestimentos, para gerar melhores propriedades mecânicas nas ferramentas com a finalidade de aumentar a resistência ao desgaste da camada superior que entra em contato com o

cavaco e com a peça (ALMEIDA, 2005). As ferramentas de metal duro são muito utilizadas para usinagem do aço e de outros materiais alcançando 90% de utilização nas industriais (MACHADO et al., 2004). As principais camadas de revestimentos são: Carbonetos de titânio (TiC); Óxido de alumínio (Al_2O_3); Nitreto de titânio (TiN); nitreto de titânio-alumínio (TiAlN) e nitreto de alumínio-titânio (AlTiN) (ESPANHOL, 2008).

Segundo (TRENT et al., 2000) quando se usina aços com metal duro WC + CO (classe K) em altas velocidades de corte surgirá ligeiramente o desgaste por cratera e de flanco por difusão. Já a classe P contendo adições de TiC e TaC e NbC alcançaram menores níveis de desgaste, logo apresentaram maiores vida útil. Em maiores velocidades de corte pode acontecer a deformação da aresta por tensão e compressão e em baixas velocidades o mecanismo de attrition prevalecerá.

Os cermetes que também é um metal duro a base de titânio, cujo nome comina as palavras cerâmica e metal (SANDVIK, 2015). Também são utilizados na usinagem do aço, com baixas velocidades de corte e principalmente para aços moles, por conta de sua menor resistência ao desgaste. (ABRÃO et al., 1986). Por outro lado, (SHAW, 1984) comenta que as ferramentas de cermetes, são muito utilizadas em processos de usinagem a alta velocidade (*"High Speed Machining"* – HSM) de aços endurecidos, que não estejam submetidos a choques mecânicos durante o processo de usinagem.

3.8.2 Cerâmicas

(TRENT et al., 2000) afirma que aços com dureza superior a 500HV (600 a 650HV) deve ser usinado com cerâmica e sua utilização permite o emprego de velocidades de corte elevadas, no entanto, seu uso gera desgaste de flanco e cratera, que são causados por deformação plástica superficial (TRENT et al., 2000).

No entanto, a utilização de cerâmicos na usinagem de aços, está limitada ao torneamento de aços baixa liga e endurecidos, sendo utilizadas cerâmicas a base de óxido de alumínio (tipo, brancas e mistas) na usinagem desses materiais. De forma geral, se usa cerâmicas mistas ao ponto que a dureza da peça e a velocidade de corte crescem, pois resistem melhor as tensões térmicas e ao efeito de elevadas temperaturas acompanhadas de grandes esforços de corte, se comparadas com as

cerâmicas brancas. Razão pela qual são mais indicadas para o torneamento de aços endurecidos (PEREIRA, 2006).

A presença de carboneto de titânio (TiC) nas ferramentas cerâmicas (cerâmicas mistas), também apresenta bons resultados no acabamento superficial de aços laminados, podendo ser de três a seis vezes do que resultados encontrados com ferramentas de metal duro, isso é permitido, por que a adição de TiC melhora de forma significativa a dureza e a resistência ao desgaste das ferramentas cerâmicas. Já a adição de carboneto de silício (SiC) nas ferramentas cerâmicas a base de alumina permite a usinagem de aços duros (MACHADO et al., 2004).

3.8.3 Nitreto cúbico de boro sintético monocristalino (CBN) e Nitreto cúbico de boro sintético policristalino (PCBN)

Segundo (SANDVIK, 2015) as ferramentas de CBNs apresentam excelente eficiência para torneamento de acabamento de aços endurecidos, com dureza superior a 45 HRC. Já para aços com dureza menor que 45HRC, que contêm quantidade maior de ferrita, não é recomendado o uso dessa classe de ferramenta, por conta do efeito negativo na resistência ao desgaste do CBN. Se comparadas com ferramentas de cerâmicas os CBNs apresenta limitações, pelo seu elevado custo e menor estabilidade química aos aços. Mas, apresenta pouca tendência de reação com o ferro, se comparada ao diamante, o que permite a usinagem de aços. Além disso, os CBNs, permitem maiores taxas de remoção de material se comparados com outras classes de ferramentas (TRENT et al., 2000).

Os efeitos dos PCBNs se assemelham com os CBNs se comparados com as ferramentas cerâmicas, pois possuem dureza, tenacidade e condutividade térmica superior quando utilizadas na usinagem de aços endurecidos, além de possui melhores propriedades que resistem ao desgaste abrasivo, as trincas e quebras. No entanto, possuem menor resistência a reações químicas com o ferro, facilitando a ação do mecanismo de desgaste difusivo, levando ao desgaste de cratera. Outra razão para a geração desse tipo de desgaste na usinagem de aços endurecidos por ferramentas PCBNs, é o fato dessa classe de aço formar cavacos curtos (COSTA, 1993).

3.9 EFEITOS DA USINAGEM DOS AÇOS COMUM AO CARBONO E DOS AÇOS LIGA NOS PARÂMETROS DO PROCESSO

3.9.1 Força de corte

A força de usinagem é composta pela soma vetorial de três componentes: força de corte, força passiva e força de avanço. Matematicamente a força de usinagem é expressada da seguinte forma: ($F_u = F_f(x) + F_p(y) + F_c(z)$). Essas forças produzidas durante o processo de usinagem atuam na ferramenta de corte, nas direções de avanço, ortogonal ao plano de trabalho e corte (SÁNCHEZ, 2002). As forças de corte, agem como um importante indicador de usinabilidade, sendo um parâmetro fundamental durante uma tomada de decisões acerca do material a ser utilizado em determinada operação (TRENT et al., 2000). Apresentação dos componentes da força de usinagem é mostrada na figura 3.10.

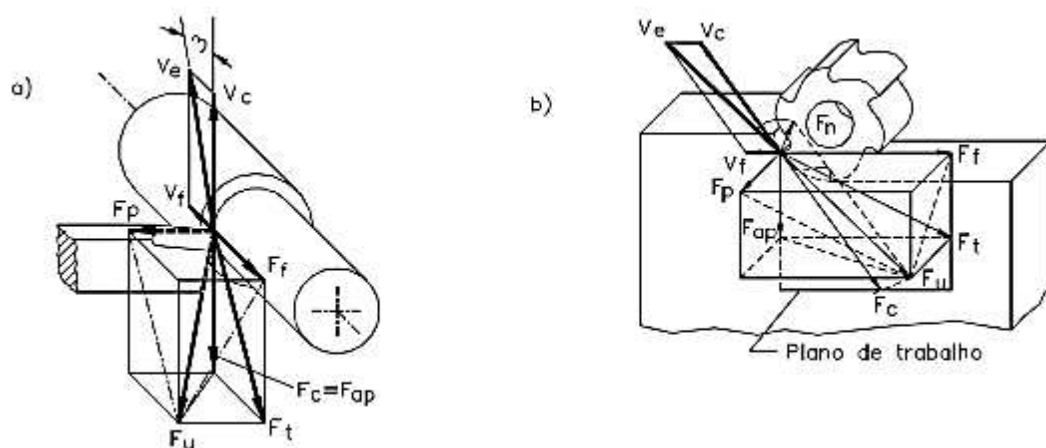


Figura 3.10 - Componentes da Força de Usinagem. a) no torneamento; b) no fresamento (MACHADO et al., 2004).

Segundo (DE AMORIM, 2002) alguns fatores influenciam na força de usinagem:

- ✓ **Material da peça:** Quanto maior a resistência e dureza do material maiores são as forças de corte, no entanto alguns fatores podem mascarar o aumento da força de corte gerado pela dureza do material, são esses: acabamento superficial e um baixo atrito na interface cavaco ferramenta, pois eles tendem a reduzir as forças de corte.

A adição de alguns elementos de liga pode causar influência nas forças de corte, por exemplo, o carbono, tendem a aumentar F_c . Por outro lado, fosforo, chumbo, enxofre e boro causam influencia contraria.

- ✓ **Material e desgaste da ferramenta:** Quase não se comenta acerca da influência da ferramenta sobre a força de corte, pois costuma ser desprezível. No entanto, deve-se levar em consideração a afinidade deste com o material da peça, caso ocorra uma zona de aderência estável e forte, os valores de F_c aumentam, já com a diminuição do atrito na região de saída, F_c diminuirá, o que geralmente ocorre quando se usa revestimentos nitreto de titânio.
No caso do desgaste da ferramenta, se observa que com o aumento do atrito cavaco-ferramenta diminui a vida útil da ferramenta de corte o que acarreta no aumento da força de corte.
- ✓ **Velocidade de corte:** A diminuição dos componentes da força de usinagem ocorre com o aumento da velocidade de corte, pois a resistência do material diminui com o aumento da temperatura. (FERRARESI, 1977; STEMMER et al., 1990). Nos aços em que ocorre aresta postiça de corte, a atenuação das forças ocorre a baixas velocidade de corte, até um ponto em que a F_c cresce novamente.
- ✓ **Uso de fluido de corte:** A influência dos fluidos de corte sobre a força de corte, ocorre de duas formas. Enquanto o efeito lubrificante do fluido de corte provoca a diminuição dos esforços diminuindo o atrito cavaco-ferramenta, o efeito refrigerante age no material da peça, aumentando a resistência ao cisalhamento da mesma, devido a redução da temperatura que provoca o aumento dos esforços. Assim, concluímos que a ação do fluido de corte depende do efeito predominante sobre o processo de corte.
- ✓ **Área da seção de corte (ap e f):** O avanço e a profundidade de corte são os que mais influenciam de formas diferentes a força de corte e K_s .
- ✓ **Geometria da ferramenta:** Os ângulos da ferramenta desenvolvem forte influência na força de corte, dentre eles, o ângulo de saída (γ_o) é o que mais influencia as forças de corte. O aumento deste ângulo, provoca o aumento da força de corte, devido a menor deformação do cavaco. O ângulo de inclinação (λ_s) provoca o mesmo efeito, ainda que em menor intensidade.

De acordo com (TRENT et al., 2000) a adição de elementos químicos (C, Si, Mn, Cr, etc.) ao ferro, para produção de alguns tipos de aço, alterando propriedades como ductilidade e resistência, influenciando as tensões atuantes na ferramenta de corte e as temperaturas de usinagem. Observa-se que as forças são menores do que quando usinado ferro puro (fig. 3.11).

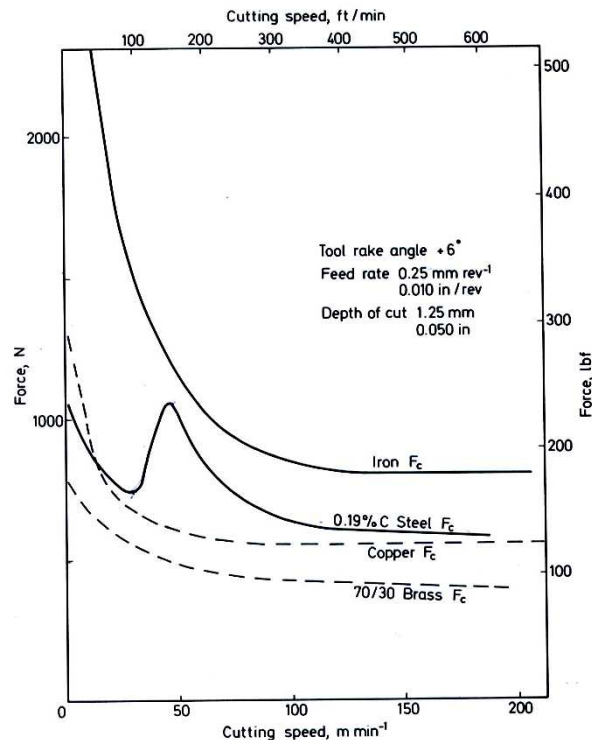


Figura 3.11 - Forças de corte em função da velocidade de corte na usinagem de ferro puro, aço, cobre e latão (TRENT et al., 2000).

No trabalho publicado por RODRIGUES et al, (2007), foram investigados seis materiais distintos: bronze, latão, cobre, alumínio e os aços ABNT 1020 e ABNT 1045, para análise dos efeitos provocados pelo fluido de corte, ferramenta de corte, material da peça e avanço sobre as forças que agem durante o processo de usinagem, ou seja, sobre as forças de usinagem.

Para realização do procedimento experimental foram utilizados os equipamentos abaixo (RODRIGUES et al., 2007):

- ✓ Torno IMOR - MAXI - II -520;
- ✓ Dinamômetro KISTLER tipo 9443B;
- ✓ Amplificador multicanal tipo 5019A;

- ✓ Um microcomputador AT 486 equipado com uma placa de aquisição de dados e programa para leitura e conversão dos dados de (pC) para (N).

O software utilizado foi configurado para realizar 150 leituras a cada teste. Sendo que cada teste foi realizado três vezes e a média aritmética dos três valores foi tomado como resultado. A montagem do sistema é ilustrada na figura 3.12.

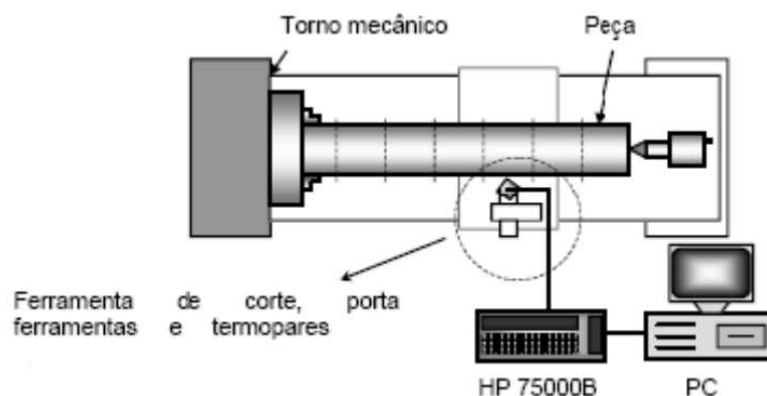


Figura 3.12 - Montagem do sistema de medição de forças, ao lado do torno (RODRIGUES et al., 2007).

