

JOSÉ GEREZ MIGUEL

USINABILIDADE DO AÇO DIN C45 TREFILADO DE ALTA RESISTÊNCIA

Guaratinguetá  
2014

GEREZ MIGUEL, José

DM  
2014

*JOSÉ GEREZ MIGUEL*

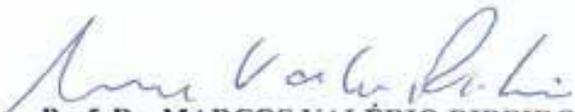
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA  
ÁREA: MATERIAIS

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

  
Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho  
Coordenador

*BANCA EXAMINADORA:*

  
Prof. Dr. MARCOS VALÉRIO RIBEIRO  
Orientador / UNESP/FEG

  
Prof. Dr. JOSÉ VITOR CANDIDO DE SOUZA  
UNESP/FEG

  
Prof. Dr. AMAURI HASSUI  
UNICAMP

*Dezembro de 2014*

JOSÉ GEREZ MIGUEL

USINABILIDADE DO AÇO DIN C45 TREFILADO DE ALTA RESISTÊNCIA

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro

Guaratinguetá  
2014

G367u Gerez, Miguel José  
Usinabilidade do aço DIN C45 trefilado de alta resistência / José Gerez Miguel – Guaratinguetá : [s.n], 2014.  
69 f. : il.  
Bibliografia : f. 67-69  
Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2014.  
Orientador: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro

1. Usinagem 2. Aço de alta resistência I. Título

CDU 621.9

## **DADOS CURRICULARES**

### **JOSÉ GEREZ MIGUEL**

NASCIMENTO	05.09.1960 – JARINU / SP
FILIAÇÃO	José Gerez Navarro Maria Miguel Gerez
1975/1978	Laboratorista Industrial Escola Técnica Industrial – Lauro Gomes – S. B. Campo – Unesp.
1979/1982	Curso de Graduação Tecnologia Mecânica – Soldagem – Fatec - São Paulo - Unesp
2011/2014	Curso de Pós-Graduação em Materiais, nível de Mestrado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.

*À minha esposa Sueli Maria Messias Gerez e  
minhas filhas, engenheira e futura engenheira,  
Michelle Messias Gerez e Adrielle Messias Gerez, pelo incentivo e apoio.*

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos,

ao meu orientador, *Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro*, que jamais deixou de me incentivar. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível.

aos meus pais *José Gerez Navarro e Maria Miguel Gerez*, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos.

às funcionárias da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar,

à secretária da pós-graduação Regina pela dedicação e alegria no atendimento,

à Gerdau S.A., pelo incentivo dos gestores: Sérgio Domingos Junior, Eduardo Ernesto Guilherme e Nicolau de Almeida Santos.

à MSc. Denise Correa de Oliveira e ao MSc. João Paulo Gomes Antunes Costa pela revisão.

aos técnicos do laboratório metalúrgico da Gerdau: Fábio C. Coutinho, Luiz Carlos S. de Oliveira e João Moreira da Motta pelo tratamento térmico, preparação das ferramentas e ensaios realizados.

ao Prof. MSc. Elias Alves de Cunha do SENAI Taubaté pelo projeto e confecção do porta ferramentas.

ao Prof. José Manoel Bernardes pela confecção do porta ferramenta e pelos ensaios de usinabilidade realizados.

ao Prof. Dr. Manoel Cleber Sampaio Alves pelo apoio durante os ensaios

ao Prof. MSc. Renann Pereira Gama pelo apoio no laboratório de metrologia.

“A mente que se abre a uma nova  
ideia jamais voltará ao seu  
tamanho original”

Einstein

Miguel, J. G. **Usinabilidade do aço DIN C45 trefilado de alta resistência 2014**.69f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

## **RESUMO**

Este trabalho é uma proposta para facilitar a quantificação da usinabilidade de um material de alta resistência destinado à produção de peças de segurança para indústria automotiva. A complexidade dos processos de usinagem necessita do desenvolvimento de um método de avaliação da usinabilidade nas mãos de quem produz o material e, pelo grande número de parâmetros envolvidos, dificulta a rápida e precisa obtenção de resultados. A evolução tecnológica tende a desenvolver materiais com melhores propriedades mecânicas e com microestruturas mais refinadas que oferecem maior resistência à usinagem. Neste trabalho foram desenvolvidas ferramentas que permitiram simular uma situação real de usinagem de barras do aço DIN C45, por torneamento radial. O objetivo do trabalho foi avaliar os parâmetros do processo atualmente utilizado, bem como, estabelecer um padrão de referência para aferição, no próprio fornecedor, de melhorias implantadas neste produto. Como resultado foi possível confirmar que o avanço e a rotação atualmente utilizados estão perfeitamente adequados. Entretanto, outro ângulo de saída proposto apresentou aumento significativo da vida da ferramenta nas várias condições testadas. Foi possível realizar a quantificação da usinabilidade, conforme a intenção inicial deste trabalho.

**PALAVRAS-CHAVE:** Usinagem. Aço de alta resistência. Ensaio de usinabilidade. Desgaste. Aço rápido sinterizado.

**Miguel, J. G.** Machinability of a high strength DIN C45 steel cold drawn 2014 76p. Dissertation (Master's Degree in Mechanical Engineering) - Faculdade de Engenharia do campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

#### ABSTRACT

This work is a proposal to quantify the machinability of a high strength material for safety parts production in automotive industry. The complexity of machining processes requires development of an evaluation method of machinability that can be done by those who produce the material before the end-user involvement and, mainly due to large number of parameters involved, it's difficult to obtain fast and accurate results. Technological evolution leads to the development of materials with improved mechanical properties and finer microstructures that offer greater resistance to machining. This work aimed to establish tools that simulated a real situation machining grade DIN C45 steel bars. The goal was to evaluate the process parameters used currently and also to establish a benchmark for evaluation in laboratory for future improvements to be incorporated in the steel bar. In this evaluation, it was confirmed that the advance and speed currently used are perfectly adequate. However, another angle output proposed achieved superior results, significantly increasing tool life in several conditions tested.

**KEYWORDS:** Machining, High strength steel, Machinability testing, Wear, Sintered High Speed Steel.

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	15
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1.	PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO AÇO DIN C45 .....	16
2.1.1.	A carga metálica .....	16
2.1.2.	Forno elétrico a arco .....	17
2.1.3.	Descarburação e desfosforação .....	18
2.1.4.	Forno Panela .....	18
2.1.5.	Desoxidação.....	19
2.1.6.	Dessulfuração .....	20
2.1.7.	Homogeneização e remoção de inclusões não metálicas .....	20
2.1.8.	Desgaseificação .....	20
2.1.9.	Lingotamento Contínuo.....	21
2.1.10.	Produção da bobina laminada.....	22
2.1.11.	Produção da barra trefilada.....	23
2.2.	USINAGEM .....	24
2.2.1.	Torneamento .....	25
2.2.2.	Ensaio de usinabilidade.....	25
2.2.3.	Principais tipos de desgaste de Ferramentas .....	26
2.2.4.	Efeito da composição química e das inclusões sobre a usinabilidade .....	29
2.3.	APLICAÇÕES .....	41
2.3.1.	Suspensão MacPherson .....	41
2.3.2.	Usinagem da haste de amortecedor .....	43
3.	MATERIAIS E MÉTODOS .....	44
3.1.	MATERIAL UTILIZADO .....	44
3.2.	DISPOSITIVOS.....	46
3.2.1.	Desenvolvimento das ferramentas de corte .....	46
3.2.2.	Ferramenta de faceamento e desbaste .....	47
3.2.3.	Porta ferramentas para os bedames .....	48
3.3.	EQUIPAMENTOS .....	49
3.3.1.	Centro de torneamento utilizado.....	49
3.3.2.	Estereoscópio.....	50
3.4.	SISTEMAS DE MEDIÇÃO .....	50
3.4.1.	Medição da rugosidade .....	50
3.5.	METODOLOGIA .....	51
4.	RESULTADOS .....	55
4.1.	RESULTADOS POR AUMENTO DE ROTAÇÃO E COMPRIMENTO DE CORTE 55	
4.2.	RESULTADOS POR VARIAÇÃO DO ÂNGULO DE SAÍDA .....	56
4.3.	RESULTADOS POR VARIAÇÃO DE AVANÇO .....	60
5.	CONCLUSÕES.....	64

6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	66
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	67

## TABELA DAS FIGURAS

Figura 1 - Forno a arco elétrico .....	17
Figura 2 - Forno Panela .....	19
Figura 3 - Lingotamento contínuo .....	21
Figura 4 - Resfriamento controlado de bobinas.....	22
Figura 5 - Influência do resfriamento na dureza do aço DIN C45 após a laminação.....	23
Figura 6 - Curva de encruamento do aço DIN C45.....	24
Figura 7 - Exemplo de apresentação de resultado de vida da ferramenta . <b>Erro! Indicador não definido.</b>	
Figura 8 - Desgaste de flanco .....	26
Figura 9 - Desgaste em cratera .....	27
Figura 10 - Desgaste por deformação plástica.....	27
Figura 11 - Aresta postiça de corte.....	28
Figura 12 - Desgaste frontal x velocidade de corte e região de formação da aresta postiça de corte .....	29
Figura 13 - Efeito do enxofre sobre a usinabilidade.....	32
Figura 14 - Efeito do teor de enxofre no atrito entre o cavaco e a ferramenta.....	33
Figura 15 - Relação entre o teor de enxofre e o tamanho do cavaco.....	34
Figura 16 - Efeito do teor de carbono sobre o índice de usinabilidade de barras de aço B1113 em testes de torneamento a pressão constante.....	34
Figura 17 - Efeito do teor de nitrogênio sobre o desempenho de barras de aço trefiladas, utilizadas na produção de tambores de porcas de parafuso. ....	36
Figura 18 - Influência da razão comprimento sobre espessura do sulfeto no índice de usinabilidade..... <b>Erro! Indicador não definido.</b>	
Figura 19 - Diagrama binário cal-alumina .....	39
Figura 20 - Diagrama ternário cal-sílica-alumina.....	40
Figura 21 - Suspensão MacPherson .....	41
Figura 22 - Forças atuantes em um amortecedor dianteiro .....	42
Figura 23 - Corpo de prova ensaiado.....	44
Figura 24 - Micro estrutura do material testado - Ataque nital - Aumento 500X .....	45
Figura 25 - Desenho do bedame .....	46
Figura 26 – Microestrutura do aço rápido laminado (a) e aço rápido sinterizado(b) .....	47
Figura 27 - Ferramenta de faceamento e desbaste.....	48
Figura 28 - Porta ferramentas Sandvik SVJBL2020K .....	48
Figura 29 - Porta-ferramenta para o bedame .....	49
Figura 30 - Centro de torneamento.....	49
Figura 31 - Estereoscópico da marca Zeiss, modelo Stemi 2000.....	50
Figura 32 - a - Ilustração do efeito Hall e b - Sensor de efeito Hall fabricante LEM, modelo AT B10. ....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 33 - Sensor de efeito Hall.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 34 - Módulo de canais modelo BNC-2120. ....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 35 - Computador para aquisição de dados .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>

Figura 36 - Rugosímetro Mahr modelo MarSurf M300 e MarSurf RD 18 .....	51
Figura 37 - Esquema de avanço do bedame de corte .....	52
Figura 38 - Aspecto das ferramentas após os ensaios .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 39 - Estado da Ferramenta do ensaio 4 após o uso. ....	56
Figura 40 - Aspecto do cavaco em função do aumento de velocidade de corte.....	56
Figura 41 - Fotos de aresta postiça de corte nas ferramentas dos ensaios 5, 6 e 7, onde S indica superfície de saída e F de folga. ....	58
Figura 42 - Variação da rugosidade em função do ângulo de saída dos ensaios 5 e 6.....	59
Figura 43 - Aspecto do cavaco em função da variação do ângulo de saída da ferramenta de corte .....	60
Figura 44 - Variação de rugosidade em função do avanço.....	62
Figura 45 - Aspecto do cavaco em função da variação do avanço.....	62
Figura 46 - Resultado de medição de potência de corte na amostra 13 do pré-teste.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O compromisso com a melhoria de desempenho e redução de consumo de combustíveis dos veículos tem levado a novos projetos com aumento das tensões atuantes nos componentes. As propriedades mecânicas das peças proporcionalmente são mais elevadas e raramente encontra-se solução de engenharia para atendê-las que não afetem significativamente a usinabilidade do material.

O aço DIN C45 trefilado associa boa resistência mecânica, com baixo custo e é muito utilizado na produção de eixo e peças assemelhadas que necessitam de têmperas localizadas.

Conforme Pimentel (2006), nos componentes mecânicos de aço, a operação de usinagem pode representar mais de 50% do custo de produção. Nas últimas décadas tivemos significativo avanço no campo de equipamento e ferramentas de usinagem, entretanto, pouco se avançou na área metalúrgica.

Os estudos disponíveis abordam separadamente os efeitos da composição química, efeitos das inclusões, taxas de encruamento ou parâmetros do processo de usinagem na usinabilidade da barra trefilada.

O presente trabalho aborda uma forma para determinar a usinabilidade, com uso de equipamentos disponíveis. O objetivo principal é criar uma referência que permita medir pequenos incrementos de usinabilidade com as melhorias implantadas no aço trefilado, sem recorrer aos testes de desempenho no cliente final, devido às dificuldades de acompanhamento e principalmente de interrupção do processo produtivo para isso.

Também será possível aferir se os parâmetros do processo de usinagem estão adequados a cada aplicação específica.

Foram desenvolvidas ferramentas de aço rápido sinterizado, devido a sua grande homogeneidade metalúrgica, que permitiram simular uma situação real de usinagem de uma barra trefilada de aço de alta resistência do aço DIN C45.

Pela elevada homogeneidade metalúrgica das ferramentas de aço rápido sinterizado e grande emprego na indústria, elas serão utilizadas neste trabalho a fim de eliminar uma variável do processo e manter-se o mais próximo da realidade do mercado.

Esta proposta de ensaio de usinabilidade vem complementar os avanços metalúrgicos, principalmente de controle de processos, que permitem atuar de forma pontual em cada especificação, buscando na soma de pequenos benefícios intrínsecos na obtenção de

um resultado conjunto mais significativo na usinabilidade de uma determinada barra de aço trefilado.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo são abordados os aspectos mecânicos e metalúrgicos da produção da barra de aço de alta resistência, os diferentes ensaios de usinabilidade existentes, alguns resultados de trabalhos de usinabilidade, as influências dos elementos de liga na usinabilidade e detalhamento da aplicação do aço DIN C45 na produção de hastes de amortecedor, particularmente na suspensão tipo *MACPHERSON*.

### **2.1. PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO AÇO DIN C45**

O aço DIN C45 analisado é elaborado em forno elétrico a arco e a matéria-prima principal é a sucata de ferro e aço, que pode ser de obsolescência, retorno da própria produção ou de outros fornecedores.

As etapas principais para sua produção são: montagem da carga metálica; fusão em forno a arco elétrico; descarburização e desfosforação; refino em forno panela; desoxidação; dessulfuração; homogeneização e remoção de inclusões não metálicas; desgaseificação e lingotamento contínuo.

#### **2.1.1. A carga metálica**

A carga do forno a arco é composta de sucata de ferro e aço, ferro-liga e ferro gusa. Visando aproveitar os elementos de liga contidos na sucata, é realizada uma cuidadosa classificação e armazenamento da sucata. Normalmente, a sucata é classificada em grupos (por família de aços), de modo reduzir a adição de ferro liga na obtenção da composição química desejada. Uma usina de aços especiais pode fazer uso de até 50 diferentes grupos de sucata.

Existem várias opções de ferro liga: há ligas de alto teor de carbono ou baixo teor de carbono, ligas de baixo fósforo e enxofre e ligas de altos e baixos teores de residuais (Cr, Ni, Mo, V e etc.).

O maior custo de uma siderúrgica está na aciaria, portanto, é importante fazer um balanço para obter o melhor equilíbrio econômico-operacional das opções disponíveis para atingir a especificação de aço.

