

Marcelo do Nascimento Sousa

Aplicação de Modelos Estatísticos para Verificar a
Influência dos Elementos Residuais (Cr, Ni e Cu) na
Usinabilidade de Aços de Corte-Fácil



Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Mecânica

2006

Marcelo do Nascimento Sousa

Aplicação de Modelos Estatísticos para Verificar a Influência dos
Elementos Residuais (Cr, Ni e Cu) na Usinabilidade de Aços de
Corte-Fácil

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-graduação em Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Uberlândia, como parte
dos requisitos para obtenção do título de **Mestre
em Engenharia Mecânica**.

Área de Concentração: Processo de
Fabricação

Orientador: Prof Dr Álisson Rocha Machado

CO-Orientador: Prof Dr Marcos A. de Souza
Barrozo

Uberlândia – MG

2006

Dedicatória

Aos meus pais, Marcos e Fátima Darc

Meus Irmãos, André e Letícia

Ao meu sobrinho, Rodrigo

E a Deus.

Agradecimentos:

Aos Professores Álisson Rocha Machado e Marcos A. de Souza Barrozo, pela amizade, e pela orientação neste trabalho de pesquisa.

À Faculdade de Engenharia Mecânica e Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, pela oportunidade de realização deste trabalho.

Aos colegas de trabalho, doutorando Nelis Evangelista Luiz e o graduando Rodrigo de Oliveira, os quais foram partes essenciais neste trabalho de pesquisa.

Aos demais colegas do Lepu, Rosemar Batista, Paulo Motta, e a todos que contribuíram neste trabalho pelas suas importantes discussões e sugestões.

A Denise Correia, pelas suas contribuições técnicas.

Aos professores do curso de pós-graduação, em especial ao professor Dr Márcio Bacci, pelos conhecimentos transmitidos.

Aos técnicos Reginaldo R. de Sousa e Carlos Humberto, pelo apoio e realização dos ensaios experimentais.

À Villares Metals S/A, pela doação do material ensaiado.

A Capes, pelo apoio financeiro, através da bolsa de mestrado.

Ao Cnpq, através do programa FVA.

Sumário	Página
Listas de Símbolos, Formulas e Abrevitaruras.....	viii
Resumo.....	xii
Abstract.....	xiii
I Introdução.....	1
II Revisão Bibliográfica.....	5
2.1 Noções sobre Processos de Usinagem.....	5
2.1.1 Parâmetros do Processo.....	5
2.1.2 Geometrias das Ferramentas.....	7
2.1.2.1 Função e influência dos Ângulos da Cunha Cortante.....	9
2.1.3 Materiais para Ferramentas de Corte.....	11
2.1.3.1 Aços-Rápido.....	13
2.1.4 Desgaste das Ferramentas	16
2.1.4.1 Avaria de Origem Térmica no Fresamento.....	16
2.1.4.2 Avarias de Origem Mecânica no Fresamento.....	19
2.1.4.3 Desgaste nas Ferramentas de Corte.....	21
2.1.4.4 Mecanismos de Desgaste.....	23
2.1.5 Vida da Ferramenta de Corte.....	26
2.1.5.1 Critério de Fim de Vida.....	26
2.1.6 Usinabilidade dos Materiais.....	27
2.1.7 Fluído de Corte.....	29
2.2 Aços para Usinagem.....	30
2.2.1 Aços de Usinabilidade Melhorada.....	30
2.2.2.1 Desoxidação pelo Cálcio.....	31
2.2.2. Aços de Corte-Fácil.....	33
2.2.2.1 Classificação dos Aços de Corte-Fácil.....	34
2.2.2.2 Efeito dos elementos nos Aços de Corte-Fácil.....	35
2.2.2.3 Influência dos Elementos Residuais nos Aços de Corte-Fácil.....	41
2.2.2.4 Formadores de Inclusões Não-Metálicas (Al, Si, O ₂).....	46

III	Análise Estatística.....	48
3.1	Comparação de K tratamentos – Análise de Variância.....	48
3.1.1	A distribuição F.....	51
3.1.2	Comparação de 2 tratamentos	54
3.2	Planejamentos de Experimentos.....	57
IV	Procedimentos Experimental.....	59
4.1	Material da Peça.....	59
4.1.1	Preparação dos Corpos de Prova.....	61
4.2	Ferramentas.....	62
4.2.1	Ferramentas de Corte.....	62
4.2.2	Suporte Porta-Ferramenta.....	63
4.3	Fluído de Corte.....	64
4.4	Equipamentos.....	64
4.4.1	Máquina-Ferramenta.....	64
4.4.2	Microscópio Ferramenteiro.....	65
4.5	Procedimento Teste.....	66
4.6	Teste Volvo.....	68
4.6.1	Determinação do Índice de Usinabilidade B.....	68
V	Resultado e Discussões.....	73
5.1	Resultado dos Índices de Usinabilidade B.....	74
5.2	Resultado da Análise de Variância.....	76
5.3	Resultados da Comparação de 2 tratamentos através do teste t de Student.....	77
5.4	Resultados obtidos através da Análise de Regressão.....	80
5.5	Superfície e Resposta.....	82
5.6	Resultados dos Índices de Usinabilidade B para o aço ABNT 1112 (sem chumbo).....	88
5.7	Desgaste nas Ferramentas de Aço-Rápido.....	90
VI	Conclusões e Sugestões Para Trabalhos Futuro.....	93
6.1	Conclusões.....	93
6.2	Sugestões Para Trabalhos Futuros	94

VII	Referência Bibliográficas.....	95
VI	Anexos.....	102

Lista de Símbolos, Fórmula e Abreviaturas

Letras Latinas

a_e	penetração de trabalho
a_f	penetração de avanço
a_p	profundidade de corte
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnica
Al_2O_3	óxido de alumínio
A_γ	superfície de saída
A_α	superfície de folga
Al	alumínio
b	largura de corte
Bi	bismuto
B_2O_3	óxido de boro
C	carbono
Ca	cálcio
Cr	cromo
Cu	cobre
f	avanço
F	distribuição F de Fisher e Snedecor
F_{cal}	F calculado
gl	grau de liberdade
h	espessura de corte
HB	dureza Brinell
H_0	hipótese nula
H_1	hipótese alternativa
INDB	resposta do índice de usinabilidade B
KT	profundidade máxima de cratera
MnS	sulfeto de manganês
MnSe	seleneto de manganês
MnTe	telureto de manganês
Ni	níquel

O_2	oxigênio
P	fósforo
Pb	chumbo
P_f	plano admitido de trabalho
P_o	plano ortogonal
P_r	plano de referência da ferramenta
P_s	plano de corte da ferramenta
P'_s	plano secundário de corte
QMR	quadrado médio de resíduos
QMT	quadrado médio de tratamentos
R^2	coeficiente de correlação
RA	região de aceitação de H_0
RC	região crítica de rejeição de H_0
SQT	soma de quadrados de tratamentos
SQTO	soma de quadrado total
SQTR	soma de quadrado de resíduos
VB_B	desgaste de flanco médio
S	enxofre
Si	silício
VB_{BMax}	desgaste de flanco máximo
Te	telúrio
V_c	velocidade de corte
VN	desgaste de entalhe
VRM	volume de material removido
Y_{ij}	resposta de interesse

Letras gregas

β_o	ângulo de cunha da ferramenta
ε_r	ângulo de ponta da ferramenta
α	nível de significância
α_o	ângulo de folga da ferramenta

γ_o		ângulo de saída da ferramenta
λ_s		ângulo de inclinação da ferramenta
μ		média geral de todos os indivíduos
μ_j		efeito do j-ésimo tratamento
ξ_i		erro residual
η		média populacional
σ		desvio-padrão populacional
χ_r		ângulo de posição da ferramenta
χ'_r		ângulo de posição secundário da ferramenta

Resumo

Sousa, M.N., (2006), Aplicação de Modelos Estatísticos para Verificar a Influência dos Elementos Residuais (Cr, Ni e Cu) na Usinabilidade de Aços de Corte-Fácil, 106p. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia.

Os aços de corte-fácil são especialmente projetados para oferecer melhores resultados mediante a operação com retirada de cavaco, reduzindo o coeficiente de contato ou atrito com a ferramenta. Em geral, estes aços têm que cumprir baixas especificações em outras características como resistência mecânica, resistência a fadiga e temperabilidade, entre outras. Por esta razão os principais elementos de liga que os constituem são destinados a melhoria da usinabilidade. São geralmente aços de baixo carbono com fortes adições de S, Mn, Pb, P etc... . Como são fabricados, normalmente, com materiais recicláveis, elementos como Cr, Ni, Cu e Mo são sempre encontrados em suas composições, sendo considerados elementos residuais. Este trabalho visa investigar a influência de pequenas variações nos teores de cobre, níquel e cromo na usinabilidade dos aços de corte-fácil baixo carbono baseado na metodologia descrita na norma VOLVO STD 1018, 712. Ela se baseia em ensaios de vida de ferramentas monocortantes de HSS aplicadas em condições especiais no processo de fresamento frontal. Para uma melhor confiabilidade foram usadas ferramentas estatísticas através da análise de variância, teste *t* de Student e análise de regressão nos resultados obtidos pela norma VOLVO. Os resultados encontrados através dos experimentos mostraram que os elementos residuais realmente influenciam na usinabilidade do aço SAE 12L14, sendo que os mais significativos foram o Ni e Cu.