Os parâmetros utilizados para realização do procedimento, são apresentados na tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Materiais da peça, fluido de corte e ferramentas empregados nos experimentos (Adaptado/Reduzida RODRIGUES et al., 2007).

Parâmetros variados		Materiais da peça	
vc	16 a 222 m/mim	Aço ABNT 1020	Φ 2 " x 300 mm
f	0,138 a 0,277 mm/rev	Aço ABNT 1045	Φ 3" x 300 mm
ap	0,5 a 3 mm	Fluido de corte	
rp	0,4; 0,8; 1,2 mm	Emulsionável com concentração 5% -Dromus Bx	
Ferramentas de Corte (METAL DURO ISO P20)			
Com revestimento (TiN) - SPUN 1203 08		Sem revestimento - SPUN 1203 08	
Com revestimento (TiN) -TPMR 1603 04		Com revestimento (TiN) -TPMR 1603 08	
Com revestimento (TiN) -TPMR 1603 12			

Os resultados obtidos para os materiais aço ABNT 1020 e ABNT 1045, são descritos por meio de gráficos, como podemos observar a seguir.

- ✓ Parâmetros de corte: Ferramenta sem revestimento e a seco. $vc = 96$ m/min; $ap = 0,5$ mm; $f = (0,138$ a $0,277$ mm/rev).

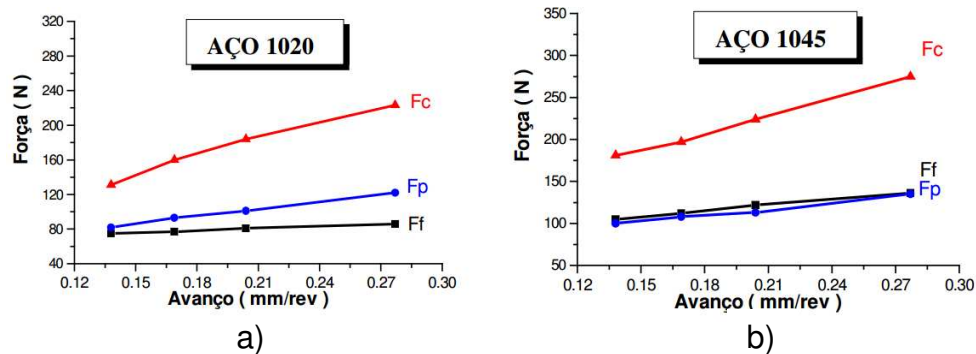


Figura 3.13 - Variação das forças de corte com o avanço para os diversos materiais testados: a) Aço 1020, b) Aço 1045 (RODRIGUES, et. al., 2007).

- ✓ Parâmetros de corte: Ferramenta com revestimento, com e sem fluido; $vc = 96$ m/min; $ap = 0,5$ mm; $f = (0,138$ a $0,277$ mm/rev).

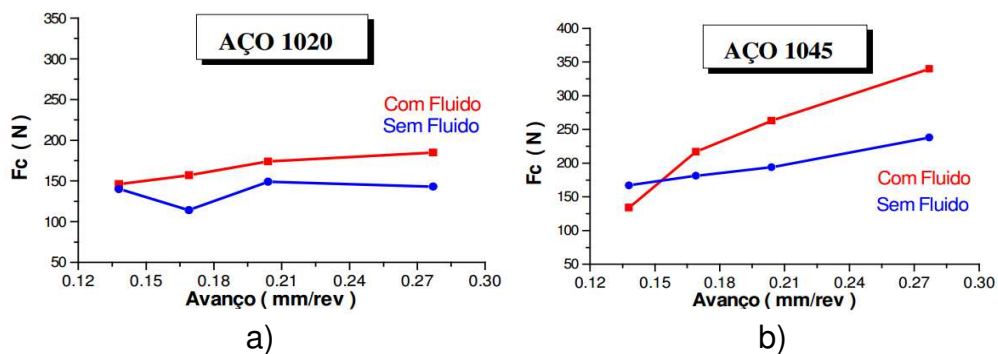


Figura 3.14 - Efeito do uso de fluido de corte sobre a força de corte para: a) Aço 1020, b) Aço 1045 (RODRIGUES, et. al., 2007).

- ✓ Parâmetros de corte: Ferramenta (com e sem revestimento), sem fluido de corte; $vc = 96$ m/min; $ap = 0,5$ mm; $f = (0,138$ a $0,277$ mm/rev).

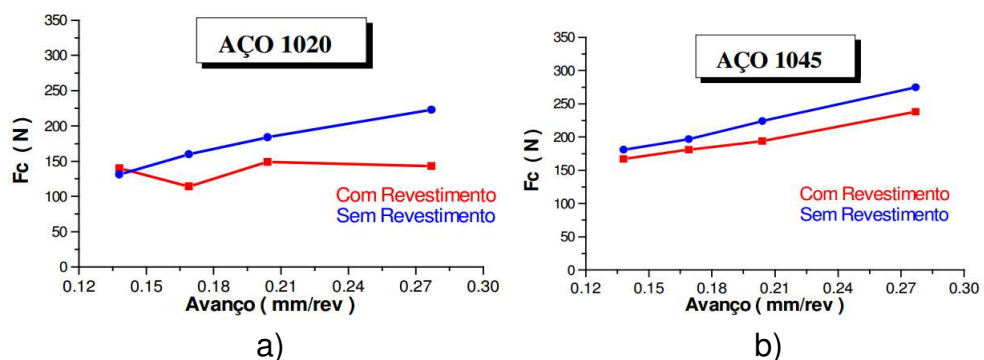


Figura 3.15 - Resultados obtidos com ferramentas com e sem revestimentos sobre a força de usinagem para as amostras: a) Aço 1020, b) Aço 1045, (RODRIGUES, et. al., 2007).

- ✓ Parâmetros de corte: Ferramenta sem revestimento e a seco; $vc = 96 \text{ m/min}$; $ap = 0,5 \text{ mm}$; $f = (0,138 \text{ a } 0,277 \text{ mm/rev})$.

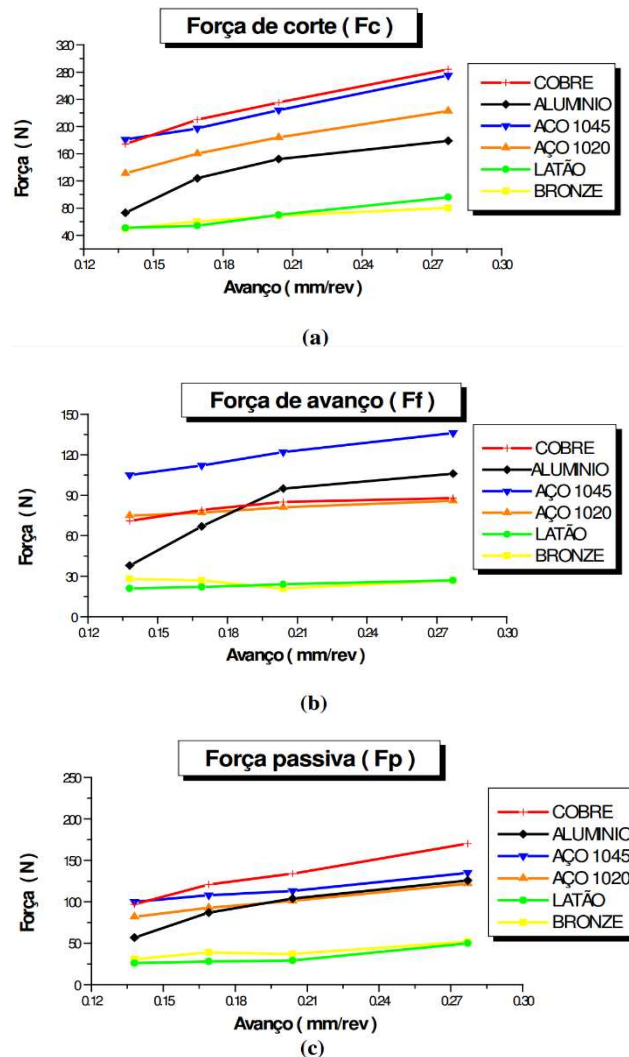


Figura 3.16 - Comportamento do material da peça observados para: a) força de corte, b) força de avanço e c) força passiva. (RODRIGUES, et. al., 2007).

Após análise dos resultados obtidos nos testes, RODRIGUES, et. al., (2007) concluíram que:

- ✓ Durante o torneamento, a profundidade de corte e avanço são os parâmetros que mais influenciam nas forças de usinagem. Um aumento destes gera um significativo aumento nas forças de usinagem;
- ✓ O aumento da velocidade de corte provocou uma pequena redução na força de usinagem;

- ✓ Dentre as forças que compõem a força de usinagem, a força de corte foi a maior de todas, vindo em seguida a força de avanço e força passiva, respectivamente. Para valores de profundidade de corte superiores a 0,5 a força de avanço (F_f) foi maior que a força passiva (F_p);
- ✓ As forças de corte obtidas durante a usinagem com fluido de corte foram maiores que os testes realizados a seco;
- ✓ Para a usinagem dos Aços ABNT 1045 e 1020 as forças de corte foram menores para a usinagem com ferramentas revestidas do que com as sem revestimento;
- ✓ Para a maioria dos testes o Cobre (alta ductilidade) e o Aço 1045 (grande resistência ao cisalhamento) tiveram as maiores forças de corte, acompanhados pelo alumínio (dúctil) e Aço 1020 (resistente ao cisalhamento).

3.9.2 Temperatura de corte

Conforme (FERRARESI, 1977) os influencias de geração e transmissão de calor na usinagem de metais são de grande complexidade, pois as elevações da temperatura mudam as propriedades físicas e mecânicas do material em trabalho. A temperatura, agindo no desgaste das ferramentas, limita a aplicação de regimes de corte mais altos, fixando, por isso, as condições máximas de produtividade e duração das mesmas. A análise das condições de geração e transmissão de calor no processo de usinagem em função de diferentes fatores de corte, permite a escolha de dimensões e formas mais convenientes das ferramentas, além de melhorar o regime de trabalho e durabilidade.

A temperatura da interface cavaco-ferramenta sofre grande influência da velocidade de corte, por isso, haverá um limite prático na velocidade de corte, para cada par ferramenta peça (TRENT et al., 2000). A figura 3.17 mostra as temperaturas máximas registradas na superfície de saída de diversas ferramentas de aço rápido (HSS) utilizadas na usinagem de várias ligas em função da velocidade de corte.

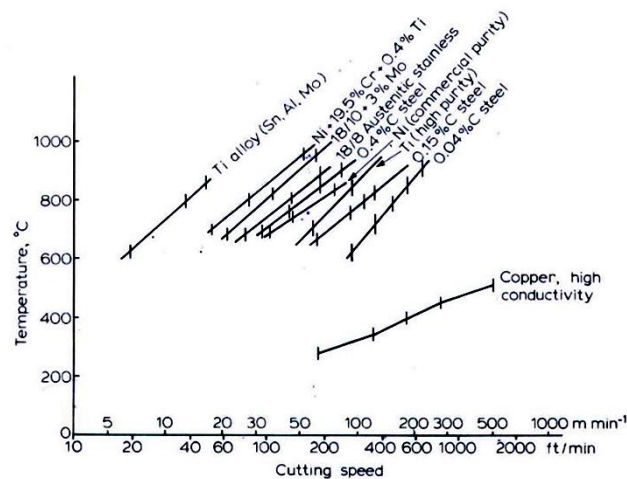


Figura 3.17 - Temperaturas máximas registradas na superfície de saída de diversas ferramentas de aço rápido (HSS) utilizadas na usinagem de várias ligas em função da velocidade de corte (TRENT et al., 2000).

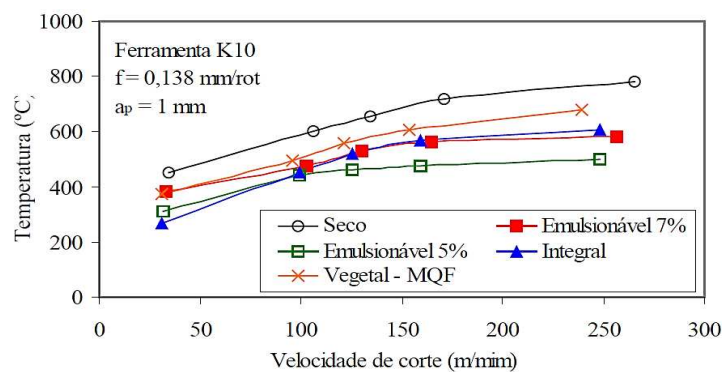
RIBEIRO et. al., (2003) desenvolveram um trabalho que tem como principal objetivo a investigação do comportamento da temperatura de corte na interface cavaco-ferramenta sob diferentes condições de refrigeração/lubrificação, variando-se a velocidade de corte e a taxa de avanço, utilizando ferramentas de duas classes de metal duro.