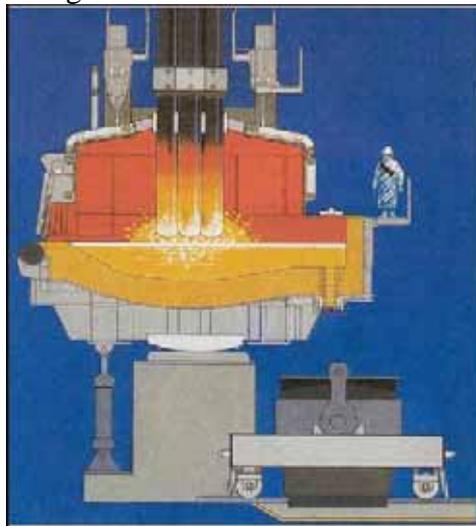
A carga é pré-acondicionada em tamborões onde também é adicional a cal da escoria, visando redução do tempo de carregamento do forno.

### 2.1.2. Forno elétrico a arco

A maior parte do aço produzido em fornos elétricos provém de fornos a arco. O forno elétrico a arco é um dos instrumentos mais versáteis de produção de aço. A tendência a instalações cada vez maiores (fornos de 200-250 t) evidenciam sua importância. O aumento do emprego de aços modificados adequados a cada aplicação (com faixas de composição química e/ou temperabilidade diferentes dos valores indicados pelas normas nacionais e internacionais) são mais economicamente produzidos no forno a arco.

Na Figura 1 é mostrado o esquema de um forno a arco elétrico. Os três eletrodos de grafite são ligados às três fases do secundário de um transformador de tensão variável cuja faixa de operação é, normalmente, de 100-300 V. É estabelecido arco elétrico entre os eletrodos e a sucata, assim, a radiação emitida por este arco funde a carga.

Figura 1 - Forno a arco elétrico



Fonte: (ACIARIANEWS, 2012)

Nos fornos modernos, há ainda um sistema de captação de fumos, evitando-se a emissão de pós poluentes para a atmosfera.

As tecnologias desenvolvidas ou em andamento para os fornos elétricos a arco são (CHEVRAND, 2003):

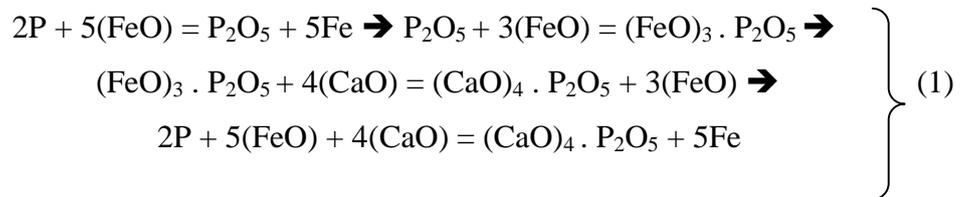
- Uso de queimadores/injetores de oxigênio e combustíveis ou outros materiais;
- Substituição da energia elétrica por energia fóssil;

- Injeção de gás inerte pela soleira do forno;
- Aumento do uso de gusa sólido e gusa líquido;
- Utilização dos fornos tipo “Twin Shell” (forno com carcaça dupla) e “High Shell” (forno com carcaça elevada).

### 2.1.3. Descarburização e desfosforização

Ao final da fusão se deseja que o teor de carbono do aço esteja acima da faixa especificada para que, sopro de oxigênio oxide o C ( $C + \frac{1}{2} O_2 = CO$ ), ocorrendo agitação e eliminação de gases dissolvidos.

Neste estágio da corrida, ocorre também a desfosforização para atender a faixa especificada (HASSALL; JACKAMAN; HAWKINS, 1991), descritas pelas equações 1 e 2:



Ou por



As condições ideais para o progresso da desfosforização são:

- Baixa temperatura (~ 1540 °C), pois a oxidação do fósforo é exotérmica.
- Escória excessivamente básica, para abaixar a atividade de  $P_2O_5$ , formando  $(CaO)_4 \cdot P_2O_5$ .

Notadamente esse resultado é obtido pela adição de cal e minério de ferro. Atualmente, tem sido empregado o sistema de lanças COJET, através do qual são injetados oxigênio e combustível. Com uma significativa redução do tempo requerido na desfosforização convencional (minério + cal), ainda com excelentes resultados de desfosforização.

Após fusão, descarburização e desfosforização, o aço é vazado para uma panela, onde é removida a escória de desfosforização e em seguida transferida para a estação do forno panela.

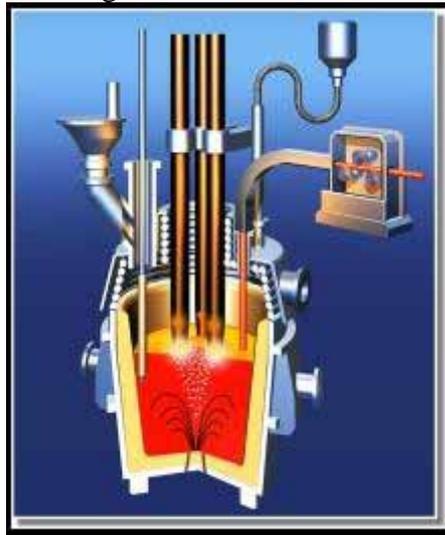
### 2.1.4. Forno Panela

O forno panela semelhante a um forno elétrico a arco, cuja carga é o aço líquido em uma panela, conforme Figura 2. Através do reaquecimento do aço líquido, facilita operações de refino do aço, deixando o forno elétrico disponível para fusão de novas corridas, bem como permite: o controle restrito da temperatura de cada liga adequada ao vazamento, o ajustes

estritos da composição química, a redução da perda de ligas que reagem durante a marcha, a troca e controle da escória, o uso de atmosfera não oxidante, a agitação para homogeneização da carga e a Melhor limpeza dos aços (através da desoxidação, dessulfuração e remoção de inclusões).

Também faz parte do conjunto forno panela: carro de transferência; equipamento automático para amostragem e sistema de despoeiramento.

Figura 2 - Forno Panela



Fonte: (ACIARIANEWS, 2012)

### 2.1.5. Desoxidação

O oxigênio dissolvido no aço líquido geralmente é indesejado, pois pode formar compostos (tipo óxidos duros) que interferem diretamente na qualidade física e superficial do produto reduzindo a resistência a fadiga. No forno panela a desoxidação é realizada através da adição de elementos que combinam com o oxigênio dissolvido no aço, formando compostos de densidade menor que o aço líquido e que flutam e são incorporados na escória. Podendo ser usado: carbono, silício, alumínio e titânio.

Seja a desoxidação representada pela equação genérica:



Onde: M é o metal desoxidante dissolvido no aço e  $M_xO_y$  o óxido formado.

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

### 2.1.6. Dessulfuração

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



Ou, ionicamente, por:



As condições para uma boa dessulfuração serão, portanto:

- Escória excessivamente básica (alto CaO ou  $\text{O}^{-2}$ );
- Aço desoxidado (baixo FeO ou  $\underline{\text{O}}$ );
- Alta temperatura (~1660 °C).

Esse processamento provoca a absorção de gases (hidrogênio e nitrogênio) pelo aço líquido, indesejável em alguns aços, podendo ser necessária a desgaseificação posterior.

### 2.1.7. Homogeneização e remoção de inclusões não metálicas

Para agitação e homogeneização térmica e química do aço líquido é injetado argônio pelo fundo da panela.

Essa movimentação do aço líquido facilita a flotação da maior parte das inclusões que são incorporadas na escoria.

### 2.1.8. Desgaseificação

Na desgaseificação o aço líquido é exposto a um vácuo médio (0,5-2mm Hg) e agitado, pela injeção de Argônio ou nitrogênio ( quando desejado no aço em proporções acima do normalmente obtido) pelo fundo da panela.

Os gases como oxigênio, nitrogênio e hidrogênio em contato com a baixa pressão são carregados pelo sistema de vácuo.

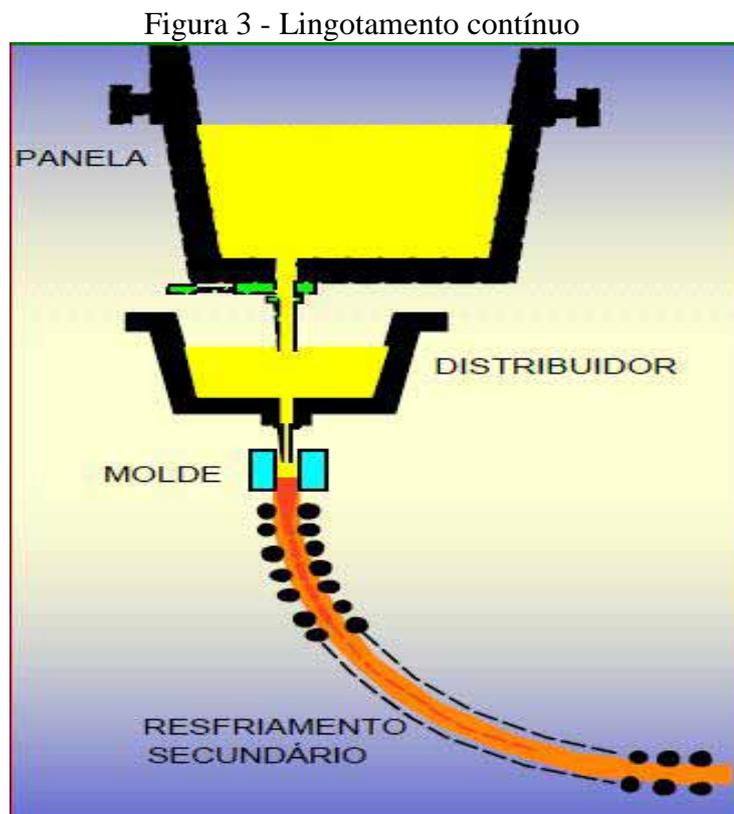
### 2.1.9. Lingotamento Contínuo

O processo de lingotamento contínuo consiste basicamente no vazamento do aço líquido em um recipiente com uma ou mais saídas que alimentam os moldes de solidificação, conforme demonstrado na Figura 3.

Os moldes de cobre são refrigerados, permitindo a produção de tarugos. O controle o nível do aço líquido no molde é feito por uma válvula tipo tampão.

Alguns trabalhos demonstram que a simples adição de enxofre, para melhorar a usinabilidade do material, pode provocar interferências no processo que inviabilizam seu uso nas proporções desejadas.

Conforme Contini (2011) e Magalhães (2010), na presença de elevados teores de S ocorre o fenômeno de deposição de  $Al_2O_3$  na válvula tampão, também conhecido com *cloggin*, podendo provocar o descontrole do nível do molde e até o arraste dessas inclusões depositadas, gerando macroinclusões no aço.



Fonte: (ACIARIANEWS, 2012)

### 2.1.10. Produção da bobina laminada

O aço do lingotamento contínuo na forma de tarugo quadrado de 155 mm é reaquecido e laminado em bobinas, onde são observados os cuidados e objetivos descritos no Quadro 1.

No final da laminação: a velocidade, sistema de abertura ou fechamento esteira de resfriamento, bem como a possibilidade de ventilação forçada são considerados e realizados conforme a dureza e micro estrutura desejada.

Quadro 1 - Cuidados na laminação do fio máquina

Cuidados	Objetivo
Tolerância de bitola restrita	Garantir menor variação de resultados de propriedades mecânicas da barra trefilada.
Baixa temperatura de reaquecimento do tarugo	Obtenção de microestrutura fina e homogênea com baixo nível de descarbonetação superficial.
Baixa temperatura de saída no formador de espiras	Obtenção de microestrutura fina e homogênea
Controle de resfriamento das espiras na esteira (Figura 4)	Obtenção de microestrutura fina e homogênea e propriedades mecânicas adequadas para trefilção

Fonte: (O AUTOR)

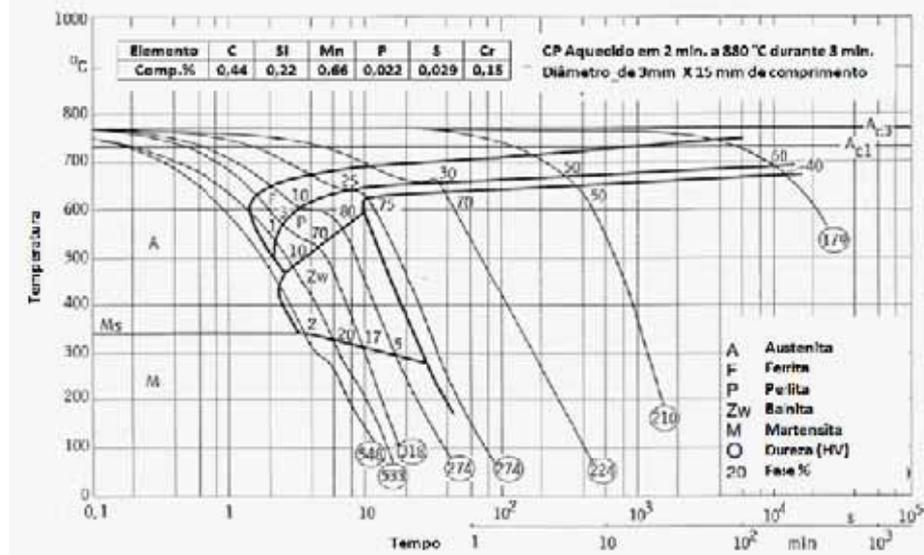
Figura 4 - Resfriamento controlado de bobinas



Fonte: (O AUTOR)

No gráfico da Figura 5 pode se observar como a velocidade de resfriamento afeta a dureza e microestrutura no final da laminação a quente.

Figura 5 - Influência do resfriamento na dureza do aço DIN C45 após a laminação



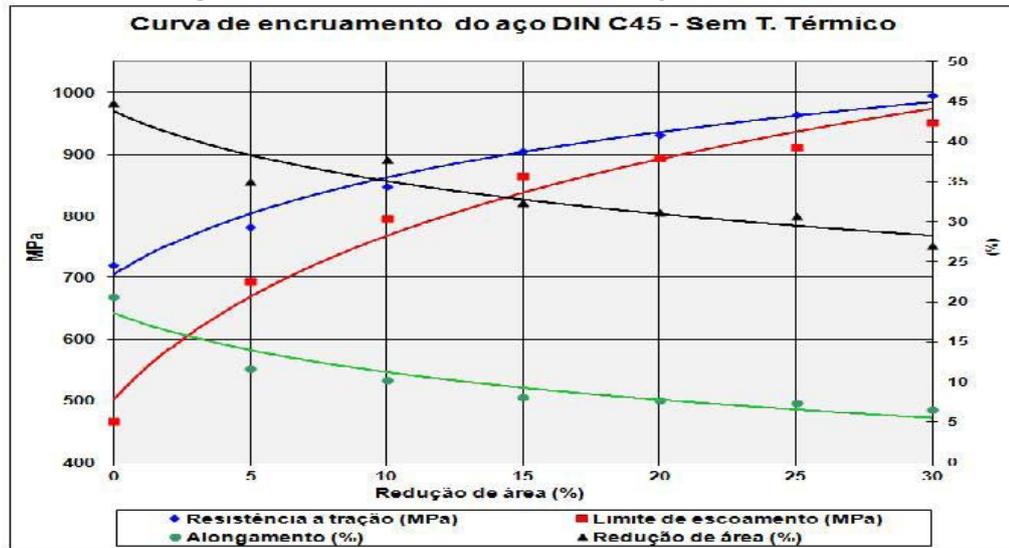
Fonte: (ATLAS ZUR WARMEBEHANDLUNG DER STAHL, ADAPTADA, 1954)

### 2.1.11. Produção da barra trefilada

As bobinas são trefiladas em barras com redução de área compatíveis com a especificação do cliente final, a bitola requerida e a bitola disponível do material laminado, que geralmente são padronizadas visando produtividade na laminação.

Para encolha da bitola do laminado mais adequada é elaborada uma curva de encruamento do aço estudado, conforme pode ser observado na Figura 6, onde se podem prever as propriedades mecânicas das várias bitolas disponíveis através da equivalente redução de área na trefilação.

Figura 6 - Curva de encruamento do aço DIN C45



Fonte: (O AUTOR)

Para elaboração da curva de encruamento, amostras do mesmo material são trefiladas com reduções de área diferentes e crescentes (neste caso com acréscimo de 5% entre cada passe). É importante que a redução aplicada seja realizada num único passe, para permitir simular o resultado numa condição real de encruamento. Em seguida cada amostra é ensaiada para obtenção dos resultados. Este gráfico permite escolher qual a melhor bitola do material laminado que atende as propriedades mecânicas requeridas na barra trefilada.

