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

LUANA ROBERTA PACHECO BITTENCOURT

ESTUDO DA USINABILIDADE COM BASE NOS ASPECTOS METALÚRGICOS DOS AÇOS

São Luís - MA
2016

LUANA ROBERTA PACHECO BITTENCOURT

ESTUDO DA USINABILIDADE COM BASE NOS ASPECTOS METALÚRGICOS DOS AÇOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica e Produção, ao 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

São Luís - MA

2016

Bittencourt, Luana Roberta Pacheco.

Estudo da usinabilidade com base nos aspectos metalúrgicos dos aços / Luana Roberta Pacheco Bittencourt. – São Luís, 2016.

57f.

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual do Maranhão, 2016.

Orientador: Prof. Dr. Jean Robert Pereira Rodrigues.

1.Aços. 2.Usinabilidade. 3.Aspectos metalúrgicos. 4.Parâmetros do processo. I.Título

CDU: 621.9.01

LUANA ROBERTA PACHECO BITTENCOURT

ESTUDO DA USINABILIDADE COM BASE NOS ASPECTOS METALÚRGICOS DOS AÇOS

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 para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovada em: / /

BANCA EXAMINADORA

_____

Prof. Dr. Jean Robert Pereira Rodrigues

Universidade Estadual do Maranhão

ORIENTADOR

_____

Prof. Dr. Adilto Pereira Andrade Cunha

Universidade Estadual do Maranhão

Professor da UEMA

_____

Prof. Dr. José Roberto Pereira Rodrigues

Universidade Federal do Maranhão

Coordenador do Curso de Engenharia Química - UFMA

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por me fazer acreditar sempre e nunca desistir dos meus sonhos, e por todas as bençõe concedidas e oportunidades para o desenvolvimento desse trabalho.

Ao Prof. Dr. Jean Robert pela orientação, por ter contribuído para minha formação, sempre disposto a esclarecer todas minhas dúvidas e desempenhado um excelente trabalho como orientador.

A minha mãe Cleonice Maria de Sá Pacheco, por ter me ensinado o caminho correto e estar presente em todos os momentos da minha vida, por ter acreditado em mim, dando-me força na minha jornada.

Ao meu amado marido Marcos Wilbur Luiz Bittencourt pelo incentivo, por me incentivar na formação deste trabalho, me ajudando a tornar-me uma pessoa melhor e confiar no meu trabalho, sempre buscando o melhor para mim.

A todos aos meus amigos do curso de Engenharia Mecânica por todo apoio, incentivo e momentos que tivemos de estudos em grupo.

Aos amigos e profissionais que tanto contribuíram para concretização desse trabalho.

Aos Professores do Departamento de Engenharia Mecânica da UEMA, por intermédio dos quais recebi conhecimentos teórico para chegar até aqui.

A todas as outras pessoas que contribuíram direta ou indiretamente para a realização desse trabalho.

“Mas os que esperam no Senhor, renovarão as suas forças, subirão com asas como águias, correrão e não se cansarão, caminharão e não se fatigarão”.

Isaías 40:31 – Bíblia Sagrada

RESUMO

A operação de usinagem representa 50% do custo de produção em componentes mecânicos. O estudo dos aços com seus respectivos aspectos metalúrgicos como: a composição química, trabalho a frio, a microestrutura e as inclusões têm um efeito acentuado na usinabilidade dessa classe de materiais metálicos. O presente trabalho tem por objetivo avaliar a usinabilidade do aço frente aos aspectos metalúrgicos, por meio de um apanhado de pesquisas bibliográficas. Foi possível constatar que no trabalho a frio para ter o aumento da dureza e diminuição da ductilidade de aços é promover seu encruamento. Constatou-se também que quanto a questão da composição química e microestrutura é possível verificar respectivamente, que via a mudança de fase, ocasionada por tratamento térmico afeta a sua usinabilidade e o aumento de teor de enxofre no aço resulta na formação de cavacos pequenos na usinagem, favorecendo um menor desgaste de flanco da ferramenta de corte. É possível verificar que conhecendo bem a usinabilidade do aço, suas características e adicionando alguns elementos de liga e conhecendo alguns parâmetros do processo tem-se o processo melhorado.

Palavras-chave: Aços. Usinabilidade. Aspectos Metalúrgicos. Parâmetros do Processo.

ABSTRACT

The machining operation represents 50% of the cost of production in mechanical components. The study of its actions with its metallurgical effects as: chemical composition, cold work, microstructure and inclusions have a marked effect on the machinability of this class of metallic materials. The present work has the objective of evaluating a machinability of the steel in front of few metallurgists, through a collection of bibliographical researches. It was possible to verify that there is no cold work to promote the increase of the hardness and decrease of the ductility of steel and to promote its hardening. It was also found that on the matter of the chemical composition and the microstructure it is possible to check, respectively, by means of a phase change, a thermal treatment at a machinability and the increase of the sulfur content, Favoring less wear of the tool flank Cutting. It is possible to verify that the well-being of steel, its characteristics and other alloying elements and knowing some of the process processes has improved process.

Keywords: Steels. Machinability. Metalworkers aspects. Process parameters.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Produção do Aço 22

Figura 2 - Fluxo de Produção do Aço. 24

Figura 3 - Componentes da Força de Usinagem. 27

Figura 4 - Força de Corte em função da espessura do Material 28

Figura 5 - Distribuição da Temperatura do Cavaco. 29

Figura 6 - Fatores Influentes sobre a Qualidade Superficial. 32

Figura 7 - Formas de Cavacos: (a) fita, (b) helicoidal, (c) espiral, (d) em lascas. 33

Figura 8 - Cavacos obtidos nos ensaios 1 (a) e 2 (b). 35

Figura 9 - Cavacos obtidos nos ensaios 3 (c) e 4 (d). 36

Figura 10 - Cavacos obtidos nos ensaios 5 (e) e 6 (f). 36

Figura 11 - Cavacos obtidos nos ensaios 7 (g) e 8 (h). 37

Figura 12 - Cavacos obtidos nos ensaios 9 (i) e 10 (j). 38

Figura 13 - Efeito do Encruamento (por trefilação a frio) na Vida da Ferramenta. 40

Figura 14 - Efeito da Microestrutura na Usinabilidade do Aço 4140. 41

Figura 15 - Efeito da Microestrutura na Usinabilidade do Aço 4140. 42

Figura 16 - Relação entre o Teor de Enxofre e a Deformação do Cavaco a Vários Avanços em Testes de Torneamento. 44

Figura 17 - Relação entre o Teor de Enxofre e o Tamanho do Cavaco. 44

Figura 18 - Efeito do Teor de Carbono sobre o Índice de Usinabilidade de Barras de Aço B1113 em Testes de Torneamento. 45

Figura 19 - Efeito do Teor de Silício sobre o Índice de Usinabilidade de Barras de Aço B1113 em Testes de Torneamento. 46

Figura 20 - Efeito da Porcentagem de Fósforo Equivalente sobre a Taxa de Produção para os Aços do Grau 12XX, com e sem adição de Chumbo. 49

Figura 21 - Efeito da Porcentagem de Fósforo equivalente sobre as Condições de Usinagem para os Aços do Grau 12XX, com e sem Adição de Chumbo. 50

Figura 22 - Efeito da Percentagem de Fósforo Equivalente sobre as Condições de Usinagem para os Aços do Grau 12XX, com e sem Adição de Chumbo. 50

LISTA DE TABELA

Tabela 1 - Vida da Ferramenta (Percurso de Corte) de Torneamento para Diversos Avanços e Velocidades de Corte 31

Tabela 2 - Síntese dos dados de entrada e da investigação dos cavacos gerados..34

Tabela 3 - Melhores Condições de Usinagem em Função do Teor de Carbono dos Aços.....43

Tabela 4 - Efeito do teor de nitrogênio sobre o Desempenho de Barras de Aço Trefiladas, Utilizadas na Produção de Tambores de Porcas de Parafuso. 47

Tabela 5 - Inclusões Presentes nos Aços. 48

Tabela 6 - Composição Química de Alguns Aços Ressulfurados.....51

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 14

2 OBJETIVOS 16

2.1 Objetivo Geral 16

2.2 Objetivo Específicos 16

3 JUSTIFICATIVA 17

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 18

4.1 Histórico Dos Aços 20

4.1.1 Produção dos aços 21

4.1.2 Etapas 23

4.1.3 Importância do Aço e Suas Principais Aplicações 25

5 INFLUÊNCIA DA USINAGEM DOS AÇOS NOS PARÂMETROS DO PROCESSO 27

5.1 Força de Usinagem 27

5.2 Temperatura de Corte 28

5.3 Desgaste da Ferramenta de Corte 30

5.4 Acabamento Superficial da Peça 31

5.5 Formação do Cavaco 33

6 ASPECTOS METALÚRGICOS QUE INTERFEREM NA USINABILIDADE DOS AÇOS 39

6.1 Trabalho a Frio 39

6.2 Microestrutura 41

6.3 Composição Química 43

6.3.1 Efeito do Enxofre 43

6.3.2 Efeito do Carbono e do Silício 45

6.3.3 Efeito do Fósforo e do Nitrogênio 46

6.4 Inclusões 47

6.4.1 Efeito das Inclusões Metálicas 48

6.4.2 Efeito das Inclusões Não Metálicas 51

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS 53

REFERÊNCIAS 55

1 INTRODUÇÃO

Os materiais têm sido de grande importância na cultura humana desde os tempos mais longínquos para o uso em diversas operações como: transportes, habitação, comunicação, recreação, proteção, ferramentas de trabalho etc. enfim, em tudo que está ligado a sua sobrevivência. Entretanto os primeiros seres humanos, tiveram acesso apenas a um número limitado de materiais, os naturais (Passos, 2006).

A compreensão dos cientistas com o passar dos tempos sobre as relações entre os elementos estruturais deu-lhes as condições de moldar, em grande parte, as características dos materiais. Assim, dezenas de milhares de materiais diferentes foram desenvolvidos com características relativamente específicas que atendem as necessidades de nossa moderna e complexa sociedade; estes incluem variados tipos de materiais como: metais, plásticos, vidros e fibras. O desenvolvimento de muitas tecnologias que tornam o nosso dia-a-dia tão confortável tem estado diretamente ligado com a acessibilidade a materiais adequados (Callister, 2006).

A usinagem é um dos processos mais importantes na produção de componentes mecânicos no universo tão amplo da manufatura. Estima-se que cerca de 10% do produto interno bruto dos Estados Unidos estejam associados a processos de usinagem, incluindo gastos com ferramenta e custos com mão de obra e com o capital investido (Shaw, 2005).

O aço detém vários campos de aplicação de modo geral, tornando-se a liga metálica mais importante na indústria mecânica, devido suas excelentes 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*., 2009).

Segundo Pimentel *et al.* (2015), 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 como 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.

Materiais de aço são compostos principalmente de ferro e carbono, muitas vezes com uma mistura modesta de elementos de liga. A maior diferença entre materiais de ferro fundido e aço é o teor de carbono. Materiais de ferro fundido são composições de ferro e carbono, com um mínimo de 1,7% de carbono para 4,5% de carbono. O aço tem um teor de carbono de 0,05% a 2,11% (SCHNEIDER, 2009).

O objetivo deste trabalho é avaliar os aspectos metalúrgicos dos aços como: microestrutura, composição química, inclusões, trabalho a frio e os Parâmetros do processo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

- Estudo da usinabilidade com base nos aspectos metalúrgicos de aços.

2.2 Objetivo Específicos

- Analisar os efeitos dos parâmetros do processo (Força de Usinagem, Qualidade Superficial da Peça, Formação de Cavacos; Temperatura de Corte, Desgaste da Ferramenta de Corte) na usinagem;
- Discutir sobre os fatores influentes na usinabilidade dos aços, como também estudar os aspectos metalúrgicos que interferem na usinabilidade.
- Estudar o trabalho a frio e avaliar a influência de materiais laminados ou estudados na usinabilidade dos aços;
- Estudar o efeito da microestrutura na usinabilidade dos aços frente aos processos de usinagem;
- Investigar o efeito da composição química dos aços na sua usinabilidade;
- Buscar técnicas que tornam a usinagem do aço mais simples e econômica;

3 JUSTIFICATIVA

Conforme Trent, (2000) a usinagem de um material é entendida como a facilidade ou a dificuldade de remoção de um material durante a usinagem e pode ser avaliada através da força de usinagem (F_u), da temperatura de corte (T_c), do acabamento superficial, do controle do cavaco, da taxa de desgaste da ferramenta de corte; e de outras análises, dependendo da necessidade, disponibilidade de infraestrutura, facilidade, podemos levar em conta também a vibração mecânica (V_b) do sistema peça-ferramenta, sinais de emissão acústica, entre outros.