O material da peça utilizado foi o aço ABNT 8640, laminado a quente e normalizado, com valor médio de dureza Vickers HV = 290 kgf/mm² na forma de barras cilíndricas de diâmetro 60,4 mm x 500 mm de comprimento. Os ensaios foram realizados em um torno mecânico, modelo IMOR MAXI-II 520, (6 CV). As ferramentas utilizadas foram confeccionadas em barras de metal duro integral classes K10 e P30 retificadas para a seguinte geometria: $\gamma_o = 6^\circ$; $\alpha_o = 5^\circ$; $\chi_r = 75^\circ$; $\epsilon_r = 90^\circ$ e $\lambda_s = 0^\circ$. Os fluidos de corte utilizados neste trabalho foram, emulsionável às concentrações de 5 e 7%, o fluido mineral, fluido integral e o vegetal (RIBEIRO et. al., 2003).

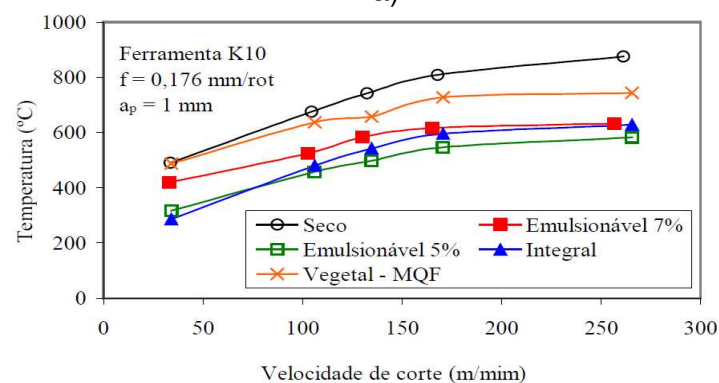
Para a medição de temperatura foi empregado o método do termopar ferramenta-peça. Um amplificador foi usado para amplificação do sinal elétrico gerado pela região aquecida entre o cavaco e a ferramenta e enviado para uma placa de aquisição de dados em um microcomputador. Com o auxílio de um programa, desenvolvido na linguagem C++, se estabeleceu a relação desta tensão amplificada com a temperatura real da interface. Para isso utilizou-se a curva de

calibração já ajustada. As condições de corte empregadas foram as seguintes: velocidades de corte diferentes que variaram dentro de um intervalo entre $v_c = 30$ m/min e 270 m/min, combinados com valores de avanço $f = 0,138$ mm/rot e $0,176$ mm/rot com profundidade de corte, $a_p = 1,0$ mm (RIBEIRO et. al., 2003).

Após os testes no torneamento do aço ABNT 8640, observa-se que a temperatura de corte aumenta com a velocidade de corte para todas as condições testadas. Nas figuras 3.18a e b quando se usa ferramenta K10 para usinagem desse aço, observa-se que as baixas velocidades de corte (próximo a 33 m/min) provocam temperaturas reduzidas, isso se explica pela formação de aresta postiça de corte (APC), que aumenta a fonte principal de calor (na zona de cisalhamento secundária) para uma região afastada da superfície de saída. Os maiores valores de temperatura foram encontrados quando se usinou a seco, se comparado com os demais fluidos utilizados, atingindo o valor de 781°C para maiores velocidades de corte, provocando um aumento de 60% em relação à temperatura produzida pelo fluido emulsionável 5% para a maior v_c , onde foram encontradas as menores temperaturas (RIBEIRO et. al., 2003).



a)

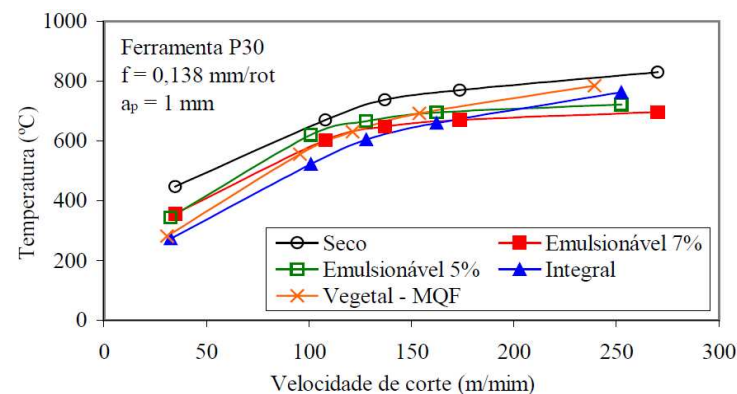


b)

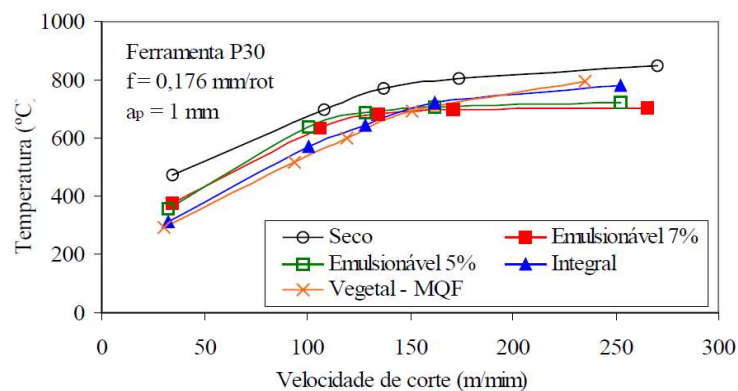
Figura 3.18 - Temperatura de usinagem em função de v_c para avanço: a) de $0,138$ mm/rot e b) de $0,176$ com ferramenta K10 (RIBEIRO et. al., 2003).

Vale ressaltar que os menores valores de temperatura foram produzidos quando o aço ABNT 8640 foi usinado com avanço $f = 0,138 \text{ mm/rot}$ (fig. 3.18a) isso também acontece para ferramenta P30 com o mesmo avanço (fig. 3.19a) (RIBEIRO et. al., 2003).

Nas figuras 2.19a e b quando o aço 8640 é usinado com ferramenta P30, observa-se valores de temperatura muitos próximos entre os tipos de fluido de corte, com uma pequena elevação de T na condição a seco. O fluido vegetal na condição MQF se mostra bastante eficiente como refrigerante quando se utiliza a ferramenta P30 até $vc = 150 \text{ m/min}$. Percebe-se ainda que as ferramentas P30 apresentaram maiores valores de temperatura se comparadas com as ferramentas K10 (RIBEIRO et. al., 2003).



a)



b)

Figura 3.19 - Temperatura de usinagem em função de vc para avanço: a) de $0,138 \text{ mm/rot}$ e b) de $0,176 \text{ mm/rot}$ com ferramenta P30 (Ribeiro et. al., 2003).

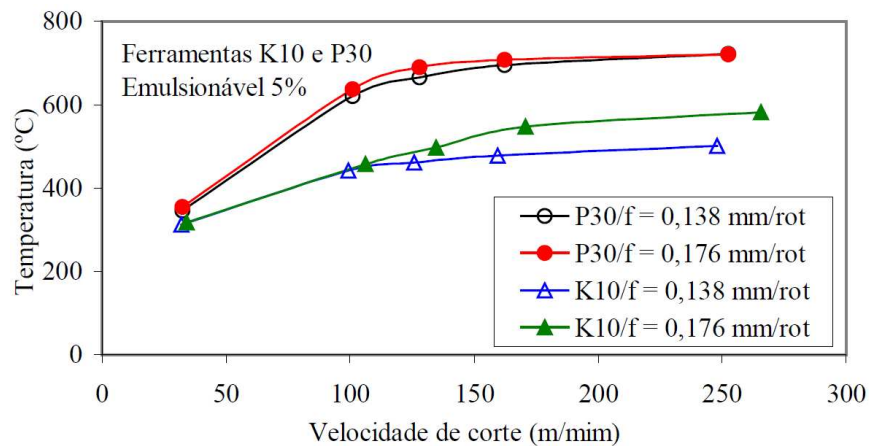


Figura 3.20 - Temperatura de usinagem em função vc e f para as ferramentas K10 e P30 com fluido emulsionável 5% ($ap = 1$ mm) (Ribeiro et. al., 2003).

A figura 3.20 apresenta os valores de temperatura em função de vc , para as ferramentas K10 e P30 na usinagem do aço para os dois valores de avanço (0,138 e 0,176 mm/rot), utilizando o fluido emulsionável 5% que, em geral, produz os menores valores de temperaturas de usinagem dentre todos os outros fluidos utilizados. Verifica-se que os menores valores de temperatura são alcançados utilizando a ferramenta K10, que é em média 35% menor que os valores encontrados utilizando a ferramenta P30. Esse resultado pode ser atribuído ao maior valor da condutividade térmica da ferramenta K10, que por sua vez está relacionada com a composição química da ferramenta (RIBEIRO et. al., 2003).

Segundo (TRENT et al., 2000), a temperatura de corte e o gradiente de temperatura gerado na ferramenta de corte são fortes indicadores de usinabilidade. Desta forma a quantidade de calor que é transmitido para a ferramenta e seu comportamento durante o processo de remoção de cavaco, irá depender da condutividade térmica da ferramenta, das condições de corte (velocidade de corte (v_c), avanço (f) e do tipo e geometria da ferramenta de corte), condições da máquina e material da peça a usinar. Além disso, os problemas produzidos pela elevação da temperatura muitas vezes podem ser eliminados com a utilização correta do fluido de corte (RIBEIRO et. al., 2003).

3.9.3 Desgaste da ferramenta de corte

Segundo (FERREIRA, 2011) as falhas da ferramenta de corte (desgaste e ruptura) representam aproximadamente 20% da vida de uma ferramenta na máquina. Esses desgastes sofridos pelas ferramentas atuam de forma negativa na produtividade e na qualidade do produto, causas que definem esses desgastes como problemas críticos na usinagem. Já o tempo em que as ferramentas de corte apresentam vida útil, é descrito pelo período que a mesma trabalha efetivamente sem perda de corte, até que atinjam o critério de fim de vida. Os três principais tipos de desgaste de ferramentas são (fig. 3.21): desgaste de cratera, desgaste de flanco e desgaste de entalhe.

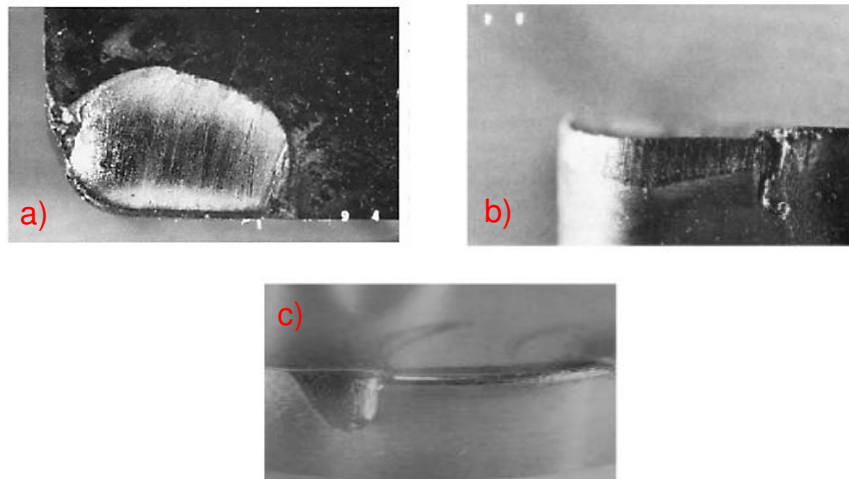


Figura 3.21 - Tipos de desgaste das ferramentas de corte: a) Desgaste de cratera, b) Desgaste de flanco e c) Desgaste de entalhe (DE SÁ, 2010).

O desgaste de cratera é gerado na superfície de saída da ferramenta, área de deslizamento do cavaco. Ocorre na maioria das vezes em altas velocidades de corte, devido as elevadas temperaturas geradas, o que favorece o mecanismo de desgaste por difusão. Na usinagem dos aços a temperatura máxima está afastada da aresta de corte. A cratera irá se desenvolver quando a temperatura é superior a 700°C, e o principal mecanismo de desgaste é o difusivo. (TRENT et al., 2000). Para resolver esse problema, no fresamento, geralmente se utiliza ferramenta de MD revestidas de TiN como última camada, adquirindo maior resistência ao desgaste de cratera pois o coeficiente de atrito é relativamente pequeno, diminuindo assim as faixas de temperatura e dificultando a difusão (MACHADO et al., 2009).

O desgaste de flanco é formado nas superfícies de folga da ferramenta, provocando perda no ângulo de folga durante o processo de corte, provocando maior contato com a peça, aumentando o atrito e consequentemente a temperatura e as forças envolvidas no corte. Isto resulta na perda de controle dimensional e em uma superfície com péssimo acabamento superficial. Este tipo de desgaste é considerado o mais comum no fresamento e o que mais causa risco a peça usinada, por isso é processo definidor na falha de uma ferramenta de corte (DINIZ et. al., 2003). Segundo (MACHADO et al., 2009) no fresamento, as ferramentas de metal duro revestidas de TiC na última camada se tornam mais resistentes ao desgaste de flanco, pois são mais resistentes à abrasão. Já o desgaste de entalhe é a avaria formada na aresta principal de corte aparecendo nas extremidades do flanco da ferramenta, tendo como prováveis características: concentrações, tensões na ferramenta e uma camada abrasiva de óxido na superfície a ser usinada (SHAW, 1984).