## 2.2. USINAGEM

A usinagem é um importante método pelo qual os metais são transformados, através de remoção com formação de cavacos, para adquirirem as formas necessárias de utilização. O comportamento à usinagem é muito complexo, pois, envolve uma enorme quantidade de variáveis, tais como: ferramenta; peças; material empregado; equipamento; meios de refrigerações e etc.

A usinabilidade interessa a todos aqueles que direta ou indiretamente estão envolvidos na produção de peças por meio da formação de cavaco.

Usinabilidade é usado para indicar o desempenho de usinagem de um material; pode ser definida pela capacidade de um material ser cortado ou usinado por uma ferramenta apropriada (MURPHY; AYLWARD, 1971). A usinabilidade não é a propriedade de um único material, mas sim a propriedade resultante da combinação de dois materiais; isto é, da combinação ferramenta – peça usinada. Sob este ponto de vista, quando se fala em

usinabilidade, esta grandeza tecnológica deve ser encarada como uma propriedade resultante da combinação de dois materiais (FERRARESI, 1995).

Não foram estabelecidas unidades fundamentais que possam descrever usinabilidade devido ao grande número de variáveis envolvidos nesse processo. Assim, o desempenho de usinagem pode ser dado em termos de uma taxa percentual de desempenho comparado com outro material conhecido e tomado como padrão.

### **2.2.1. Torneamento**

Segundo a norma NBR 206175: “torneamento é um processo mecânico de usinagem destinado a obter superfícies através de rotações com a ajuda de uma ou mais ferramentas monocortantes”.

### **2.2.2. Ensaios de usinabilidade**

Os índices de usinabilidade podem ser obtidos em ensaios de longa ou curta duração. Nos ensaios de longa duração pode-se traçar as curvas de vida de uma ferramenta, com uma precisão razoável. Nos ensaios de curta duração aplica-se condições de usinagem exageradas e determinam desgastes pequenos. Os ensaios de curta duração apresentam a vantagem de necessitarem um consumo mínimo de material e de serem realizados num tempo relativamente pequeno (FERRARESI, 1995).

#### **2.2.2.1. Ensaio de “Vida da ferramenta x Velocidade de corte”**

Um dos ensaios de curta duração é o ensaio de “vida da ferramenta x velocidade de corte”, originalmente desenvolvido por F. W. Taylor como um meio de avaliar o desempenho de aço-ferramenta. Embora o ensaio possa ser executado em muitos tipos de máquina-ferramenta, ele é frequentemente conduzido em operações de torneamento mecânico para fácil obtenção dos dados (MURPHY; AYLWARD, 1971).

Os resultados dos ensaios de vida da ferramenta são, usualmente, plotados em coordenadas cartesianas ou logarítmicas. Os resultados típicos do ensaio originam curvas exponenciais quando mostrados em coordenadas cartesianas, enquanto os mesmos resultados apresentam relação linear aparente entre velocidade de corte e quando mostrados em coordenadas logarítmicas.

### 2.2.2.1.1. Procedimentos do ensaio de vida da ferramenta

O ensaio de vida da ferramenta estabelece a relação entre a velocidade de corte e a vida da ferramenta para determinadas condições e materiais particulares. Onde a vida da ferramenta é definida como o tempo de usinagem até ser alcançada a situação correspondente ao critério de fim de vida preestabelecido. Para acelerar a obtenção dos resultados e como o ensaio é comparativo, o corte pode ser executado a seco. Em ensaios utilizando uma série de velocidades de corte, dados podem ser obtidos para mostrar o efeito da velocidade de corte sobre a vida da ferramenta.

### 2.2.3. Principais tipos de desgaste de Ferramentas

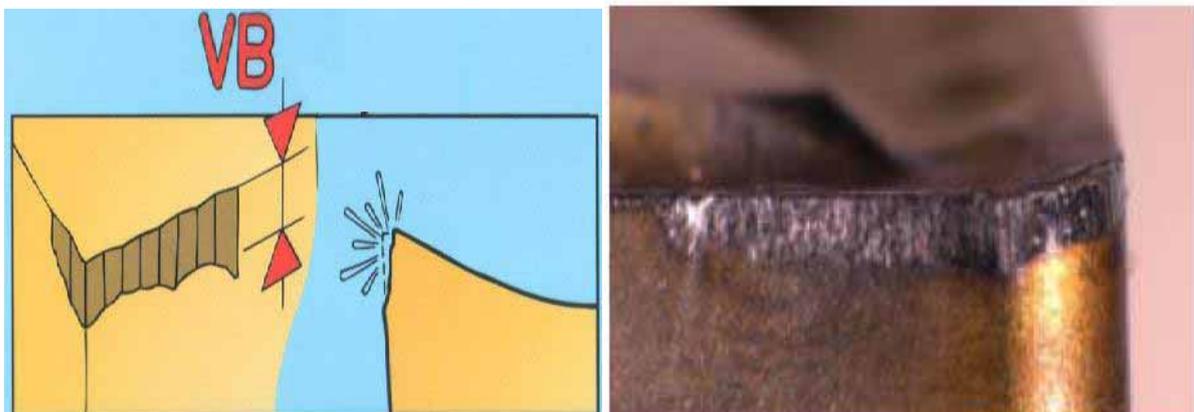
Conforme Diniz *et. al* (2008) o desgaste é “perda contínua e microscópica de partículas da ferramenta devido à ação do corte. As demais ocorrências são denominadas avarias”.

#### 2.2.3.1. Desgaste de flanco

O desgaste de flanco ocorre na superfície de folga da ferramenta, devido ao contato entre a peça e a ferramenta. Este é o tipo de desgaste mais comum e é agravado pelo aumento da velocidade de corte.

Quando este tipo de desgaste ocorre aumenta a rugosidade e altera a dimensão, podendo a peça ficar fora da tolerância estabelecida. Na Figura 8 pode-se ver exemplo do desgaste de flanco.

Figura 7 - Desgaste de flanco

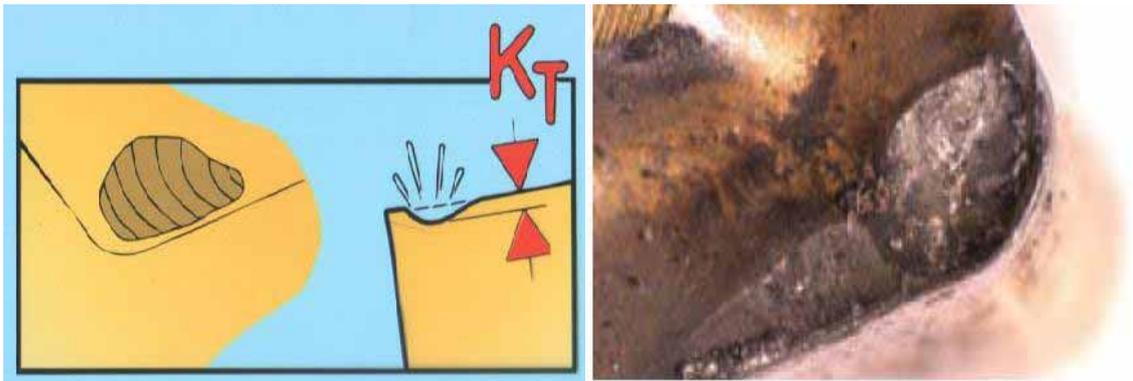


Fonte: (MANUAL TÉCNICO DE USINAGEM SANDVIK COROMANT, 2005.10)

### 2.2.3.2. Desgaste de cratera

O desgaste de cratera, conforme Figura 9, ocorre na superfície de saída da ferramenta devido o contato entre a ferramenta e o cavaco. O aumento de velocidade agrava este tipo de desgaste. Com o agravamento do desgaste em cratera pode ocorrer a quebra da ferramenta, quando este se encontra com o desgaste frontal.

Figura 8 - Desgaste em cratera

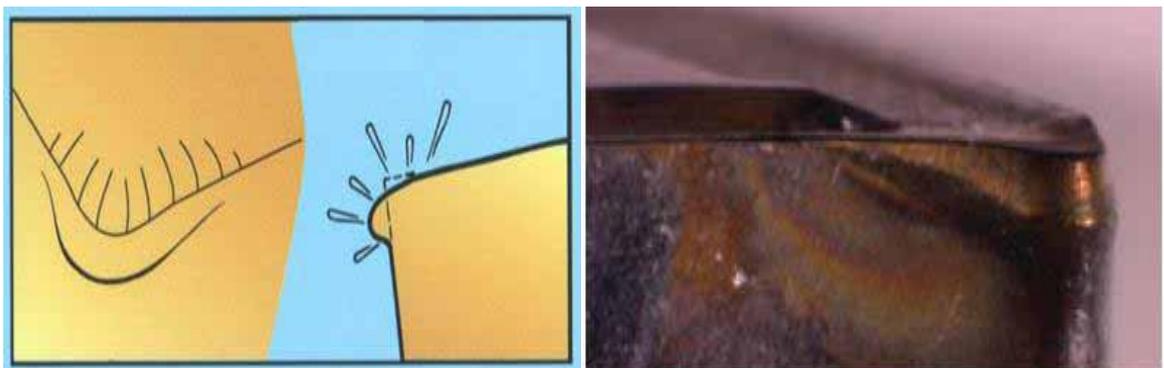


Fonte: (MANUAL TÉCNICO DE USINAGEM SANDVIK COROMANT, 2005.10)

### 2.2.3.3. Deformação plástica da aresta de corte

A deformação plástica da aresta de corte ocorre devido a altas temperaturas e a pressão aplicada na ponta da ferramenta que toma uma forma bem típica, conforme ilustrado na Figura 10. Esse tipo de desgaste dificulta o controle do cavaco, aumenta a rugosidade superficial da região usinada e pode levar à quebra da ferramenta. Para evitar o desgaste por deformação plástica de ser utilizada ferramenta com maior dureza a quente .

Figura 9 - Desgaste por deformação plástica

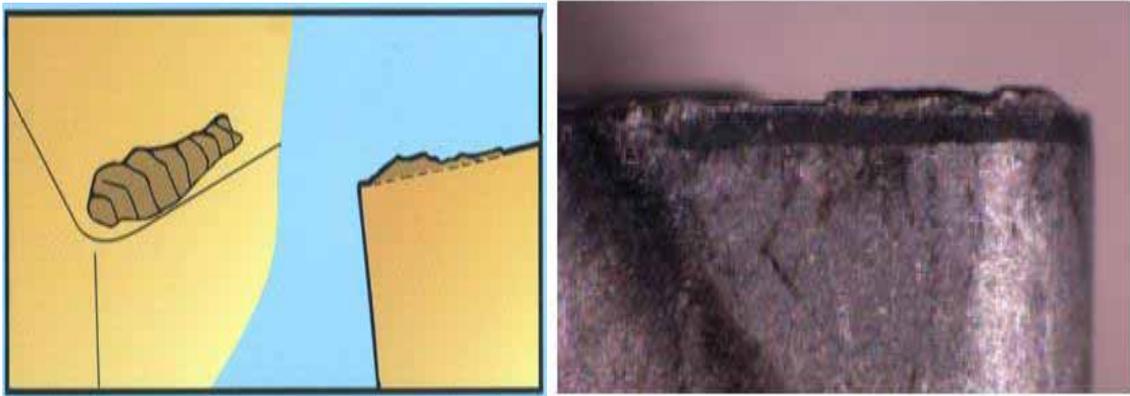


Fonte: (MANUAL TÉCNICO DE USINAGEM SANDVIK COROMANT, 2005.10)

### 2.2.3.1. Aresta postiça de corte

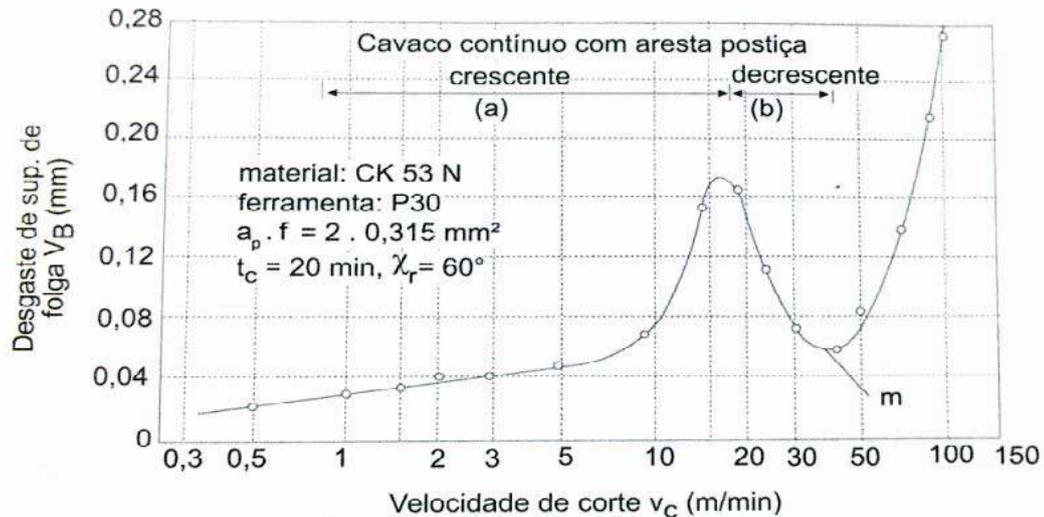
Conforme Diniz (2008), em baixas velocidades de corte devido à pressão do cavaco na superfície de saída, pode ocorrer que a parte de baixo do cavaco tenha um movimento relativo momentaneamente nulo, vindo a soldar-se na ferramenta e com a pressão do cavaco que passa nessa região vai encruando-se e recebendo novas porções de material, como pode ser observado na Figura 11. A aresta postiça de corte age como aresta de corte e modifica o comportamento da ferramenta em relação a seu desgaste, força de corte e acabamento superficial da peça. Com o aumento da velocidade de corte ocorre o aquecimento da aresta postiça, que a partir da sua temperatura de recristalização perde o efeito do encruamento, tendendo que esse material seja arrastado pelo cavaco ou se incruste na peça. Esse desprendimento de material altera a rugosidade do material usinado e pode arrastar parte da superfície de folga, reduzindo a vida da ferramenta. Para evitar-se a aresta postiça de corte pode-se aumentar o ângulo de saída da ferramenta ou aumentar a velocidade de corte. A partir dessa velocidade chamada de crítica não ocorre a formação da aresta postiça, conforme demonstrado na Figura 12. Outras ações como aumento do avanço, profundidade de corte e retirada da refrigeração colaboram para redução da aresta postiça de corte.

Figura 10 - Aresta postiça de corte



Fonte: (MANUAL TÉCNICO DE USINAGEM SANDVIK COROMANT, 2005.10)

Figura 11 - Desgaste frontal x velocidade de corte e região de formação da aresta postiça de corte



Fonte: DINIZ (2008)

#### 2.2.4. Efeito da composição química e das inclusões sobre a usinabilidade

A usinabilidade dos metais deve ser analisada através da influência das variáveis dos seguintes componentes, intimamente relacionados (FERRARESI, 1995):

- Material da peça
- Composição química, que determina as propriedades do material;
- Resistência ao cisalhamento, que pode ser calculada a partir do ângulo de cisalhamento medido e das forças de corte, e frequentemente é um tanto maior do que a resistência à tração (TROUP, 1966);
- Endurecimento por trabalho a frio, medido pela taxa de aumento da resistência e diminuição da ductilidade com o aumento da deformação plástica (SMITH, 1970);
- Ductilidade, a capacidade de deformar plasticamente sem ruptura;
- Abrasividade dos constituintes microestruturais que são mais duros do que a ferramenta de corte;
- Natureza das inclusões e interfaces entre elas e a matriz metálica e a ferramenta de corte.
- Processo mecânico e condições de usinagem
- Material da ferramenta;
- Condições de usinagem (velocidade, avanço, profundidade, geometria da ferramenta, etc.);
- Fluidos de corte;

- Rigidez da máquina, ferramenta e do sistema de fixação da peça;
- Tipos de trabalhos executados pela ferramenta (operação empregada: corte contínuo ou intermitente, condições de entrada e saída da ferramenta).
- Critério empregado na avaliação

A seguir, será abordado o efeito da composição química e das inclusões sobre a usinabilidade.