Palavras-chave: Aços de corte-fácil, Usinabilidade, Elementos químicos residuais, Norma Volvo STD 1018 - 712, Análise estatística.

Abstract:

Sousa, M.N., (2006), Application of Statistics Models to verify the Influence of Residual Elements (Cr, Ni e Cu) in the Machinability of Free Cutting Steels, p. 106. Dissertation of Master Degree. Faculty of Mechanical Engineering, Federal University of Uberlândia.

Low carbon free-cutting steels are widely used for parts and components subject to moderate strength levels and relatively low shock loading, with machinability being the most important factor. Examples are hydraulic valves, keys, contact boards and other parts requiring rapid metal removal. These materials are especially designed for high machinability, that is, reduced tool-chip contact length, low coefficient of friction between the tool and the chip or the workpiece, production of easy handled chips, low cutting forces and power consumption, thereby providing long tool lives and/or high productivity by using high cutting speeds. Elements like Mn, P, S and Pb are generally present in their composition ensuring improved machinability. However, low carbon free-cutting steels also contain residual elements that often impair machinability such as Cr, Ni, Mo and Cu, which are difficult to be eliminated during the manufacturing process. This work investigates the influence of the tramp elements Cr, Ni and Cu on the machinability of the SAE 12L14 low carbon free-cutting steel after testing in accordance with VOLVO STD 1018, 712 standard. The standard is based on tool life tests using HSS single point tools in face milling operation under special cutting conditions. The tool life results were treated statistically using ANOVA method, Student's t distribution and multiple regression analysis. The results showed that the residual elements actually affect machinability of the SAE 12L14 low carbon free-cutting steel, with Ni and Cu being more significant.

Keywords: Low carbon free-cutting steels; Machinability; Tramp elements; VOLVO STD 1018, 712 standard; Design of experiments and statistic analysis.

Capítulo I

Introdução:

Os processos de usinagem estão presentes nas etapas de fabricação de praticamente todos os produtos da indústria de transformação mecânica, e representa aproximadamente 50% do custo final de uma peça acabada (Apple, 1989). Alguns autores (Trent e Wright, 2000) estimam em cerca de 250 milhões de dólares os gastos anuais na década de 80 com a usinagem nos EUA. A necessidade freqüente de materiais cada vez mais resistentes implica em crescentes dificuldades de processamentos dos mesmos. Devido a esses fatores, têm crescido em grande escala as pesquisas nas indústrias siderúrgicas visando à obtenção de aços especiais com melhoria na usinabilidade, os quais permitem trabalhar com maiores velocidades de corte, promovem menor desgaste nas ferramentas e ainda possibilitam a obtenção de melhor acabamento superficial, reduzindo o custo final de fabricação.

Entre esses aços encontram-se os aços de corte-fácil, que surgiram no Brasil na década de 60, devido ao desenvolvimento da indústria automobilística, aliada à política de substituição de importações. Os primeiros aços resulfurados de corte fácil foram produzidos no Brasil pela Belgo-Mineira e os resulfurados ao chumbo pela Siderúrgica Aparecida (depois incorporada a Villares). Na década 70 a Acesita e, mais recentemente, a Gerdau Piratini passaram a produzir também aços de corte-fácil (Troiani, 2004). Os aços-de-corte-fácil são projetados com o objetivo de obter máxima performance em operações de usinagem. Estes aços são aplicados na fabricação de peças que possuem poucas exigências mecânicas, tais como: componentes para bombas, buchas, pistões, componentes de aparelhos domésticos, etc (Prado e Pimentel, 2004). A figura 1.1 apresenta exemplos de componentes mecânicos fabricados através dos aços de corte-fácil.



Figura 1 – Exemplos de componentes mecânicos fabricados com aços de corte-fácil (Evangelista, 2004)

Nas aplicações dos aços de corte-fácil utilizam-se normalmente barras de aço trefiladas com diâmetros iguais ou menores que 50mm, de forma que as velocidades de corte raramente ultrapassam 200m/min. Os aços de corte-fácil são ligas ferro-carbono (com baixo ou médio teor de carbono) e normalmente são adicionados enxofre (para formação de sulfetos de manganês) e chumbo (Bas, 1995). Estes materiais são considerados aditivos de corte-fácil que promovem a melhoria da usinabilidade. De especial importância são os aços de corte-fácil baixo carbono que responde pelo maior volume consumido dentro deste grupo de aço, que é de aproximadamente 15000 t/ano no mercado brasileiro (Prado e Pimentel, 2004).

Segundo os fabricantes de aços, não é raro encontrar reclamações de clientes pelo fato de observarem grande variabilidade de usinabilidade entre lotes distintos, apesar de estarem dentro das especificações da norma. Acredita-se que as variações na composição química sejam responsáveis por estas variações na usinabilidade destes aços (Mill & Redford 1983).

Atualmente à maioria das aciarias de produtos longos utilizam sucatas na fabricação do aço. Isso acarreta um aumento dos elementos químicos residuais encontrados nestes aços. Pode-se, considerar como principais elementos residuais Cr, Ni, Mo, Cu e Sn, sendo difíceis de serem eliminados. Eles aumentam a dureza da ferrita, que aumenta o desgaste da ferramenta. Apesar da importância, a literatura disponível sobre a influência dos elementos químicos residuais é muito pobre.

Este trabalho faz parte de uma linha de pesquisa do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), que envolve ainda o Laboratório de Automação e Manufatura (LAM) da Universidade Federal e Itajubá (UNIFEI) e a empresa siderúrgica Aços Villares S.A. Essa linha de pesquisa está inserida no contexto de um dos quatro subprojetos do projeto maior (Machado, 2004): “Redes de Materiais Avançados de Usinabilidade Melhorada”. O subprojeto tem o título: “Investigação com Vista ao Desenvolvimento de Aços de Corte Livre Alternativos sem Chumbo”. A primeira grande linha de pesquisa nesta direção tem como objetivo avaliar a influência dos elementos químicos residuais nos aços-de-corte-fácil. O fluxograma da figura 1.2 mostra a abrangência desta linha de pesquisa. O material investigado é o ABNT 12L14, produzido pela Aciaria Aços Villares em nove versões de residuais Cr, Ni e Cu diferentes.

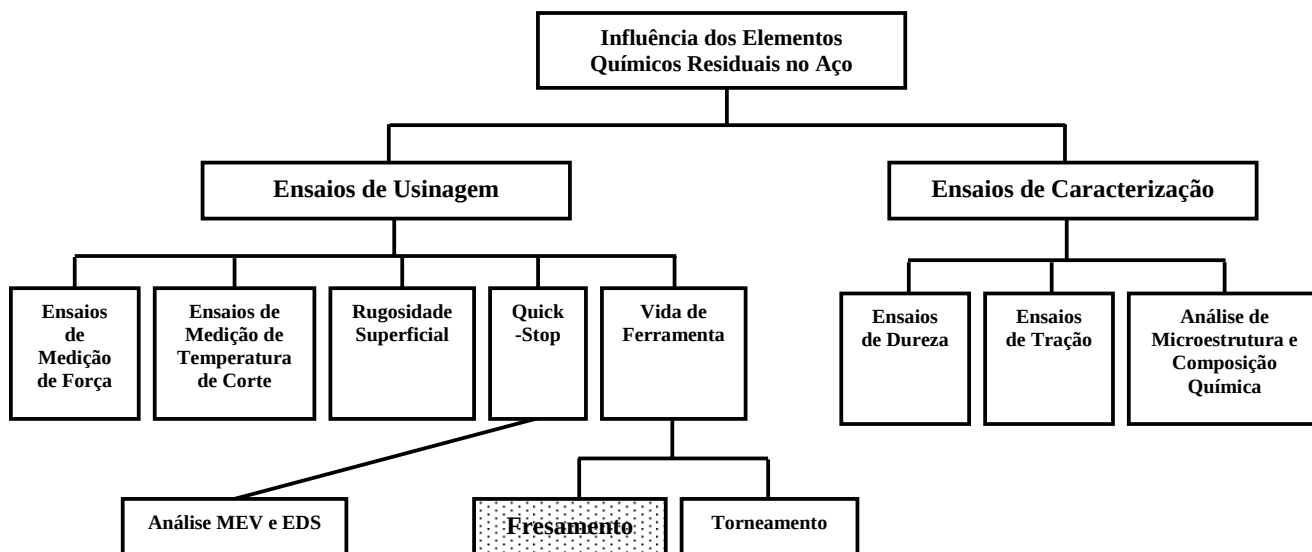


Figura 1.2 - Fluxograma das atividades desenvolvidas no projeto maior

Essa pesquisa mãe envolve uma tese de doutorado em desenvolvimento (Evangelista, 2004), cujos, os resultados ainda não foram publicados, englobando todas as atividades mostradas na figura 1.2, exceto aquelas relativas à ensaio de vida de ferramenta, que compreende duas dissertações de mestrado: uma já defendida (Almeida, 2005) e a presente dissertação, em destaque na figura 1.2.

A atividade desenvolvida no trabalho de Almeida (2005) está representada pelo quadro de ensaio de vida de ferramenta no torneamento, na figura 1.2, utilizando um ensaio de curta duração, normalizado pela ISO 3685 (1993).