De acordo com a norma ISO 3685 (1977), desgastes nas ferramentas de corte de aço rápido, metal duro e cerâmica são quantificados utilizando-se os parâmetros: Profundidade da cratera ($KT = 0,06 + 0,3 f$), onde f é avanço em mm/rev, Desgaste de flanco médio ($VB_B = 0,3 \text{ mm}$), Desgaste de flanco máximo ($VB_{B\text{máx}} = 0,6 \text{ mm}$), Desgaste de entalhe (VB_N e $VC_N = 1,0 \text{ mm}$) e Falha catastrófica, como critério de vida da ferramenta (fig. 3.22)

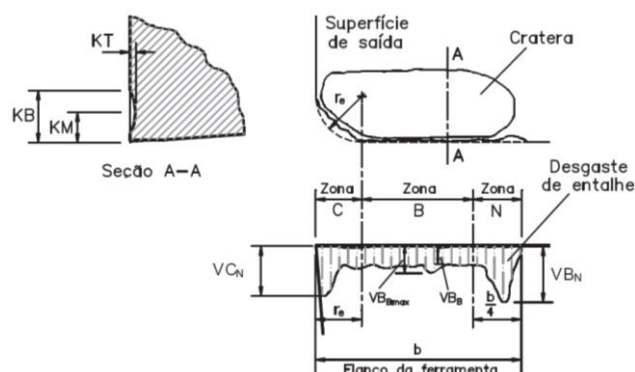


Figura 3.22 - Parâmetros utilizados para medir os desgastes das ferramentas de corte (ISO 3685, 1977).

ALMEIDA et al., (2001) desenvolveram trabalho utilizando ferramentas cerâmicas e PCBN no torneamento de peças endurecidas cujo o objetivo era prestar uma contribuição na escolha de ferramentas, avaliando o desgaste de flanco dos insertos utilizados e a rugosidade dos corpos de prova usinados. Foi usinado o aço

ABNT 5115 com as dimensões iniciais de 200 x Φ 78,10 mm, submetido ao tratamento térmico de carbonitreção até atingir a dureza de 66HCR, o processo de usinagem utilizado foi o torneamento. Para desenvolvimento dos testes foi usado um torno CNC (potência de 5,5 kW e rotação máxima de 3500 rpm) e um microscópio equipado com micrômetros de resolução milesimal para medição dos desgastes das ferramentas. Foram utilizadas cinco ferramentas de corte como pode-se ver abaixo (ALMEIDA et al., 2001):

- ✓ Três classes cerâmicas de alumina mista com geometria VNGA 160408 T02020 dos seguintes fabricantes: NTK (HC2), Sumitomo (NB90S) e Kennametal (K090).
- ✓ Duas classes cerâmicas da Kyocera com geometria VNGA 160408 T082025, sendo uma com revestimento de TiN (A66N) e outra sem revestimento (A65).
- ✓ Uma classe de PCBN da Sumitomo (BNX20) com geometria VNMA 160404 T01525.

O suporte porta-ferramentas possuía a geometria: ângulo de posição principal $\chi_r = 93^\circ$, ângulo de inclinação $\lambda_s = -5^\circ$, ângulo de saída $\gamma_o = -9^\circ$ e ângulo de ponta da ferramenta $\varepsilon_r = 35^\circ$. Os raios de ponta das ferramentas foram $r_\varepsilon = 0,4$ e $0,8$ mm para os insertos de PCBN e cerâmica, respectivamente. Os parâmetros de corte adotados foram: velocidade de corte $v_c = 180$ m/min, avanço $f = 0,08$ mm/rot e profundidade de corte $a_p = 0,15$ mm. Após definidas as ferramentas que apresentaram melhor desempenho, variou-se a velocidade de corte para $v_c=250$ m/min. O critério de fim de vida adotado foi para $VB_B = 0,30$ mm. Caso esse critério não fosse alcançado após trinta minutos de usinagem, o teste era encerrado (ALMEIDA et al., 2001).

Segundo (ALMEIDA et al., 2001) após a usinagem do aço endurecido ABNT 5115, com velocidade de corte ($v_c=180$ m/min) observou-se que as ferramentas de PCBN (BNX20) e as de cerâmicas com revestimento TiN (A66N) e sem revestimento (A65) apresentaram menores taxas de desgaste de flanco em função do tempo (fig. 3.23). No início dos testes a ferramentas A66N e BNX20 comportaram-se de maneira similar, no entanto por volta dos 12 minutos a primeira

apresentou maior desgaste. Já a A65 apresentou maior desgaste após 20 min. As outras ferramentas usadas nos testes sofreram desgaste mais acentuado.

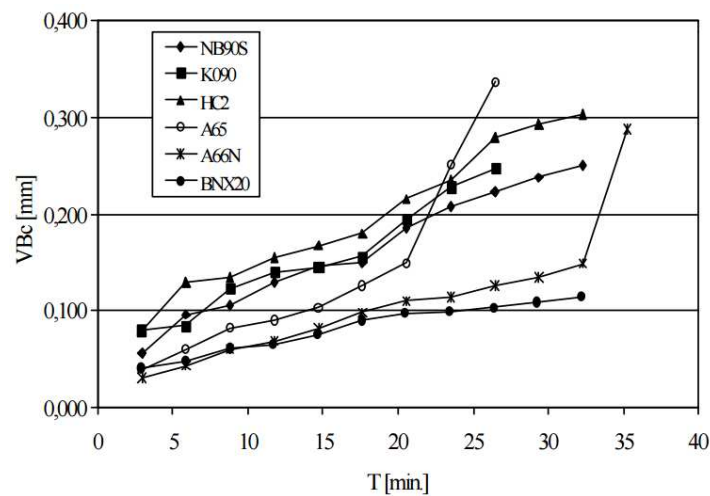


Figura 3.23 - Curvas de desgaste para $v_c=180$ m/min, $f=0,08$ mm/rot e $a_p=0,15$ mm (ALMEIDA et al., 2001).

Na figura 2.24 que ilustra as curvas de vida para as ferramentas A65 e A66N, observa-se que a ferramenta A65 apresenta comportamento superior à A66N, pois conforme a velocidade de corte vai aumentando essa última apresenta elevado desgaste de flanco, acarretando em uma diminuição acentuada no tempo de vida. Logo se conclui que para as velocidades de corte acima de $v_c = 180$ m/min a ferramenta A65 obteve o melhor comportamento entre as ferramentas cerâmicas, sendo pequena a inclinação em sua curva de vida. Já para velocidades de corte menores que $v_c = 180$ m/min a ferramenta cerâmica A66N se mostra melhor para usinagem do aço ABNT 5115 (ALMEIDA et al., 2001).

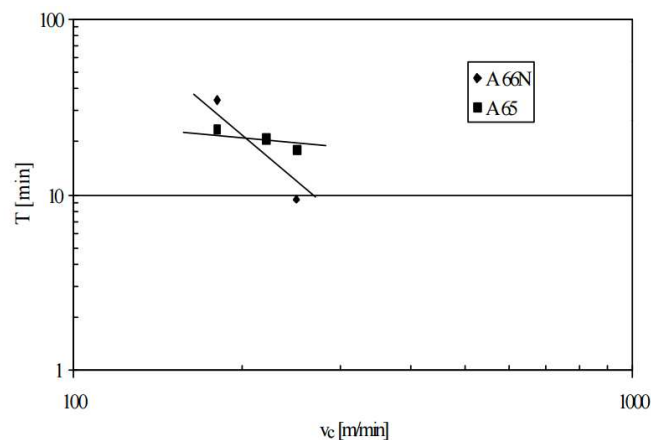


Figura 3.24 - Curvas de vida para as ferramentas A65 e A66N (ALMEIDA et al., 2001).

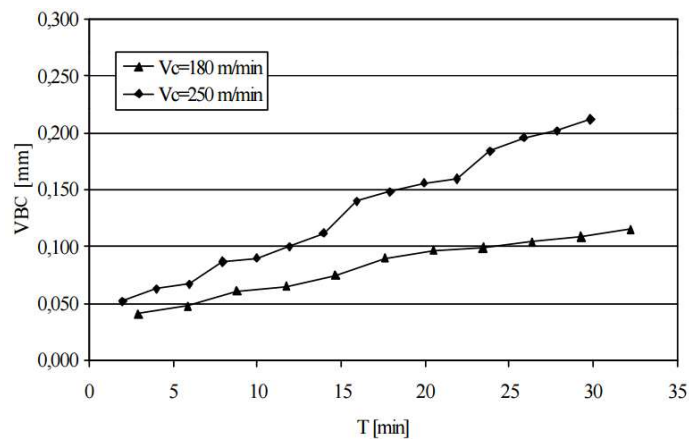


Figura 3.25 - Curvas de desgaste para $v_c=180$ e 250 m/min, $f=0,08$ mm/rot e $a_p=0,15$ mm para a ferramenta BNX20 (ALMEIDA et al., 2001).

A taxa de desgaste para a ferramenta PCBN (BNX20), para velocidades de corte $v_c = 180$ e 250 m/min é bem menor que das cerâmicas como se pode observar na figura 3.25. Logo para usinagem do aço 5115 a essas condições a ferramenta PCBN se mostra mais adequada que as demais utilizadas nesse experimento (ALMEIDA et al., 2001).

3.9.4 Fluidos de Corte

O aço é o material de maior utilização industrial e possui grande variedade e composição. Assim, todos os tipos de fluido de corte podem ser usados, e a escolha depende da severidade da operação e da resistência do aço (MACHADO et al., 2004). A uma infinidade de tipos de fluido de corte presente no mercado, com diversas composições e propriedades (tab. 3.7). No entanto, o tipo de fluidos de corte a ser usado vai além de suas próprias propriedades, depende também de fatores como: ferramenta de corte, material da peça e parâmetros de corte (STEMMER, 2005). Na tabela 3.8 lista os tipos de fluidos de corte para o aço e outros materiais dependendo da operação de usinagem.

Tabela 3.7 - Tipos, composição e propriedades dos fluidos de corte (LISBOA et al., 2013).

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.

Tabela 3.8 - Fluidos de corte recomendados para algumas operações de usinagem (Adaptado PALHANO, 2014; OBERG et al., 2012).

Material a ser cortado	Torneamento	Fresamento	Furação	Rosqueamento
Alumínio	Óleo mineral com 10% gordura ou Óleo Solúvel	Óleo Solúvel (96% água) ou óleo mineral	Óleo Solúvel (70 a 90% água)	25% óleo a base de enxofre misturado com óleo mineral
Latão	Óleo mineral com 10% gordura	Óleo Solúvel (96% água)	Óleo Solúvel	10 a 20% banha com óleo mineral
Bronze	Óleo Solúvel	Óleo Solúvel	Óleo Solúvel	30% banha com 70% óleo mineral
Aços-liga	25% óleo a base de enxofre com 75% óleo mineral	10 % banha animal com 90% óleo mineral	Óleo Solúvel	30% banha com 70% mineral
Aço ferramenta e baixo carbono	25% banha com 75% óleo mineral	Óleo Solúvel	Óleo Solúvel	25 a 40% banha com óleo mineral
Ferro Fundido	Seco	Seco	Seco	Seco ou 20% banha com 80% mineral
Ferro Maleável	Óleo Solúvel	Óleo Solúvel	Óleo Solúvel	Óleo Solúvel
Cobre	Óleo Solúvel	Óleo Solúvel	Óleo Solúvel	Óleo Solúvel

(WALLBANK et al., 1997) obtiveram bons resultados, como, redução nas componentes de força (principalmente em baixas velocidades de corte), ao usar o aço AISI 1045 com fluido de corte, água e uma emulsão de óleo mineral (pulverizado), aplicado na saída do cavaco. É aconselhável usar em condições severas (usinagem onde se tem alto avanço e profundidade e baixa velocidade de corte) e com forças de corte elevadas, usando fluido de corte lubrificante óleo puro, que é aplicado nas partes em contato. Já na usinagem branda ou leve, onde há velocidade de corte alta, usa-se a emulsão, pois é necessária principalmente a refrigeração (DINIZ et al., 2003).

Conforme (OBERG et al., 2012) o fluido de corte recomendado para a usinagem de aço com alta velocidade depende em grande medida da gravidade da operação. Geralmente operações realizadas a seco, são executadas em aço usinado em altas velocidades de corte com ferramenta de metal duro, pois deve-se ter cuidado quando se utiliza um fluido de corte. Se um fluido de corte é utilizado, ele deve ser um óleo solúvel misturado a uma consistência de cerca de 1 parte para 20 a 30 partes de água.

Segundo (EBBRELL et al., 2000) para usinagem de ligas de aço de difícil corte e resistentes ao calor, fluidos de corte a base de água são os preferidos, porque temperatura torna-se mais elevada na área de corte. E em algumas operações de usinagem, óleos de corte minerais com adição de enxofre é utilizado.

Para torneamento comum, fresamento e perfuração em aços de baixa e média resistência, utiliza-se óleo solúvel com uma consistência de óleo de 1 parte para 10 a 20 partes de água. Para aços ferramenta e aços de liga duros, um óleo solúvel pesado com uma consistência de óleo de 1 parte para 10 partes de água é recomendada para torneamento e fresamento. Já, operações difíceis, tais como roscar, e brochar, um óleo graxo-mineral sulfuclorinado é recomendada para os aços ferramenta e aços de alta resistência, e um óleo graxo-mineral sulfuclorinado ou um óleo mineral sulfurado pode ser utilizado para aços de média e baixa resistência. (OBERG, et al. 2012).