De acordo com Tolley e Charles (1976) a usinabilidade dos aços é diretamente influenciada pela tensão limite de cisalhamento e pela ductilidade do material. Quanto menor for a tensão de cisalhamento e quanto menor for a ductilidade em um mesmo material, maior será a sua usinabilidade. Como baixa ductilidade e baixa resistência mecânica são propriedades difíceis de serem conciliadas em um mesmo material, uma relação de compromisso deve ser buscada. Naturalmente a microestrutura da peça influencia diretamente as propriedades citadas, desse modo, uma das formas de melhorar a usinabilidade é através do controle da microestrutura do material a usinar ( NELIS, 2003)

#### **2.2.4.1. Efeito da composição química sobre a usinabilidade**

No Quadro 2 pode-se observar a influência dos elementos químicos em efeitos no aço e na usinabilidade com especial ênfase nas forças de corte, forma do cavaco, desgaste de ferramenta e acabamento superficial (LESKOVAR E GRUM, 1986).

Quadro 2 - Efeito da composição química sobre a usinabilidade

Elemento químico	Efeito no Aço	Critério de usinabilidade				Usinabilidade
		Força de usinagem	Forma do cavaco	Desgaste	Acabamento superficial	
Carbono	Perlita/Cementita	■		□		□
Silício	Forma carbonetos, inclusões duras de silicatos SiO <sub>2</sub>	□	■	□		□
Manganês	MnO, MnS, MnTe					□>1% / ■<1%
Alumínio	forma nitretos e possibilita o refinamento de grão da estrutura		□	□		□
Titânio	forma nitretos, carbonetos e possibilita o refinamento de grão da estrutura, aumenta da tenacidade		□	□		□
Cobre	aumenta a tenacidade e aumenta a resistência em altas temperaturas			□	□	□
Enxofre	MnS, FeS, FeS, eutético (fragilidade a quente)	■	■		■	■
Fósforo	Fragilidade a frio e segregação	■	■	□	■	■
Oxigênio	SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MnO, (FeO, Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )			□		□
Nitrogênio	Forma nitretos com Al e Ti		□	□		□
Pb(Bi)	ocorrência de inclusões metálicas insolúveis	■	■	■	■	■
Níquel	promove refinamento de grão da microestrutura					□
Cobalto	aumenta a tenacidade e aumenta a resistência em altas temperaturas			□	□	□
Cromo	forma carbonetos, promove o refinamento de grão da estrutura					□
Molibdênio	forma carbonetos, promove o refinamento de grão da estrutura					□
Tungstênio	forma carbonetos, promove o refinamento de grão da estrutura					□
Vanádio	forma carbonetos, nitretos, aumenta a resistência		□	□		□
Nióbio	forma carbonetos, nitretos, aumenta a resistência		□	□		□

Efeito: favorável ■                      desfavorável □

Fonte: (LESKOVAR E GRUM, 1986)

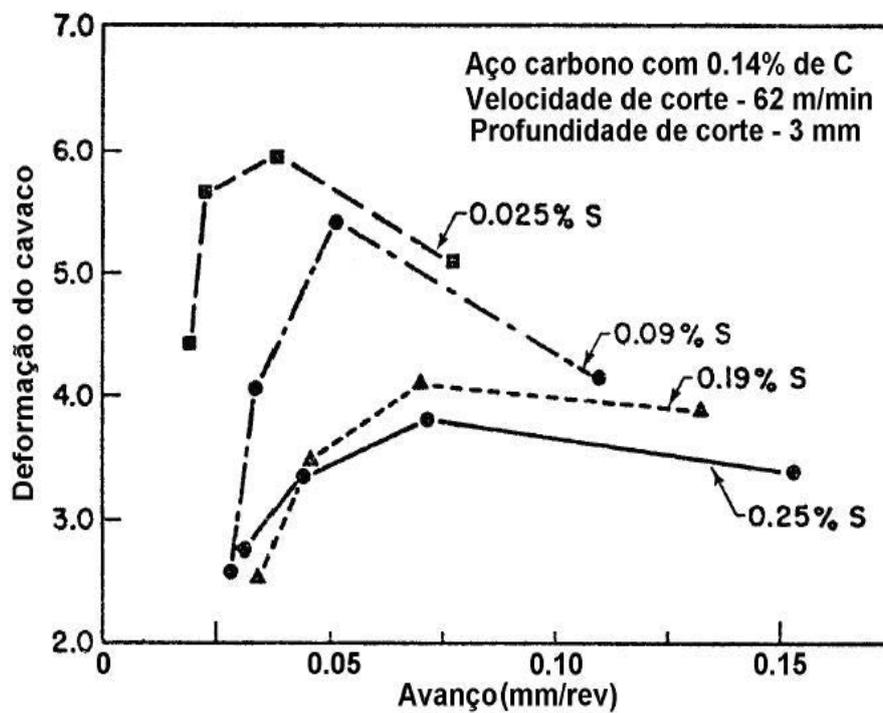
- Efeito do enxofre

A melhora da usinabilidade nos aços baixo – carbono é obtida pelo aumento do teor de enxofre para valores acima de 0,040% (GARVEY; TATA, 1965). Por não ser um aditivo caro, o enxofre é extensivamente usado para melhorar a usinabilidade dos aços.

Nos aço, o enxofre se apresenta, geralmente, combinado com o manganês na forma de inclusões de sulfeto de manganês, MnS. As características desse tipo de inclusões, tais como tamanho, morfologia, frequência e distribuição, exercem grande influência sobre a usinabilidade dos aços.

Para entender a influência do enxofre sobre a usinabilidade, ensaios de torneamento foram conduzidos com barras de diâmetro de 22,23 mm contendo 0,14% de carbono, 0,80% de manganês e teor de enxofre variando na faixa de 0,025 a 0,25% (BOULGER et al., 1957). Na Figura 13 pode-se observar que, para um dado avanço, um aumento no teor de enxofre diminui a deformabilidade do cavaco, ou seja, a quantidade de deformação plástica associada com a formação do cavaco, favorecendo a quebra do cavaco, reduzindo o contato deste com ferramenta e portanto o aquecimento e desgaste desta.

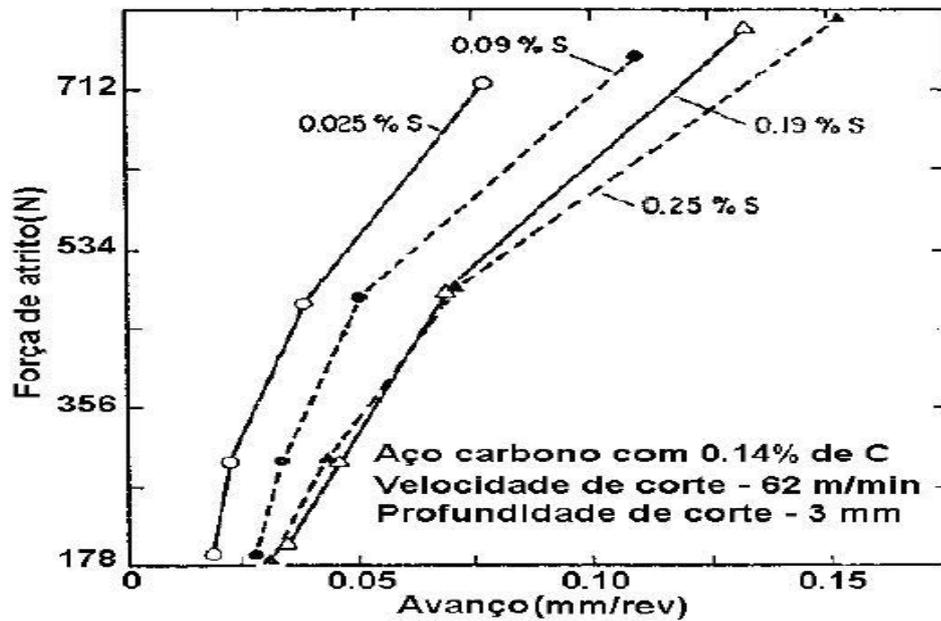
Figura 12 - Efeito do enxofre sobre a usinabilidade



Fonte: (GARVEY; TATA, 1965)

Na Figura 14 pode-se observar a diminuição do atrito entre o cavaco e a ferramenta de corte com o aumento do teor de enxofre, implicando que os sulfetos de manganês também pode exercer um efeito lubrificante.

Figura 13 - Efeito do teor de enxofre no atrito entre o cavaco e a ferramenta

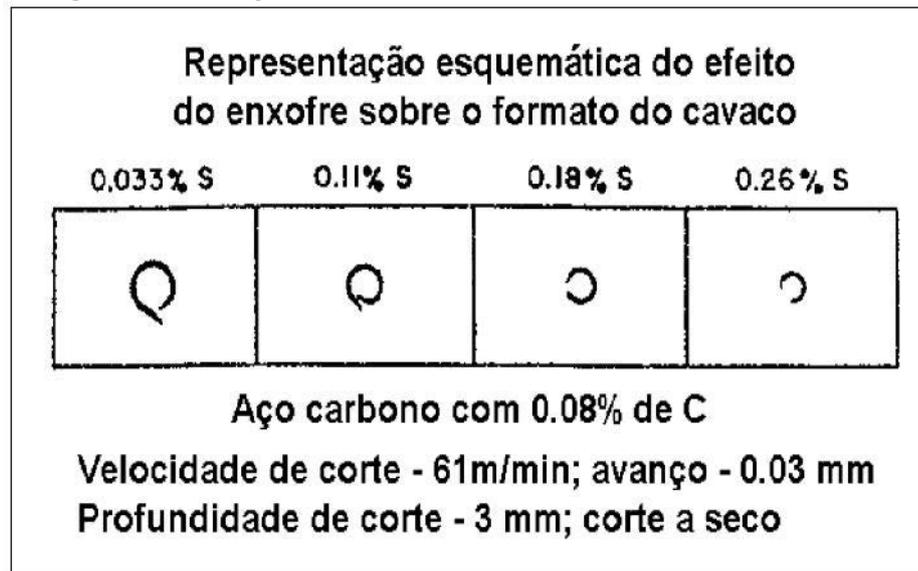


Fonte: (BOULGER et al , 1957)

Para determinar a influência do enxofre sobre a formação do cavaco foram realizados ensaios utilizando-se aços ao carbono refosforados com 0,08% de carbono e contendo diferentes teores de enxofre (SHAW; USUI; SMITH, 1961). Este estudo foi conduzido pela U. S. Steel e pelo Instituto de Tecnologia de Massachusetts, barras laminadas a quente foram usinadas com diferentes velocidades e avanços de corte, sem uso de fluido de corte. Os cavacos produzidos em cada condição de usinagem foram comparados para avaliar a relação entre o formato do cavaco e o teor de enxofre.

O efeito do enxofre sobre o tamanho do cavaco é mostrado esquematicamente na Figura 15 (SHAW; USUI; SMITH, 1961). Nota-se que o tamanho do cavaco diminuiu com o aumento do teor de enxofre, reduzindo a área de contato entre o cavaco e a ferramenta de corte. Logo, as forças de atrito entre o cavaco e a ferramenta de corte serão menores, reduzindo o aquecimento da ferramenta e menor desgaste da ferramenta de corte.

Figura 14 - Relação entre o teor de enxofre e o tamanho do cavaco

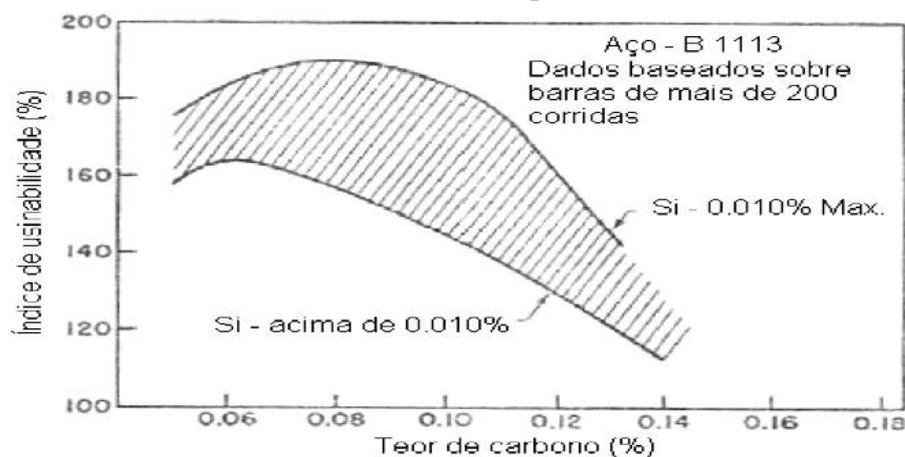


Fonte: (SHAW; USUI; SMITH, 1961)

- Efeito do carbono e do silício

Na Figura 16 pode-se observar que o índice de usinabilidade varia com o teor de teores de Carbono. Também se pode observar que o silício tem um efeito prejudicial sobre a usinabilidade dos aços baixo – carbono.

Figura 15 - Efeito do teor de carbono sobre o índice de usinabilidade de barras de aço B1113 em testes de torneamento a pressão constante



Fonte: (GARVEY; TATA, 1965).

O silício prejudica a usinabilidade através de dois modos (GARVEY; TATA, 1965). Quando o silício está presente no aço como inclusões abrasivas de silicato, a vida da ferramenta de corte diminui drasticamente. O silício também influencia no formato das

inclusões de sulfeto de manganês. À medida que o teor de silício aumenta, diminui a proporção de inclusões de sulfeto de manganês globulares, prejudicando desta maneira a usinabilidade, haja vista que esta morfologia propicia uma melhora significativa na quebra do cavaco.

Conforme Leskovar e Grum o carbono é um elemento de liga com forte influência nas propriedades mecânicas e tecnológicas do aço. Ele aumenta a tensão de resistência e cisalhamento e a dureza (LESKOVAR E GRUM, 1986). Com o aumento do teor de carbono do aço, a quantidade de carbonetos de ferro (cementita) também aumenta. Como a cementita é extremamente dura, ela acelera o desgaste da ferramenta. Aços com teores muito baixos de carbono tem baixa usinabilidade devido à sua alta ductilidade, entretanto, com o aumento dos teores de carbono a fragilidade do aço é aumentada, o que beneficia a usinagem. Acima de aproximadamente 0,20 % de carbono ocorre novamente queda de usinabilidade (ECHEVARRÍA E CORCUERA, 1987; MURPHY E AYLWARD, sem data).

- Efeito do fósforo e do nitrogênio

O fósforo beneficia a usinabilidade dos aços de corte fácil baixo – carbono através da contribuição à formação de cavacos frágeis (BAS, 2000). Adições moderadas de nitrogênio também atuam de uma maneira similar (GARVEY; TATA, 1965).

Pequenas adições de nitrogênio e fósforo melhoram a usinabilidade dos aços de corte fácil baixo – carbono, entretanto, grandes adições destes elementos podem ser nocivas. Como pode ser visto na Figura 17, o aumento do teor de nitrogênio de 0,003% para 0,028% exerce um efeito nocivo à vida da ferramenta. Também deve ser notado 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%). É importante não esquecer que grandes quantidades de fósforo e nitrogênio prejudicam a conformabilidade a frio, pois promovem a fragilização destes materiais.

Figura 16 - Efeito do teor de nitrogênio sobre o desempenho de barras de aço trefiladas, utilizadas na produção de tambores de porcas de parafuso.

Aço <sup>u</sup>	P, %	N <sub>2</sub> , %	Vida média da ferramenta, horas			
			77 m/min	86 m/min	95 m/min	105 m/min
1	0,018	0,003	b	b	b	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: (GARVEY; TATA, 1965)

- Efeito do cobre e do estanho

Para determinar o efeito do cobre sobre a usinabilidade (que tem uma grande solubilidade na ferrita), foram realizados ensaios em barras trefiladas de aços ao chumbo nitrogenados (0,010% de nitrogênio), contendo 0,09%, 0,27%, 0,40% e 0,56% de cobre. Os resultados deste estudo um aumento no teor de cobre de 0,09% para 0,56% não possibilitou uma melhora significativa no desempenho das ferramentas de corte. A média da vida da ferramenta de corte foi acima de 8 horas para os aços contendo 0,09%, 0,27%, e 0,40% de cobre e abaixo de 8 horas para o aço contendo 0,56% de cobre. A redução na vida da ferramenta foi devida basicamente ao aumento na dureza do aço.

O estanho, se apropriadamente distribuído em contornos de grão, confere um efeito fragilizante ao aço (GARCIA; HUA; DEARDO, 2002), facilitando a quebra de cavaco. O nível de estanho empregado (0,04 a 0,08%) e o teor de elementos (cobre <0,05%) que possam competir pela localização preferencial nos contornos de grão devem ser bem controlados para que os efeitos positivos do estanho não desapareçam.