A presente dissertação vai investigar a usinabilidade deste material através de ensaios de vida da ferramenta pelo fresamento. O objetivo principal é determinar a influência dos níveis dos elementos químicos residuais (Cr, Ni, Cu) na usinabilidade do aço ABNT 12L14, utilizando um teste desenvolvido e normalizado pela Volvo (1989). Na análise dos resultados foram utilizadas ferramentas estatísticas (BOX, 1978), para garantir maior confiança nos resultados, sendo as ferramentas usadas: análise de variância que possui a finalidade de verificar se realmente existe diferença nos resultados obtidos, o teste t de Student para comparar os materiais em pares, e análise de regressão para filtrar quais faixas de elementos residuais são significativas na influência da usinabilidade do aço-de-corte-fácil.

Este trabalho está dividido em 7 capítulos, incluindo-se está introdução - capítulo I; Revisão bibliográfica sobre noções do processo de usinagem - capítulo II; Uma abordagem sobre análise estatística - capítulo III; Procedimento Experimental - capítulo IV; Resultados obtidos e discussões destes resultados - capítulo V; Conclusões e sugestões para trabalhos futuros - capítulo VI; Referência Bibliográfica - capítulo VII; e anexos I e II.

Capítulo II

Revisão Bibliográfica

2.1 Noções sobre Processos de Usinagem

Na maioria dos livros especializados da área tem-se que fabricar é transformar matérias primas em produtos acabados, por vários processos, sendo um destes processos o de usinagem (Machado e da Silva, 2004). A importância da fabricação é melhor, entendida pelo fato de que todos os objetos culturais têm forma e dimensões diferentes com raríssimas exceções, e esses objetos são feitos de um ou mais materiais e transformados em produtos acabados por uma larga variedade de processos. Por processos de usinagem entendemos aqueles que, ao conferir à peça a forma, ou as dimensões ou o acabamento, ou ainda uma combinação qualquer destes três bens, produzem cavaco (Ferraresi, 1977). Hoje cerca de 10% de toda produção de metais são transformadas em cavaco (Machado e da Silva, 2004). O estudo dos processos de usinagem é imprevisível, devido à complexidade em se determinar às condições ideais de corte, o que torna as pesquisas desafiadoras e de grande importância para as indústrias.

2.1.1 Parâmetros do Processo

- **Velocidade de corte (v_c):** é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e o sentido de corte (figura 2.1).
- **Avanço f :** é o percurso de avanço em cada volta (mm/volta) ou em cada curso da ferramenta (mm/golpe) (figura 2.1).

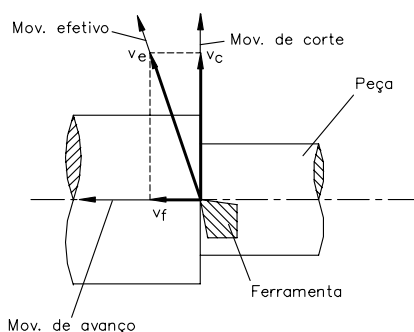


Figura 2.1 - Direção dos movimentos de corte, de avanço e efetivo, no torneamento, (Norma ABNT NBR 6162/1989).

- **Profundidade de corte (a_p):** é a profundidade ou largura de penetração da ferramenta na peça, medida numa direção perpendicular ao plano de trabalho (figura 2.2).
- **Penetração de trabalho (a_e):** é a penetração da ferramenta em relação à peça, medida no plano de trabalho e numa direção perpendicular à direção de avanço (figura 2.2)..
- **Penetração de avanço (a_f):** é a grandeza de penetração da ferramenta, medida no plano de trabalho e na direção de avanço (figura 2.2).

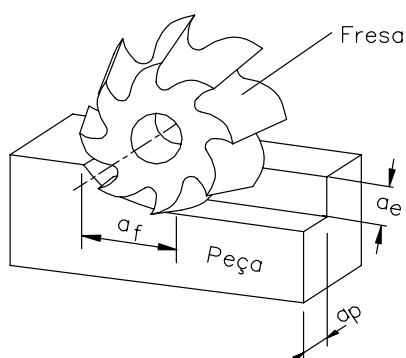


Figura 2.2 - Largura de usinagem a_p , penetração de trabalho a_e e penetração de avanço a_f , no fresamento periférico (Norma ABNT NBR 6162/1989)

- **Grandezas Relativas ao Cavaco**

- Largura de corte b :** é a largura calculada da seção transversal de corte a ser retirada, media na superfície de usinagem principal, segundo a direção normal à direção de corte (figura 2.3).

- b) Espessura de corte h :** é a espessura calculada da seção transversal de corte a ser retirada, medida normalmente à superfície em usinagem principal e segundo a direção perpendicular a direção de corte (figura 2.3).
- c) Seção transversal efetiva de corte:** é a área calculada da seção transversal de um cavaco a ser retirado, medido no plano normal à direção de corte (figura 2.3).

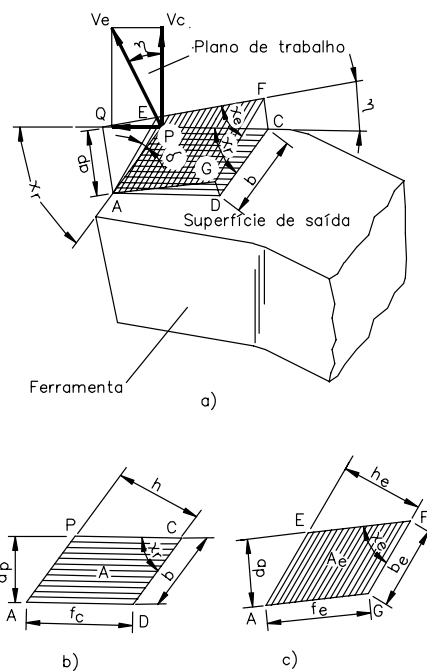


Figura 2.3 - Grandezas de corte, para arestas de corte retilíneas (Norma ABNT NBR 6162/1989).

2.1.2 Geometrias das Ferramentas

a) Cunha de corte: é a parte da ferramenta na qual o cavaco se origina, através do movimento relativo entre a ferramenta e peça. As arestas que limitam as superfícies da cunha são arestas de corte, estas podem ser retilíneas, angulares ou curvilíneas (Ferraresi, 1977) (figura 2.4).

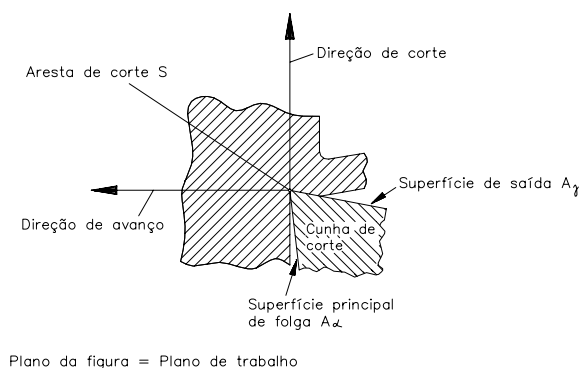


Figura 2.4 - Cunha de Corte da Ferramenta (Norma da ABNT NBR 6163/80).

b) Ângulos:

- **Ângulo de posição da ferramenta (χ_r):** medido no plano de referência, é o ângulo entre o plano de corte da ferramenta (P_s) e o plano admitido de trabalho (P_f). É sempre positivo e situa-se sempre fora da cunha cortante, de forma que seu vértice indica a ponta de corte e a posição da aresta de corte (figura 2.5).
- **Ângulo de ponta da ferramenta (ϵ_r):** medido no plano de referência, é o ângulo entre os planos principais de corte (P_s) e o secundário de corte (P'_s), medido no plano de referência da ferramenta (figura 2.5).
- **Ângulo de posição secundário da ferramenta (χ'_r):** medido no plano de referência, é o ângulo entre o plano de corte secundário da ferramenta (P'_s) e o plano admitido de trabalho (P_f). É sempre positivo e situa-se sempre fora da cunha cortante, de forma que seu vértice também indica a ponta de corte. Este ângulo indica a posição da aresta secundária da ferramenta (figura 2.5).
- **Ângulo de inclinação da ferramenta (λ_s):** medido no plano de corte, é o ângulo entre a aresta de corte e o plano de referência da ferramenta (P_r). É agudo e o seu vértice indica a ponta de corte. É positivo quando, observando-se a partir da ponta de corte, a aresta de corte encontra-se na região posterior em relação ao P_r , orientando-se, para tanto, segundo o sentido de corte (figura 2.5).
- **Ângulo de folga da ferramenta (α_o):** medido no plano ortogonal, é o ângulo entre a superfície de folga (A_α) e o plano de corte da ferramenta (P_s) (figura 2.5).
- **Ângulo de cunha da ferramenta (β_o):** medido no plano ortogonal, é o ângulo entre as superfícies de saída (A_γ) e a de folga (A_α) (figura 2.5).
- **Ângulo de saída da ferramenta (γ_o):** medido no plano ortogonal, é o ângulo entre a superfície de saída (A_γ) e o plano de referência da ferramenta (P_r). É sempre agudo,

e é positivo quando a interseção entre a superfície de saída e o plano ortogonal (P_o) encontra-se na região posterior em relação ao P_r , orientando-se, para tanto, segundo o sentido de corte (figura 2.5).