3.9.5 Acabamento Superficial da Peça

(AKASAWA et al., 2003) ao usinar aços resulfurados com e sem elementos de liga para melhoria da usinabilidade (Bi, S, Cu e Ca), observaram que a presença de sulfetos de manganês proporcionou maiores rugosidades, ou seja, pior acabamento superficial a peça. (JIANG et al., 1996) também ao realizar testes com o mesmo tipo de aço, observou que as APC's também influem na qualidade superficial, pois arestas postiças de corte menores proporcionavam melhor acabamento superficial, concluindo que a dimensão da APC influi no acabamento superficial.

(JIAO et al., 2004) comenta que em relação aos parâmetros de corte, o avanço é o que mais influencia no acabamento, pois um aumento no avanço gera um grande aumento na rugosidade. Já, a velocidade e profundidade de corte influi de forma moderada, a não ser na região da formação da aresta postiça de corte, pois nesta região o acabamento superficial piora muito. Uma vez acima da velocidade crítica, aumentos na velocidade de corte, provoca uma melhora na qualidade superficial.

(LIMA et al., 2005) ao realizarem testes de torneamento com os aços AISI 4340 e AISI D2 perceberam que a rugosidade média (R_a) dos corpos de prova diminuíram com a elevação da velocidade de corte. No entanto esses números positivos de rugosidade não acontecem apenas no torneamento. Em pesquisa realizada por (KORKUT et al., 2007) foi analisado a influência do avanço e da velocidade de corte, sobre as forças de corte, rugosidade superficial e comprimento de contato cavaco-ferramenta, no processo de fresamento dos aços AISI 1020 e AISI 1040, para cinco velocidades diferentes (44, 56, 71, 88 e 111 m/min). Ambos materiais usinados obtiveram menores valores de rugosidade com o aumento de temperatura. Também foi observado que o aço AISI 1040 apresentou pior acabamento se comparado ao AISI 1020.

No trabalho publicado por FNIDES et al., (2008), foi usinado a liga de aço duro X38CrMoV5-1, cuja composição química é apresentada na tabela 3.9, com objetivo de avaliar as forças de corte e rugosidade superficial no torneamento desse material, variando alguns parâmetros de usinagem.

Tabela 3.9 - Composição química do aço X38CrMoV5-1 (FNIDES et al., 2008).

Composição	(%)
C	0,35
Cr	,26
Mo	1,19
V	0,5
Si	1,01
Mn	0,32
S	0,002
P	0,016
Outros Componentes	1,042
Fe	90,31

O corpo de prova utilizado no teste tem dimensões de 400mm de comprimento por 75 de diâmetro com dureza de 50 HRC. O procedimento de torneamento foi feito com auxílio de um torno TOS TRENCIN, modelo SN40C (potência de 6.6 KW), para medição da rugosidade foi realizada por um rugosímetro SurfTest 301 Mitutoyo. A partilha de corte utilizada é CC650 cerâmica mista, removível, de forma quadrada, tendo designação SNGN 120.408 T01020. A geometria utilizada foi: $\chi_r = 75^\circ$; $\alpha_o = 6^\circ$; $\gamma_o = -6^\circ$; $\lambda_s = -6^\circ$. Foram utilizados a rugosidade média aritmética (R_a), a profundidade de rugosidade média (R_z) e a Rugosidade total (R_t) para análise da rugosidade superficial. Os demais parâmetros de corte podem ser vistos na legenda dos gráficos, pois varia em relação as relações apresentadas (FNIDES et al., 2008).

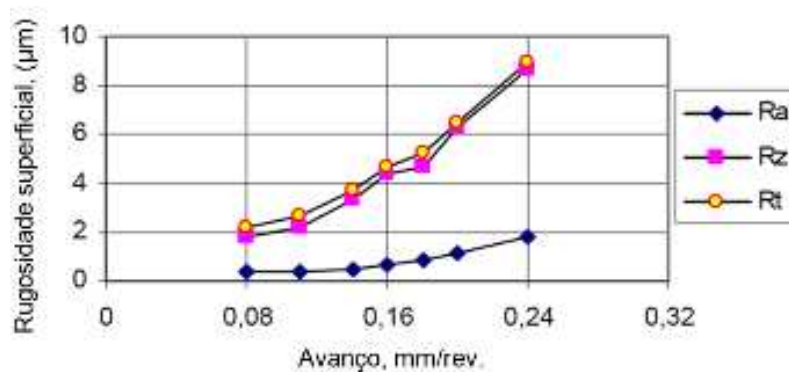


Figura 3.26 - Rugosidade da superfície vs. avanço com $v_c = 125 \text{ m/min}$; $a_p = 0,15 \text{ mm}$ (FNIDES et al., 2008).

A figura 3.26 relaciona a rugosidade superficial com o avanço, para o torneamento da liga de aço duro X38CrMoV5-1, através da análise da mesma observa-se que o avanço detém grande influência, pois o seu aumento gera sulcos helicoidais na forma da ferramenta, que se tornam mais amplos e profundos com o crescimento do avanço, o que causa resultados ruins no acabamento superficial. Por isso, recomenda-se que avanços moderados durante a rotação (FNIDES et al., 2008).

A figura 3.27, expressa a evolução dos critérios de rugosidade superficial em função da velocidade de corte. Durante os testes da liga de aço endurecido, observa-se que a medida que se usina com maiores velocidades de corte percebe-se uma melhora no acabamento superficial da peça. Quando a velocidade está entre 125 e 350 m/min, a rugosidade da superfície é rapidamente estabilizada por causa da diminuição nas forças de corte, estabilizando o sistema de usinagem. Se a velocidade é maior que 350 m/min, as curvas relativas a rugosidade superficial, crescem, devido às vibrações relacionadas com altas velocidades (FNIDES et al., 2008).

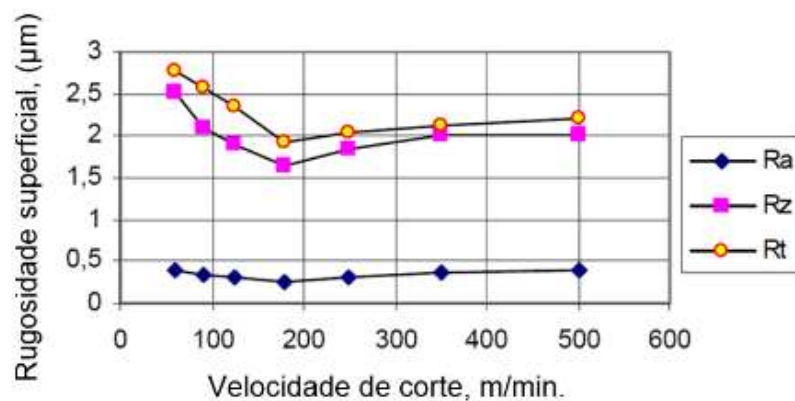


Figura 3.27 - Rugosidade da superfície vs. velocidade de corte em $f = 0,08$ mm/rev; $a_p = 0,15$ mm (FNIDES et al., 2008).

A evolução da rugosidade da superfície de acordo com a profundidade de corte (fig. 3.28) demonstra que para usinagem dessa liga de aço duro, este parâmetro causa uma influencia muito pequena se comparado com o avanço. Isso é gerado pelo aumento do tempo de contato entre a ferramenta e a peça usinada, que melhora as condições de fluxo de calor a partir da zona de corte e, por isso diminui o desgaste do processo. Para as profundidades de corte entre 0,05 - 0,6mm registramos um aumento na Rz e Rt, respectivamente, de 9,96% e 16,45%. A rugosidade Ra permanece praticamente estável. Por isso se conclui que caso se

queira maiores taxas de remoção de material, recomenda-se o aumento de profundidade de corte em vez do avanço (FNIDES et al., 2008).

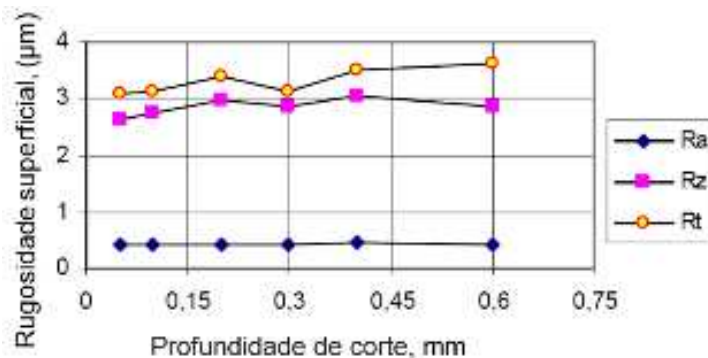


Figura 3.28 - Rugosidade da superfície vs. profundidade do corte com $v_c=125$ m/min; $f = 0,08$ mm/rev (FNIDES et al., 2008).

A figura 3.29 apresenta o efeito do desgaste de flanco VB na rugosidade da superfície. No plano experimental, para um desgaste de flanco de 0,105 milímetros, os valores dos parâmetros Ra, Rz e Rt são, respectivamente, 0,32 ; 2,15 e 2,78 μm . A rugosidade da superfície é proporcional e estreitamente relacionada ao desgaste de flanco para a liga de aço duro estudada (FNIDES et al., 2008).

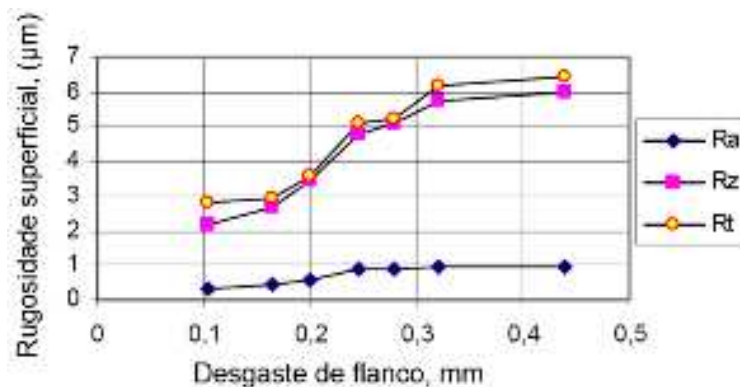


Figura 3.29 - Rugosidade da superfície vs. desgaste de flanco com $v_c = 125$ m/min; $f = 0,08$ mm/rev; $a_p = 0,15$ mm (FNIDES et al., 2008).

3.9.6 Formação de Cavaco

O material da peça está entre os principais fatores que influenciam na forma de formação dos cavacos. Quanto as condições de corte, um aumento no ângulo de saída e na velocidade de corte, acompanhados de uma redução no avanço, tende a produzir cavacos em fitas (contínuos). Em relação aos parâmetros de corte, o avanço tem maior influência na formação de cavacos se comparado com

a profundidade de corte (MACHADO et. al.,2004). A fabricante de ferramentas de corte Mitsubishi – Mitsubishi Materials descreve os tipos de cavacos formados no torneamento do aço baixo carbono S45C – AISI 1045 (tab. 3.10) e suas relações com velocidade de corte, avanço e fluido de corte, como pode-se observar nas figuras 3.30.

Tabela 3.10 - Condições de controle de cavacos no torneamento de aço (MITSUBISHI, 2015).

Tipo	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo D	Tipo E
Pequena Profundidade de Corte $d < 7\text{mm}$					
Grande Profundidade de Corte $d = 7-15\text{mm}$		—			
Comprimento da Espiral l	Sem Espiral	$l \geq 50\text{mm}$	$l \leq 50\text{mm}$ 1 ~ 5 Espirais	≈ 1 Bom	Menos que 1 Espiral Metade de uma Espiral
Notas	• Forma Irregular e contínuo. • Passa entre a peça e a ferramenta.	• Forma regular e contínuo. • Cavacos longos.	Bom	Bom	• Dispersão dos cavacos. • Trepidação • Acabamento superficial ruim • Máximo

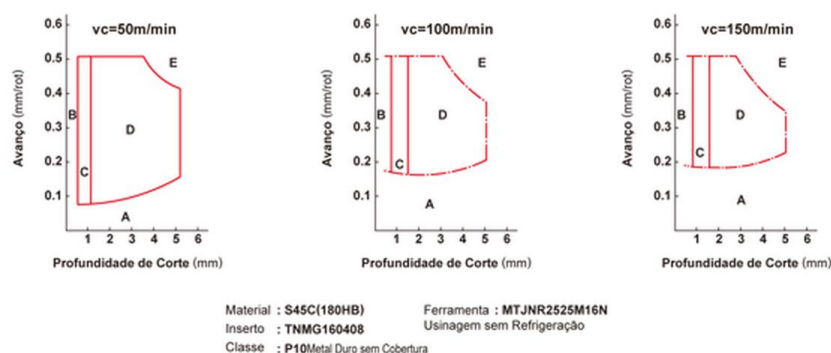


Figura 3.31a: Efeitos da velocidade de corte no campo de controle de cavacos (MITSUBISHI, 2015).

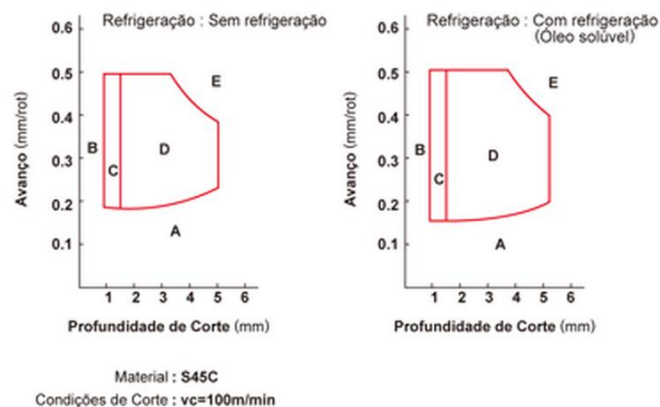


Figura 3.30b - Efeitos do fluido refrigerante no campo de controle de cavacos (MITSUBISHI, 2015).