- Efeito do Chumbo

Estudos da utilização do Pb ( Chumbo) nos aços começaram na década de 40, porém somente na década de 60 iniciou-se a produção em escala industrial.

O Pb é um elemento que possui solubilidade nula no ferro à temperatura ambiente, promovendo desta forma a precipitação de inclusões metálicas. Normalmente estando associadas aos MnS, uma inclusão de MnS apresenta um envoltório de chumbo.

O Pb apresenta densidade superior a do ferro, logo apresenta forte tendência a segregar e é um elemento tóxico.

A solubilidade do Pb no ferro líquido cresce com a temperatura. A 1600 °C a solubilidade é de aproximadamente 0,30%. Conforme Bas (1995), o índice de usinabilidade apresenta um patamar ótimo para teores de chumbo de 0,25-0,35%.

- Efeito do Bismuto

O bismuto melhora a usinabilidade dos aços surgindo como uma alternativa aos aços com chumbo, devido o bismuto ser um elemento atóxico.

O bismuto apresenta propriedades similares ao chumbo:

- baixa solubilidade no aço sólido, formando inclusões metálicas;
- baixo ponto de fusão.
- densidade superior a do ferro.
- apresenta-se em forma de inclusões metálicas e envelopando os MnS.

Comparativamente com o Pb apresenta menor densidade, resultando numa menor tendência a segregar. Desta forma, obtém-se com o bismuto melhor dispersão das inclusões metálicas.

O efeito do bismuto está comprovado por inclusões metálicas de bismuto associadas às microtrincas na formação do cavaco. ( CESTARI, 2012)

- Efeito do Telúrio

O telúrio atua provocando a globulização das inclusões de MnS. (YAGUCHI et all - 1990), apresentou 4 teorias para justificar o efeito do telúrio:

- aumento de usinabilidade devido à obtenção de sulfetos mais globulares, se pode verificar a influência da relação comprimento/espessura da inclusão de sulfeto de Manganês na usinabilidade.
- redução da fricção entre a ferramenta e o cavaco, devido aos baixos pontos de fusão dos compostos formados pelo telúrio, atuando como lubrificante.

- o líquido fragilizante do telúrio metálico e seus compostos, reduzindo a resistência ao cisalhamento aparente pelo aumento do número de micro trincas nucleadas.
- o telúrio apresenta superfície extremamente ativa, formando um filme entre a matriz e a outra fase como carbonetos, sulfetos ou teluretos.

O telúrio apresenta-se parcialmente dissolvido nos MnS em concentrações de até 0,12% e formando principalmente MnTe. Os MnTe localizam-se preferencialmente nas bordas das inclusões de MnS.

- Efeito do Selênio

O selênio é um elemento utilizado para melhora da usinabilidade, apresentando propriedades muito similares ao enxofre. Apresenta forte tendência a formar selenetos de manganês (MnSe) o qual apresenta propriedades similares ao MnS, porém apresenta a vantagem de não prejudicar outras características dos aços.

O MnSe é completamente solúvel no MnS e sua dureza é muito baixa, porém existem combinações que conseguem obter uma redução na deformabilidade a quente do MnS, obtendo-se sulfetos mais globulares.

- Efeito do Boro

O boro é um elemento usado no aumento da temperabilidade e tenacidade dos aços. O boro deve estar em solução sólida e não em forma de óxidos, nitretos e carbonitretos.

O uso do boro para aumento da usinabilidade está baseado na formação do  $B_2O_3$  que tem baixo ponto de fusão (450 °C) e a partir dos 210 °C se encontra no estado viscoso.

- Efeito dos óxidos plásticos

Com o tratamento com cálcio é possível controlar a composição, as propriedades e a morfologia de inclusões de óxido presentes no aço. Com essa técnica existem dois ganhos em termos de usinabilidade pela troca das inclusões duras de alumina por inclusões maleáveis de óxidos plásticos.

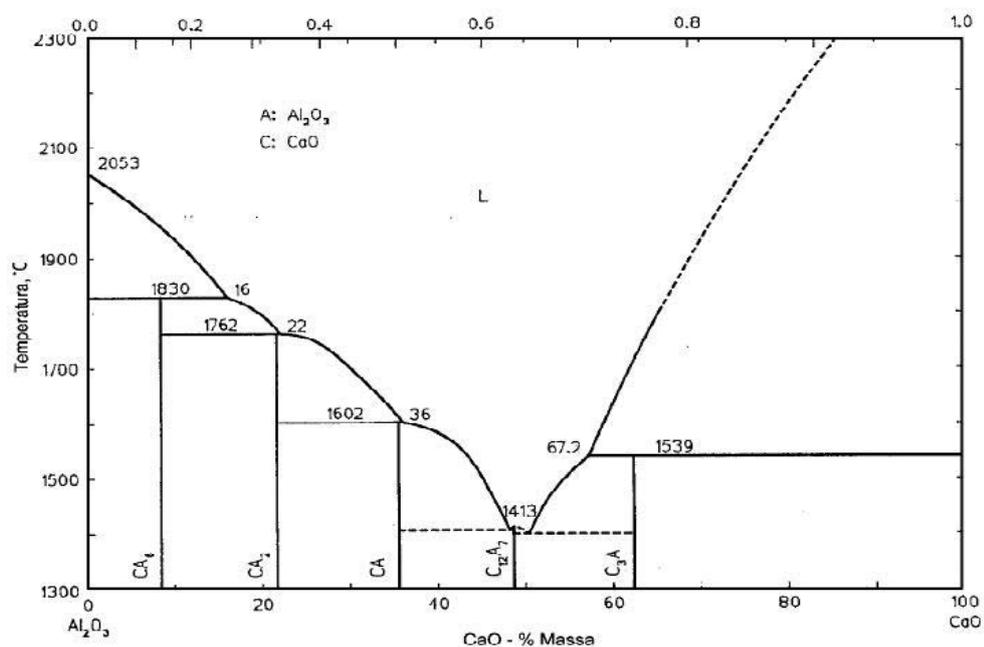
As inclusões de alumina são originárias da desoxidação do aço utilizando alumínio, que é extremamente duro, prejudicando a usinabilidade do material pela abrasão na aresta de

corte da ferramenta, e por arrancar a camada protetora de elementos lubrificantes, como o MnS, que por ventura tenha se formado na superfície de saída da ferramenta.

O emprego de ferramentas mais sofisticadas permitiu aumentos de velocidade que motivou a substituição dos aços de corte fácil ao chumbo por aços com morfologia de inclusões controladas, tanto de sulfetos de manganês (PIERSON, 1990) quanto de óxidos plásticos (SUBRAMANIAN; RAMANUJACHAR, 1996), pois se observa que para altas velocidades de corte (>120m/min.), os aços com morfologia de inclusões controlada apresentam melhor usinabilidade que os aços ao chumbo. Subramanian e colaboradores, em várias publicações (SUBRAMANIAN, RAMANUJACHAR, 1997; SUBRAMANIAN et al., 1998; SUBRAMANIAN et al., 1999; SUBRAMANIAN et al., 2002; SUBRAMANIAN et al., 2004) mostraram que, em usinagem a altas velocidades de corte, o controle das inclusões de óxidos no aço é muito mais efetivo do que os mais avançados revestimentos de ferramentas para prevenir desgaste por craterização.

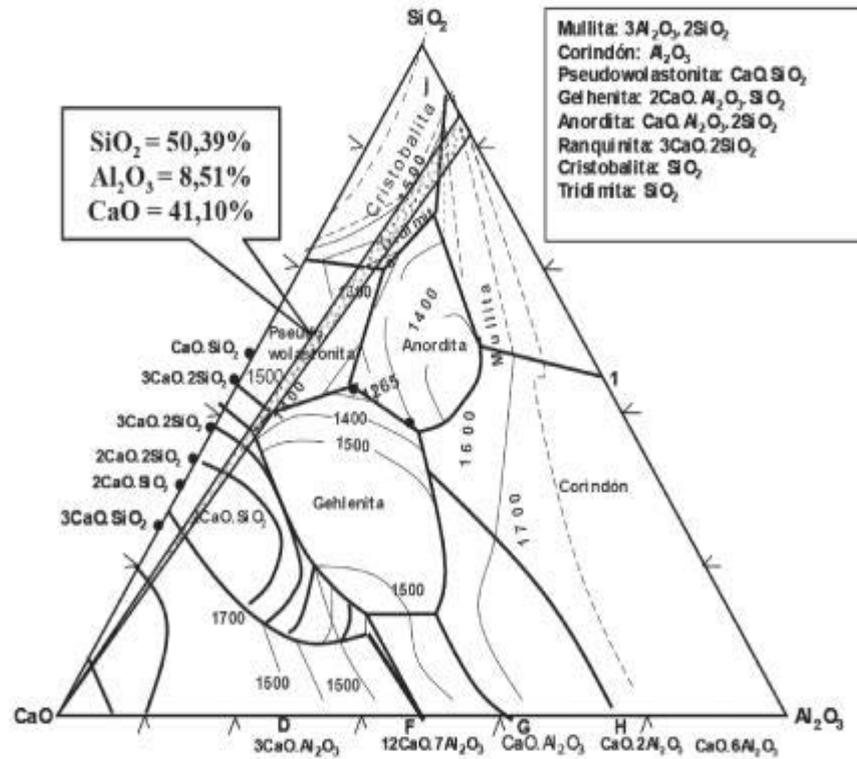
A limitação do uso em larga escala desta técnica é que ela exige controle rigoroso de escória, pois as inclusões no campo da anortita no diagrama binário cal-alumina, conforme demonstrado na Figura 19 e no ternário cal-sílica-alumina na Figura 20 são as que apresentam menor dureza e ponto de fusão (KLUJSZO – 2004), entretanto exigem tempo de processamento e temperaturas de processamento que implicam em uso de refratários de elevado custo.

Figura 17 - Diagrama binário cal-alumina



Fonte: (SLAG ATLAS – 1995)

Figura 18 - Diagrama ternário cal-sílica-alumina



Fonte: (RAFAEL QUINTANA - at all – 2010)

- Efeito do tamanho de grão sobre a usinabilidade

Segundo Bellot (1978) o aumento do tamanho de grão fragiliza o material e, logo, facilita o fracionamento do cavaco e a remoção do material. Como consequência observa-se um aumento da rugosidade no acabamento superficial, portanto, quando a menor rugosidade é exigida, prefere-se o grão fino na operação de acabamento.

## 2.3. APLICAÇÕES

As barras aço DIN C45 trefiladas geralmente são aplicadas em eixos de motores, alternadores e peças em geral de média resistência mecânica onde eventualmente alguma região ou todo o componente necessita ser endurecida por tratamento térmico.

Uma das aplicações mais críticas da barra trefilada de aço de alta resistência DIN C45 é na produção de hastes de amortecedor, particularmente na suspensão tipo MacPherson. Esse componente faz parte do sistema de fixação de toda suspensão, portanto, segue o detalhamento do processo de produção da haste e funcionamento dessa suspensão.

### 2.3.1. Suspensão MacPherson

O Jornal Oficina Brasil (2010) apresentou a reportagem abaixo, e demonstrou que, projetar um sistema de suspensão é um desafio muito complexo, pois além de oferecer robustez, níveis aceitáveis de conforto, facilidade de manutenção, dimensões compactas e custo economicamente viável para produção em larga escala, o projeto escolhido deve também ser indiscutivelmente seguro.

O engenheiro automotivo norte-americano Earle Steele MacPherson, desenvolveu em 1930 um inovador sistema de suspensão que une um amortecedor em formato de torre a uma mola do tipo helicoidal, formando assim uma estrutura resistente, leve e compacta, atendendo perfeitamente as necessidades dos veículos de pequeno e médio porte de tração dianteira ou traseira, conforme Figura 21.



Fonte: (O JORNAL OFICINA BRASIL, 2010)

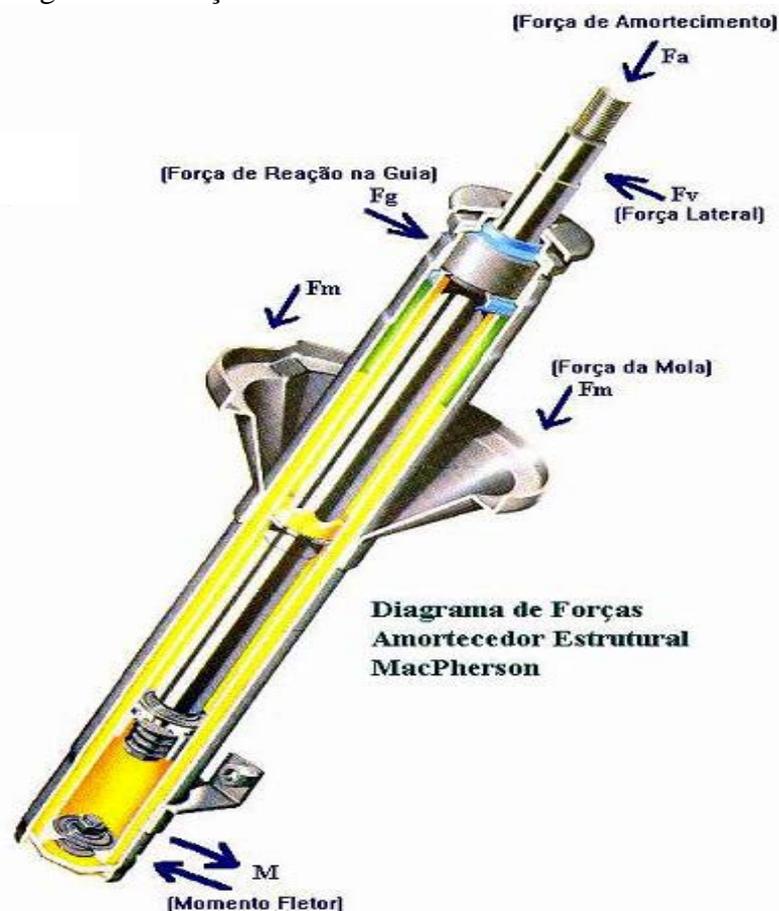
Outra vantagem é a independência entre as rodas, que resulta em superior nível de conforto quando comparada a uma suspensão com eixos interligados e dependentes.

Os problemas mais comuns encontrados neste tipo de suspensão em ordem crescente de ocorrência são referentes à: folga nos pivôs e buchas de bandeja, fim de vida útil do amortecedor e batentes, rolamento dos batentes e por último a mola.

Como se pode verificar toda parte superior de suspensão está fixada na carroceria do veículo unicamente pela haste do amortecedor. Se ocorrer a sua ruptura o veículo fica totalmente desgovernado.

Na Figura 22, é mostrado que devido à distância entre a roda e a fixação do amortecedor, existe uma força lateral que aplica um momento no amortecedor, que é transferido para a haste que faz sua fixação, portanto, haste está submetida a esforços de flexão. Para resistir esses esforços as propriedades mecânicas mínimas necessárias das hastes são obtidas também com refinadores de grão e taxas de encruamento, que dificultam sua usinagem.

Figura 20 - Forças atuantes em um amortecedor dianteiro



Fonte: (O JORNAL OFICINA BRASIL, 2010)

### 2.3.2. Usinagem da haste de amortecedor

Uma das formas de produção das hastes de amortecedor é o corte do *blank*, retificação do diâmetro para remoção de descarbonetação, pequenos defeitos superficiais e rebarbas do corte e usinadas por torneamento das extremidades são para produção das espigas de fixação.

A espiga externa é que vai fixar o amortecedor na estrutura do veículo, portanto, suas dimensões e geometrias são produzidas de acordo com as determinações do fabricante do veículo, portanto, apresentando diversas geometrias é usinada com pastilha de corte de metal duro.

A espiga interna do amortecedor onde é fixada uma das válvulas geralmente é padronizada para todos os tipos de amortecedor e tem sua geometria definida pelo fabricante, portanto, sendo produzida em larga escala e necessitando de um processo de alta produtividade para atender a demanda. Na espiga interna, de menor diâmetro, pode ser aplicada usinagem por perfilamento radial com ferramenta de aço rápido sinterizado.

Na sequência a haste tem a superfície temperada por indução e tem o diâmetro externo retificado novamente para bitola final.