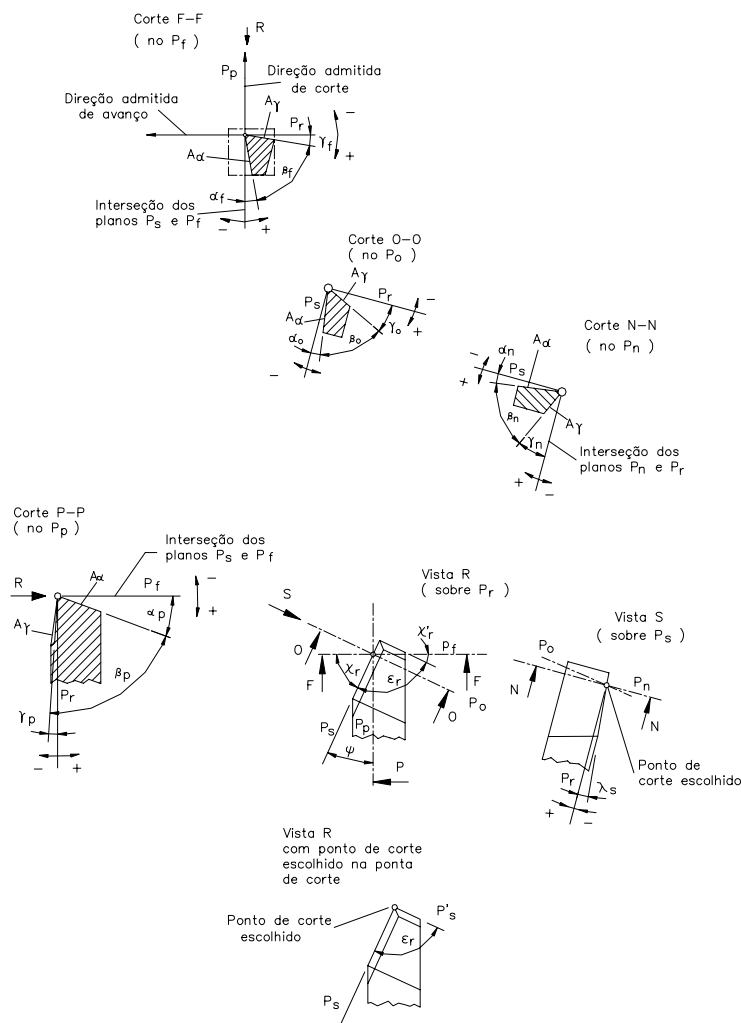


Figura 2.5 - Ângulos da Ferramenta numa ferramenta de torneamento (Norma da ABNT NBR 6163/80)

2.1.2.1 Funções e Influência dos Ângulos da Cunha Cortante.

As funções e influências dos principais ângulos que compõem a cunha cortante das ferramentas são (Machado e da Silva, 2004).

▪ **Ângulo de Posição (χ_r):**

- Distribuir as tensões de corte favoravelmente no início e no fim do corte.
- Aumenta o ângulo de ponta (ε_r), aumentando a sua resistência e a sua dissipação de calor.
- Influi a direção de saída do cavaco.
- Produz uma força passiva na ferramenta, reduzindo vibrações.
- Geralmente $30^\circ \leq (\chi_r) \leq 90^\circ$. Em perfilamento pode ser maior que 90° .

▪ **Ângulo de inclinação da ferramenta (λ_s):**

- Controlar a direção de saída do cavaco.
- Proteger a quina da ferramenta contra impactos.
- Atenuar vibrações.
- Geralmente $-4^\circ \leq (\lambda_s) \leq 4^\circ$.

▪ **Ângulo de folga da ferramenta (α_o):**

- Evitar atrito entre a peça e a superfície de folga da ferramenta.
- Se α_o é pequeno, a cunha não penetra convenientemente no material, a ferramenta perde o corte rapidamente, há grande geração de calor e prejudica o acabamento superficial.
- Se α_o é grande, a cunha da ferramenta perde resistência, podendo soltar pequenas lascas ou quebrar.
- α_o depende principalmente: resistência do material da ferramenta e da peça a usinar. Geralmente $2^\circ \leq (\alpha_o) \leq 14^\circ$.

▪ **Ângulo de saída da ferramenta (γ_o):**

- Influi decisivamente na força e na potência necessária ao corte, no acabamento superficial e no calor gerado.
- Quando maior γ_o menor será o trabalho de dobramento do cavaco.
- γ_o depende principalmente de:
- Resistência do material da ferramenta da peça a usinar.
- Quantidade de calor gerado pelo corte
- γ_o negativo é muito usado para corte de materiais de difícil usinabilidade e em cortes interrompidos, com o inconveniente da necessidade de maior força e potências de usinagem e maior geração de calor na ferramenta.
- Geralmente $-10^\circ \leq (\gamma_o) \leq 30^\circ$.

2.1.3 Materiais para Ferramentas de Corte

Os materiais de ferramentas têm tido grandes desenvolvimento nos últimos tempos principalmente no final do século 20 (Handbook, 1994). O primeiro grande impulso desse desenvolvimento foi quando Taylor e White desenvolveram o primeiro aço-rápido, que revolucionou a prática de usinagem naquela época, dando um grande aumento na produtividade, aumentando a velocidade de corte em uma ordem de grandeza de (de 3 a 5m/min para 30 a 35m/min). O segundo grande impulso aconteceu com o aparecimento do metal duro em 1926 na Alemanha, onde a empresa Fredrick Krupp A. G. iniciou a primeira produção de metal duro fabricado pela metalurgia do pó, baseado nas patentes de Lohman e Schroter, sendo verificado na época as excelentes propriedades de dureza e resistência ao desgaste deste material, aumentando as velocidades de corte de 35m/min com aços-rápidos para 250-300m/minuto com esses metais duros (Ferraresi, 1977). Verificando-se que o TiC aumentava muito a resistência ao desgaste, principalmente de cratera, nos metais duros, e devido a escassez de tungstênio durante a segunda guerra mundial, vários pesquisadores concentraram no desenvolvimento de um material com as mesmas características do metal duro. Esse material foi desenvolvido e batizado de cermet onde a primeira patente foi datada de 1931 (Machado e Silva, 2004). Os cerâmicos foram utilizados durante a segunda guerra mundial pelos ingleses, onde obtiveram resultados surpreendentes na usinagem, permitindo velocidades de cortes que ultrapassaram em muito, aquelas possibilitadas com o metal duro. Na literatura não existe uma definição clássica para os materiais cerâmicos que os possa identificar. A definição que segue abaixo, citada por Machado e da Silva (2004), utilizada por diversos autores, ou livros (Kalpakjian, 1984, De Garmo et alli, 1988, ASM Handbook, 1990).

“Materiais cerâmicos são compostos dos elementos metálicos e não-metálicos geralmente na forma de óxidos, carbonetos e nitretos, e existem em uma grande, variedades de composição e forma. A maioria tem estruturas cristalinas, mas em contraste com os metais, as ligações entre os elementos são iônicas ou covalentes. A ausência de elétrons livres faz com que as cerâmicas sejam pouco condutoras de eletricidade, e em seções finas sejam transparentes. Devido às fortes ligações primárias, a maioria das cerâmicas tem alto ponto de fusão”.

O diamante natural foi usado como ferramenta de corte por centenas de anos, pois se trata do material de maior dureza e resistência ao desgaste da natureza, possuindo excelente condutividade térmica, mas devido à sua fragilidade, risco de falha sob impacto, e alto custo, tem sua aplicação limitada como ferramenta de corte principalmente após o

aparecimento do diamante sintético. Estes foram produzidos pela primeira vez em 1950 e entraram no mercado de trabalho em 1970.

A Figura 2.6 apresenta a lista dos materiais para ferramentas de corte existentes hoje no mercado mundial. À medida que se desce na lista, ganha-se em dureza (ou resistência ao desgaste) e perde-se em tenacidade, e vice-versa. A ordem na lista, também, obedece a cronologia de aparecimento das ferramentas no mercado mundial, com poucas exceções.