De acordo com (BAPTISTA, 2002) a formação de cavaco se relaciona bastante com a resistência e conformidade do material usinado, pois um aumento desta propriedade facilita a quebra dos cavacos. Os elementos de liga presentes por exemplo, nos aços, exercem grande influência na formação dos cavacos. Elementos químicos como, fósforo, enxofre e chumbo proporcionam a formação de cavacos com facilidade de quebra, nesse caso, os aços são considerados de boa usinabilidade (KÖNIG et al., 2002).

SOUSA et al., (2011) investigaram experimentalmente a formação do cavaco na usinagem do aço ABNT 1045 e do ferro fundido nodular, apresentaram como objetivo principal a verificação das condições de corte na formação do cavaco. Onde foram variadas condições de corte como, velocidade de corte, avanço, fluido de corte (e forma de aplicação), revestimento da ferramenta e material da peça. Os cavacos foram caracterizados com relação ao tipo, forma, microdureza.

Foram usinadas barras de aço ABNT 1045 (dureza média de 206 HV) e ferro fundido nodular, no entanto, vamos dá ênfase ao aço, por esse material ser tema desse trabalho. A operação utilizada foi o torneamento cilíndrico externo feita em um torno mecânico IMOR modelo MAXI-II-520 (com potência máxima de 4,42 kW), com ferramentas de metal duro com revestimento TIN (SPUN 120308 MC7035 CDC P10 -Brassinter) e sem revestimento (SPUN 120308 CDC P10 - Brassinter), montadas em um suporte CSBPR 2020 K12, resultando nos parâmetros geométricos principais: $(\chi_r) = 75^\circ$; $(\gamma_o) = 6^\circ$ e $(\lambda_s) = 0^\circ$. Os insertos são quadrados sem quebra cavacos com ângulo de folga de 10° e ângulo de saída de 0° (fora do suporte) (SOUSA et al., 2011).

Utilizou-se durante os testes um dinamômetro Kistler tipo 9265B + 9441B + 9443B e um amplificador de sinais Kistler tipo 5019A para monitorar a força de corte. Foram colhidas amostras do cavaco formado para todos os testes para análise do tipo de cavaco, forma e medição da espessura. A espessura foi medida utilizando micrômetro Mitutoyo de resolução 0,01 mm, logo para cada condição de corte foram obtidos os tipos e as forma dos cavacos, que possibilitou a obtenção de vários parâmetros tais como h' , R_c , e Φ (SOUSA et al., 2011). A tabela 3.11 mostra as condições de corte.

Tabela 3.11: Parâmetros e variações utilizados nos testes (SOUSA et al., 2011).

Material	Velocidade de corte m/min	Avanço mm/rot	Fluido de corte	Revestimento
Aço 1045	30	0,138	Seco, MQF, Gotejado	Sem/Com
		0,149	Seco, MQF, Gotejado	Sem/Com
		0,204	Seco, MQF, Gotejado	Sem/Com
	100	0,138	Seco, MQF, Gotejado	Sem/Com
		0,149	Seco, MQF, Gotejado	Sem/Com
		0,204	Seco, MQF, Gotejado	Sem/Com
	200	0,138	Seco, MQF, Gotejado	Sem/Com
		0,149	Seco, MQF, Gotejado	Sem/Com
		0,204	Seco, MQF, Gotejado	Sem/Com
FoFo Nodular	30	0,138	Seco, MQF, Gotejado	Sem/Com
		0,149	Seco, MQF, Gotejado	Sem/Com
		0,204	Seco, MQF, Gotejado	Sem/Com
	100	0,138	Seco, MQF, Gotejado	Sem/Com
		0,149	Seco, MQF, Gotejado	Sem/Com
		0,204	Seco, MQF, Gotejado	Sem/Com
	200	0,138	Seco, MQF, Gotejado	Sem/Com
		0,149	Seco, MQF, Gotejado	Sem/Com
		0,204	Seco, MQF, Gotejado	Sem/Com

Os testes com ferramenta de metal duro com revestimento (tab. 3.12) e sem revestimento (tab. 3.13) levaram os autores a concluírem que para usinagem do aço ABNT 1045 os cavacos helicoidais longos predominam em quase todas as condições de testes, no entanto, em algumas situações os cavacos helicoidais passaram para espiral ou tubular e de longo para curto. Os cavacos helicoidais predominam com a utilização de fluido de corte na usinagem com ferramentas sem revestimento. Já em ferramentas com revestimento, esta forma helicoidal só não acontece em seis condições de corte. Isto nos mostra que a forma de cavaco se relaciona com a região cavaco-ferramenta, onde se observa a ação do fluido e do revestimento (SOUSA et al., 2011).

A utilização de ferramentas sem revestimento provoca um pequeno aumento na quantidade de cavacos curtos, se comparada a ferramenta contendo revestimento. A diminuição do avanço e das velocidades também proporcionou um razoável aumento na quantidade de cavacos curtos. Os cavacos helicoidais e longos são encontrados nos ensaios, com ênfase nas velocidades de 100 m/min e 200 m/min e os avanços de 0,149 mm/rot e 0,204 mm/rot. No entanto, o fluido não teve uma influência significativa, pois para uma mesma condição variando-se alguns parâmetros de corte ocorria a alteração na forma do cavaco (SOUSA et al., 2011).

Tabela 3.12 - Formas dos cavacos e condições de corte do aço ABNT 1045 para ferramentas sem revestimento (SOUSA et al., 2011).

Fluído	Avanço (mm/rot)	Vc (m/min)	Forma
Seco	0,138	30	Arco solto
Seco	0,138	100	Arco solto
Seco	0,138	200	Helicoidal arruela longo
Seco	0,149	30	Arco solto
Seco	0,149	100	Arco solto e Fita emaranhado
Seco	0,149	200	Helicoidal arruela emaranhado
Seco	0,204	30	Arco solto e Tubular curto
Seco	0,204	100	Arco solto e Hel. Arruela emar.
Seco	0,204	200	Helicoidal arruela longo
MQF	0,138	30	Espiral cônico
MQF	0,138	100	Helicoidal arruela longo
MQF	0,138	200	Helicoidal arruela emaranhado
MQF	0,149	30	Espiral cônico
MQF	0,149	100	Helicoidal arruela longo
MQF	0,149	200	Helicoidal arruela emaranhado
MQF	0,204	30	Espiral cônico
MQF	0,204	100	Helicoidal arruela longo
MQF	0,204	200	Helicoidal arruela longo
Gotejado	0,138	30	Tubular curto
Gotejado	0,138	100	Helicoidal arruela emaranhado
Gotejado	0,138	200	Helicoidal arruela longo
Gotejado	0,149	30	Tubular curto
Gotejado	0,149	100	Helicoidal arruela longo
Gotejado	0,149	200	Helicoidal arruela longo
Gotejado	0,204	30	Helicoidal arruela curto
Gotejado	0,204	100	Helicoidal arruela longo
Gotejado	0,204	200	Helicoidal arruela longo

Tabela 3.13 - Formas dos cavacos e condições de corte do aço ABNT 1045 para ferramentas revestidas (SOUSA et al., 2011).

Fluído	Avanço (mm/rot)	Vc (m/min)	Forma
Seco	0,138	30	Helicoidal arruela longo
Seco	0,138	100	Helicoidal arruela longo
Seco	0,138	200	Helicoidal arruela emaranhado
Seco	0,149	30	Helicoidal arruela longo
Seco	0,149	100	Helicoidal arruela emaranhado
Seco	0,149	200	Helicoidal arruela emaranhado
Seco	0,204	30	Helicoidal arruela emaranhado
Seco	0,204	100	Helicoidal arruela longo
Seco	0,204	200	Helicoidal arruela longo
MQF	0,138	30	Espiral cônico
MQF	0,138	100	Helicoidal arruela longo
MQF	0,138	200	Helicoidal arruela longo
MQF	0,149	30	Espiral cônico
MQF	0,149	100	Helicoidal arruela longo
MQF	0,149	200	Helicoidal arruela longo
MQF	0,204	30	Tubular curto
MQF	0,204	100	Helicoidal arruela longo
MQF	0,204	200	Helicoidal arruela longo
Gotejado	0,138	30	Tubular curto
Gotejado	0,138	100	Helicoidal arruela longo
Gotejado	0,138	200	Helicoidal arruela emaranhado
Gotejado	0,149	30	Tubular curto
Gotejado	0,149	100	Helicoidal arruela longo
Gotejado	0,149	200	Helicoidal arruela emaranhado
Gotejado	0,204	30	Arco solto
Gotejado	0,204	100	Fita emaranhado
Gotejado	0,204	200	Helicoidal arruela longo

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A maioria dos aços são de baixa usinabilidade, na maioria das vezes devido à dificuldade no controle de cavaco, produzindo assim cavacos longos e contínuos. No entanto, é notório que aços com adição de enxofre (acompanhado de manganês), fósforo, chumbo e desoxidados com cálcio apresentam bons índices de usinabilidade, principalmente por tornar os cavacos mais quebradiços e diminuir os desgastes das ferramentas, tornando assim a usinagem mais fácil e econômica.

O carbono é o elemento que influencia diretamente na usinagem do aço por meio da dureza. Logo, quanto maior a quantidade de carbono maior será a dureza do material, causado pelo aumento de cementsita na microestrutura do aço que por sua vez apresenta elevada dureza e que acelera o desgaste das ferramentas de corte.

A profundidade de corte e avanço são os parâmetros de usinagem mais influentes nas forças de usinagem. Um aumento na velocidade de corte acarreta na redução nessas forças. Para o torneamento do aço ABNT 1020 e 1045 as forças de corte com ferramentas revestidas foram menores se comparadas com ferramentas sem revestimento.

Em relação a temperatura de corte, observou-se que a mesma aumenta em função do aumento da velocidade, e quando se usina a seco. Menores valores de avanço provocam temperaturas mais baixas.

Para o torneamento do aço endurecido ABNT 5115 as ferramentas de PCBN são mais adequadas por apresentar menores taxas de desgaste de flanco se comparadas as ferramentas cerâmicas.

Todos os fluidos de corte podem ser usados na usinagem do aço, no entanto a escolha se dá pela severidade do processo e da resistência do aço. Na usinagem leve (torneamento, fresamento e furação) de aços de média resistência recomenda-se uso de óleo solúvel. Já para aços ligas de difícil usinagem, utiliza-se óleos minerais com adição de enxofre em algumas operações.

O rugosidade superficial sofre forte influência do avanço, pois o aumento do mesmo provoca um grande aumento na rugosidade. Logo, para maiores taxas de remoção de material é preferível aumentar a profundidade de corte do que o avanço. Vale destacar que na região de formação de APC o acabamento superficial se torna muito ruim.

5 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros tem-se:

- ✓ Aprofundar os estudos sobre os efeitos dos elementos de liga na usinabilidade do aço;
- ✓ Estudar a influência dos elementos químicos residuais na usinagem dos aços de corte fácil;
- ✓ Estudar as técnicas de inclusões e seus efeitos na usinabilidade dos aços de usinabilidade melhora;
- ✓ Estudar a fundo as influências do carbono nos constituintes microestruturais do aço;
- ✓ Investigar a influência do fluido de corte nos aços aplicando MQF;
- ✓ Investigar as melhorias ocasionadas pelo uso de ferramentas de corte com revestimento na usinagem do aço.
- ✓ Investigar os efeitos causados pelas ferramentas de metal duro com revestimento TiC e TiN no fresamento do aço.
- ✓ Avaliar o acabamento superficial durante a usinagem de aços endurecidos com ferramentas CBN e PCBN.
- ✓ Estudar os efeitos dos fluidos de corte, como também sua posição e modo de aplicação.
- ✓ Estudar os efeitos dos tratamentos térmicos e suas melhorias na usinabilidade dos aços.
- ✓ Estudar os modos de medição de temperatura, como também sua influência nos desgastes das ferramentas;
- ✓ Analisar a usinagem do aço com altas velocidades de corte.

REFERENCIAS

ABM – Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. **Tendências e Inovações em Aços** – Panorama do Setor Siderúrgico, 2008. Disponível em <www.abm.org.br>. Acesso em 10 março de 2015.

ABRÃO, A. M. E ASPINWALL, D. K. **The surface integrity of turned and ground hardened bearing steel**. Wear, 1986, p. 279 - 284.

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

ALMEIDA C. H. D. de, ABRÃO A. M. **A utilização de ferramentas cerâmicas e PCBN no torneamento de peças endurecidas**. UFMG, Departamento de Engenharia Mecânica, MG, 2001.

ALMEIDA, M. C. **Estudo do Efeito dos Elementos Residuais (Cr, Ni e Cu) no Torneamento do Aço-de-Corte-Fácil ABNT 12L14**, Dissertação de Mestrado em Projeto e Fabricação – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, 2005, 126p.

ALVES, Marco Aurélio Bruno. **Estudo do comportamento da demanda do aço laminado plano nos mercados interno e externo**. Dissertação (Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Produção. São Paulo, 2006.