Alguns fabricantes preferem o processo de usinagem após a operação de têmpera por indução, visando menor desvio de cilindridade entre a haste e as “espigas” produzidas nas duas extremidades da haste, entretanto, nessa opção é necessário acrescentar uma operação de endireitamento em 100% das peças após a têmpera e antes da usinagem.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir serão apresentados os: equipamentos, ferramentas, programas e as características dos materiais utilizados nos ensaios.

Utilizamos o processo de torneamento radial, portanto, dois termos básicos para a operação de torneamento, e conseqüentemente para o ensaio de “vida da ferramenta x velocidade de corte”.

#### 3.1. MATERIAL UTILIZADO

Foram utilizados CDPs (corpos de prova) extraídos de barras trefiladas de aço DIN C45 na bitola redonda de 20,35mm, com comprimento de 200 a 250 mm cada (Figura 23). Para facilitar o faceamento os CDPs foram cortados com disco abrasivo refrigerado, com o uso de aparelho marca Discoton, pertencente ao Departamento de Materiais e Tecnologia da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, UNESP.

Figura 21 - Corpo de prova ensaiado



Fonte: O AUTOR.

Os ensaios e análise para determinar: propriedades mecânicas, composição química e metalográficas das amostras utilizadas foram realizados nos laboratórios da Gerdau S.A. – Usina de Pindamonhangaba.

A análise química foi realizada no espectrômetro de Emissão Óptica à Vácuo, marca ARL, modelo 4460 e no determinador de Carbono e Enxofre, marca LECO, modelo CS-600 e os resultados estão reportados na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química das amostras utilizadas.

Elemento	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Al
% em peso	0,44	0,56	0,24	0,016	0,013	0,11	0,06	0,02	0,01

Fonte: (O AUTOR)

Para determinação das propriedades mecânicas das amostras utilizadas, foi realizado ensaio de tração, conforme norma ASTM E8/E8M - Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, na máquina universal de ensaios Kratos ECC – 4547 e os resultados obtidos estão demonstrados na Tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades mecânicas das amostras ensaiadas

Ensaio	Resistência à tração (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Alongamento (%)	Redução de área (%)
1	834	719	10,1	35,5
2	832	715	10,9	36,1
<b>Média</b>	<b>833</b>	<b>717</b>	<b>10,5</b>	<b>35,8</b>

Fonte: (O AUTOR)

As inclusões foram analisadas conforme norma ASTM E 45 - standard test methods for determining the inclusion content of steel, com auxílio do microscópio Olympus BX51M e os resultados encontrados estão descritos na tabela 3.

Tabela 3 Nível de microinclusões encontrados nas amostras ensaiadas

Tipo Amostra	A		B		C		D	
	F	G	F	G	F	G	F	G
1	1	0	0	0	0	0	0,5	0,5
2	1	0,5	0	0	0	0	0,5	0,5
3	0,5	0	0	0	0	0	0,5	0,5
4	1	0,5	0	0	0	0	0,5	0
5	1	0,5	0	0	0	0	0,5	0,5
6	1	0	0	0	0	0	0,5	0
<b>Média</b>	<b>1</b>	<b>0,5</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>

F = fina G = Grossa

Fonte: (O AUTOR)

Na análise metalográfica foi encontrada micro estrutura de ferrita e perlita lamelar fina, conforme demonstrado na Figura 24.

Figura 22 - Micro estrutura do material testado - Ataque nital - Aumento 500X



Fonte: (O AUTOR)

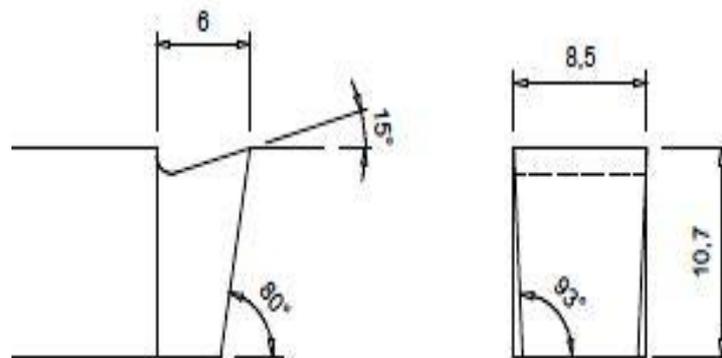
## 3.2. DISPOSITIVOS

### 3.2.1. Desenvolvimento das ferramentas de corte

Para realização dos ensaios foram desenvolvidas ferramentas tipo bedame com: material, tratamento térmico, ângulo de saída e folga semelhante a um exemplo de uso industrial, onde cada ferramenta perfiladora usina uma profundidade de 3,10mm, portanto, foi usado o comprimento da face de corte com 6,0mm. O ângulo de folga de  $10^\circ$  adotado corresponde à tangente do raio da ferramenta original.

Para os ensaios realizados variamos o ângulo de saída a partir da medida original  $+5^\circ$  e  $-5^\circ$ . A ferramenta com o ângulo de saída original de  $15^\circ$  esta representada na Figura 25.

Figura 23 - Desenho do bedame



Fonte: (O AUTOR)

O material utilizado na fabricação da ferramenta foi o aço rápido sinterizado S390 do fabricante Bohler, cuja composição química esta demonstrada no quadro 3.

Quadro 3 - Composição química da ferramenta de aço rápido sinterizado

C	Si	Mn	Cr	Mo	V	W	Co
1,64	0,60	0,30	4,80	2,00	4,80	10,40	8,00

Fonte: (CERTIFICADO DE QUALIDADE BOHLER)

O tipo de material utilizado industrialmente mostrou-se adequado para os ensaios de usinabilidade devida à sua elevada homogeneidade estrutural, obtida no processo de

fabricação por sinterização. Na Figura 26 fica evidente a diferença de estrutura metalográfica entre o material utilizado e um aço rápido laminado em bitola semelhante.

Figura 24 – Microestrutura do aço rápido laminado (a) e aço rápido sinterizado(b)



**a - Aço rápido AISI M2 laminado**  
Rd. 67,00mm – Ataque Nital - 100X



**b - Aço rápido S390 sinterizado**  
Ataque Nital - 100X

Fontes: (a - ASM METALS HANDBOOK, 1985 e b - CATÁLOGO BOHLER)

O tratamento térmico das ferramentas foi executado nas dependências da Gerdau Aços especiais Brasil S.A. planta de Pindamonhangaba.

Conforme recomendação do fabricante foi empregado o ciclo de tratamento térmico abaixo.

- 1 – Aquecer até 1190 °C 30min; Patamares de aquecimento 550 °C; 850 °C e 1050 °C 30min cada;
- 2 – Resfriar em óleo a temperatura ambiente;
- 3 – Revenir (1º revenimento) logo após a têmpera ( máximo 1 hora) a 580 °C 1 hora;
- 4 - Revenir (2º revenimento) a 580 °C por 1 hora;
- 5 - Revenir (3º revenimento) a 540 °C por 1 hora.

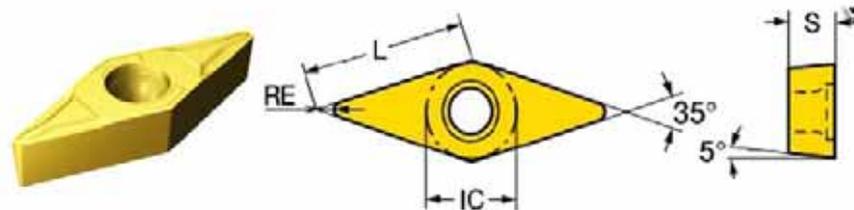
Dureza esperada = 63 a 66HRc e dureza obtida = 63HRc

### **3.2.2. Ferramenta de faceamento e desbaste**

Antes da atuação do bedame, uma camada superficial de 0,10mm foi removida, a fim de eliminar variações de dureza provocadas pelo encruamento e decarbonetação superficial

oriundos do processo de produção da barra trefilada. Também foi realizado o faceamento na região de início do teste, ambos com ferramenta de metal duro modelo VBMT 331 – UM e tipo P4015 afixada no Porta ferramentas Sandvik SVJBL2020K, conforme Figuras 27 e 28.

Figura 25 - Ferramenta de faceamento e desbaste



Fonte: (MANUAL TÉCNICO DE USINAGEM SANDVIK COROMANT, 2005.10)

Figura 26 - Porta ferramentas Sandvik SVJBL2020K



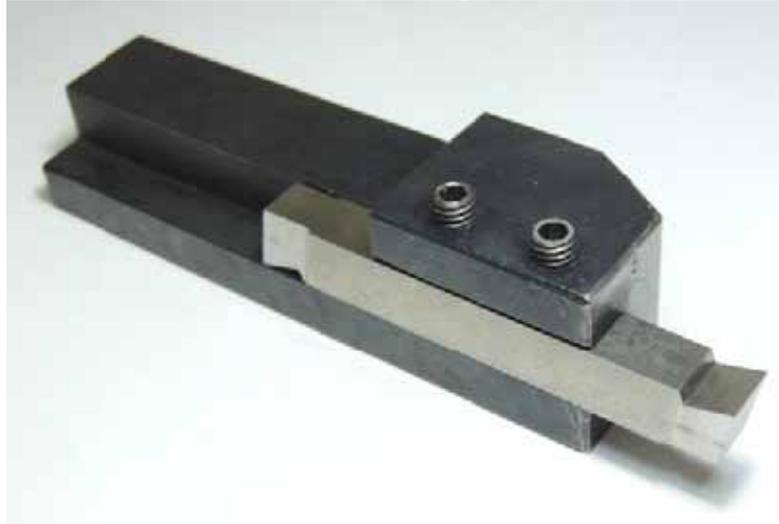
Fonte: (MANUAL TÉCNICO DE USINAGEM SANDVIK COROMANT, 2005.10)

### 3.2.3. Porta ferramentas para os bedames

Para apoio do bedame, foi construído um porta-ferramenta, conforme demonstrado na Figura 29.

Foi utilizado aço SAE 1045, que depois de usinado, foi colocada em caixa metálica fechada contendo Carvão e carbonato de cálcio, aquecido em forno tipo mufla até 870 °C com patamar de 1 hora e resfriado em água à temperatura ambiente. Em seguida foi revenido a 390 °C por uma hora, obtendo-se a dureza de 43HRc.

Figura 27 - Porta-ferramenta para o bedame



Fonte: (O AUTOR)

### 3.3. EQUIPAMENTOS

#### 3.3.1. Centro de torneamento utilizado

Os ensaios foram realizados no centro de torneamento GL 240M marca ROMI, conforme Figura 30, pertencente ao Departamento de Materiais e Tecnologia da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, UNESP.

Figura 28 - Centro de torneamento



Fonte (CATÁLOGO DO FABRICANTE ROMI)

Somente foi utilizada refrigeração nas operações de faceamento e desbaste com a pastilha de metal duro.

### 3.3.2. Estereoscópio

Foi utilizado um estereoscópio da marca Zeiss, modelo Stemi 2000, para a realização das imagens das ferramentas visando registro dos aspectos do desgaste para cada condição de corte utilizada. Figura 31

Figura 29 - Estereoscópio da marca Zeiss, modelo Stemi 2000



Fonte: (GAMA – 2014)

## 3.4. SISTEMAS DE MEDIÇÃO

Não foi possível realizar a medição do desgaste da ferramenta, pois, devido à falta de refrigeração, quando ela perdia a condição normal de corte rapidamente se deteriorava. Face ao exposto, optamos para interromper o teste quando o nível de ruído e vibração demonstrava uma significativa alteração da condição de corte e registro da ferramenta nesse estágio.

### 3.4.1. Medição da rugosidade

A peças foram levadas a um desempenho de granito onde a rugosidade ( $R_a$  e  $R_{max}$ ) foram medidas através do rugosímetro da marca Mahr modelo MarSurf M300 e MarSurf RD 18, o

qual era aferido e calibrado antes do início das medições – Figura 32. Devido à largura da ferramenta utilizada o parâmetro de cut-off foi ajustado para 4,0 mm em todas as medidas.

Todas as medições foram realizadas no sentido longitudinal da amostra, na 4ª entrada da ferramenta (posição média das 7 entradas realizadas em cada amostra). Foram realizadas 3 medições em cada ponto com rotação da amostra cerca de 120° entre as medições. Os resultados representam a média da medida em cada ponto.

Figura 30 - Rugosímetro Mahr modelo MarSurf M300 e MarSurf RD 18



Fonte: (GAMA – 2014)

### 3.5. METODOLOGIA

Para realização dos ensaios foram cortados corpos de prova de 200mm de comprimento de uma única corrida de barra de aço trefilado na bitola redonda de 20,35mm.

Os corpos de prova foram fixados na placa do torno ficando 66 mm projetados para fora da placa para realização da usinagem.

O bedame foi fixado no porta ferramenta, ficando 12,45mm projetado para fora deste.

O porta ferramenta foi fixado na posição 4 do torno ficando com 35mm para fora do suporte.

O ângulo de corte do bedame foi alinhado com o centro da contra ponta para “zerar” as coordenadas do torno.

A pastilha de metal duro VBMT 331 foi afixada no porta ferramentas Sandvik SVJBL2020K, que foi fixado no torno.

Foi criado no torno CNC o programa de usinagem número O027 com a seguinte sequência:

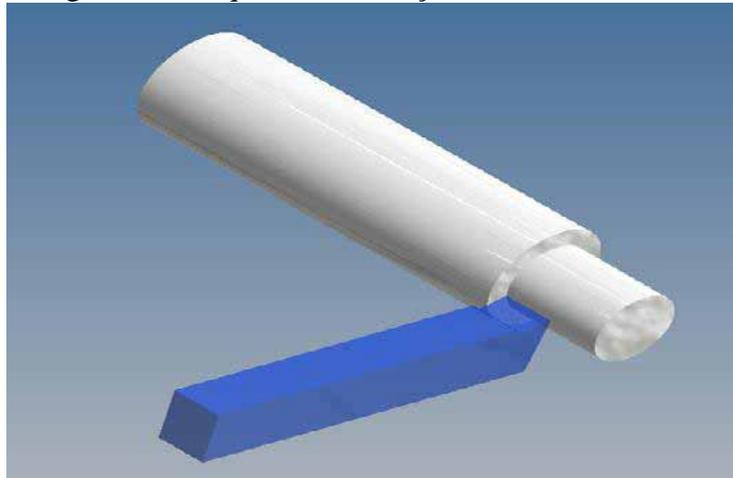
1. acionar a pastilha para realizar 3 faceamentos de 1,00mm cada e

2. desbaste de 0,10mm ao longo de 60mm na superfície do corpo de prova, com refrigeração.
3. Acionar o bedame para realizar 5 ou 7 entradas radiais consecutivas ao longo do corpo de prova até o diâmetro de 10,00 ou 14,00mm, com rotação e avanço conforme cada ensaio.

Todos os ensaios foram encerrados quando o nível de ruído e vibração demonstraram uma significativa alteração da condição de corte

A Figura 33 ilustra esquematicamente como foi o avanço radial do bedame de corte em cada entrada.

Figura 31 - Esquema de avanço do bedame de corte



Fonte: (O AUTOR)

Inicialmente foi realizado um ensaio visando detectar se a sua duração estava adequada a uma avaliação por ensaio acelerado.

O ensaio n° 01 foi realizado usando-se uma ferramenta bedame de aço rápido sinterizado, com ângulo de saída 15° conforme Figura 19, com os parâmetros de ensaio abaixo:

- Velocidade média de corte 35,74 m/min. (Rotação = 756 RPM);
- Número de entradas por peça = 5
- Bitola final de usinagem = Rd. 14,00mm.
- Sem refrigeração

Neste teste, foram usados CDPs de 400 mm de comprimento, com a extremidade de ensaio cortada em disco abrasivo refrigerado. A cada ciclo de cinco entradas o CDP era novamente submetido ao corte em disco abrasivo refrigerado, para remover a região ensaiada.

Durante cerca de 3 horas de ensaios consecutivos foram realizadas 110 entradas, correspondente a 1195m de material removido, sem percepção de qualquer alteração significativa na ferramenta de corte, portanto o ensaio foi interrompido.