Os aços fazem uma grande percentagem dos materiais utilizados na indústria metálica, para diversas aplicações, devido ter boas propriedades mecânicas, grande disponibilidade e custo relativamente baixo. Apesar de alguns aços serem fáceis de usinar, a maioria dos metais desse grupo é de baixa usinabilidade. Talvez, um dos maiores problemas na usinagem dos aços é a produção de cavacos contínuos e, geralmente, longos. Outros fatores também contribuem para dificultar a usinagem, entre eles: o alto ponto de fusão, as altas temperaturas desenvolvidas na superfície das ferramentas (o que acontece a uma certa distância da aresta de corte) e as altas tensões de compressão (SHAW, 2005).

Tem - se procurado com o desenvolvimento tecnológico, obter materiais que respondam uma boa usinabilidade. Um dos fatores metalúrgicos de importância na usinabilidade é a presença de elementos de liga. Existem alguns elementos de liga que têm efeito positivo na usinabilidade, como o chumbo, o enxofre e o fósforo, que geralmente estão presentes em aços de usinabilidade melhorada (DINIZ et al., 2006).

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo Amorim (2003), a usinagem é um termo que abrange processos de fabricação mecânica por geração de superfícies através da retirada de material, conferindo dimensão e forma à peça. Uma definição bastante ampla do termo usinagem foi descrita por Ferraresi (1977), segundo ele, usinagem são operações que ao conferir à peça a forma, ou as dimensões ou o acabamento, ou qualquer combinação destes três itens, produzem cavaco.

No processo de usinagem de um metal, no seu início do corte, a ferramenta penetra no material da peça, e ela deforma elástica e plasticamente. Logo em seguida tal material irá ultrapassar a tensão máxima de cisalhamento do material e começar 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 esse trabalho de usinagem é que vai caracterizar a usinabilidade do mesmo (BAPTISTA, 2002).

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*., 2006). 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).

Como regra geral, o aço puro carbono, com teor de carbono menor que 0,3% deve estar em seu estado de maior dureza possível, para se obter uma boa usinabilidade. Isto é obtido quando ele é trefilado a frio e possui uma granulação fina. Para altos teores de carbono (C > 0,7%) melhores resultados de usinabilidade são obtidos quando a estrutura esferoidal estiver presente. Nos aços ligas, os elementos de liga são adicionados, geralmente, para aumentar a dureza e produzir uma matriz

mais resistente, tendo uma maior tendência ao encruamento. Do ponto de vista de usinabilidade os aços ligas produzirão melhores resultados que os aços comuns ao carbono (com o mesmo teor de carbono), quando a dureza daqueles forem menores que as dos aços comuns (SHAW, 2005).

Adição de enxofre (juntamente com o manganês), chumbo ou telúrio levam à produção de aços-de-livre-corte (ou aços de corte-fácil). Os aços desoxidados com cálcio geram menos desgaste nas ferramentas de corte, do que quando a desoxidação é feita com o silício. O mecanismo preciso com que essas adições atuam, melhorando a usinabilidade, ainda não está totalmente esclarecido (possivelmente pela formação de uma camada com constituintes de menores resistências ao cisalhamento que a própria matriz), mas elas permitem velocidades de corte mais elevadas, proporcionam vidas de ferramentas maiores, melhores acabamentos superficiais, menores forças de corte, menores temperaturas de corte, menores potências consumidas e melhor controle dos cavacos (MACHADO *et al*., 2009)

As ferramentas mais utilizadas na usinagem dos aços são os aços-rápidos e o metal duro. O limite de emprego das ferramentas de aço-rápido, está na dureza de 300 HV do aço. Para as ferramentas de metal duro, este limite é maior, isto é, 500 HV (TRENT, 2000). Quando se usa ferramentas de aço-rápido, uma cratera se desenvolve por difusão e cisalhamento plástico superficial. A velocidades de corte mais altas, as ferramentas podem se deformarem plasticamente sobre tensão de compressão. Quando se usa metal duro WC + CO (classe K) com altas velocidades de corte, acontecerá o desenvolvimento rápido da cratera e do desgaste do flanco por difusão. Adições de TiC e TaC e NbC às ferramentas (classe P), aumentarão as suas vidas. A velocidades de corte mais elevadas, a deformação da aresta por tensão de compressão pode acontecer e o mecanismo de atrito vai prevalecer à velocidades de corte baixas (TRENT, 2000).

4.1 Histórico Dos Aços

A história do Aço 1770 A.C. A primeira indústria do ferro apareceu ao sul do Cáucaso, 1700 A.C., entre os Hititas. O minério de ferro apresentava-se sob a forma de pequenas pedras à flor da terra. Os Hititas aqueciam a mistura (minério e carvão vegetal) dentro de um buraco feito no solo e dessa maneira obtinham uma massa pastosa que era, em seguida, batida para que se desprendesse a escória. O que restava de massa de ferro era depois forjado. O instrumento para produção de ferro se aperfeiçoou e evoluiu até se tornar um forno semi-enterrado no qual se colocava camadas de ferro e carvão vegetal, de acordo com os princípios aplicados pelos Hititas nos fornos primitivos (METAL TUBO, 2016).

O ar insuflado por um fole manual ativava a combustão. A temperatura atingia 1000-1200º C e assim se obtinha por redução, isto é, por eliminação do oxigênio do minério, uma massa pastosa de ferro pesando alguns quilos. 1100 A.C. Depois do Cáucaso, o ferro apareceu no Egito em torno de 1100 A.C. Posteriormente, foi encontrada em regiões às quais, hoje, damos o nome de Grécia (1100 A.C), Áustria (920 A.C), Itália (600 A.C), Espanha França, Suíça (500 A.C) (METAL TUBO, 2016).

Segundo Malynowskyj et al. (2000), o ferro passou a ser ainda mais importante para a humanidade no período da revolução Industrial, que foi iniciada na Inglaterra no início do século XIX. 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 Gilchrst Thomas que elimina o excesso de fósforo, promovendo melhoras na qualidade dos aços e viabilizou sua ampliação no processo industrial, através da fabricação de maquinas de vapor e uso no transporte ferroviário.

Segundo IABR (2016), o aço está sempre presente no nosso cotidiano como no almoço de domingo, no caminho para o trabalho ou nas atividades em casa. Resistente, durável e 100% reciclável, o aço é essencial na produção de residências,

veículos, utilidades domésticas e bens de consumo em geral. É tão presente no dia a dia das pessoas que, muitas vezes, torna-se invisível. O aço é material fundamental nas construções em geral. Em um prédio ou numa casa, ele marca sua presença desde a base até os acabamentos, dando segurança e estabilidade para toda a estrutura.

4.1.1 Produção dos aços

Segundo a Indústria do Aço no Brasil as usinas de aço do mundo inteiro classificam-se segundo o seu processo produtivo como mostra a figura 1:

- **Integradas** - que operam as três fases básicas: redução, refino e laminação; participam de todo o processo produtivo e produzem aço;

- **Semi-integradas** – que operam duas fases: refino e laminação. Estas usinas partem de ferro gusa, ferro esponja ou sucata metálica adquiridas de terceiros para transformá-los em aço em aciarias elétricas e sua posterior laminação. Além disso, a (IABR, 2016) fala em função dos produtos que preponderam em suas linhas de produção, as usinas também podem ser assim classificadas:

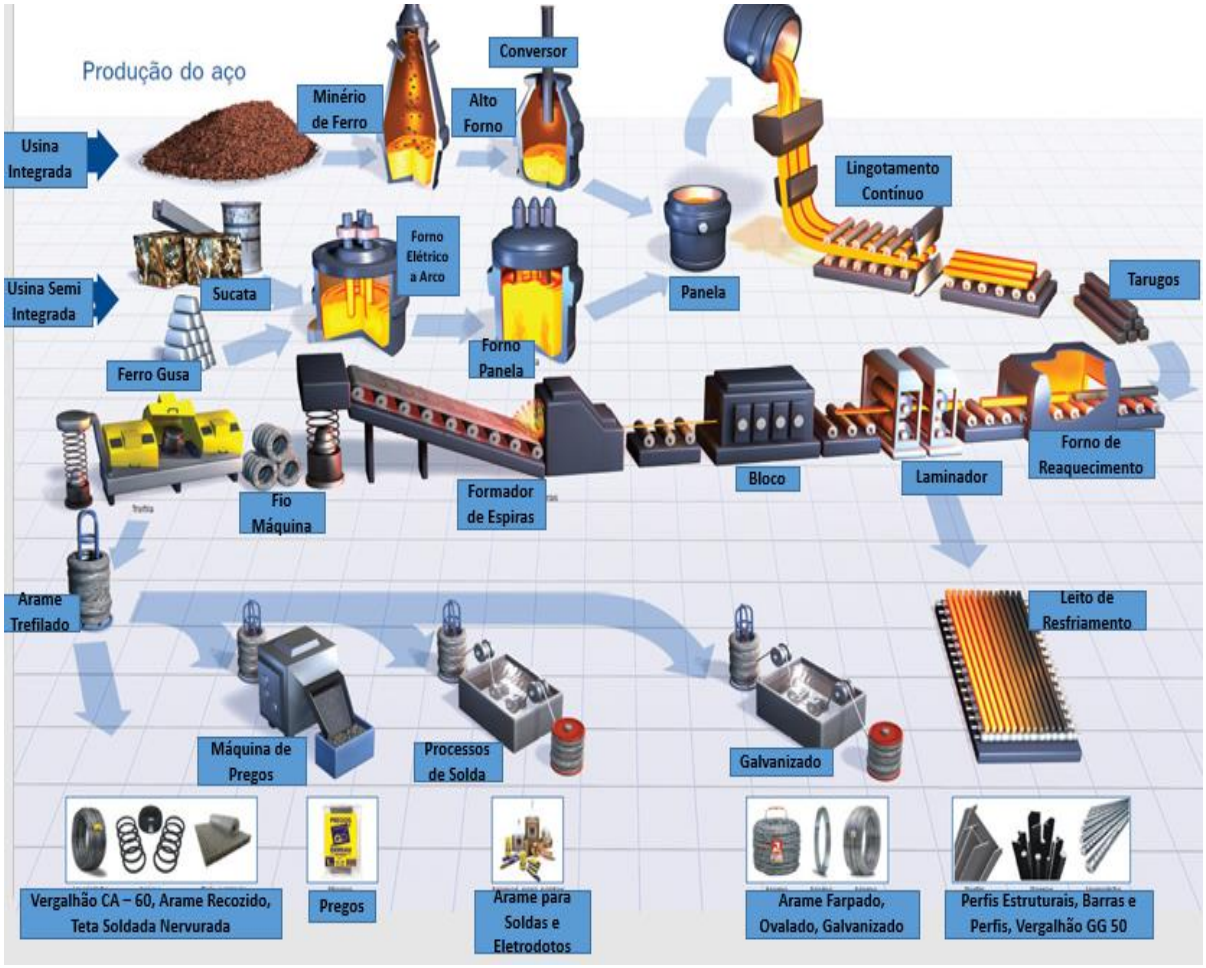
- De semi-acabados (placas, blocos e tarugos);

- De planos aços carbono (chapas e bobinas);

- De planos aços especiais / ligados (chapas e bobinas);

- De longos aços carbono (barras, perfis, fio máquina, vergalhões, arames);

Figura 1 - Produção do Aço



Fonte: GERDAU, 2016

Gerdau Brasil (2016), afirma que nas usinas integradas, há dois processos diferentes de redução: o alto forno que produz o ferro gusa e a redução direta que produz o ferro-esponja. Nestas unidades a produção do aço é feita a partir do minério de ferro encontrado na natureza em forma de rochas que precisam ser processadas para a obtenção do ferro-gusa ou ferro-esponja. Nestas usinas, a transformação da matéria prima em aço começa com o processo de redução. No alto forno o minério em forma granulada é aquecido juntamente com o coque ou carvão vegetal a mais de 1400ºC.

O aço é então transportado ao lingotamento contínuo, onde é distribuído, em moldes de resfriamento para solidificar-se na forma de tarugos ou blocos que serão cortados em dimensões adequadas a laminação. A partir da laminação são

produzidas chapas, barras e perfis estruturais enquanto que arrames recozidos, arrames para solda e eletrodos, arrame farpado, galvanizado e pregos são produzidos através do processo de trefilação (Gerdau Brasil, 2016).