AMARO, J. P. M. **Desenvolvimento de aços de baixa-liga de construção mecânica com usinabilidade melhorada**. In: Congresso Anual da ABM, 37. Rio de Janeiro, p. 271-281, julho de 1982.

AQUINO, I. P. **Caracterização da superfície do aço-carbono ABNT 1008 revestida com organo-silanos por meio de técnicas eletroquímicas e físico-químicas**. São Paulo, 2006.

ARFELD, E. D.; HANUM, A. L. **Aços de Corte Fácil de Baixo Carbono**. Metalurgia - ABM, vol. 33, no 241, dez. de 1977.

ASM INTERNATIONAL. **ASM HANDBOOK**. 9ed, ASM, v. 16, USA, 1991d.

BAPTISTA, André Luís de Brito. **Aspectos metalúrgicos na avaliação da usinabilidade de aços**. Revista Escola de Minas. Ouro Preto. vol.55, no.2. 2002. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-44672002000200006>. Acesso em: 11 de março de 2015.

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

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

BOULGER, F. W. “**Machinability of Steels**”, Metals Handbook Tenth Edition v.1, 1990, pp 591-602.

BRAGA, C.A.P. **Siderurgia no Brasil: história e análise da competitividade internacional do setor nos anos 70**. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Economia e Administração, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1980. 246p.

CALLISTER, W.D. **Fundamentos da ciência e engenharia dos materiais: uma abordagem integrada**, 3 ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2006. 702 p.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos**. 7º edição. São Paulo: Publicação ABM (Associação Brasileira de Metais), 2008.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia mecânica – Vol. III**. 2ª edição. Ed. McGraw-Hill, São Paulo, 1986.

CIMM. **Definição - O que é Aço de alto carbono.** Disponível em: <<http://www.com.br/portal/verbetes/exibir/636-aco-de-alto-carbono>>. Acesso em 05 de maio de 2015.

COSTA V. L.; ESCORSIM S., COSTA D.L. **Processo produtivo e produção de aço: a inserção do Grupo Gerdau S.A. no cenário mundial.** Ponta grossa, Paraná, 2007.

COSTA, D. D. **Análise dos parâmetros de torneamento de aços endurecidos.** UNICAMP, Campinas, 1993, 110 p.

DA SILVA, R. A., FARIA, A. **Estudo da microestrutura do aço SAE 1045 para a melhoria da usinabilidade. Uma proposta para a gestão dos processos de usinagem.** Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté (UNITAU). São Paulo, 2012.

DE AMORIM, H. J. **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro.** Porto Alegre, 2002.

DE JESUS C. A. G. **Sumário Mineral 2014 – Ferro.** DNPM, MG, 2014. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/ferro-sumario-mineral-2014>>. Acesso em: 15 de abril de 2015.

DE SÁ, V. M. **Avaliação do desgaste da ferramenta de metal duro revestida com TiN no fresamento do aço ABNT 4140 temperado e revenido, utilizando duas fresas de diâmetros diferentes.** Belo Horizonte, 2010.

DE SOUZA, G. A. **Caracterização microestrutural de um aço médio carbono e baixa liga (com estrutura bainítica/martensítica) via microscopia óptica.** Guaratinguetá, [s.n.], 2008.

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

EBBRELL, S.; WOOLEY, N. H.; TRIDIMAS, Y. D.; ALLANSON, D. R.; ROWE, W. B. **The effects of cutting fluid application methods on the grinding process.** International Journal of Machine Tools & manufacture: Design, Research and Application. Vol. 40, pp.209-223, 2000.

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

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

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais.** 4 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1977.

FERREIRA, M. **Avaliação do desgaste da ferramenta de metal duro revestida com TiN no fresamento do aço ABNT4140 a seco e com fluido sintético 8% em água.** Belo Horizonte, 2011.

FISCHER, C. A. **Automatestähle, Analyse und Bearbeitbarkeit.** QZ 23 (1978) 10 p. 258-262.

FNIDES, B., H. AOUCI, M. A. YALLESE. **Cutting forces and surface roughness in hard turning of hot work steel X38CrMoV5-1 using mixed ceramic.** Departamento de Mecanica. Unoversidade de Guelma, Algeria. 2008.

FURTADO M. **Cenário Mundial do Aço.** Instituto Aço Brasil, São Paulo, 22 de out. de 2013.

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

GIANFRANCESCO, E.; PALADINO, M. **New quality control systems in manufacturing free cutting steels**. Machinability testing and utilization of machining data. Amecan Society for metals. 1979. p 104-116.

GUIMARAES, W. H. S. **Gerenciamento de resíduos na indústria do aço**. Rio de Janeiro, 2009.

HUNDY, B. B. **Residual elements in carbon steels” Metallurgical developments in carbon steels**. Iron and Steel Inst. 1963 p. 75-84.

IABR. **A indústria do aço no Brasil**. Brasília, CNI, 2012. Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/sustentabilidade/downloads/livro_cni.pdf> . Acesso em 26 de abril de 2015.

IABR. **Dados de Mercado, 2011**. Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/numeros/numeros--mercado.asp>>. Acesso em 22 de abril de 2015.

IABR. **História da Siderurgia no Brasil**. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/aco/siderurgia-no-brasil--desenvolvimento.asp>>. Acesso em: 24 de abril de 2015.

IABR. **O aço – Historia**. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/aco/introducao.asp>>. Acesso em: 11 de abril de 2015.

IABR. **Por tipo de Aço** Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/aco/produtos--tipo-aco.asp>>. Acesso em: 10 de maio de 2015.

IABR. **Relatório De Sustentabilidade 2014**. Rio de Janeiro. 2014. Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/biblioteca/Relatorio%20de%20Sustentabilidade_2014_web.pdf>. Acesso em: 22 de abril de 2015.

IABR. **Siderurgia no Mundo.** Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/aco/siderurgia-no-mundo--introducao.asp>>. Acesso em: 20 de abril de 2015.

INFOMET. **Sistemas de classificação dos aços.** Disponível em: <<http://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?codConteudo=4>>. Acesso em: 02 de maio de 2015.

ISO “**Tool Life Testing with Single-Point Turning Tools**”, ISO 3685, 1977.

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

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

KANKAANPÄÄ, H., PÖNTINEN, H., KORHONEN, A. S., 1987. “**Machinability of Calcium Treated Steels Using TiN Coated High Speed Steel Tools**”, Materials Science and Technology, v.3.

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

KIRSIS, K.M., MARCUS, P.F. **Many questions, more answers: steel success strategies – Europe 2.** Paris: World Steel Dynamics, 2004. 50p.

KLAUS, F. **Etat actuel des connaissances sur l’usinabilité des aciers.** Stahl und Eisen. 16 decembre 1965, 85, n°, p 1669-1686.

KLUJSZO, L. A. C; SOARES, R. B. **Novos desenvolvimentos de aços de usinabilidade melhorada**. Artigo publicado na Revista máquinas e metais, abril 2003.

KLUJSZO, Luis Augusto Colembegue; SOARES, Rodrigo Belloc. **Aços de usinabilidade melhorada corfac na gerdau açominas s.a. Aços**. Gerdau Açominas S.A. Rio grande do Sul, 2004.

KÖENIG, W.; **Tecnologia da fabricação**: Tornear, fresar e furar, v.1, Achen: 1981.

KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren - Drehen, Fräsen, Bohren**. Springer-Verlag. 7ª Edição. Berlin, 2002.

KORKUT, I. and DONERTAS, M. A. **The Influence of Feed Rate and Cutting Speed on the Cutting Forces, Surface Roughness and Tool-Chip Contact Length During Face Milling**, Materials and Design, Surrey, Vol. 28, No. 1, 2007, pp 308-312.

LANE, J.D., Stam, J.W., Wolfe, J.B., **“General Introductory Rewiev of the Relationship Between Metallurgy and Machinability”**, Machinability (Proceedings of a Conference on Machinability), pp.65-70. London:Iron and Steel Institute, 1967.

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

LIMA, J. G. et al., 2005, **“Hard Turning: AISI 4340 High Strength Low Alloy Steel and AISI D2 Cold Work Tool Steel”**, Journal of Materials Processing Technology, Amsterdam, Vol. 169, No. 3, pp 388-395.

LISBOA, F. C., MORAES, J. J. B., HIRASHITA, M. A. **Fluidos de corte: uma abordagem geral e novas tendências**. Parcerias Globais para o Desenvolvimento Sustentável dos Sistemas Produtivos, Salvador, Bahia, 2013.

LUIZ, N. E. **Usinabilidade do Aço de Corte-Fácil Baixo Carbono ao Chumbo ABNT 12L14 com diferentes níveis de elementos químicos residuais.** - Uberlândia: [s.n.], 2007.

MACHADO, Á. R.; 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.

MALYNOWSKYJ, A. **Fabricação de aço líquido em conversor a oxigênio.** Cubatão: COSIPA, 2000. 68p.

MATSUMOTO, H., MINATOGAWA J., GALLEGOS J. **Influência da Microestrutura na Usinabilidade dos Aços Inoxidáveis AISI 630 com e sem Adição de Cálcio H.** Revista Matéria, v. 10, n. 2, São Paulo, 2005, pp. 213 – 221.

MEI, P. R.; SILVA, A. L. C. **Tecnologia dos aços:** 1. ed. São Paulo: Ed. Eletrometal e Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 1981. 380p.

MILAN, J. C. G. **Usinabilidade de Aços para Moldes de Plástico**, Dissertação para a obtenção do título de mestre em engenharia mecânica, UFU, 1999.

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

MITSUBISHI. **Controle de cavaco para torneamento.** Disponível em: <http://www.mitsubishicarbide.net/contents/mht/pt/html/product/technical_information/information/turning_chip_control.html>. Acesso em: 20 de maio de 2015.

MURPHY, D. W. **Evaluation de l'usinabilité des aciers de décolletage.** Metal Progress Juillet. 1964, 86, n° 1 p 85-89.

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

OBERG, E. **Machinery's Handbook**. 29th Edition, Industrial Press. 2012.

OLIVEIRA JR., G. G., **Fatores metalúrgicos que condicionam a usinabilidade das ligas de alumínio**. In.: Congresso Anual da ABM, 42. Salvador, Bahia, v. 4, p. 203-216, outubro de 1987.

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

OLIVEIRA, V. P. **Reconfiguração da indústria siderúrgica no estado de Minas Gerais nos anos 90 e a evolução do nível de emprego das relações de trabalho no setor**. Belo Horizonte, 2000.

PALHANO, H. B. **Estudo da usinabilidade do cobre e suas ligas**. São Luís, 2014.

PANNONI, F. D. **Princípios da proteção de estruturas metálicas em situação de corrosão e incêndio**. Coletânea do uso do aço, 1ª edição, 2002.

PANNONI, Fabio Domingos. **Aços Estruturais**. Açominas, 2009.

PEREIRA J. C. C. **Determinação de Modelos de Vida de Ferramenta e Rugosidade no Torneamento do Aço ABNT 52100 Endurecido Utilizando a Metodologia de Superfície de Resposta (DOE)**. Itajubá, 2006.

PIMENTEL, M. F.; PRADO, E. L. do. **A usinabilidade dos aços de corte fácil baixo-carbono**. Disponível em <
<http://www.guiadasiderurgia.com.br/novosb/component/content/article/104-materias20/693-acos-corte-facil-baixo-carbono>>. Acesso em 10 março de 2015.

PWC. **Siderurgia no Brasil**. 2013. Disponível em:
 <https://www.pwc.com.br/pt_BR/br/publicacoes/setores-atividade/assets/siderurgia-metalurgia/metal-siderurgia-br-13a.pdf>. Acesso em 26 de abril de 2015.

RIBEIRO L. O., DA SILVA, R. B., MACHADO Á. R. **A temperatura na interface cavaco-ferramenta sob diferentes condições de refrigeração/lubrificação.** Uberlândia – MG, 2003.

RODRIGUES, J. R. P., RODRIGUES, J. R. P., SANTOS J. C. S., SORDI, A. **Componentes da força de usinagem no torneamento de ligas não ferrosas e aços ABNT 1020 e 1045.** UNICAMP, Campinas, São Paul, 2007.

SALDARRIAGA, Pablo, A. C. **Estudo dos tempos de tensão gerados por inclusões durante o processo de torneamento em aços ABNT 1045 utilizando o método dos elementos finitos.** USP, Tese, 2008.

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

SANDVIK. Disponível em: <www.sandvik.coromant.com>. Acesso em: 05 de maio de 2015.

SHAW, M. C., **Metal Cutting Principles.** Oxford University Press, Great Britain, 1984.

SICETEL. **Análise do mercado do aço 2014.** São Paulo, 2014. Disponível em: <<http://sicetel.org.br/sicetel2014/wp-content/uploads/2014/09/Analise-do-Mercado-do-Aco-2014.pdf>>. Acesso em: 22 de abril de 2015.

SIEBERS, R., HUBAUER, A., LANGE, J., HAUKE, B. **Eco Efficiency of Strutuctural Frames for Low Rise Office Buildings. Concepts and Methods for Steel Intensive Building Projects** (P. 55-70). ECCS – European Convention for Constructional Steelwork, 2012.

SOUSA, M. N., DA SILVA, M. A., DA SILVA, M. B. **Investigação experimental da formação do cavaco na usinagem do aço ABNT 1045 e do ferro fundido nodular.** Uberlândia, MG, 2011.

SOUZA, S. A. **Classificação dos Aços Carbono e Aços de Baixa Liga**. São Paulo: Ed. Edgard Blücher Ltda., 2001. p. 53-74.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de Corte I e II**. Florianópolis: Editora da UFSC, 1989. 295p.