Visando reduzir a duração do ensaio, os CDPs foram previamente cortados ao meio e em ambas as extremidades com comprimento de 200 mm. Essa preparação permitiu o ensaio em ambos os lados do CDP, sem interrupção para readequação dos CDPs. Foram também alterados os três parâmetros abaixo, conforme indicados no Quadro 4:

Quadro 4 - Alteração de parâmetros de ensaio

Parâmetro	De	Para
Diâmetro final mm	14,00	10,00
Rotação RPM	756	832 e 907
Nº de entradas	5	7

Fonte: (O AUTOR)

Para avaliar a influência da velocidade na vida da ferramenta, foram realizados os ensaios 2, 3 e 4, conforme demonstrado na tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros dos testes para avaliação da influência da velocidade na vida da ferramenta

ENSAIO	ÂNGULO SAÍDA	AMOSTRA nº	RPM	ENTRADAS POR PEÇA	BIT. FINAL mm	VEL. CORTE INICIAL	VEL. CORTE FINAL m/min	VEL. CORTE MÉDIA m/min	COMPR. DE CORTE / ENTRADA m	AVANÇO mm
2	15°	1	907	7	10,00	57,27	28,49	42,88	10,87	0,03
3	15°	2	832	7	10,00	52,54	26,14	39,34	10,87	0,03
4	15°	3 a 5	756	7	10,00	47,74	23,75	35,74	10,87	0,03

Fonte: (O AUTOR)

Considerada a drástica redução de vida observada nos ensaios 2, 3 e optou-se por variar o ângulo de saída e avanço para os demais ensaios e:

- Manter o diâmetro final de 14,00 mm;
- Usar a rotação de 756 RPM;
- Alterar o número de entradas de cinco para sete.

Dessa forma foi realizado o ensaio 5 (com bedame com ângulo de saída de 15° e avanço de 0,03mm). Depois de cerca de uma hora e 1282m de material removido (muito próximo dos 1195m do ensaio 1) o ensaio foi interrompido quando o nível de ruído e vibração demonstraram uma significativa alteração da condição de corte.

Uma vez definido que os parâmetros do experimento 5 estavam adequados para comparação com outras condições de ensaio, foram realizados os experimentos 6 a 13 avaliando-se a influência de ângulo de saída do bedame e avanço, conforme demonstrado na tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros dos testes para avaliação da influência de ângulo de saída do bedame e avanço na vida da ferramenta

ENSAIO	ÂNGULO SAÍDA	AMOSTRA n°	RPM	ENTRADAS POR PEÇA	BIT. FINAL mm	VEL. CORTE INICIAL m/min	VEL. CORTE FINAL m/min	VEL. CORTE MÉDIA m/min	COMPR. DE CORTE / ENTRADA m	AVANÇO mm
5	15°	6 a 22	756	7	14	48	33	40	11	0,03
6	20°	23 a 52	756	7	14	48	33	40	11	0,03
7	10°	53 a 63	756	7	14	48	33	40	11	0,03
8	20°	64 a 80	756	7	14	48	33	40	8	0,04
9	20°	81 a 98	756	7	14	48	33	40	7	0,05
10	20°	99 a 100	756	7	14	48	33	40	5	0,06
11	15°	101	756	7	14	48	33	40	5	0,06
12	15°	102 a 105	756	7	14	48	33	40	8	0,04
13	15°	106 a 116	756	7	14	48	33	40	7	0,05

Fonte: (O AUTOR)

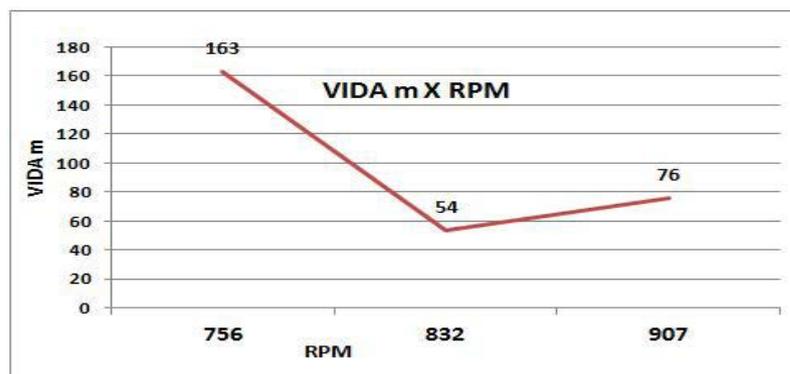
## 4. RESULTADOS

Para melhor entendimento dos resultados obtidos eles serão apresentados classificados por cada parâmetro avaliado: comprimento de corte por entrada; rotação; ângulo de saída e avanço.

### 4.1. RESULTADOS POR AUMENTO DE ROTAÇÃO E COMPRIMENTO DE CORTE

Neste ensaio foi aumentada rotação e o comprimento de corte em cada entrada e a degradação da ferramenta foi excessivamente rápida, entretanto, nota-se que mesmo com a menor rotação de 756RPM (igual ao ensaio 1) o comprimento de corte total foi muito baixo (13,6% do comprimento total cortado no ensaio 1), como pode ser observado na tabela 6.

**Tabela 6 - Efeito da rotação na vida da ferramenta**



ENSAIO	ÂNGULO SAÍDA	AMOSTRA n°	TOT. AM	RPM	ENTRADAS POR PEÇA	BIT. FINAL mm	TOTAL ENTRADAS	VEL. CORTE INICIAL m/min	VEL. CORTE FINAL m/min	VEL. CORTE MÉDIA m/min	COMPR. DE CORTE / ENTRADA m	VIDA m	AVANÇO mm
2	15°	1	1	907	7	10,00	7	57,27	28,49	42,88	10,87	76	0,03
3	15°	2	1	832	7	10,00	5	52,54	26,14	39,34	10,87	54	0,03
4	15°	3 a 5(1 entr.)	3	756	7	10,00	15	47,74	23,75	35,74	10,87	163	0,03

Fonte: (O AUTOR)

O principal mecanismo de desgaste presente na ferramenta de corte foi de aresta postiça nas ferramentas do ensaio 2 e 3 e de fusão por excesso de aquecimento na ferramenta do ensaio 4, conforme pode ser visto na Figura 34.

Figura 32 - Estado da Ferramenta do ensaio 4 após o uso.



Fonte: (O AUTOR)

Na figura 35 pode ser verificada a influência da rotação na geometria do cavaco, quanto maior a rotação utilizada melhor o controle do cavaco, pois aparentemente há uma diminuição da deformação plástica facilitando a sua quebra, estes ensaios foram realizados com ferramentas com ângulo de saída de  $15^\circ$  e avanço de 0,03mm.

Figura 35 - Aspecto do cavaco em função do aumento de rotação



Fonte: (O AUTOR)

#### 4.2. RESULTADOS POR VARIAÇÃO DO ÂNGULO DE SAÍDA

Pode ser observada na Tabela 7, nos ensaios 5, 6 e 7 a evolução do comprimento total ensaiado com o aumento do ângulo de saída. É importante notar que o ensaio 6 foi interrompido sem que fosse verificado nível de ruído e/ou vibração significativa que alterasse a condição de corte.

Tabela 7 - Efeito do ângulo de saída na vida da ferramenta



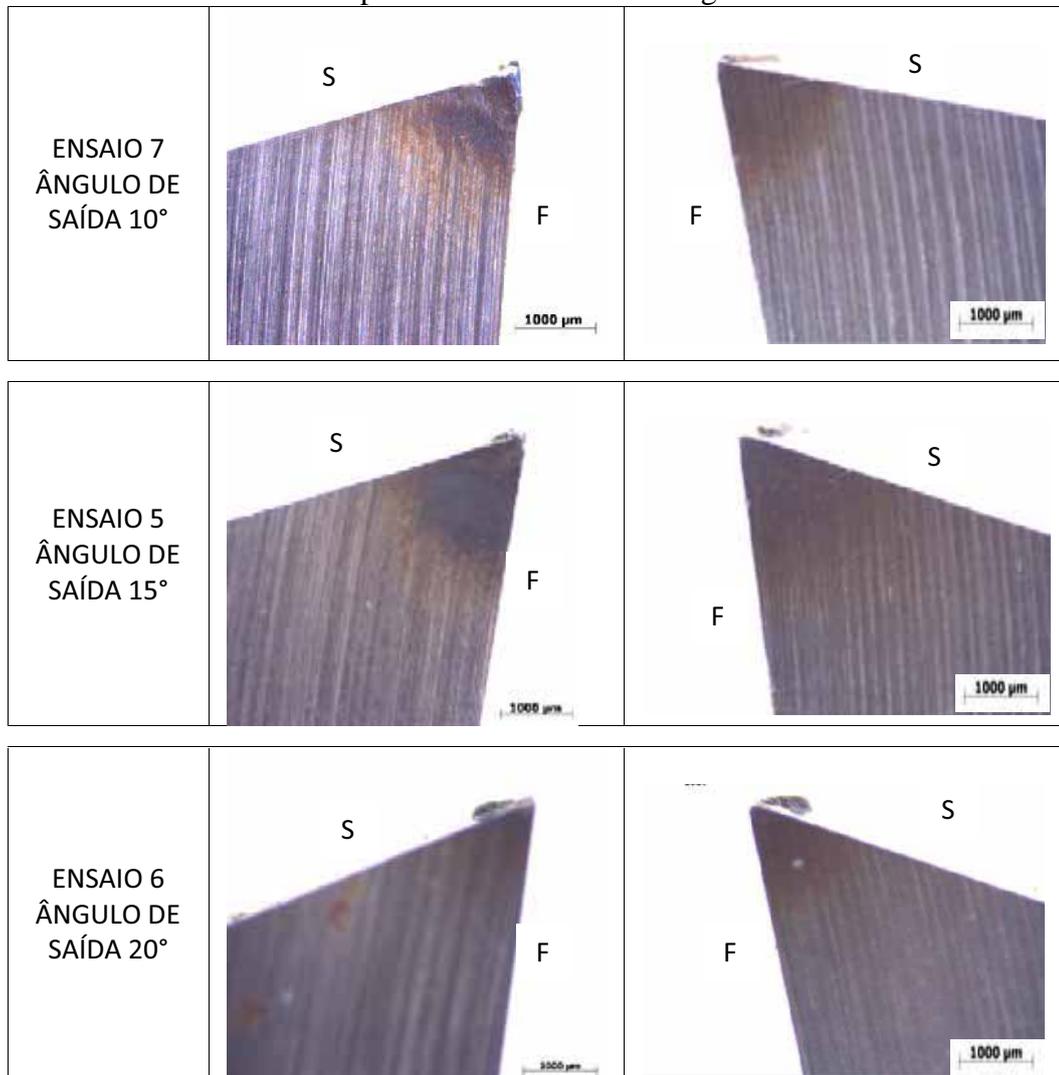
ENSAIO	ÂNGULO SAÍDA	AMOSTRA	TOTAL AM	RPM	ENTRADAS POR PEÇA	BIT. FINAL mm	TOTAL ENTRADAS	AVANÇO mm	VIDA FERRAM. m
7	10°	53 a 63 (6 entr.)	11	756	7	14	76	0,03	826
5	15°	6 a 22 (6 entr.)	17	756	7	14	118	0,03	1282
6	20°	23 a 52	30	756	7	14	210	0,03	2281(1)

(1) ensaio interrompido antes do final da vida

Fonte: (O AUTOR)

O mecanismo de desgaste principal presente na ferramenta de corte foi de formação de aresta postiça. Na figura 36 pode ser observada a presença da aresta postiça de corte nas ferramentas dos ensaios 5, 6 e 7, em virtude das baixas velocidades de corte utilizadas e da ductilidade do material ensaiado.

Figura 33 - Fotos de aresta postiça de corte nas ferramentas dos ensaios 5, 6 e 7, onde S indica superfície de saída e F de folga.



Fonte: (O AUTOR)

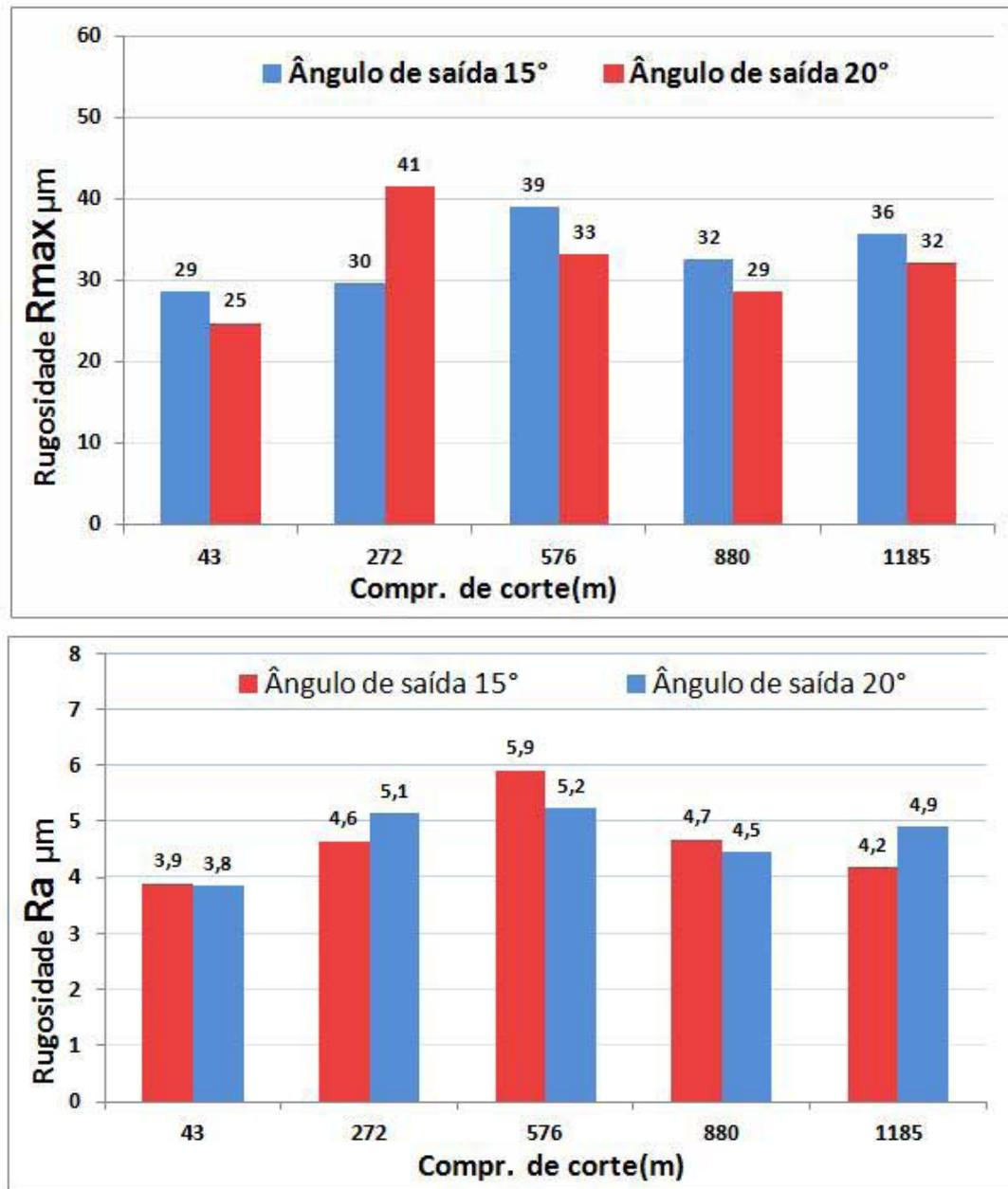
Nas medições de rugosidade realizadas ao longo das 16 primeiras amostras ensaiadas, nos ensaios 5 e 6, pode-se verificar que a variação de ângulo de saída não provocou alteração significativa na rugosidade da superfície usinada, conforme pode ser visto na Figura 42.

Esses ensaios foram realizados com rotação de 756RPM e avanço de 0,03mm.

A variação irregular da rugosidade pode ser explicada pela constante presença de aresta postiça no decorrer do ensaio, conforme pode ser visto na Figura 41.

O parâmetro de rugosidade Ra se mostrou como uma boa opção para avaliação da superfície gerada, pois, comparando os seus valores com os do parâmetro de rugosidade Rmax, para ambas as tendências observadas foram semelhantes.

Figura 34 - Evolução da rugosidade em função do ângulo de saída nos ensaios 5 e 6.



Fonte: (O AUTOR)

Na figura 38 pode ser verificada a influência da variação do ângulo de saída da ferramenta de corte na geometria do cavaco, estes ensaios foram realizados com ferramentas com ângulo de saída de 10°, 15° e 20°, com rotação de 756rpm.