O calcário, outro tipo de fundente, é adicionado para ajudar na formação da escória responsável pela captura das impurezas do minério. O resultado, após a passagem pelo alto forno, é o ferro em forma líquida chamado ferro gusa. Após está etapa, o ferro gusa é transportado para o conversor da aciaria onde ocorre o refino do metal que irá transformar o ferro gusa em aço. O aço é obtido através da injeção do oxigênio no ferro gusa líquido e também é adicionado a cal para promover a formação da escória. De acordo com o produto final pretendido, na panela o material poderá receber outros elementos de liga para dar novas propriedades ao aço como cromo e níquel, em quantidades corretas, no caso dos aços inoxidáveis austeníticos (Gerdau Brasil, 2016).

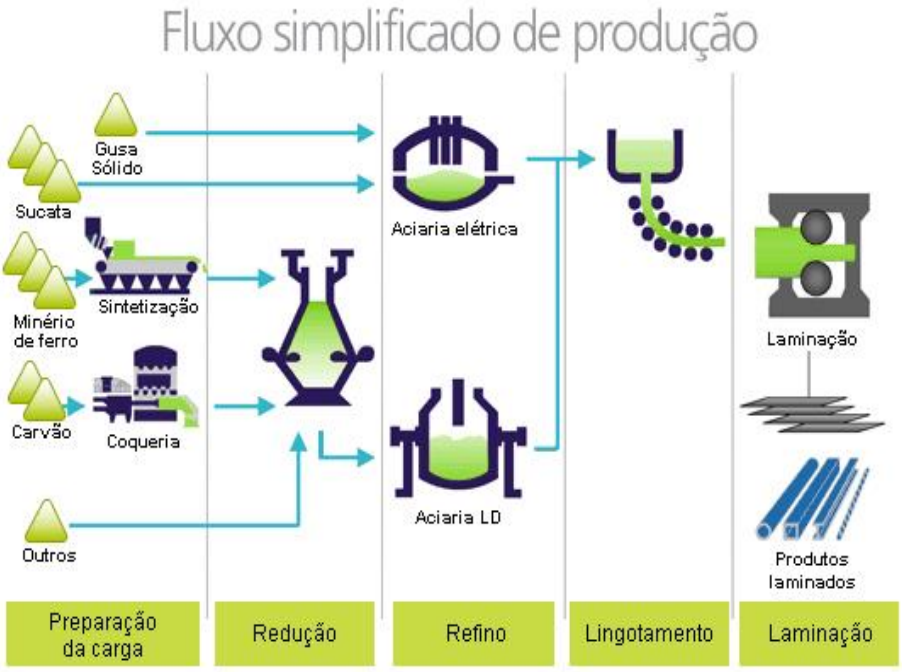
O ferro-esponja é obtido através de um processo alternativo. A redução direta é feita em um reator. O processo inicia com a redução do minério de ferro que pode ser granulada ou na forma de pelotas. No reator, com monóxido de carbono e hidrogênio o minério reage a temperatura de 950ºC e se transforma em ferro-esponja que é altamente metalizado. Nas usinas semi-integradas, a produção do aço começa quando o forno elétrico é abastecido com a sucata, principal matéria prima, e insumos para o processo de fusão. O metal é fundido no forno elétrico e atinge temperaturas acima de 1700˚ C, resultando no aço em forma líquida. Após a fusão, o aço é transportado ao forno panela. No forno panela, o aço passa por um refino secundário para ajustar sua temperatura e composição química, nesta etapa o aço recebe as adições de ligas (de cromo, níquel, molibdênio e outras). Essa etapa garante a produção de um aço de qualidade que é constantemente avaliado através de testes químicos definidos a partir de normas estabelecidas (Gerdau Brasil, 2016).

4.1.2 Etapas

O aço é produzido, basicamente, a partir de minério de ferro, carvão e cal. A fabricação do aço pode ser dividida em quatro etapas: preparação da carga, redução,

refino e laminação que podem ser mostrados na figura 2, como fluxo de produção do minério (IABR, 2016).

Figura 2 - Fluxo de Produção do Aço.



Fonte: Instituto Aço Brasil

4.1.2.1 Preparação da carga

- Grande parte do minério de ferro (finos) é aglomerada utilizando-se cal e finos de coque;
- O produto resultante é chamado de sínter;
- O carvão é processado na coqueria e transforma-se em coque.

4.1.2.2 Redução

- Essas matérias-primas, agora preparadas, são carregadas no alto forno;
- Oxigênio aquecido a uma temperatura de 1000ºC é soprado pela parte de baixo do alto forno;

- O carvão, em contato com o oxigênio, produz calor que funde a carga metálica e dá início ao processo de redução do minério de ferro em um metal líquido: o ferro-gusa;

- O gusa é uma liga de ferro e carbono com um teor de carbono muito elevado.

4.1.2.3 Refino

- Aciarias a oxigênio ou elétricas são utilizadas para transformar o gusa líquido ou sólido e a sucata de ferro em aço líquido;

- Nessa etapa parte do carbono contido no gusa é removido juntamente com impurezas;

- A maior parte do aço líquido é solidificada em equipamentos de lingotamento contínuo para produzir semi-acabados, lingotes e blocos.

4.1.2.4 Laminação

Os semi-acabados, lingotes e blocos são processados por equipamentos chamados laminadores e transformados em uma grande variedade de produtos siderúrgicos, cuja nomenclatura depende de sua forma e/ou composição química.

4.1.2.5 Fluxo

As usinas semi-integradas operam duas fases do processo: refino e laminação. O aço é obtido a partir da fusão de metálicos (sucata, gusa e/ou ferro-esponja) e refinado em forno elétrico. A sucata ferrosa é o principal insumo (IABR, 2016).

4.1.3 Importância do Aço e Suas Principais 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.

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 classificado pela sua aplicação, são expostos abaixo (CHIAVERINI, 2005):

- Aços para fundição: são utilizados para fundição de peças empregadas em máquinas operatrizes, indústria automobilística, indústria ferroviária, indústria naval.

- 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.;

5 INFLUÊNCIA DA USINAGEM DOS AÇOS NOS PARÂMETROS DO PROCESSO

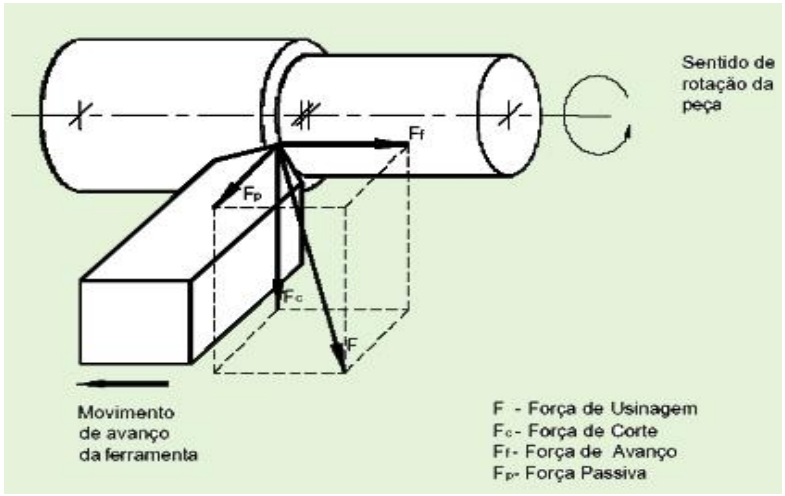
5.1 Força de Usinagem

Ferraresi (1977), afirma que o conhecimento da força de usinagem F ou de suas componentes: força de corte F_c, força de avanço F_f e da força passiva F_p, é a base como mostra a figura 3:

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

A força de usinagem é também um critério para a determinação da usinabilidade de um material de peça. Os componentes da força de usinagem (F_c, F_f e F_p) diminuem com o aumento da velocidade de corte v_c devido à diminuição da resistência do material com o aumento da temperatura (FERRARESI, 1977).

Figura 3 - Componentes da Força de Usinagem.



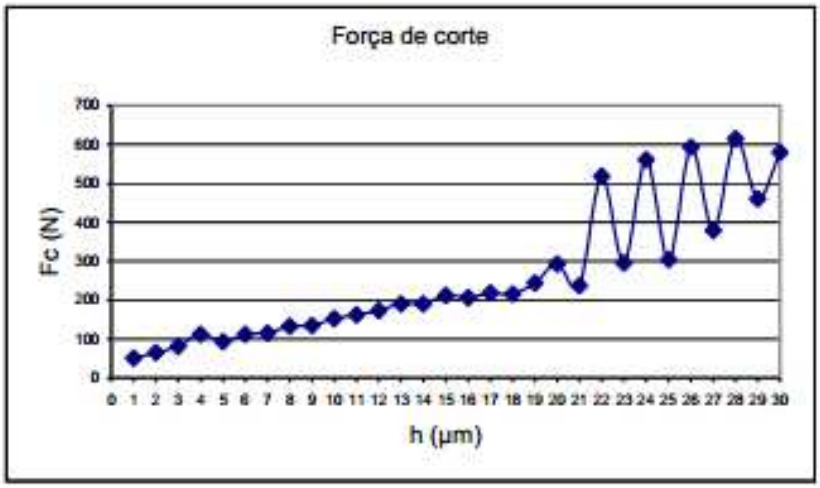
Fonte: MOLDES E INJEÇÕES, 2016

Da silva (2011), afirma que foi usinado a seco, uma peça de aço ABNT 1045, projetada e fabricada de forma adequada para fixação no dinamômetro. Os ensaios

realizados simularam o processo de torneamento cilíndrico. Foram realizados ensaios para simulação do corte ortogonal em baixas velocidades de corte.

Da silva (2011), constatou uma variação de maneira crescente, observando a linearidade no comportamento da curva para espessuras de material na faixa 1μm à 20μm, obtido na usinagem a seco do aço ABNT 1045 com velocidade de corte Vc = 150 mm/min, h = 1μm à 30μm, e ferramenta de aço rápido, para espessuras superiores a 20μm a curva começa a variar entre 237N e 614N como mostra a figura 4.

Figura 4 - Força de Corte em função da espessura do Material



Fonte: DA SILVA, 2011

Pode-se considerar uma deformação elástica durante o corte e isto significa que a ferramenta precisa penetrar uma profundidade mínima dentro do material antes de começar a cortá-lo e a força envolvida neste intervalo é chamada força residual, calculada por meio de extrapolação de uma curva de força de corte para uma velocidade zero (DA SILVA, 2011).

5.2 Temperatura de Corte

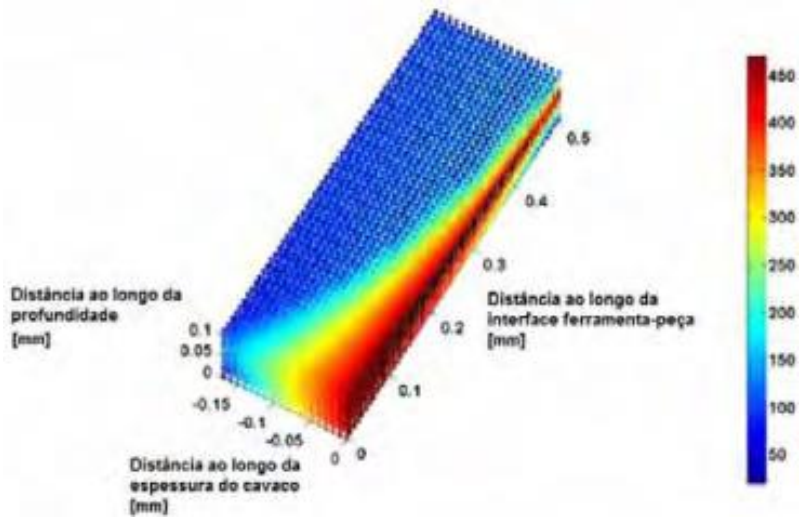
Conforme Ferraresi (1977), as influências de geração e transmissão de calor na usinagem de metais são de grande complexidade, pois as elevações da temperatura mudam as propriedades físicas e mecânicas do material em trabalho. A temperatura, agindo no desgaste das ferramentas, limita a aplicação de regimes 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.

Um método muito utilizado para estimar de forma aproximada o campo de temperatura na usinagem é o método numérico. A resolução parte apenas de dados de entrada, não tendo necessariamente de se realizar a operação de usinagem. Devido ao avanço computacional nos últimos tempos, a técnica difundiu-se muito. Os métodos mais encontrados na literatura para a resolução dos problemas térmicos diretos são: elementos finitos, diferenças finitas e volumes finitos (BARRIOS, 2013).