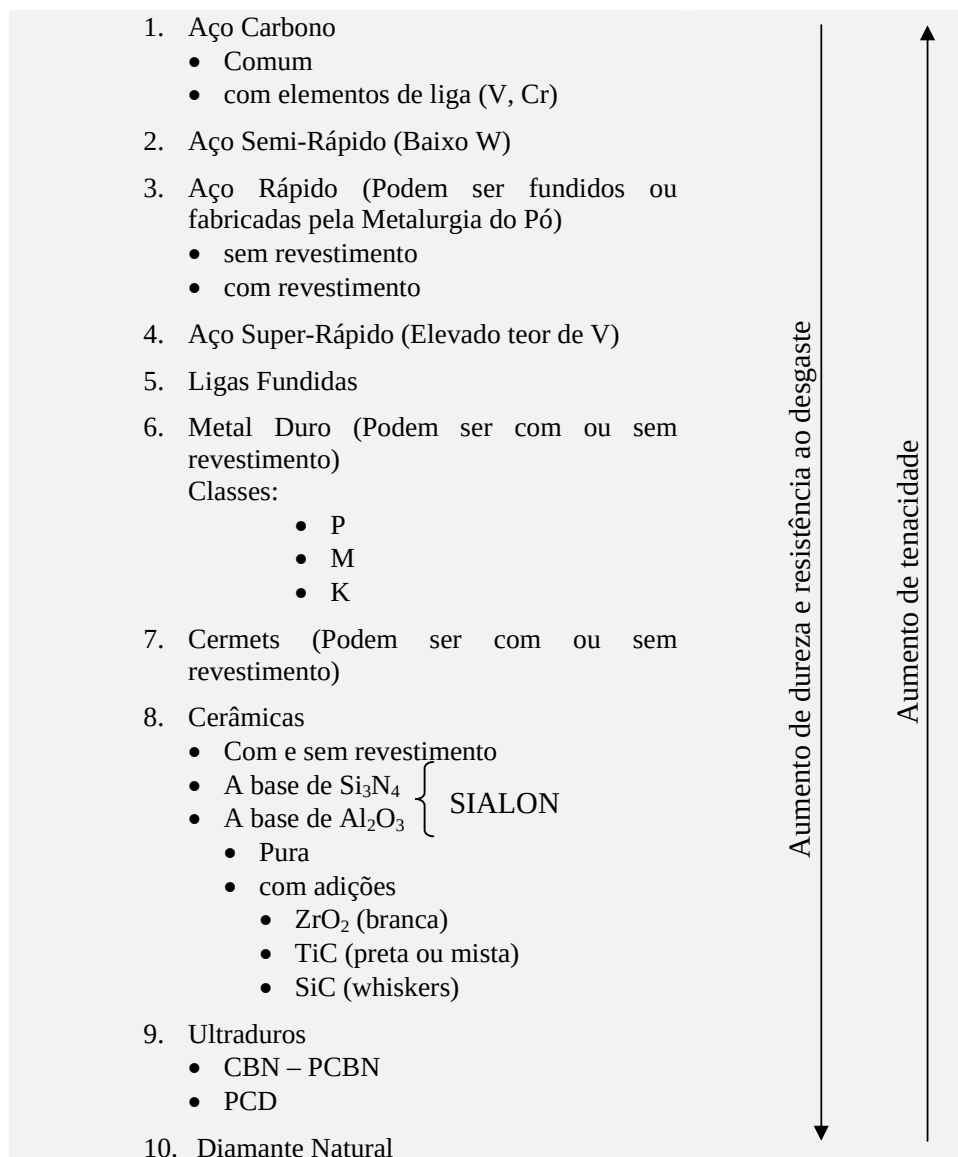


Figura 2.6 - Lista dos materiais para ferramentas de corte (adaptada de Machado e da Silva, 2004).

Neste trabalho será utilizado ferramentas de aço-rápido, portando uma abordagem mais detalhada deste grupo será apresentada a seguir.

2.1.3.1 Aços-Rápidos

O aço-rápido é um aço ferramenta com altos teores de tungstênio, molibdênio, cromo, vanádio, cobalto e nióbio, com um apropriado tratamento térmico, que surgiu em 1900 e revolucionou a prática de usinagem naquela época, proporcionando uma grande produtividade. As velocidades de corte puderam ser aumentadas em uma ordem de grandeza de 3 a 5m/min com as ferramentas de aço-carbono para 30 a 35m/min com aços-rápidos (Machado e da Silva, 2004).

É um material tenaz sendo esta propriedade dependente dos elementos de liga e do grau de dissolubilidade destes. Tem elevada resistência ao desgaste e elevada dureza a quente, se comparado com os aços carbonos usados para ferramentas. Podem ser utilizados até temperaturas da ordem de 600°C. Sua estrutura básica é martensítica com carbonetos incrustados, o que confere ao material alta dureza a quente, a qual é tanto maior quanto mais elementos de ligas são dissolvidos durante o aquecimento da tempera e permanecem dissolvidos depois, do resfriamento. Estes elementos irão se precipitarem na forma de carbonetos duros durante o recozimento (dureza secundária) (Diniz, et al, 1999). Estes carbonetos secundários são responsáveis pela resistência à abrasão. Em geral os aços-rápidos resistentes à abrasão são poucos tenazes e vice-versa, e possuem alta dureza à temperatura ambiente.

Os efeitos dos elementos de liga nos aços-rápidos são: (Machado e da Silva, 2004).

Carbono: Como nos aços-carbonos, atua no sentido de aumentar a dureza do material. Também possibilita a formação de carbonetos, que são partículas, duras e resistentes ao desgaste. Os teores variam de 0.7 a 1.6%, teores mais baixos representam menores durezas e teores mais altos aumentam a formação de carbonetos complexos o que representa maior dureza e resistência ao desgaste.

Tungstênio e molibdênio: O tungstênio está sempre presente nos aços-rápidos os teores podem chegar a 20%. O molibdênio é introduzido como seu substituto, gerando a outra classe de aços-rápidos. Ambos formam carbonetos responsáveis pela alta dureza a quente destes aços. Como o molibdênio tem um peso atômico menor que o tungstênio cerca da metade, ao ser adicionado na mesma porcentagem em peso, produzirá o dobro de

átomos para ligar-se ao carbono do aço. Nestas condições, usa-se 1% de molibdênio para substituir 1,6 a 2,0% de tungstênio.

Vanádio e nióbio: O vanádio aparece em teores de 1 a 5%. É desoxidante, mas forte formador de carbonetos, precisa-se aumentar o teor de carbono de 25% a cada 1% de vanádio que é acrescentado para a formação dos carbonetos. O carboneto de vanádio é o carboneto mais duro encontrado nos aços-rápidos. Os aços com alto teor de vanádio e carbono são os que possuem melhor resistência ao desgaste. O nióbio tem características semelhantes ao vanádio, e tem sido muito usado no Brasil por ser mais barato.

Cromo: Aparece em teores sempre em torno de 4%. Juntamente com o carbono é o principal responsável pela alta temperabilidade dos aços-rápidos.

Cobalto: Aumenta significativamente a dureza a quente, aumentando a eficiência das ferramentas em operações de altas temperaturas, como é o caso de corte de debaste e em corte a altas velocidades. O cobalto se dissolve grandemente na matriz, proporcionando uma dureza média mais elevada, tanto a temperatura ambiente, como a altas temperaturas. O ponto de fusão da liga é aumentado, o que proporciona também uma queda na taxa de difusão dos elementos de liga, inibindo, por conseguinte a coalescência de carbonetos secundários, isto permite temperaturas de tempera mais elevadas sem risco de problemas sérios de crescimento de grão. O cobalto aumenta ainda a condutividade térmica do aço-rápido. Os aços-rápidos ao cobalto são também recomendados para a usinagem de materiais que apresentam cavacos curtos como ferro fundido, onde a temperatura se eleva bastante devido a não utilização de fluido de corte.

Existem duas categorias de aços-rápidos: a categoria T que compreende os tipos pré-dominantes ao tungstênio e a categoria M que predomina os tipos pré-dominantes ao molibdênio. Estas categorias são divididas em subcategorias, de acordo com a classificação AISI mostrada na tabela 2.1.

Tabela 2.1. - Classificação dos aços – rápidos segundo a AISI (Machado e da Silva, 2004)

AISI	C	Mn	Si	Cr	V	W	Mo	Co	Outros
Tipos ao W									
T1	0,70/0,75	0,10/0,40	0,10/0,40	4,00/4,10	1,00/1,20	18,00/18,25	0,70 (opc.)	-	-
T2	0,80/0,85	0,10/0,40	0,10/0,40	4,00/4,25	2,00/2,15	18,00/18,50	0,50/0,75 (opc.)	-	-
T2	0,95/0,98	0,10/0,40	0,10/0,40	4,00/4,25	2,00/2,15	18,00/18,50	0,50/0,75 (opc.)	-	-
T7	0,70/0,75	0,10/0,40	0,10/0,40	4,50/5,00	1,50/1,80	13,50/14,50	-	-	-
T9	1,22/1,28	0,10/0,40	0,10/0,40	3,75/4,25	3,75/4,25	18,00/18,50	0,71 (opc.)	-	-
Tipos ao W - Co									
T4	0,70/0,75	0,10/0,40	0,10/0,40	4,00/4,50	1,00/1,25	18,00/19,00	0,60/0,70 (opc.)	4,75/5,25	-
T5	0,77/0,85	0,10/0,40	0,10/0,40	4,00/4,50	1,85/2,00	18,50/19,00	0,65/1,00 (opc.)	7,60/9,00	-
T6	0,75/0,85	0,10/0,40	0,10/0,40	4,00/4,50	1,60/2,00	18,75/20,50	0,60/0,80 (opc.)	11,50/12,25	-
T8	0,75/0,80	0,10/0,40	0,10/0,40	3,75/4,25	2,00/2,25	13,75/14,00	0,75	5,00/5,25	-
T15	1,50/1,60	0,10/0,40	0,10/0,40	4,50/4,75	4,75/5,00	12,50/13,50	0,50 (opc.)	4,75/5,25	-
Tipos ao Mo									
M1	0,78/0,85	0,10/0,40	0,10/0,40	3,75/4,00	1,00/1,25	1,50/1,65	8,00/9,00	-	-
M7	0,97/1,03	0,10/0,40	0,10/0,40	3,75/4,00	1,90/2,10	1,50/1,75	8,50/8,75	-	-
M10	0,85/0,90	0,10/0,40	0,10/0,40	4,00/4,25	1,90/2,10	-	8,00/8,50	-	-
Tipos ao Mo - Co									
M30	0,80/0,85	0,10/0,40	0,10/0,40	3,75/4,25	1,10/1,40	1,50/1,80	8,25/8,50	4,75/5,25	-
M33	1,05/1,10	0,10/0,40	0,10/0,40	3,50/4,00	1,05/1,25	1,30/1,70	9,25/9,75	7,75/8,25	-
M34	0,87/0,93	0,10/0,40	0,10/0,40	3,50/4,00	1,85/2,25	1,30/1,60	8,45/8,95	8,00/8,50	-
M42	1,05/1,10	0,10/0,40	0,10/0,40	3,75/4,25	1,10/1,40	1,30/1,60	9,25/9,75	7,75/8,25	-
M43	1,15/1,25	0,10/0,40	0,10/0,40	3,75/4,25	1,60/2,00	2,50/2,75	7,75/8,20	8,00/8,50	-
M46	1,20/1,25	0,10/0,40	0,10/0,40	3,75/4,25	3,00/3,30	1,75/2,20	8,00/8,50	8,00/8,50	-
Tipos ao Mo - W									
M2	0,80/0,85	0,10/0,40	0,10/0,40	4,00/4,25	1,70/2,10	6,00/6,50	4,75/5,25	-	-
M3	1,00/1,10	0,10/0,40	0,10/0,40	4,00/4,25	2,40/2,55	6,00/6,25	5,70/6,25	-	-
(tipo 1) M3	1,10/1,20	0,10/0,40	0,10/0,40	4,00/4,25	3,00/3,30	5,60/6,25	5,00/6,25	-	-
(tipo 2) M4	1,25/1,30	0,10/0,40	0,10/0,40	4,25/4,50	3,75/4,25	5,50/6,00	4,50/4,75	-	-
Tipos Mo - W - Co									
M6	0,75/0,80	0,10/0,40	0,10/0,40	3,75/4,25	1,25/1,55	3,75/4,25	4,75/5,25	11,50/12,50	-
M15	1,50/1,60	0,10/0,40	0,10/0,40	4,00/4,75	4,75/5,25	6,25/6,75	3,00/5,00	4,75/5,25	-
M35	0,80/0,85	0,10/0,40	0,10/0,40	3,90/4,40	1,75/2,15	6,15/6,65	4,75/5,25	4,75/5,25	-
M36	0,80/0,90	0,10/0,40	0,10/0,40	3,75/4,25	1,65/2,00	5,50/6,00	4,25/5,25	7,75/9,00	-
M41	1,05/1,10	0,10/0,40	0,10/0,40	4,00/4,75	1,65/2,00	6,25/6,75	3,00/5,00	4,75/5,25	-
M44	1,10/1,20	0,10/0,40	0,10/0,40	4,00/4,75	2,00/2,25	5,00/5,50	5,00/6,25	11,50/12,50	-
M45	1,20/1,25	0,10/0,40	0,10/0,40	4,00/4,75	1,60/2,00	6,75/8,10	4,75/5,25	5,25/5,75	-