O menor ângulo de saída provoca maior atrito do cavaco com a superfície da ferramenta, logo, aquecimento ligeiramente maior, facilitando sua formação mais compacta. Por outro lado o aumento do ângulo de saída facilita a saída do cavaco, aumentando a tendência de formação de cavaco em fita.

Figura 35 - Aspecto do cavaco em função da variação do ângulo de saída da ferramenta de corte



Fonte: (O AUTOR)

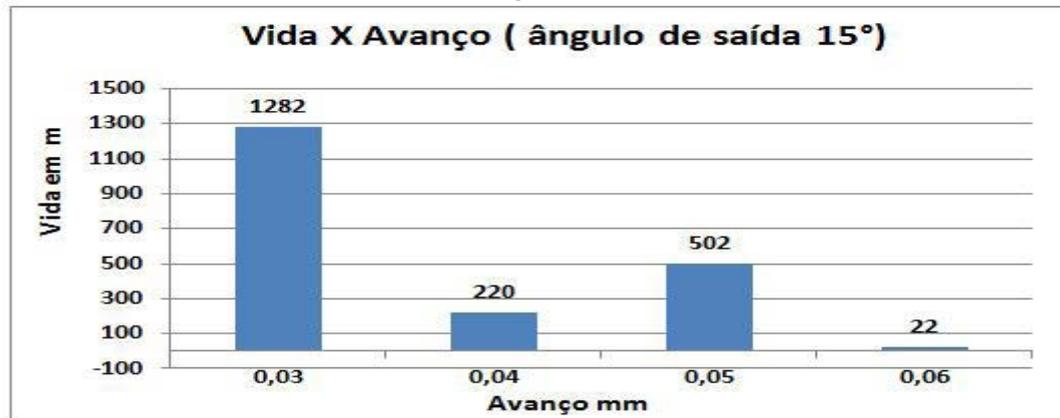
#### 4.3. RESULTADOS POR VARIAÇÃO DE AVANÇO

Como pode ser observada na Tabela 8, nos ensaios 5, 11, 12 e 13 a redução da vida da ferramenta com o aumento do avanço.

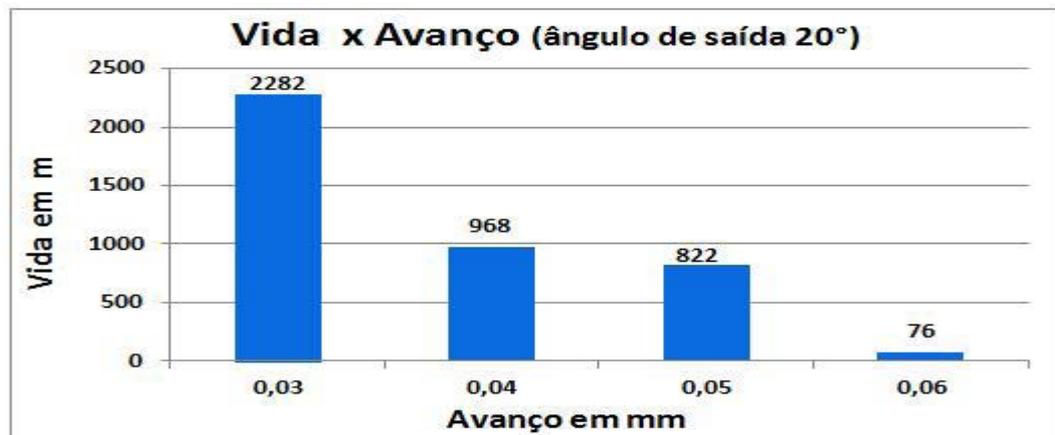
Também ficou claro que o ângulo de saída de 20° é mais apropriado que o ângulo de 15°, para esta operação de usinagem, confirmando nos ensaios 11, 12 e 13 o aumento de vida observado no ensaio 6.

O mecanismo de desgaste principal presente na ferramenta de corte foi de formação de aresta postiça.

Tabela 8 - Efeito do avanço na vida da ferramenta



ENSAIO	ÂNGULO SAÍDA	AMOSTRA	TOTAL DE AMOSTRAS	RPM	ENTRADAS POR PEÇA	BIT. FINAL mm	TOTAL ENTRADAS	COMPR. DE CORTE / ENTRADA m	AVANÇO mm	VIDA m
5	15°	6 a 22 (6 entr.)	17	756	7	14,00	118	10,87	0,03	1282
12	15°	102 a 105	4	756	7	14,00	27	8,14	0,04	220
13	15°	106 a 116	11	756	7	14,00	77	6,53	0,05	502
11	15°	101 (4 entr.)	1	756	7	14,00	4	5,45	0,06	22



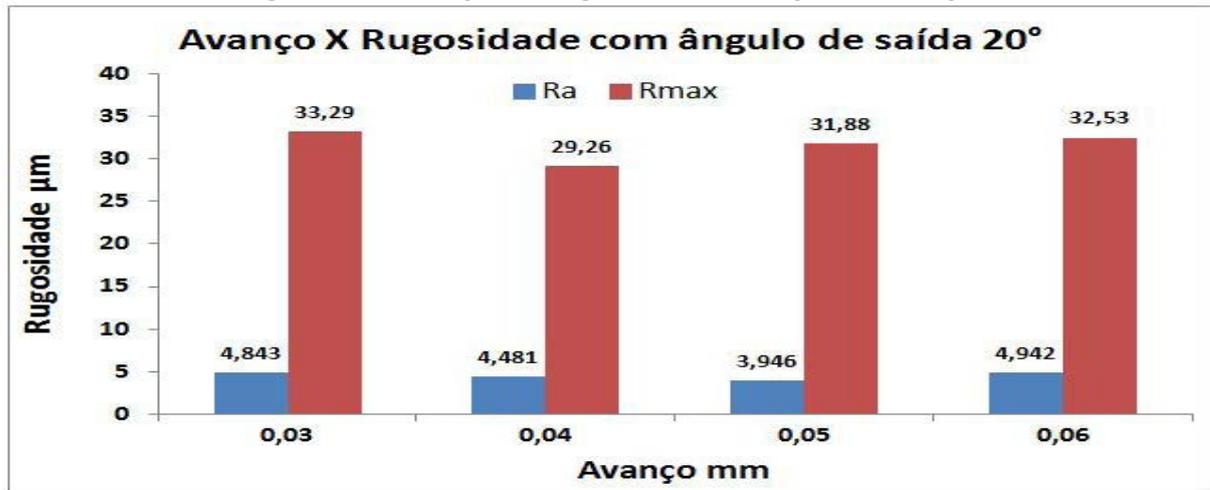
ENSAIO	ÂNGULO SAÍDA	AMOSTRA	TOTAL DE AMOSTRAS	RPM	ENTRADAS POR PEÇA	BIT. FINAL mm	TOTAL ENTRADAS	COMPR. DE CORTE / ENTRADA m	VIDA m	AVANÇO mm
6	20°	23 a 52	30	756	7	14,00	210	10,87	2282 (1)	0,03
8	20°	64 a 80	17	756	7	14,00	119	8,14	968	0,04
9	20°	81 a 98	18	756	7	14,00	126	6,53	822	0,05
10	20°	99 a 100	2	756	7	14,00	14	5,45	76	0,06

[1] Ensaio interrompido antes do final da vida

Fonte: (O AUTOR)

Nas medições realizadas ao longo das amostras ensaiadas, nos ensaios 6, 8, 9 e 10, onde foram usadas ferramentas com ângulo de saída de 20° e rotação 756Rpm, pode-se verificar que a variação de avanço não provocou alteração significativa na rugosidade da superfície usinada, conforme pode ser visto na Figura 39.

Figura 36 - Variação de rugosidade em função do avanço

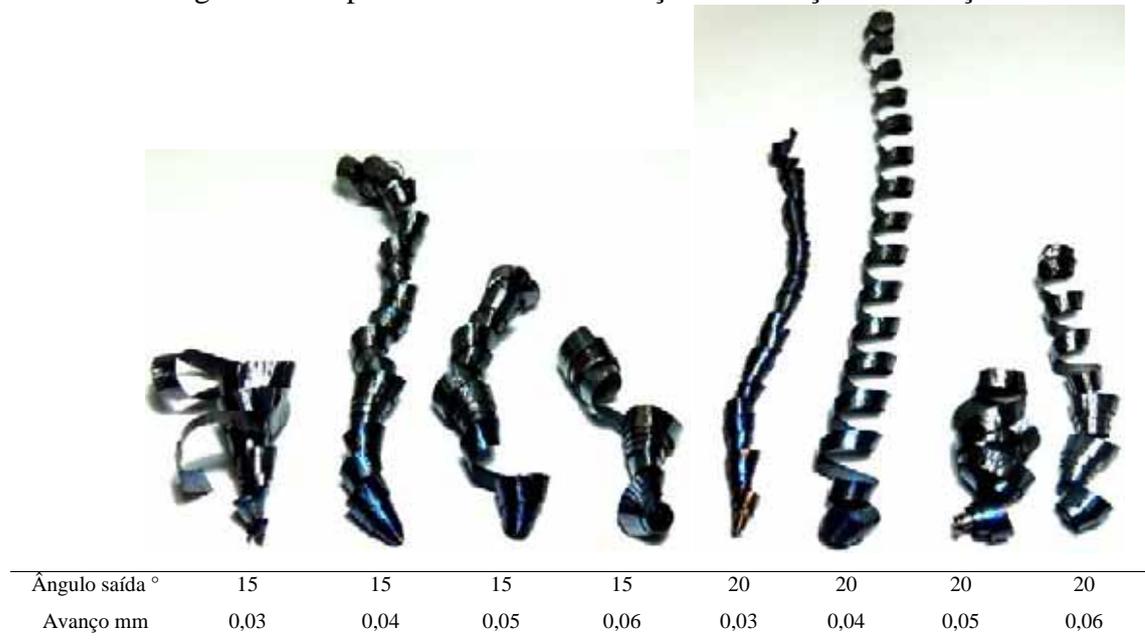


Fonte: (O AUTOR)

Os comportamentos tanto do Ra como do Rmax reportados são similares, ou seja, o Ra confirmou como sendo um bom parâmetro para avaliação da superfície.

Na figura 40 pode ser verificada a influência da variação do avanço na geometria do cavaco, estes ensaios foram realizados com ferramentas com ângulo de saída de 15° e 20°, com rotação de 756rpm.

Figura 40- Aspecto do cavaco em função da variação do avanço



Fonte: (O AUTOR)

Para ambos os ângulos, com o aumento do avanço ocorre um ligeiro aumento da temperatura, o que possivelmente proporciona um aumento nas deformações, retardando o cisalhamento, que resulta em uma menor fragilização do cavaco retardando a sua quebra.

## 5. CONCLUSÕES

- O aumento do ângulo de saída da ferramenta reduz o desgaste por formação de aresta postiça de corte, conforme pode ser verificado comparando-se os resultados obtidos nos ensaios 5, 6 e 7.

Em todos os ensaios realizados a com ângulo de saída de 20° foi observado aumento da vida da ferramenta.

A explicação dessa ocorrência é que o desgaste identificado como aresta postiça de corte, apresenta menor ocorrência quando o ângulo de saída é aumentado, pois reduz a pressão do cavaco na superfície de saída da ferramenta.

Como consequência do aumento do ângulo de saída, a ferramenta fica com cunha cortante com menor resistência mecânica, que pode significar a redução de sua vida, entretanto, no ângulo testado de 20° não foi observado esse fenômeno.

- O aumento do avanço proporciona um maior atrito em função do aumento da seção do cavaco provocando aquecimento e redução da vida da ferramenta.

Essa ocorrência pode ser explicada pelo aumento de pressão do cavaco sobre a superfície de saída da ferramenta, aumentando o atrito, que gera mais calor, consequentemente o aumento da temperatura. Quando a temperatura de revenimento da ferramenta é superada a sua dureza começa a ser reduzida, criando assim condição para o desgaste prematuro.

- O aumento de velocidade de corte também contribuiu para redução da vida da ferramenta. Semelhante ao aumento do avanço o aumento da velocidade de corte superaquece a ferramenta provocando seu desgaste prematuro.
- Pela metodologia utilizada foi possível avaliar a influência dos parâmetros de usinagem na vida da ferramenta de corte e estabelecer um padrão de referência para avaliação das melhorias que possam ser incorporadas no produto, sem a necessidade de submissão ao usuário final..
- Não foi observada variação significativa de rugosidade na superfície usinada com a variação de avanço e ângulo de saída da ferramenta de corte, pois, apesar do aumento

na severidade da operação a aresta de corte não foi comprometida, o que pode ser corroborado pelos valores de rugosidade obtidos.

- Para este estudo a proposta de melhoria apresentada para o aumento da vida da ferramenta é a variação no ângulo de saída para  $20^\circ$ , sem laçar mão de alterações metalúrgicas no material empregado.

## **6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS**

- Testar outros ângulos de saída.
- Avaliar a influência do encruamento na usinabilidade, variando redução de área na trefilação.
- Avaliar influência da rugosidade da superfície da saída da ferramenta na sua vida.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRÉ C. C. **Tecnol. Metal. Mater. Miner.**, São Paulo, v. 8, n. 4, p. 279-284, out.-dez. 2011

ASM metals handbook volume 09, **metallography and microstructures** pg. 497, 1985

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

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

CAKIR, M.C.; ISIK, Y. **Journal of Materials Processing Technology 159** (2005) pg.191–198.

CESTARI, G. S. G. **Estudo da influência do bismuto sobre a usinabilidade de aços din-20mncr5**. Dissertação apresentada a Universidade Federal do Rio Grande do Sul, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, Especialidade Siderurgia, 2012.

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

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. 9.ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1995. v.1, 751p

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

GAMA, R. P. **Estudo da formação do cavaco na usinagem de superligas de níquel por torneamento**. Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Projetos e Materiais 2014.

GARCIA, C. I.; HUA, M.; DEARDO, A. J. **Application of grain boundary engineering in the development of green steel**. In: international conference on behaviour of materials in machining, 5, 2002, New York. Proceedings, New York, 2002. p. 215-226

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

HASSALL, G. J.; JACKAMAN, D. P.; HAWKINS, R. **Phosphorus and sulphur removal from liquid steel in ladle steelmaking processes**. Iron making and Steelmaking, v.18, n.5, p. 359, 1991.

<http://aciarianews.blogspot.com.br> – disponível em 12/2012.

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

MACHADO, A. R. et al. **Teoria da usinagem dos materiais**. São Paulo: Blucher, 2011. 397 p.

MAGALHÃES, H. L. G. **Melhoria da limpidez do aço SAE 1045 desoxidado ao alumínio com aplicação na indústria automobilística, utilizando termodinâmica computacional**. 2010 - Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT, Ouro Preto, Fevereiro de 2010  
Metallurgical Guide to Machinability, New York, v.20, n.3, p. 66-73, oct. 1966.

MURPHY, D. W.; AYLWARD, P. T. **Machinability of steel**. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1971. 39p.

NELIS, E. L.; LUCAS T. B. G.; ÁLISSON R. M. **Tecnologias de melhoria da usinabilidade dos aços - uma revisão** - 9o colóquio de usinagem -Universidade Federal de Uberlândia .

PIMENTEL, M. F. **Influência da composição química e da microestrutura na usinabilidade do aço de corte fácil com adição de chumbo (SAE 12L14)** – Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Projetos e Materiais, 2006.

RAFAEL, Q. et al **Síntesis de una Matriz Cuasi ceramica Destinada a la Obtención de Fundentes Aglomerados para Proceso SAW y Evaluación Cinético-termodinámica de su Proceso de Humectación** – 2010

SHAW, M. C.; USUI, E.; SMITH, A. **Free machining steel: cutting forces, surface finish, and chip formation.** Transactions ASME, New York, v. 83, n. 1, p. 181-193, 1961.

SMITH, G. V. **Strain hardening.** Metal Progress, New York, v.1, n.1, p.73-78, dec.1970. **Society Inc**, p. 5, 1985.

TOLLEY, J.; CHARLES, J. A. **Influence of microstructure on machinability of wrought steels.** Metals Technology, pp. 248-253, May-June 1976

TROUP, G. B. **An evaluation of the present understanding of metal cutting.**

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

YAGUCHI, H. **Effect of soft additives (Pb/Bi) on machinability of low carbon resulfurized free machining steels.** Materials Science and Technology, New York, v. 5, n. 3, p. 255-267, 1989.