Barrios (2013), estimou o campo de temperatura no cavaco, ferramenta e peça durante o fresamento dos aços AISI 1050 e H13, usando ferramentas de metal duro sem revestimento. Para isso, utilizou-se um modelo numérico baseado no método de diferenças finitas. A figura 5 mostra a distribuição de temperatura do cavaco para um ângulo de inclinação da ferramenta de 6° e uma velocidade de corte de 80 m/min.

Figura 5 - Distribuição da Temperatura do Cavaco.



Fonte: BARRIOS, 2013

Esse método utiliza-se, geralmente, de dispositivos ou sensores que permitem quantificar o gradiente de temperatura através de sinais elétricos. Os fatores que podem ser considerados quando se escolhe um método são: faixa de temperatura, robustez do sensor, perturbação da temperatura por meio do sensor, qualidade do sinal quanto aos ruídos, tempo de resposta e incertezas (BARRIOS, 2013).

5.3 Desgaste da Ferramenta de Corte

A vida da ferramenta é muito importante para os processos de usinagem, ainda mais quando se trata de um setor de produção em massa. Nos estudos de Casagranda (2004), a vida da ferramenta pode ser descrita como o tempo que esta ferramenta trabalha efetivamente até perder sua capacidade de corte, em função de parâmetros previamente estabelecidos. O tempo de vida de uma ferramenta também é um critério observado na determinação da usinabilidade de um material, pois após o limite determinado a usinagem da peça estará sujeita a erros de dimensão e má qualidade superficial.

A classificação dos tipos de desgaste é um importante auxílio para a estimativa e otimização da usinagem através da correta especificação das pastilhas e dados de usinagem para um determinado tipo de usinagem e material. A vida da ferramenta de corte pode ser controlada e aumentada pela inspeção da aresta de corte ampliada e agir sobre o tipo de desgaste. Para se ter a pastilha certa existem fatores importantes para se conseguir o desenvolvimento do desgaste ideal como: bons valores iniciais dos dados de corte, suporte de especialistas, experiência própria, boa qualidade do material da peça e máquinas em boas condições (NASCIMENTO, 2008).

Logo na usinagem com ferramenta de aço rápido a destruição da aresta de corte é devida à diminuição de sua dureza, que se origina do aumento da temperatura de corte. Isso tudo se dá em temperaturas da ordem de 600°C. Esse fato pode ser observado de duas maneiras: pela formação de anel brilhante na superfície de corte da peça, geralmente acompanhado por um ruído estridente e pelo aumento das componentes de avanço e de profundidade da força de usinagem. Em operações de acabamento, de um modo geral, valem as mesmas considerações vistas para o metal duro. Porém as velocidades de corte quando se utiliza o aço rápido são relativamente pequenas, prejudicando o acabamento da peça. Os desgastes, limitados pelas exigências de tolerância e rugosidade das peças originam uma vida da ferramenta muito curta (DINIZ et al., 2006).

Um Fator de Influência no Desgaste da Ferramenta é a Condições de Usinagem que significa a progressão do desgaste é influenciada pela velocidade de

corte, logo depois pelo avanço e por último pela profundidade de usinagem. Assim, por exemplo, a diminuição da vida da ferramenta causado por um aumento de 10% na velocidade de corte é muito maior do que aquele que ocorreria se o avanço fosse aumentado na mesma proporção. Sendo assim, a velocidade de corte é o parâmetro que mais influência no desgaste, pois com o aumento dela, aumenta-se a energia (calor) que é imputada ao processo, sem um aumento da área da ferramenta que recebe este calor (DINIZ et al., 2006). O aumento do avanço, por sua vez, também aumenta a quantidade de calor imputada ao processo, porém também é aumentado a área da ferramenta que recebe este calor. Na tabela 1 observa-se alguns dados da vida da ferramenta para vários avanços e velocidades de corte diferentes.

(a_p = 1mm, Material da Peça: aço 4340, Ferramenta de Metal Duro Recoberto classe P35)

Tabela 1 - Vida da Ferramenta (Percurso de Corte) de Torneamento para Diversos Avanços e Velocidades de Corte

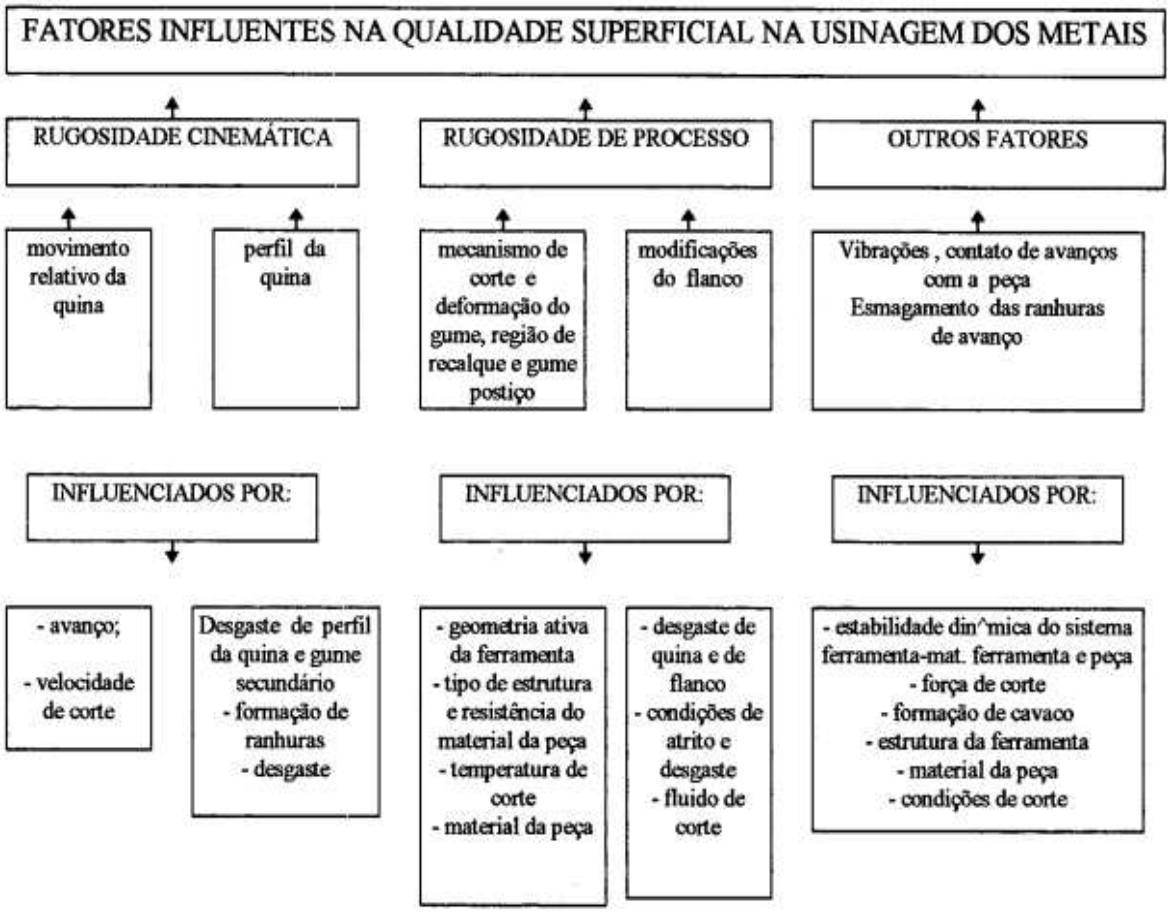
f (mm/volta)	V_c (m/min)	Vida (m)
0.16	300	1450
0.20	300	1530
0.24	300	1550
0.20	250	2600
0.20	300	1530
0.20	350	650

Fonte: DINIZ et al., 2006

5.4 Acabamento Superficial da Peça

A qualidade das superfícies obtidas na usinagem pode ser um critério para determinação dos parâmetros de entrada. Os fatores influentes sobre a qualidade superficial estão relacionados na figura 6 (WEINGAERTNER, 2003).

Figura 6 - Fatores Influentes sobre a Qualidade Superficial.



Fonte: WEINGAERTNER, 2003.

Akasawa et al. (2003), ao usinar aços ressulfurados 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.

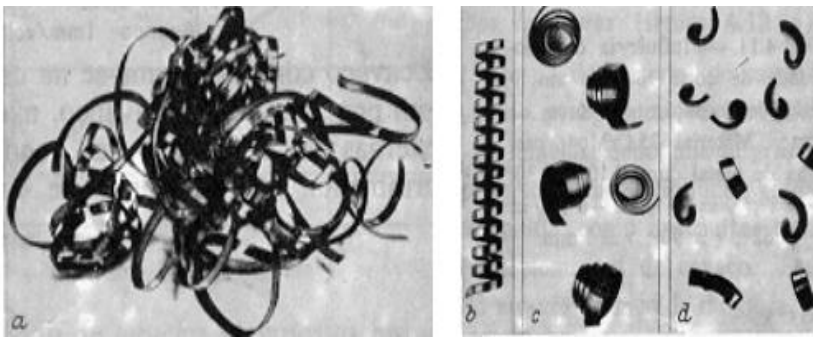
No torneamento de aços endurecidos, dificilmente ocorre a formação de aresta postiça, por causa da baixa ductilidade do material da peça e da alta temperatura de corte. Como resultado, a aresta de corte é transferida para a superfície usinada com razoável precisão. Então, contanto que o desgaste da superfície de folga permaneça pequeno e uniforme, a rugosidade não aumentará. Com o progresso do desgaste, entretanto, a aresta de corte tende a "engrossar" e, consequentemente, deteriora a

superfície usinada. Valores de rugosidade média no torneamento de aços estão na faixa de 0,1 a 0,4 μm, dependendo dos parâmetros de corte e do material da peça (COSTA, 1993).

5.5 Formação do Cavaco

De acordo com Dinniz et al. (2006), os cavacos formados em processos de usinagem podem ser classificados segundo três tipos: contínuo, de cisalhamento e de ruptura. O primeiro se caracteriza por lamelas justapostas em uma disposição contínua e agrupada. O segundo tipo apresenta a mesma configuração, porém as lamelas são mais definidas e estão parcialmente soldadas ao longo do cavaco. Já o terceiro tipo tem como característica principal a ruptura completa dos segmentos lamelares. Os cavacos também podem ser diferenciados quanto à sua forma, que podem ser em fita, helicoidal, espiral e em lascas ou pedaços. Estas formas são mostradas na figura 7.

Figura 7 - Formas de Cavacos: (a) fita, (b) helicoidal, (c) espiral, (d) em lascas.



Fonte: DE SOUZA , et al., 2006

De souza , et al. (2006), afirmam que o cavaco pode ser um elemento de pesquisa em usinagem de grande importância, apesar de não parecer e da grande maioria dos profissionais que lidam com fabricação, sobretudo nas empresas, descartarem tal fato. Via de regra na indústria o cavaco passa a ser o foco principal somente quando interfere de maneira negativa no produto final. É verdade que o principal resultado a ser alcançado é o produto usinado e não o material removido dele. Contudo, o estudo do cavaco pode trazer informações importantes ao conhecimento do processo e, consequentemente, à sua otimização.

De souza , et al. (2006), realizaram diferentes testes de torneamento do aço ABNT 1045, com diâmetro inicial de 35,8 e comprimento de corte de 300mm, empregando ferramentas de metal duro na condição a seco. Os parâmetros de corte utilizados foram avanço f = 0,094 e 0,19 mm/rot, profundidade de usinagem a_p = 0,5 e 1,0mm e velocidade de corte v_c = 86,117 e 134m/mim. Foi possivel constatar nos ensaios para diferentes parâmetros de corte, formas variadas, tipos, cores de cavacos conforme mostra a tabela 2.

Tabela 2 - Síntese dos dados de entrada e da investigação dos cavacos gerados.