Diferentemente do que acontece com os aços convencionais que são temperados e revenidos, onde a dureza exibe uma queda contínua com o aumento da temperatura de revenimento, os aços-rápidos apresentam uma elevação de dureza quando revenidos em temperaturas na faixa de 480°C a 565°C, dependendo da composição do aço. A figura 2.7 ilustra este fato. Observa-se que o comportamento da curva, portanto o valor da dureza final, depende não só da temperatura de revenimento, mas também da temperatura da tempera (Machado e da Silva, 2004).

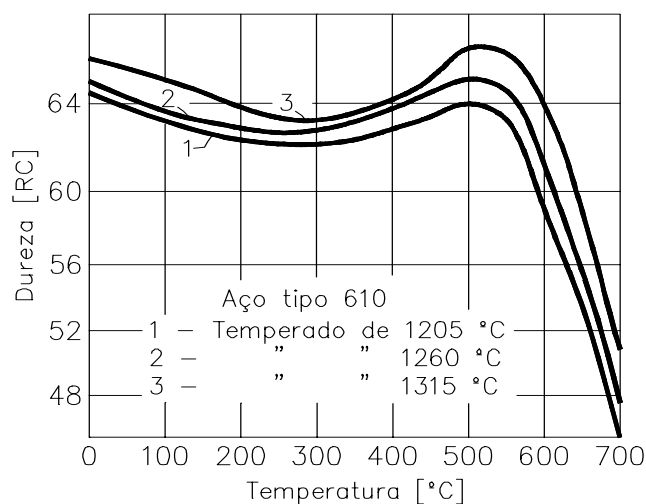


Figura 2.7 - Efeito da temperatura de revenido na dureza do aço-rápido temperado em diferentes temperaturas (Ferraresi, 1977).

2.1.4 Desgaste das Ferramentas

São diversos os tipos de desgaste e avarias que acontecem em uma ferramenta de usinagem, e que levam a sua rejeição ou substituição das arestas de corte (Machado e Da Silva, 2004). É muito importante estudar os processos de destruição das ferramentas de corte, pois podem permitir ações coerentes e efetivas para reduzir a taxa desta destruição, prolongando a vida da aresta cortante. Embora o custo da ferramenta cortante seja apenas uma pequena fração do custo total de fabricação de uma peça, a preocupação persiste, pois se estas sofrem desgaste acelerados ou avarias freqüentes, ocasionará a freqüente necessidade de parada da máquina para troca destas, e isto significa custos adicionais e perda de produtividade (Trent e Wright, 2000). Tendo o conhecimento do processo de destruição da aresta, este fornecerá subsídios para que haja evolução dos materiais e tornando-as mais resistentes aos fenômenos negativos que ocorrem durante o processo de usinagem.

2.1.4.1 Avaria de Origem Térmica no Fresamento

No fresamento, cada dente da ferramenta de corte experimenta uma fase ativa, de corte, período em que existe a formação do cavaco e, portanto, aquecimento da ferramenta, e uma fase inativa, sem corte, período em que não existe formação de cavaco por aquele dente e, portanto, ocorre o resfriamento da ferramenta. Conseqüentemente, as temperaturas

em um fresamento flutuam ciclicamente, aumentando durante o tempo ativo e diminuindo durante o tempo inativo.

Durante o processo de corte a temperatura gerada é um parâmetro de grande significância no controle da vida ferramenta, e para o processo de fresamento, tem sido investigadas por vários pesquisadores (Bhatia et al, 1986; Chakraverti et al, 1984; Wang et al, 1969 e Palmai, 1987). Eles mostraram que a temperatura no corte interrompido flutua ciclicamente, aumentando durante o tempo ativo (curva **a** da figura 2.8) e diminuindo durante o tempo inativo de corte (curva **b** da figura 2.8), e que os efeitos térmicos decorrente desta variação de temperatura são dependentes das condições de corte, principalmente da velocidade de corte, do avanço e da relação entre o tempo ativo e inativo de um ciclo, e também do material da ferramenta de corte. A curva **c** mostra uma composição das curvas **a** de aquecimento e **b** de resfriamento, representa o comportamento da temperatura da ferramenta de corte durante um fresamento.

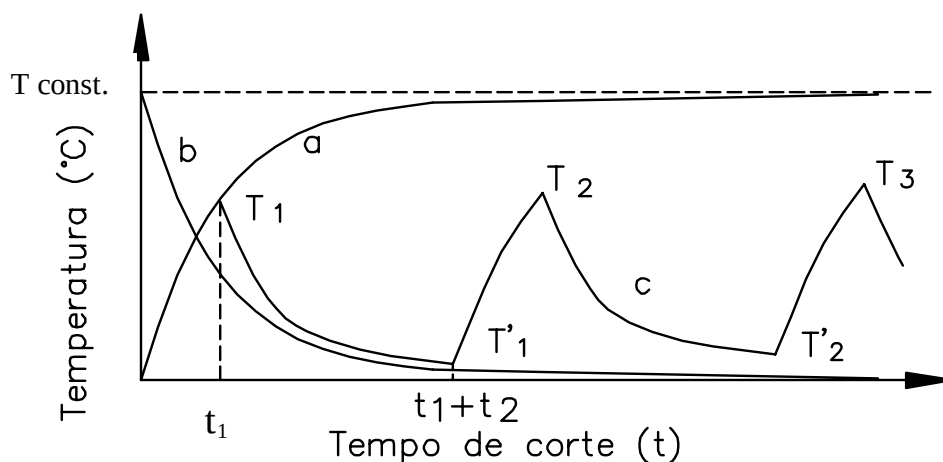


Figura 2.8 - Variação cíclica da temperatura de corte no processo de corte interrompido (Palmai, 1987).

Segundo (Ferraresi, 1977), a flutuação cíclica de temperatura na interface cavaco ferramenta, conforme ilustra a figura 2.9, leva a uma modificação também cíclica das distribuições de tensões na região de corte da ferramenta. Estas tensões de tração, atuando na ferramenta durante o período inativo em um corte intermitente, são as maiores responsáveis pela formação de trincas, sendo a magnitude dos impactos mecânicos de grande importância no processo de propagação das trincas iniciadas devido ao efeito térmico.

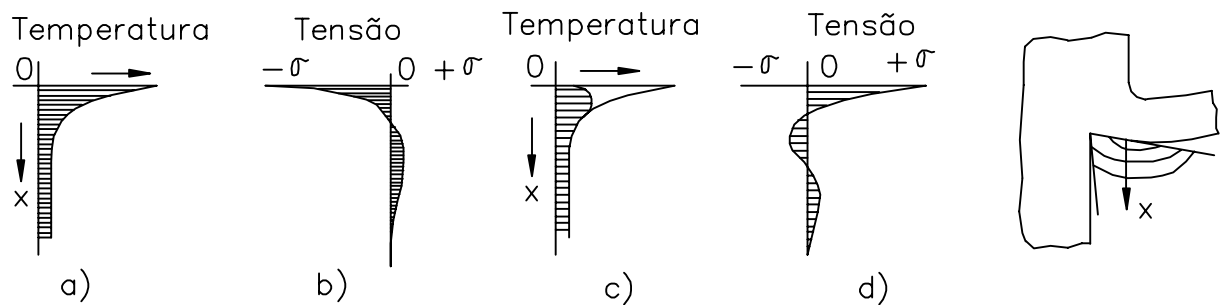


Figura 2.9 - Distribuição da temperatura e de tensões em pastilhas de metal duro, no corte interrompido (Ferraresi, 1977).