STEMMER, C.E. **Ferramentas de Corte I**. Edidora da UFSC, 6ª Edição, Florianópolis, 2005.

TECEM. **Tipos de aço e sua classificação segundo SAE / AISI**. Disponível em: <<http://www..com.br/wp-content/uploads/2013/03/AB05-classificacao-de-acos-segundo-a-aisi-e-sae-Tecem.pdf>>. Acesso em: 14 de abril de 2015.

TEDESCO, M. E. **Variação Dimensional e Microestrutural do Aço AISI 4140 em Peças Usinadas por Torneamento**, Caxias do Sul, 2007.

TESSLER, M. B. BARBOSA, C. A. **A usinabilidade dos aços inoxidáveis**. Metalurgia e Materiais – ABM, v. 49, n. 413, p. 32-41, janeiro de 1993.

TÖNSHOFF, H. K., CASSEL, C. **Effects of Non-Metallic Inclusions in Quenched and Tempered Steel on the Wear Behavior of Cermet Cutting Tools**, Journal of the Society of Tribologists and Lubrication Engineers, Vol. 49, 1993.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P.K. **Metal Cutting**. 4th Edition, Butterworth-Heinneann. 2000.

TROIANI, F., **Aços ressulfurados de corte fácil**. O Mundo da Usinagem, 2004. Disponível em <http://www.cimm.com.br/construtordepaginas/htm/3_20_3518.htm>, Acesso em: 12 de abril de 2015.

WALLBANK, J., MACHADO, A.R. **The Effect of Extremely Low Lubricant Volumes in Machining**, Wear, vol. 210, 1997, pp 76 - 82.

WSA. **Sustainability - Sustainable Steel**. 2014. Disponível em: <<http://www.worldsteel.org/steel-by-topic/sustainable-steel.html>>. Acesso em: 10 de maio de 2015.

WSA. **World Steel in Figures 2014**. Bélgica, 2014. Disponível em: <<https://www.worldsteel.org/dms/internetDocumentList/bookshop/World-Steel-in-Figures-2014/document/World%20Steel%20in%20Figures%202014%20Final.pdf>>. Acesso em: 23 de abril de 2015.

YAGUCHI, H. **Effect of soft additives (Bi, Pb) on formation of built-up-edge**. The Bulletin of the Bismuth Institute, 1990.

YAMANE, Y., HAYASHI, K., NARUTAKI, N. **“Free Cutting Cast Irons Based on Non- Metallic Inclusions”**, Second International Conference on the Behavior of Materials in Machining, ,1991.

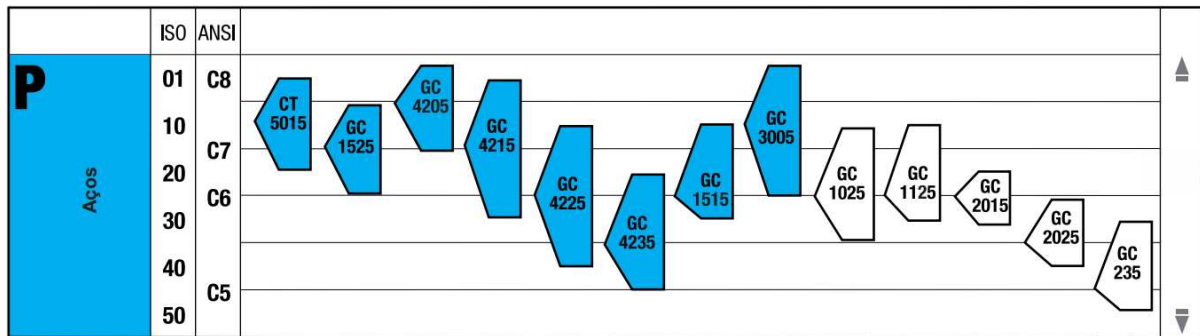
YANARDAG, E. **Effect of spherodizing on machinability characteristics and microstructure of medium carbon steels**, 2004.

ZOLIN, I. **Materiais de construção: mecânica**. 3. Ed, Universidade Federal de Santa Maria: Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

ANEXOS

ANEXO I: FERRAMENTAS DE CORTE (CLASSE P) RECOMENDADAS PARA USINAGEM DO AÇO

✓ TORNEAMENTO



AÇOS: Descrição Classe Básica

CT5015 (HT) – P10 (P01-P20)

Um cermet sem cobertura com excelente resistência para arestas postíças e deformação plástica. Uma nova fórmula com melhor tenacidade. Para acabamento de aços baixa-liga e aços-ligas quando for exigido uma alta qualidade de acabamento superficial e/ou baixa força de corte. $f_n \times a_p < 0.35 \text{ mm}^2$

GC1515 (HC) - P25 P10-P30

Micro-grãos de metal duro com cobertura fina de CVD. Recomendada para acabamento de aços baixo-carbono até aços baixa-liga e outras ligas de aço "pastosas" usando velocidades de corte de médias a baixas. Excelente quando for necessário um acabamento superficial de qualidade, ou ação de corte viva. Grande resistência a choques térmicos a torna adequada para cortes levemente intermitentes.

GC1525 (HC) – P15 (P05-P25)

Um cermet com cobertura PVD. Resistência ao desgaste muito alta e boa tenacidade da aresta. Para acabamento e semiacabamento de aços baixa-liga e baixo-carbono. Deve ser usada quando for exigida alta qualidade de acabamento superficial em velocidades de corte médias a altas. $f_n \times a_p < 0.35 \text{ mm}^2$.

GC4205 (HC) – P05 (P01-P15)

Uma classe com cobertura CVD e excelente resistência com relação ao desgaste por craterização e deformação plástica. Recomendada para condições estáveis e quando for necessária uma taxa superior de remoção de metal em aplicações de usinagem média ao desbaste em aços. É capaz de suportar altas temperaturas sem sacrifício da segurança da aresta, na usinagem com e sem refrigeração.

GC4215 (HC) - P15 (P01-P30)

Classe de metal duro com cobertura CVD para acabamento e desbaste de aços e aços fundidos em aplicações com cortes contínuos a levemente interrompidos. Substrato com gradiente otimizado em dureza e tenacidade e cobertura resistente ao desgaste. É capaz de resistir a altas temperaturas sem sacrifício da segurança da aresta em aplicações com e sem refrigeração.

GC4225 (HC) - P25 (P10 - P40)

Classe de metal duro com cobertura CVD para acabamento ao desbaste de aços e aços fundidos. Substrato com gradiente com dureza otimizada e tenacidade para torneamento de aços em combinação com uma cobertura espessa, resistente ao desgaste. Essa classe pode lidar com cortes contínuos, bem como com cortes interrompidos e altas taxas de remoção de metal. É uma classe indicada para uma ampla área de aplicação.

GC4235 (HC) - P35 (P20-P45)

Classe de metal duro com cobertura CVD para desbaste de aços e aços fundidos em condições desfavoráveis. Substrato com gradiente e dureza otimizada para tenacidade no torneamento de aços em combinação com uma cobertura espessa e resistente ao desgaste. A segurança da aresta permite à classe lidar com cortes interrompidos e com altas taxas de remoção de metal.

GC3005 (HC) - P10 (P01-P25)

Classe de metal duro com cobertura CVD e adesão muito boa ao substrato duro, capaz de resistir a altas temperaturas. Para acabamento e semiacabamento de aços alta-liga com altas velocidades de corte.

Legenda:

Azul – classe básica.

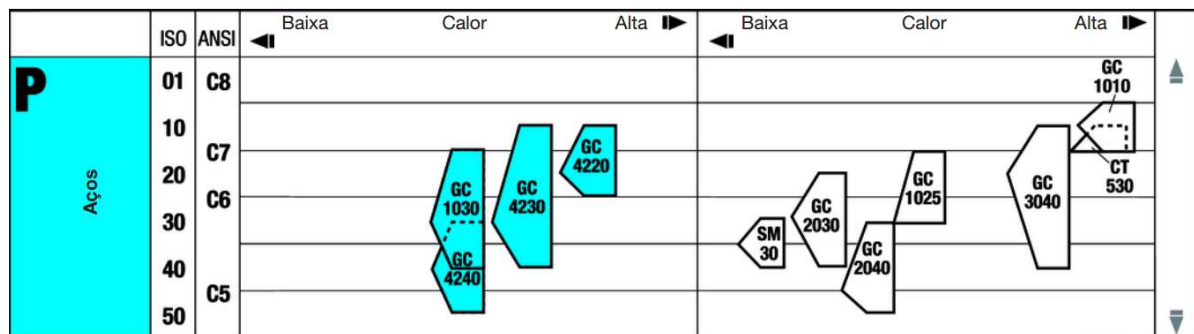
Branca – classe complementar.

HW - Metal duro sem cobertura contendo principalmente carboneto de tungstênio (WC).

HC - Metais duros como acima, porém com cobertura.

Figura 3.32 – Ferramentas de metal duro (Classe P) recomendadas para o torneamento do aço (Adaptada SANDVIK, 2015).

✓ FRESAMENTO



AÇOS: Descrição Classe Básica

GC4230 (HC) - P30 (P10-P40)

Classe de uso geral para usinagem moderna com um bom equilíbrio entre a segurança e a produtividade. Classe com cobertura de metal duro para fresamento leve a pesado (com ou sem refrigeração) em aços sem liga, ou aços baixa-liga. Primeira escolha para faceamento e uma otimizadora para produtividade mais elevada no fresamento de cantos a 90°.

GC4220 (HC) - P20 (P10-P25)

Classe de metal duro otimizado para melhor produtividade no fresamento de aços. Classe para usinagem sem refrigeração com alta taxa de remoção de metal.

GC4240 (HC) – P40 (P35 – P50)

Classe de metal duro com cobertura para operações que exigem tenacidade no fresamento de aços. Para os conceitos de cantos a 90° e fresamento de topo, a classe GC4240 deve ser utilizada em condições mais estáveis como balanço curto, faceamento, fresamento de cantos a 90° raso, etc. Para outros conceitos, a classe GC4240 é a primeira escolha, ou a escolha back-up em operações difíceis. Benefícios da segurança. Adequada para produção de pequenos lotes de materiais mistos. Funciona bem com ou sem refrigeração.

GC1030 (HC) – P30 (P15 – P40)

Classe de metal duro com cobertura PVD. A GC1030 é a primeira escolha em condições instáveis como usinagem com Long Edge, entupimento de cavacos, cantos profundos a 90 graus e fresamento de topo, longos balanços, operações de tornofresamento etc. Pode ser usada como escolha alternativa em operações difíceis. Em combinação com as pastilhas retificadas na periferia, é a primeira escolha para materiais pastosos (ex.: aço com baixo teor de carbono).

Legenda:

Azul – classe básica.

Branca – classe complementar.

HW - Metal duro sem cobertura contendo principalmente carboneto de tungstênio (WC).

HC - Metais duros como acima, porém com cobertura.

HT - Metal duro sem cobertura, também chamado cermet, contendo principalmente carbonetos de titânio (TIC) ou nitretos de titânio (TIN) ou ambos.

Figura 3.33 - Ferramentas de metal duro (Classe P) recomendadas para o fresamento do aço (Adaptada SANDVIK, 2015).

✓ FURAÇÃO

	ISO	ANSI	Brocas inteiriças/soldadas	Brocas com pastilhas intercambiáveis
P Aços	01	C8		
	10			
	20	C7	H10F, GC1220, GC4234, P20	GC4024, GC4014
	30	C6	GC34, GC1020	GC1044, GC4034, GC4234
	40			
	50	C5		

AÇOS: Descrição Classe Básica

GC1220 (HC) – P25 (P10-P30)

Substrato de metal duro de finos grãos com excelente combinação de dureza e tenacidade. Cobertura pelo processo PVD de 3-5 microns de nano multicamadas de TiAlN, proporcionando uma segurança da aresta muito boa. Classe de primeira escolha para produção mista em todos os tipos de materiais.

GC1020 (HC) – P25 (P10-P30)

Classe com cobertura pelo processo PVD para furação da maioria dos materiais. Substratos de finos grãos com cobertura TiCN+TiN. Ampla área de aplicação.

P20 (HC) – P20 (P10-P30)

Cobertura de TiN pelo processo PVD, com substrato resistente ao desgaste. Para aplicações gerais em aços.

H10F (HW) – P25 (P15-P35)

Classe de metal duro de finos grãos sem cobertura e com boa resistência da aresta. Adequada para furação na maioria dos materiais com velocidades e avanços baixos.

GC4234 (HC) – P20 (P10-P30)

Substrato de metal de finos grãos com excelente combinação de dureza e de tenacidade. Com cobertura de PVD com 3-5 microns de nano multicamadas de TiAlN, proporcionando uma segurança muito boa da aresta.

GC34 (HC) – P30 (P15-P35)

Substrato de metal duro de finos grãos combinado com uma camada de cobertura PVD (nanoestruturada) de TiAlN. Propicia segurança muito boa da aresta de corte devido ao comportamento de tenacidade e alta dureza da classe. A cobertura proporciona uma superfície suave para excelente escoamento de cavacos. Uma boa escolha para produção mista em todos os tipos de materiais.

Legenda:

HW - Metal duro sem cobertura contendo principalmente carboneto de tungstênio (WC).

HC - Metais duros como acima, porém com cobertura.

Figura 3.34 - Ferramentas de metal duro (Classe P) recomendadas para a furação do aço (Adaptada SANDVIK, 2015).