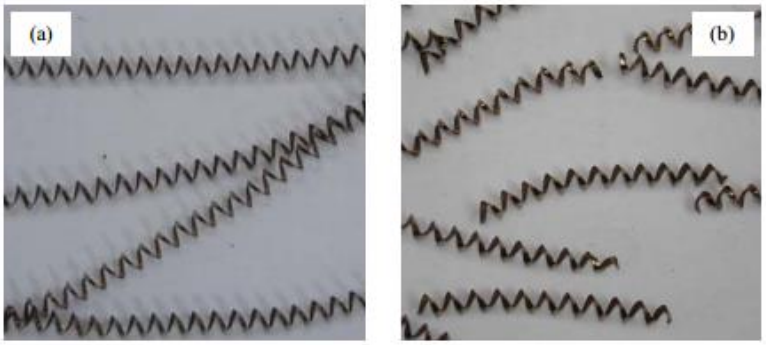
Ensaio	Parâmetros de Corte			Classificação do Cavaco		
	V_C(m/mim)	a_p[mm]	f[mm/rot]	Tipo	Forma	Cor
1	86	0,5	0,094	Contínuo	Helicoidal	Amarelo
2			0,190	Contínuo	Helicoidal	Amarelo
3		1,0	0,190	Contínuo	Helicoidal	Azul
				Ruptura	Lascas	
4			0,094	Ruptura	Lascas	Azul e Cobre
5	134	0,5	0,094	Contínuo	Fita	Azul escuro e Cobre
					Helicoidal	
6			0190	Contínuo	Helicoidal	Azul e Cobre
7		1,0	0,190	Contínuo	Helicoidal	Azul e Cobre
8			0,094	Contínuo	Fita	Azul Claro
					Helicoidal	
9	117	0,5	0,297	Contínuo	Helicoidal	Azul
10			0,449	Contínuo	Helicoidal	Amarelo

Fonte: DE SOUZA , et al., 2006

De souza , et al. (2006), constataram no ensaio 1° que o cavaco formado foi do tipo contínuo e helicoidal. Os baixos valores de avanço e profundidade de usinagem proporcionaram condições para que o cavaco removido fosse longo (de 0,75 a 1,00m). No ensaio 2, mostrada na figura 8, nota-se que o aumento do avanço promoveu a quebra do cavaco em fragmentos menores que o primeiro ensaio (20 a 50mm). A

coloração dos cavacos levemente amarelada em ambos os ensaios retrata que o calor gerado na zona de corte foi pequeno, impedindo maiores oxidações do cavaco removido.

Figura 8 - Cavacos obtidos nos ensaios 1 (a) e 2 (b).



Fonte: DE SOUZA , et al., 2006

De souza , et al. (2006), observaram no ensaio 3º a presença de cavaco contínuo e de ruptura. O aumento na profundidade de usinagem fez um grande aumento na temperatura da zona de contato cavaco-ferramenta, caracterizado pela coloração azul do cavaco, que é peculiar nos casos onde há altas temperaturas de corte.

Contudo De souza , et al. (2006), notaram a presença de cavaco de ruptura, que é característico das condições de usinagem onde há maiores taxas de cisalhamento. Eles afirmam que o aumento do avanço em duas vezes pode ter favorecido a formação do cavaco de ruptura.

No 4° ensaio De souza , et al. (2006) constataram uma coloração azulada mostrada na figura 9, que confirmam o aumento da profundidade de usinagem promoveu um aumento da temperatura na região de corte, no entanto a presença de cavaco em lascas permite estimar que o contato entre o cavaco removido e a superfície de saída foi reduzido.

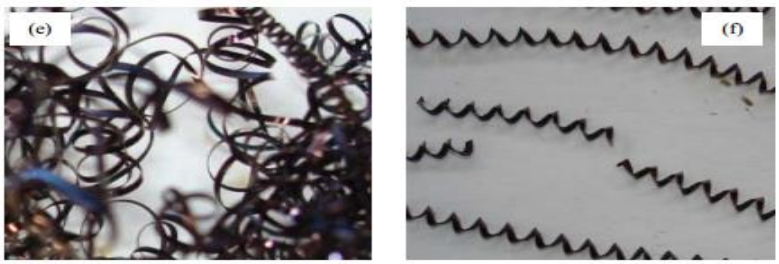
Figura 9 - Cavacos obtidos nos ensaios 3 (c) e 4 (d).

Fonte: DE SOUZA , et al., 2006

De souza, et al. (2006), ao avaliarem o 5° ensaio, tal como mostrado na figura 10, perceberam que com o aumento da velocidade de corte em 56% verificou-se a formação de cavaco em fita e helicoidal contínuo. Eles ao compararem com o primeiro ensaio, onde somente a velocidade de corte é diferente, notaram que há uma significativa mudança na forma dos cavacos gerados. Perceberam que a coloração azulada indica maior geração de calor entre a peça e a ferramenta, quando comparado com o aumento da velocidade de corte.

De souza, et al. (2006), ao realizarem o ensaio 6, constataram que o cavaco obtido é muito parecido com o obtido no ensaio 2, salvo somente a coloração azulada. Mais uma vez, eles explicam que tal ocorrência devido ao fato do aumento da velocidade de corte promover um aumento na taxa de cisalhamento do material e, consequentemente, elevar a temperatura na zona de corte.

Figura 10 - Cavacos obtidos nos ensaios 5 (e) e 6 (f).



Fonte: DE SOUZA , et al., 2006

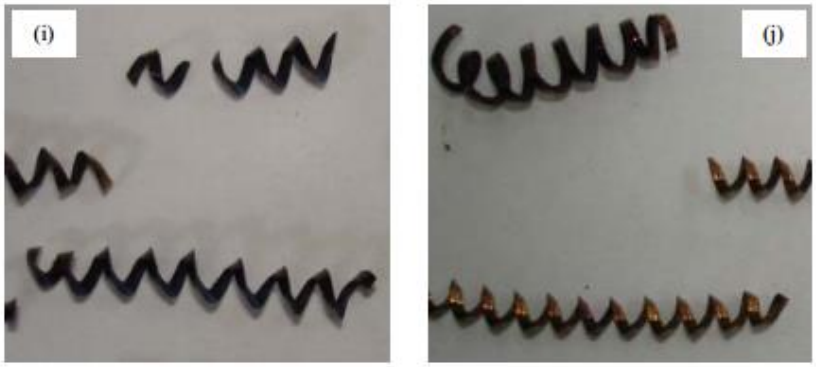
De souza , et al.(2006), constataram no ensaio 7 na figura 11, há uma sensível diminuição do tamanho do cavaco helicoidal contínuo quando comparado com o obtido no ensaio 3 (de 40 para 20mm). Contudo, no ensaio 7 não verificou no ensaio presença de cavaco lascado. Já no ensaio 8°, em instantes diferentes notou-se a formação de dois tipos de cavacos. Em um primeiro momento, o cavaco formado foi classificado como helicoidal e longo. Em seguida, houve a formação de um emaranhado de cavaco em fita que se entrelaçou no corpo – de – prova. Quando o cavaco em fita sofreu rompimento automaticamente houve a formação de um cavaco helicoidal contínuo logo em seguida se rompia e passou a ser substituído pelo cavaco em fita. A coloração azul claro indica que houve uma considerável geração de calor, porém em menores comparado ao ensaio 7º anterior.

Figura 11 - Cavacos obtidos nos ensaios 7 (g) e 8 (h).

Fonte: DE SOUZA , et al., 2006

Para ensaios 9 e 10, tal como mostrado na figura 12 De souza , et al. (2006), confirmaram que estes possuem as mesmas características dos anteriores, exceto pelo emprego de taxas de avanço bastante elevadas. O tamanho dos cavacos destes dois ensaios diferiu muito pouco, mas a grande diferença foi nas suas colorações. (DE SOUZA , et al., 2006) e seus companheiros perceberam no 10° ensaio, que a coloração foi bastante amarelada, enquanto no ensaio 9, a tonalidade foi azulada

Figura 12 - Cavacos obtidos nos ensaios 9 (i) e 10 (j).



Fonte: DE SOUZA , et al., 2006

Da análise dos resultados obtidos, De souza et al. (2006), afirmam que todos os parâmetros de corte utilizados como variáveis de entrada no experimento causaram influência na formação de cavaco. Pode-se dizer, em geral, que os resultados apresentaram boa concordância com os apresentados na literatura. O aumento da velocidade de corte fez com que a porção de material da peça removida na forma de cavaco sofresse maiores taxas de cisalhamento, alterando em alguns casos a forma do cavaco de helicoidal para fita. Além disso, o efeito mais pronunciado refere-se à coloração do cavaco, indicando que amiores taxas de cisalhamento geram mais temperatura e calor na interface cavaco-ferramenta. O tipo de cavaco permaneceu tipicamente contínuo, excecão feita aos ensaios 3 e 4 conduzidos em baixa velocidade de corte e maior profundidade de usinagem.

De souza, et al. (2006) constataram que o aumento na profundidade de usinagem pode ser ou pode está associado à mudança na forma do cavaco de lascas onde *vc* é menor para fitas onde a *Vc* para maior *Vc*. Já o aumento do avanço propiciou a formação de cavacos helicoidais, diferente do ensaio 3. Este resultado, de certa forma, pode ser confirmado analisando-se resultados dos ensaios 9 e 10, em que foram empregados grandes avanços.

6 ASPECTOS METALÚRGICOS QUE INTERFEREM NA USINABILIDADE DOS AÇOS

O fator metalúrgico predominante com respeito à usinabilidade é, obviamente, a dureza. Os aços de baixo carbono com baixa dureza e alta ductilidade tem tendência à formação da aresta postiça de corte, resultando assim na redução da vida da ferramenta e deterioração do acabamento superficial. Colocando uma maior porcentagem de carbono melhora-se a usinabilidade devido ao aumento da dureza e diminuição da ductilidade. Em termos da influência da dureza do aço na usinabilidade, pode-se dizer que 200 HB é um valor médio. A medida que se diminui a dureza abaixo deste valor, a tendência à formação da aresta de corte aumenta. Quando se aumenta a dureza acima deste valor, o desgaste da ferramenta via abrasão e difusão passa a ser um fator que afeta negativamente a usinabilidade do material (DINIZ et al., 2006).

O outro fator metalúrgico de importância na usinabilidade é a presença de elementos de liga. Alguns elementos de liga têm efeito positivo na usinabilidade, como o chumbo, o enxofre e o fósforo, que geralmente estão presentes em aços de usinabilidade melhorada. Por outro lado, elementos formadores de carboneto (que são partículas duras e abrasivas) como o vanádio, o molibdênio, o niábio e o tungstênio, além de outros como o manganês, o níquel, o cobalto e o cromo, tem efeito negativo na usinabilidade. A seguir mostraremos um estudo de uma série de aspectos metalúrgicos abaixo: (DINIZ et al., 2006).

Chiaverini (2005), comenta que valores altos para a dureza significam dificuldades de usinagem, ao passo que valores médios e baixos se associam com boas propriedades de usinabilidade, mas que as medidas de dureza não serviriam de um modo absoluto como referência para determinação de verdadeira usinabilidade.

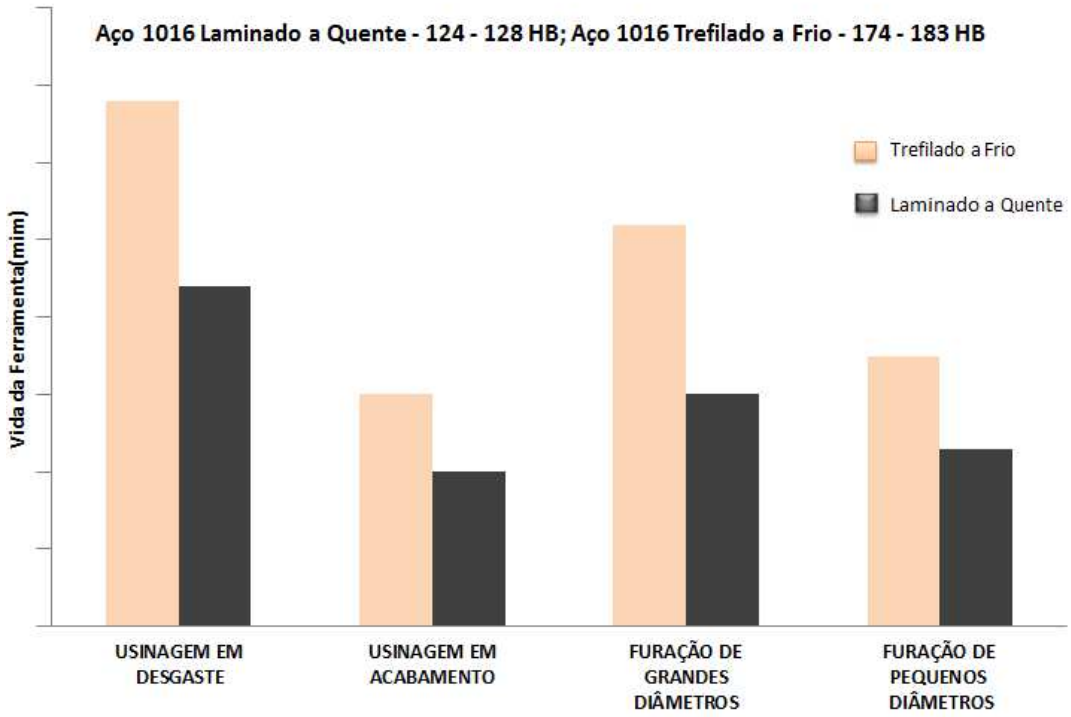
6.1 Trabalho a Frio

O processo de deformação a frio pode melhorar a usinagem, por meio do encruamento provocado, o que aumenta a dureza e dificulta o empastamento do cavaco sobre a ferramenta e a formação da aresta de corte. Se a dureza da peça for elevada excessivamente, haverá um desgaste exagerado da ferramenta e um acréscimo na potência necessária (BAPTISTA, 2002).