O mecanismo de flutuação cíclica da temperatura e distribuição de tensões pode ser explicado da seguinte maneira (Ferraresi, 1977): (A figura 2.9 a) representa a curva de distribuição de temperatura em relação à profundidade x , a partir do ponto de contato cavaco-ferramenta. Durante o corte, a camada superficial, a uma temperatura bastante elevada, se dilata. Porém as camadas inferiores, sujeitas a menores temperaturas, terão uma dilatação bem menor. (Como consequência tais camadas impedirão a ocorrência de uma dilatação muito maior na camada superficial, dando origem a camadas de compressão, figura 2.9 b). Decorre, portanto, tensões de tração a uma determinada distância x da superfície de contato cavaco-ferramenta. ((Em um instante de tempo posterior, com variação da temperatura de corte, isto é, com o resfriamento da camada superficial (devido ao tempo inativo), esta camada estará submetida à tração, enquanto que as camadas inferiores passarão a ser solicitada a compressão, figura 2.9 c) e d).

Além da ação cíclica do corte interrompido, este fenômeno pode também ser promovido por variação de temperatura causada por acesso irregular de refrigerante de corte. Esta flutuação cíclica de tensões leva ao aparecimento de trincas por fadigas em ferramentas que não apresentam tenacidade suficiente para suportarem tais tensões. Essas trincas, que são, portanto de origem térmica, levarão ao desenvolvimento do que se conhece por sulcos na forma de pente, como mostra a figura 2.10.

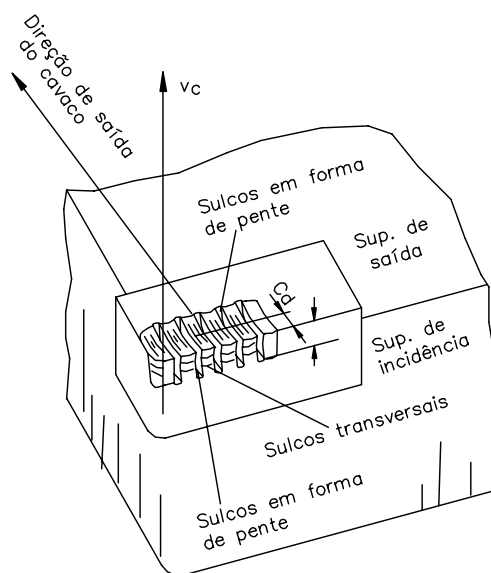


Figura 2.10 - Sulcos desenvolvidos em forma de pentes (Ferraresi,1977)

Tais sulcos, que são perpendiculares à aresta de corte, e que podem se desenvolver tanto na superfície de saída quanto na superfície de folga da ferramenta, promovem a fragilização da aresta cortante, facilitando o aparecimento de trincas mecânicas e que normalmente aparecem paralelas à aresta cortante. O encontro das trincas mecânicas, com essas trincas de origem térmicas provoca o desprendimento de porções da aresta de corte, reduzindo drasticamente a capacidade de remoção de material e acelerando o fim da ferramenta.

2.1.4.2 Avarias de Origem Mecânica no Fresamento

As trincas de origem mecânica podem ocorrer devido aos choques mecânicos, ocorridos durante a entrada ou saída da aresta de corte na ferramenta. As trincas de origem mecânicas, ao contrário das trincas térmicas que se propagam perpendicular à aresta de corte, se propagam paralelas à aresta de corte. As trincas mecânicas ao se propagarem podem se interagir com as trincas térmicas e levar ao aparecimento de lascas.

a) Avarias na Entrada da Ferramenta na Peça

No fresamento, a cada ciclo ou giro da fresa, os insertos ou dentes sofrem impactos na entrada da peça, com carregamento compressivo.

Quando as condições de corte são abusivas a ferramenta poderá sofrer lascamento ou quebra no primeiro ciclo ou giro. Caso a ferramenta seja corretamente especificada ela terá tenacidade suficiente para evitar sua quebra imediata. Mesmo possuindo tenacidade suficiente para evitar sua quebra imediata, a ferramenta de corte, estará sujeita a um carregamento repetitivo, que poderá gerar trincas, por fadigas mecânicas.

b) Avarias na Saída da Ferramenta da Peça no Fresamento

Segundo Pekelharing (1978) citado por Machado e da Silva (2004) os lascamentos excessivos de ferramentas de metal duro usadas no fresamento ocorre devido à existência de problemas durante a saída da aresta de corte da peça. O autor afirma que quando a ferramenta se aproxima da saída da peça ocorre uma rotação no plano de cisalhamento primário, tornando-o negativo, ocorrendo o fenômeno conhecido com formação do pé (foot forming), pela semelhança do cavaco destacado com um pé humano. Isto faz com que as até então elevadas tensões de compressão atuantes na região de corte passem a atuar como tensões de tração, levando à formação de trincas nas arestas cortantes. A figura 2.11 mostra a seqüência de formação deste fenômeno, que é peculiar a determinadas geometrias de saída da peça.

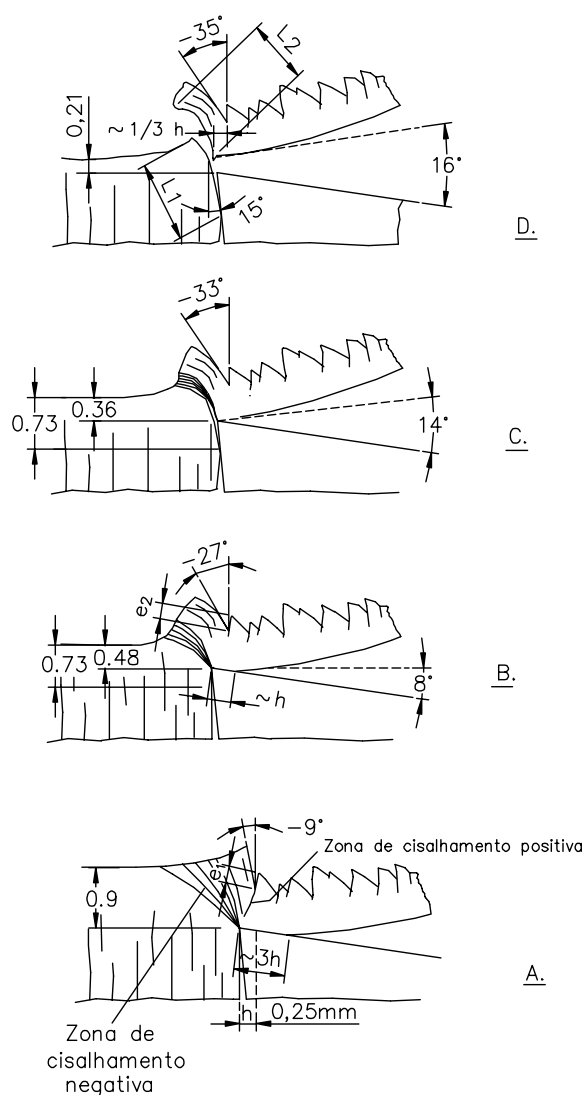


Figura 2.11 - Formação do pé (Pekelharing, 1978)

2.1.4.3 Desgaste nas Ferramentas de Corte

Mesmo a ferramenta tendo tenacidade suficiente para evitar uma avaria, ela irá de alguma forma ser comprometida, porque durante a usinagem dos metais a ação do corte muda a forma e a geometria da ferramenta de corte. O desgaste progressivo pode ser tanto na superfície de folga ou de saída da ferramenta. A figura 2.12 apresenta as principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte e identificar as três formas de desgaste: desgaste de cratera (área A), desgaste de flanco (área B) e desgaste de entalhe (área C e D).

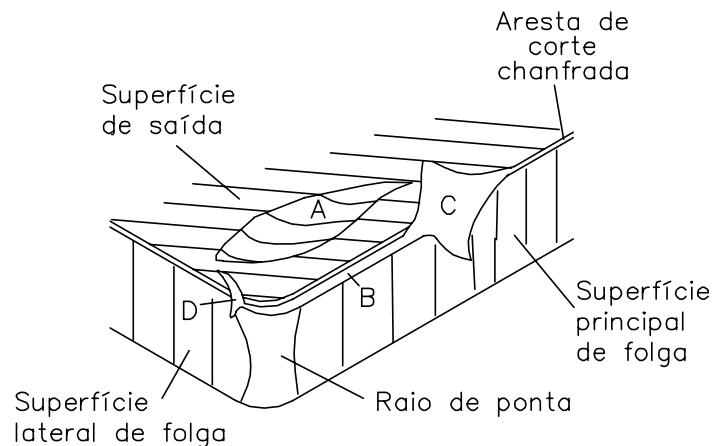


Figura 2.12 - Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte (Deranel e Trent, 1982).

a) Desgaste de Cratera

Este tipo de desgaste ocorre na superfície de saída da ferramenta, causado pelo atrito entre a ferramenta e o cavaco. Neste processo, normalmente, ocorre uma combinação de mecanismos de desgaste. A máxima profundidade de cratera ocorre geralmente próximo ao ponto médio de contato entre o cavaco e a superfície de saída, onde, acredita-se que a temperatura atinja seu maior valor. A posição da cratera relativa à aresta de corte varia de acordo com o material usinado. A profundidade e a largura da cratera formada na superfície de saída da ferramenta estão associadas à velocidade e ao avanço empregado durante o processo de corte (Ferraesi, 1977).

b) Desgaste de Flanco

É o tipo de desgaste mais comum e o principal fator a limitar a vida da ferramenta de corte, ocorrendo nas superfícies de folga principal e secundária da ferramenta, causado pelo contato entre ferramenta e a peça. Em geral, ele ocasiona deterioração do acabamento superficial da peça, por modificar totalmente a forma da aresta de corte original e também faz com que a peça mude de dimensão, podendo sair de sua faixa de tolerância. A velocidade de corte tem grande influência neste desgaste.

d) Desgaste de Entalhe

Ocorre normalmente, na superfície de folga principal, podendo, também, aparecer na superfície de folga secundária, e em alguns casos, se estender na superfície de saída da ferramenta. O mecanismo de como o desgaste de entalhe realmente acontece ainda não está definido. Sob certas condições de operação, um grande entalhe é formado na aresta principal de corte, na extremidade livre do cavaco, levando ao enfraquecimento da aresta de corte. Entalhes também são formados na aresta secundária de corte, que influenciam principalmente o acabamento superficial produzido.