A taxa de desgaste da ferramenta é reduzida em decorrência do trabalho a frio, isso ocorre, devido ao resultado à redução da energia de corte necessária bem como a queda da temperatura de trabalho. Em materiais que apresentam alta taxa de encruamento e alta ductilidade, o processo de trabalho a frio provoca uma queda acentuada na usinabilidade (GONZALES, 1992).

Uma boa medida para promover o aumento da dureza e diminuição da ductilidade de aços de baixo carbono (que normalmente possuem dureza bem menor que 200 HB) é promover seu encruamento via trabalho a frio. Como mostra a figura 13 a comparação em termos de vida da ferramenta para um aço 1016 (baixo carbono) em diversas operações de usinagem diferentes. Pode-se ver nesta figura que a vida da ferramenta aumentou em todos os casos após a trefilação a frio das barras deste aço para depois serem usinadas, operação que causou o acréscimo de dureza das peças de cerca de 125 HB para 180 HB (DINIZ et al., 2006).

Figura 13 - Efeito do Encruamento (por trefilação a frio) na Vida da Ferramenta.



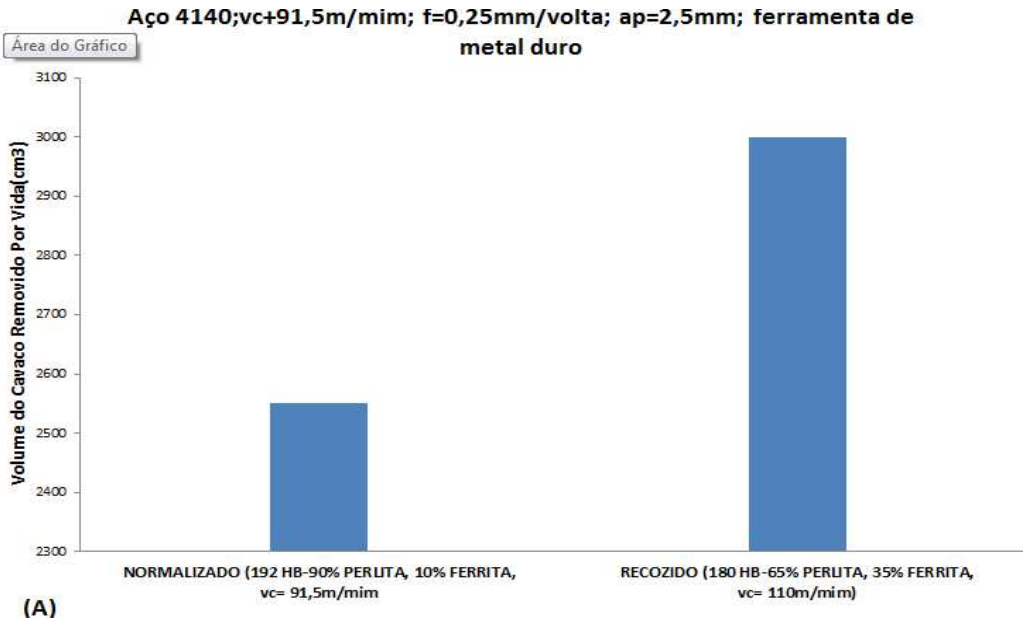
Fonte: DINIZ, 2006

6.2 Microestrutura

Diniz et al. (2006), abordam que um segundo fator metalúrgico a ser considerado que de fato afeta a usinabilidade é a microestrutura. Como mostram as figuras 14 e 15 abaixo de como a variação da microestrutura, via mudança de fase ocasionada por tratamento térmico, afeta a usinabilidade.

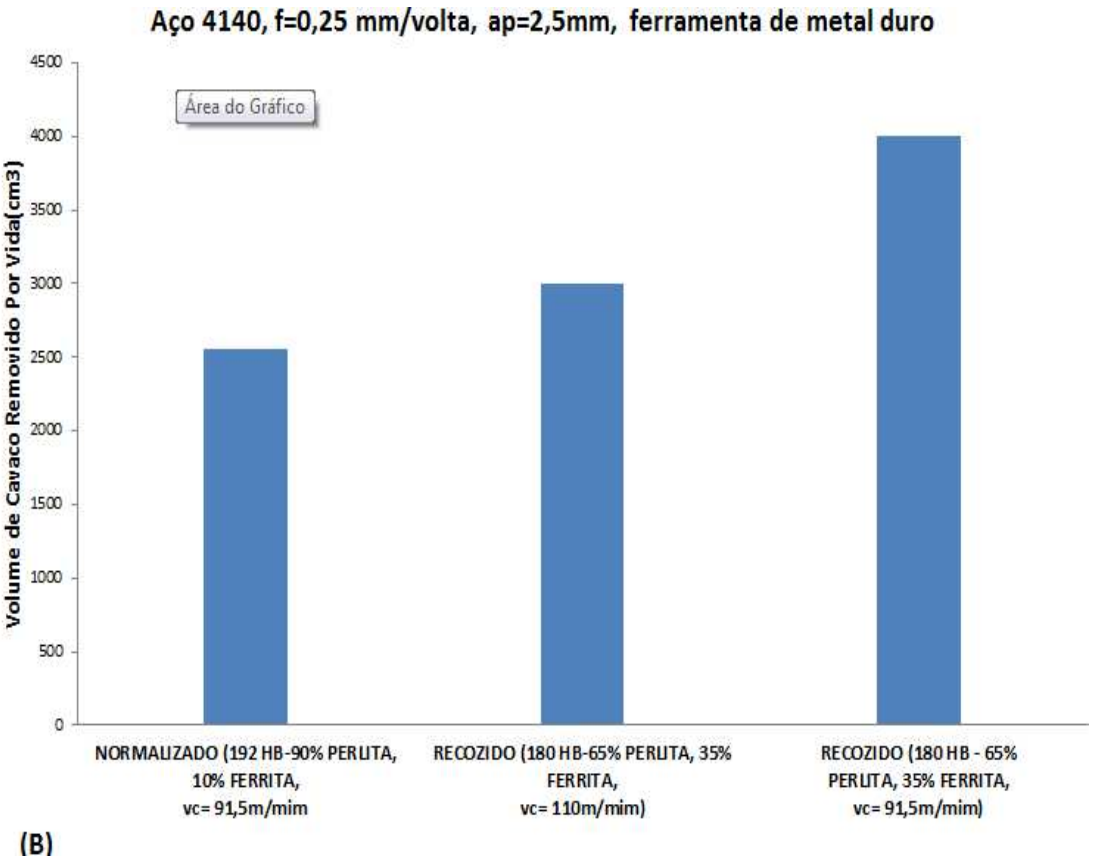
Aços com estruturas abrasivas só podem ser usinadas com eficiência, por meio de processos abrasivos ou utilizando-se de ferramentas ultra resistentes. Como mostra a figura 15 que é possível constatar que, quando passa de uma liga com 10% de ferrita e 90% de perlita para uma liga com 35% de ferrita e 65% de perlita, a vida da ferramenta cresce consideravelmente, apesar da dureza da peça ter decrescido em torno de 6%. Ele afirma que a redução dos microconstituintes como a perlita e a cementita reduzem na quantidade de abrasivos, responsáveis pelo desgaste na vida da ferramenta (DINIZ et al., 2006).

Figura 14 - Efeito da Microestrutura na Usinabilidade do Aço 4140.



Fonte: CHIAVERINI, 2005

Figura 15 - Efeito da Microestrutura na Usinabilidade do Aço 4140.



Fonte: CHIAVERINI, 2005

O efeito da microestrutura da usinabilidade dos aços pode ser resumido da seguinte maneira: a) os aços de carbono muito baixo (até 0,20%), a condição mais recomendável, inclusive por fatores de economia é a de simplesmente laminado, contudo, melhores resultados são obtidos se um alívio de tensões for aplicado. Este alívio tem por objetivo remover o encruamento remanescente da laminação (DINIZ et al., 2006).

Segundo Chiaverini apud Gilberto Sanches Gonzales, 1992, p.13,podemos avaliar o efeito da microestrutura dos aços com base no teor de carbono que os mesmos apresentam, conforme mostrado na tabela 3.

Tabela 3 - Melhores Condições de Usinagem em Função do Teor de Carbono dos Aços

TEOR DE CARBONO	MELHOR CONDIÇÃO	TRATAMENTO TÉRMICO
(a) Até 0,2%	Perlita b. laminado (Mais econômico)	
(b) 0,2 a 0,3%	Perlita b. laminado	Norm. Melhora
(c) 0,3 a 0,4%	Perlita grossa	Recozimento melhora
(d) 0,4 a 0,6%	Perlita ou Esferoidizado	Recozimento pleno
(e) Maior 0,6%	Esferoidizado	Coalescimento

Fonte: GONZALES, 1992

Ferraresi (1977), destaca que, em função da possibilidade da mudança da microestrutura do aço ou ferro fundido, sem alterar a composição química, ela se constitui em um importante fator de influência na usinabilidade. Os microconstituintes alteram as características de ductilidade e de fragilidade em função da sua presença, quantidade e forma, promovendo diferentes condições de quebra de cavaco, abrasividade, força e temperatura de corte. A presença de fases aciculares tipo bainita e martensita, em função do efeito extremamente abrasivo, também é indesejável na usinagem (AMARO, 1982).

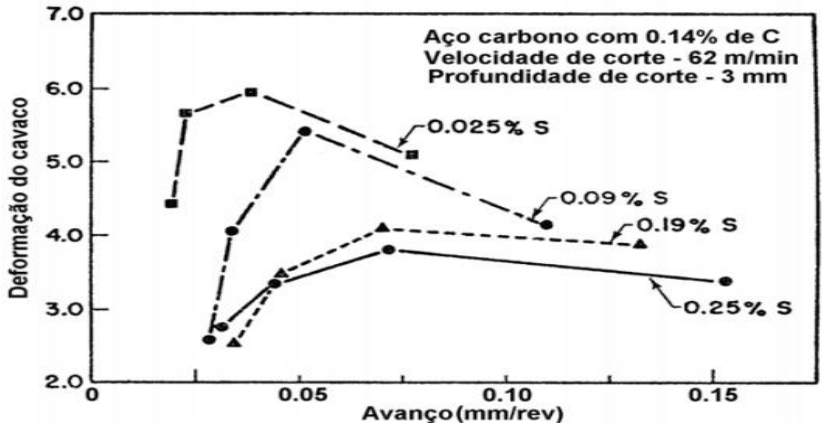
6.3 Composição Química

6.3.1 Efeito do Enxofre

Pimentel (2006), aborda que a boa usinabilidade nos aços baixo–carbono é obtida pelo aumento do teor de enxofre para valores acima de 0,40%. Ele afirma que devido ao fato de não ser um aditivo caro, o enxofre é o elemento mais extensivamente usado para melhorar a usinabilidade dos aços ao carbono. O autor destaca que em quase todos os tipos de aço comercialmente produzidos, o enxofre se apresenta, geralmente, combinado com o manganês na forma de inclusões de sulfeto de manganês. Conclui que as características desse tipo de inclusões, tais como tamanho, morfologia, frequência e distribuição, exercem notadamente grande influência sobre a usinabilidade dos aços de livre corte.

Para entender a influência do enxofre sobre a usinabilidade Pimentel (2006), realizou ensaios de torneamento em barras de diâmetro de 22,23 mm contendo a seguinte composição: 0,14% de carbono, 0,80% de manganês e explica que o teor de enxofre variando na faixa de 0,025 a 0,25%. Após os ensaios (PIMENTEL, 2006), verificou como mostra a figura 16, que para um dado avanço, o aumento do teor de enxofre diminui a deformabilidade do cavaco, isto é, a quantidade de deformação plástica associada com a formação do cavaco.

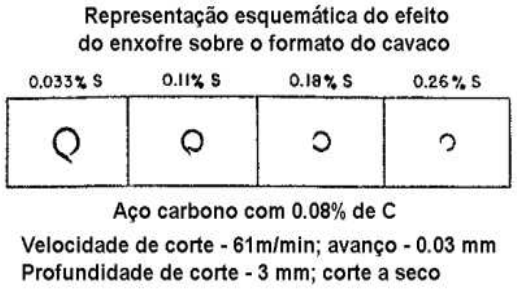
Figura 16 - Relação entre o Teor de Enxofre e a Deformação do Cavaco a Vários Avanços em Testes de Torneamento.



Fonte: PIMENTEL, 2006

Pimentel (2006), afirma que o efeito do enxofre sobre o tamanho do cavaco é mostrado esquematicamente na Figura 17. Notou que o tamanho do cavaco diminui com o aumento do teor de enxofre, proporcionando menor área de contato entre o cavaco e a ferramenta de corte. Consequentemente, as forças de atrito entre o cavaco e a ferramenta de corte ficam menores, causando um desgaste menos intenso da ferramenta de corte.

Figura 17 - Relação entre o Teor de Enxofre e o Tamanho do Cavaco.



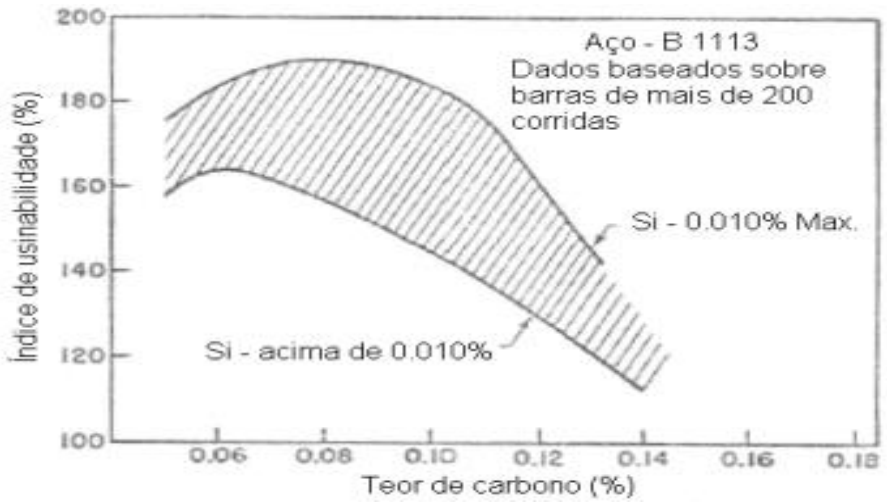
Fonte: PIMENTEL, 2006

Pimentel (2006), conclui que o aumento do teor de enxofre no aço resulta na formação de cavacos pequenos na usinagem. Ele afirma que cavacos menores implicam na redução da área de contato entre o cavaco e a ferramenta de corte. Consequentemente, o atrito na interface cavaco-ferramenta de corte é menor, proporcionando um aumento na vida da ferramenta de corte. Além disso Pimentel (2006), constatou que devido à presença das inclusões de sulfeto de manganês, o atrito na interface ferramenta-peça também é menor, favorecendo um menor desgaste de flanco da ferramenta de corte.

6.3.2 Efeito do Carbono e do Silício

As normas internacionais AISI e SAE permitam teores de carbono acima de 0,13% nos aços ressulfurados e refosforados baixo–carbono, a maioria dos aços de corte fácil frequentemente utilizada apresenta teores de carbono abaixo de 0,10%. Ele afirma que este fato pode ser evidenciado a partir da análise criteriosa das curvas da Figura 18, onde pode ser verificado que os mais altos índices de usinabilidade são obtidos para baixos teores de carbono (abaixo de 0,10%). Adicionalmente, nestas curvas, também pode ser observada a existência de um teor de carbono ("pico" de carbono), acima do qual o índice de usinabilidade diminui (PIMENTEL, 2006).

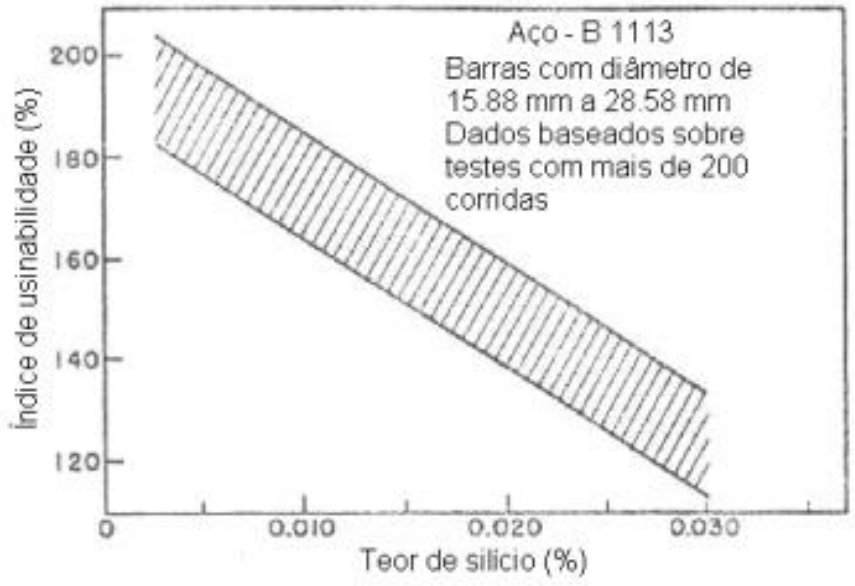
Figura 18 - Efeito do Teor de Carbono sobre o Índice de Usinabilidade de Barras de Aço B1113 em Testes de Torneamento.



Fonte: PIMENTEL, 2006

Na Figura 18, ele também observou que o silício tem um efeito prejudicial sobre a usinabilidade dos aços baixo–carbono. E fala que este efeito está mais claramente mostrado na Figura 19, onde ele verificou que o índice de usinabilidade diminui linearmente a medida que o teor de silício aumenta de 0,003% para 0,03% (PIMENTEL, 2006).

Figura 19 - Efeito do Teor de Silício sobre o Índice de Usinabilidade de Barras de Aço B1113 em Testes de Torneamento.



Fonte: PIMENTEL, 2006

Pimentel (2006), constatou que o uso de silício em torno de 0,20% aumenta a camada de sulfeto de manganês depositada nas ferramentas de corte quando se usinam aços de livre corte, melhorando assim a usinabilidade do aço. Ele aborda também que a utilização do silício é uma forma de melhorar a usinabilidade.

6.3.3 Efeito do Fósforo e do Nitrogênio

Pimentel (2006), afirma que dentro de certos limites, o fósforo beneficia a usinabilidade dos aços de livre corte pela melhoria da qualidade superficial da peça usinada e por meio da contribuição à formação de cavacos frágeis. As Adições moderadas de nitrogênio também atuam de uma maneira similar.

Pimentel (2006), constatou que se por um lado, pequenas adições de nitrogênio e fósforo melhoram a usinabilidade dos aços de livre corte, por outro lado, grandes

adições destes elementos podem ser altamente nocivas, devido à redução da vida da ferramenta de corte. Por exemplo, o autor aborda como pode ser visto na Tabela 4, que o aumento do teor de nitrogênio de 0,003% para 0,028% exerce um efeito nocivo à vida da ferramenta obtida na usinagem de aços de livre corte com baixos e altos teores de fósforo. Adicionalmente, também ele nota que, para altos níveis de nitrogênio o melhor desempenho de usinabilidade é exibido pelo aço com uma quantidade residual de fósforo (0,018%) em comparação com o aço refosforado (0,12%). Portanto Pimentel afirma que o controle dos teores destes elementos é necessário para garantir uma combinação ótima de vida da ferramenta, acabamento superficial da peça usinada e capacidade de conformação a frio.

Tabela 4 - Efeito do teor de nitrogênio sobre o Desempenho de Barras de Aço Trefiladas, Utilizadas na Produção de Tambores de Porcas de Parafuso.

Aço[a]	P, %	N_2, %	Vida média da ferramenta, horas			
			77 m/min	86 m/min	95 m/min	105 m/min
1	0,018	0,003	b	b	6,2	7,3
1	0,018	0,028	b	12,1	3,3	b
2	0,09	0,003	b	b	b	8,4
2	0,12	0,028	12,0	3,8	1,6	b
a	Composição química	Aço 1	0,09% C	0,87% Mn	0,29% S	0,008% Si
		Aço 2	0,09% C	0,96% Mn	0,28% S	0,004% Si
b	Não testado					
Nota	Todos os testes foram feitos em barras trefiladas com diâmetro de 19 mm					

Fonte: PIMENTEL, 2006

6.4 Inclusões

Afirma que todos os aços produzidos comercialmente contêm uma quantidade mensurável de inclusões, que podem ser endógenas, isto é, intrínsecas ao processo de fabricação e resultantes de reações químicas que ocorrem dentro do metal, ou exógenas, isto é, de origem externa e resultantes da erosão mecânica do refratário ou da reação química entre o metal e o refratário ou entre o metal e a escória (PIMENTEL, 2006).

Com relação às inclusões endógenas, certos tipos, quando apropriadamente controladas, podem se tornar desejáveis, e isto é o que ocorre nos aços em que a usinabilidade é a principal preocupação. Na Tabela 5, são apresentadas as inclusões que mais afetam a usinabilidade dos aços (PIMENTEL, 2006).

Tabela 5 - Inclusões Presentes nos Aços.

Categoria	Efeito	Exemplo	Forma de Presença no Aço
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 sulfetos.
Não-Metálicos duros: -Aluminatos/ -Nitretos	Negativo	Al_2O_3	Menor que 0,05% vol. Em aços desoxidados com alumínio. Presentes isoladamente ou em estrias, com partículas < 5 µm. Podem ser modificadas com cálcio.

Fonte: PIMENTEL, 2006

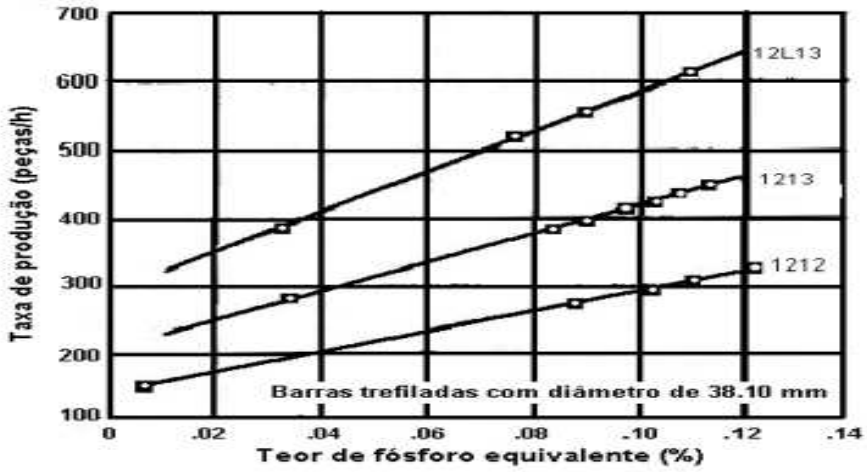
No caso das inclusões Metálicas que tem um efeito positivo, essas inclusões estão presentes como partículas alongadas em produtos laminados. Já os não metálicos duros mostram um efeito negativo que estão presentes isoladamente ou em estrias (PIMENTEL, 2006).

6.4.1 Efeito das Inclusões Metálicas

Pimentel (2006), aborda que embora teoricamente o chumbo ou o bismuto possa ser adicionado em qualquer tipo de aço, usualmente estas adições metálicas são limitadas aos aços de livre corte das séries SAE 11XX e 12XX, pois a combinação de chumbo e sulfeto de manganês tem se mostrado como sendo a que proporciona a maior usinabilidade nos aços. Ele afirma que aços com adição de chumbo são identificados pela inclusão da letra L entre o segundo e terceiro dígito na classificação SAE/AISI, como por exemplo, SAE 12L14 ou SAE 10L45. O teor de chumbo varia entre 0,15 e 0,35%, e a sua adição por si só não proporciona diminuição significativa das propriedades mecânicas à temperatura ambiente. Em temperaturas próximas as

do seu ponto de fusão, o chumbo pode provocar a fragilização do aço. A título de exemplificação, o efeito do chumbo sofre a usinabilidade do aço 1213 pode ser verificado na Figura 20. Por este gráfico, considerando-se uma determinada porcentagem de fósforo equivalente, observa-se que o chumbo melhora a produtividade do aço 1213 em aproximadamente 40%.

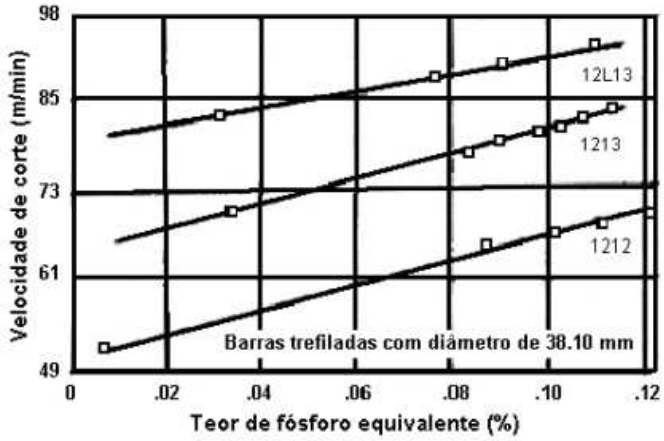
Figura 20 - Efeito da Porcentagem de Fósforo Equivalente sobre a Taxa de Produção para os Aços do Grau 12XX, com e sem adição de Chumbo.



Fonte: PIMENTEL, 2006

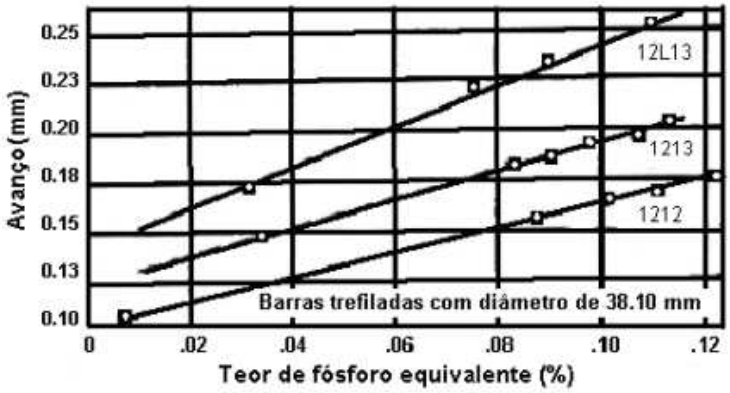
Para uma porcentagem de fósforo equivalente de 0,09%, a adição de chumbo proporciona um aumento de produtividade de 400 peças/h para 560 peças/h. Esse aumento de 40% na produtividade é devido às velocidades de corte e aos avanços da ferramenta que podem ser aumentados, conforme pode ser visto nas Figuras 21 e 22. E menciona que do mesmo modo como nos aços do grau 12XX sem adição de chumbo, um aumento na porcentagem de fósforo equivalente proporciona uma melhora na usinabilidade dos aços ao chumbo, devido a possibilidade de se operar sob maiores condições de corte sem sacrifício da qualidade superficial ou sem comprometer a vida da ferramenta de corte (PIMENTEL, 2006).

Figura 21 - Efeito da Porcentagem de Fósforo equivalente sobre as Condições de Usinagem para os Aços do Grau 12XX, com e sem Adição de Chumbo.



Fonte: PIMENTEL, 2006

Figura 22 - Efeito da Percentagem de Fósforo Equivalente sobre as Condições de Usinagem para os Aços do Grau 12XX, com e sem Adição de Chumbo.



Fonte: PIMENTEL, 2006

Devido a preocupações no sentido ambiental e sanitário durante o processo de fabricação do aço, a utilização de chumbo como elemento de adição tem sido bastante restringida, a ponto de certos países terem abandonado a sua produção. No entanto, devido a sua superior usinabilidade, componentes fabricados com aços ao chumbo ainda são utilizados por praticamente todos os fabricantes de automóveis. Apesar de existir a cerca de 30 anos no mercado, os aços ao bismuto, criados para serem substitutos dos aços ao chumbo, ainda apresentam desempenho inferior, sobretudo em velocidades de corte baixas e médias, o que restringe seu uso como eventual substituto. Segundo Pimentel (2006), para um mesmo resultado em usinabilidade, somente uma terça

parte de bismuto em comparação ao chumbo deve ser utilizada. Esta menor adição traduz-se em maior resistência à fadiga dos componentes fabricados a partir do aço, bem com conferem um melhor acabamento superficial. O bismuto adicionado ao aço DIN 9SMn28 permite um acréscimo de usinabilidade similar ao aço com chumbo.

6.4.2 Efeito das Inclusões Não Metálicas

Segundo Diniz et al. (2006), essas inclusões são de sulfeto de manganês e são obtidas pela inclusão de enxofre em quantidade suficiente para combinar-se com o manganês e com o ferro, formando uma série de sulfetos de manganês e de ferro (principalmente o primeiro), os quais são insolúveis no aço (este tipo de aço é chamado de ressulfurado). As inclusões de MnS podem ser do tipo globular ou podem tornar-se alongadas durante a laminação do aço.

Diniz (2006), verificou que de qualquer modo, elas favorecem a usinabilidade porque causam a formação de um cavaco quebradiço e atuam como uma espécie de lubrificante, impedindo que o cavaco adira à ferramenta e destrua a sua aresta cortante (APC), além de melhorar a qualidade superficial da peça. Na usinagem destes tipos de aço, a velocidade de corte pode ser bastante aumentada (até duplicada) em relação à utilizada em aços não ressulfurados. A tabela 6 mostra a composição química de alguns aços deste tipo. Podemos comentar a respeito da composição:

Tabela 6 - Composição Química de Alguns Aços Ressulfurados

Tipo SAE	% Carbono	% Manganês	% Fósforo	% Enxofre
1110	**0.08-0.13**	**0.30-0.60**	**0.040 max**	**0.08-0.13**
1112	**0.13 max**	**0.70-1.00**	**0.07-0.12**	**0.16-0.23**
1118	**0.14-0.20**	**1.30-1.60**	**0.040 max**	**0.08-0.13**
1125	**0.22-0.28**	**0.60-0.90**	**0.040 max**	**0.08-0.13**

Fonte: DINIZ, 2006

1) O teor de carbono dos aços 11XX pode chegar a 0.55%, preferindo-se os de maior carbono em aplicações em que, além da usinabilidade, se deseja também melhores propriedades mecânicas. Por exemplo o aço 1137 substitui muitas vezes os aços 1045 e 1050, em peças como eixos de geradores, certos tipos de parafusos, engrenagens e peças semelhantes, as quais, além da usinabilidade (peças que sofrem muita usinagem), devem ser duras, resistentes ao desgaste e tenazes. O aço 1137 possui índice de usinabilidade 70 (DINIZ, 2006).

2) Em alguns tipos de baixo carbono, pode-se introduzir fósforo além dos teores normais. Esse elemento dissolve-se na ferrita, cuja dureza e resistência mecânica ficam aumentadas, o que melhora a usinabilidade pois promove a ruptura dos cavacos e dificulta a formação da aresta postiça de corte. Não se ultrapassa, entretanto, 0,12% de P, pois do contrário, seus efeitos negativos poderiam prevalecer (DINIZ, 2006).

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A usinabilidade é um conjunto de caraterísticas que compõem uma resposta do metal às solicitações encontradas durante a sua usinagem. Assim sendo, esta é influenciada pela operação específica em uso, pela velocidade máxima de corte, para um dado acabamento de superfície, pela quantidade de material arrancado, pelo desgaste da ferramenta, pelas condições metalúrgicas do metal, etc.

Os aspectos metalúrgicos envolvidos na obtenção de propriedades reprodutíveis de usinabilidade variam de acordo com o material a ser trabalhado. O aumento dos teores dos elementos químicos como carbono, enxofre e chumbo, pelo fenômeno metalúrgico, influencia fortemente no desgaste da ferramenta de corte, mostrando-se benéfico à melhoria da usinabilidade.

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

Com o crescimento da velocidade de corte, há uma redução na força de usinagem. A profundidade de corte e avanço provoca um aumento na força de usinagem maior que os demais parâmetros de usinagem, durante a operação de torneamento.

Em relação a temperatura de corte, a mesma tem um aumento em função do aumento de velocidade. Valores pequenos de avanço provocam temperaturas mais baixas. A usinabilidade de um aço é fortemente influenciada pelo tipo de ferramenta utilizada, a escolha e o uso correto do fluido de corte e a determinação dos ângulos de posição da ferramenta.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar os efeitos dos elementos de liga na usinabilidade dos aços;
- Avaliar a influência dos parâmetros de corte na formação de cavaco durante a usinagem dos aços;
- Estudar a integridade superficial dos aços em diversos processos de usinagem;
- Analisar ou estudar a usinabilidade dos aços em altas velocidades de corte.
- Estudar o efeito das inclusões na usinabilidade dos aços.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

BARRIOS, André Nozomu Sadoyama. **Modelagem Térmica para Avaliação da Temperatura no Fresamento de Aços Para Moldes e Matrizes.** Tese de Mestrado apresentado a Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2013.

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.

BAPTISTA, A. L. B. **Aspectos metalúrgicos na avaliação da usinabilidade de aços.** Revista Escola de Minas, V. 55, n.2, p. 103-109, 2002.

CALLISTER, W. D. Fundamentos da ciência e engenharia de materiais: uma abordagem integrada. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

CASAGRANDA, M. V. Estudo da Usinabilidade do Aço Inoxidável Austenítico AISI 303. 2004. 25f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos**. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005.

COSTA, Dalberto Dias et al. **Análise dos Parâmetros de torneamento de aços endurecidos.** Universidade Estadual de Campinas, Tese de Mestrado, 1993.

DA SILVA, MÁRCIO AURÉLIO, et al. **Análise da Força Residual na Usinagem Aço BNT 1045**. In: 6° Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Caxias do Sul – RS, 2011.

DINIZ, A. E.; CUPINI, N. L. **Estudo do processo de furação de aços inoxidáveis austeníticos.** Metalurgia - ABM, v. 41, n. 349, p. 881-886, dez. 1986.

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. Arliber Editora,2006.

DE SOUZA, Franco Luiz Castilho, et al. **Avaliação do processo de formação de cavaco no torneamento do aço ABNT 1045.** Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia – Campus Ilha Solteira, 2006.

FERRARESI, D**. Fundamentos da Usinagem dos Materiais**. São Paulo: Blucher LTDA, 1977.

SCHNEIDER Jr. G.; CMfgE Professor Emérito **Tecnologia de engenharia**, **Lawrence Technological University**. 2009.

GERDAU. Metalúrgica Gerdau S.A. Disponível em: <http://www.gerdau.com> Acesso em: 06 de março de 2016.

GONZALES, G. S., CUPINI, N. L. A**spectos metalúrgicos na avaliação da usinabilidade do aço SAE 12L14 submetido a crescentes graus de encruamento por Trefilação**. In: XXXXVII Congresso Anual da ABM, Belo Horizonte, 1992, p. 171-188.

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 2016.

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

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

MACHADO, Álisson Rocha et al. **Teoria da Usinagem dos Materiais.** São Paulo: Editora Blucher, 2009.

METAL TUBO. Olinda, Pernambuco, setembro. 2016. Disponível em http://metaltubo.com.br/?page=home. Acesso em: 30 de setembro de 2016.

NASCIMENTO, F. A.; RIBEIRO, M. V. **Avaliação da usinabilidade do aço inoxidável martensítico AISI 410 no torneamento**. Guaratinguetá, Repositório Institucional Unesp, 2008.

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

PASSOS, L. Apostila de Ciência e Tecnologia dos Materiais, Faculdades Integradas Einstein de Limeira. São Paulo: [s.n.], 2006.

PIMENTEL, Marcelo Francisco. **Influência da Composição Química e da Microestrutura na Usinabilidade do Aço de Corte Fácil com Adição de Chumbo (SAE 12L14).** Dissertação apresentada a título de mestrado. Universidade Estadual Paulista, 2006.

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

SHAW, Milton Clayton. **Metal Cutting Principles**. New York: Oxford University Press, 2005.

TRENT, Edward Moor; WRIGHT, Paul Kenneth, **Metal Cutting**. Butterworth Heinemann, 2000.

WEINGAERTHER, W. L.; SCHROETER, R. B. **Processos de Usinagem**, **Fabricação por remoção de material**, 2003.