2.1.4.4 Mecanismo de Desgaste

Trent (1984), considera a existência de pelo menos seis processos e mecanismo de desgaste que seriam responsáveis pelas formas de desgaste ilustrada na figura 2.13.

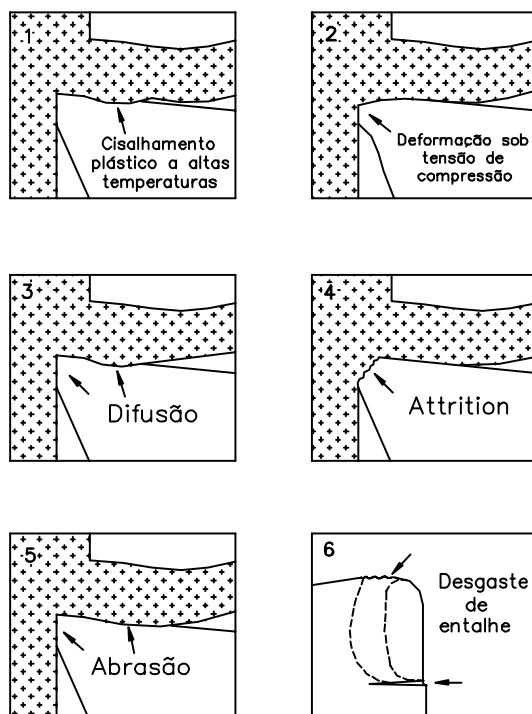


Figura - 2.13 - Mecanismos e processos de desgaste que podem acontecer nas ferramentas de corte (Trent e Wright, 2000).

a) Deformação Plástica Superficial por Cisalhamento a Altas Temperaturas

É mais um processo de desgaste, e ocorre mais provavelmente na usinagem de metais com alto ponto de fusão, em ferramentas de aço-rápido, onde às tensões cisalhantes na interface cavaco-ferramenta são suficientes para causar deformação plástica na aresta de corte.

De acordo com (Trent e Wright, 2000) esta deformação plástica é peculiar para ferramentas de aço-rápido devido à baixa resistência ao cisalhamento dessas ferramentas, embora possa ocorrer também em ferramentas de metal duro.

b) Deformação Plástica da Aresta de Corte Sob Altas Tensões de Compressão.

É também mais um processo de desgaste, e ocorre na usinagem de materiais de elevada dureza, geralmente causado por elevadas tensões e compressão, aliadas as altas temperaturas desenvolvidas na superfície de saída da ferramenta, levando a fratura súbita. É mais provável de acontecer em usinagem com altas velocidades de corte e avanço.

Motta (1994) em seu trabalho de mestrado, usinando aço ABNT 8640 com ferramentas de metal duro revestidas, em altas velocidades de corte, observou a deformação plástica da ponta de corte após a ferramenta apresentar desgaste de flanco já acentuado como mostra a figura 2.14.

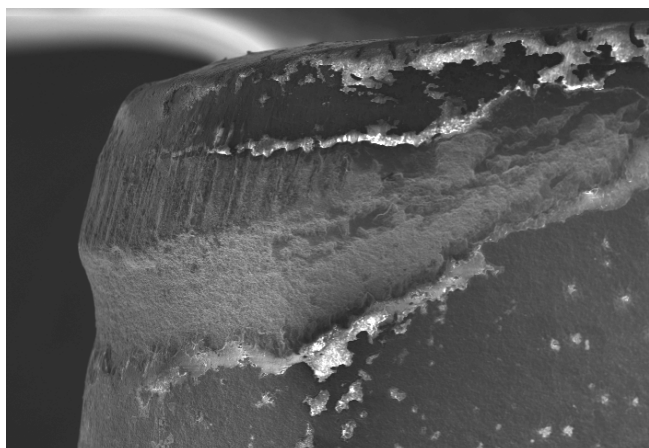


Figura 2.14. - Cunha de corte de uma ferramenta de metal duro revestida após usinar aço ABNT 8640 a 300m/min (Motta, 1994).

c) Desgaste por Difusão

Este processo de desgaste envolve a transferência de átomos entre os materiais da ferramenta e da peça, podendo ocorrer tanto na superfície de saída como de folga da ferramenta. É fortemente dependente da temperatura, do tempo e da solubilidade dos elementos envolvidos na zona de fluxo (zona de cisalhamento secundário).

Devido ao fato das velocidades relativas entre a ferramenta e a peça ou entre a ferramenta e o cavaco serem altas, os tempos de contatos entre esses materiais são muito curtos, o que praticamente levaria o mecanismo de difusão a ser desprezível, se não fosse a existência da zona de aderência na interface. Na zona de fluxo, camada logo acima da interface, na zona de aderência, existe um gradiente de velocidade, assumindo o valor zero na interface ferramenta, o que garante tempo suficiente para haver difusão (Trent e Wright, 2000). As temperaturas na zona de fluxo são também muito altas normalmente acima de 800°C, que é suficiente para promover o processo difusivo.

d) Desgaste por Aderência e Arrastamento - Attrition

Mecanismo de desgaste, também conhecido por attrition, que ocorre em geral a baixas velocidades de corte, onde o fluxo de material sobre a superfície de saída da ferramenta se torna irregular, como no caso de usinagens com aresta postiça de corte, tornando o contato com a ferramenta não contínuo. Sob estas condições, fragmentos microscópios são arrancados da superfície da ferramenta e arrastados junto ao fluxo de material adjacente a interface.

No corte interrompido (fresamento), com profundidade de corte variável, entre outros, promovem o fluxo irregular do material e, portanto, favorecem a participação do mecanismo de desgaste por attrition. As superfícies desgastadas por attrition têm uma aparência rugosa, ao contrário de superfícies desgastadas por difusão, que são lisas.

e) Desgaste Abrasivo

O desgaste abrasivo acontece quando o material é removido ou deslocado da superfície por partículas duras que podem estar soltas, entre duas superfícies com movimento relativo, ou emergindo de uma das superfícies, neste caso pertencente a ela. Na usinagem, podem ocorrer os dois tipos de abrasão: a dois e a três corpos. No caso de abrasão a dois corpos as partículas abrasivas são precipitados duros (óxidos, carbonetos,

nitretos ou carbonitretos), que pertencem ao material da peça ou do cavaco. No caso da abrasão a três corpos, as partículas abrasivas são materiais da própria ferramenta, que se desprenderam por *attrition*, mergulhados no fluxo de material adjacente da peça ou da ferramenta. O desgaste abrasivo pode envolver deformação plástica e fratura frágil, gerando perda ou deslocamento de material, causadas por partículas de elevada dureza.

2.1.5 Vida da Ferramenta de Corte

Ferraresi (1977) define vida da ferramenta de corte como sendo o tempo em que a ferramenta de corte trabalha, efetivamente, sem perder o corte ou até que se atinja um critério de fim de vida previamente estabelecido. O fim de vida de uma ferramenta de corte será determinado pelo grau de desgaste pré-estabelecido. A grandeza deste desgaste, ou a fixação de um nível de desgaste permitido irá depender de inúmeros fatores, tais como:

- acabamento superficial não satisfatório;
- tolerâncias dimensionais não são mais possíveis de se obter;
- aumento excessivo da força de corte e potência;
- temperatura excessiva atingida pela ferramenta;
- receio da quebra da aresta de corte devido ao desgaste;

Através do controle destes fatores, e adotando-se um critério de fim de vida, pode-se saber o momento adequado para a substituição da ferramenta de corte.

2.1.5.1 Critério de Fim de Vida

Os critérios recomendados pela norma ISO 3685 (1977), para ferramentas de metal duro, aço-rápido e cerâmicas, são (ver figura 2.15).

- desgaste de flanco médio, $VB_B=0.3\text{mm}$;
- desgaste de flanco máximo, $VB_{B\text{Max}}=0.6\text{mm}$;
- profundidade máxima de cratera, $K_t=0,06+0,3f$, onde f é o avanço em mm/revolução;
- desgaste de entalhe, $VN=1,0\text{mm}$;

A figura 2.15 apresenta os parâmetros utilizados para medir os desgastes das ferramentas de corte.

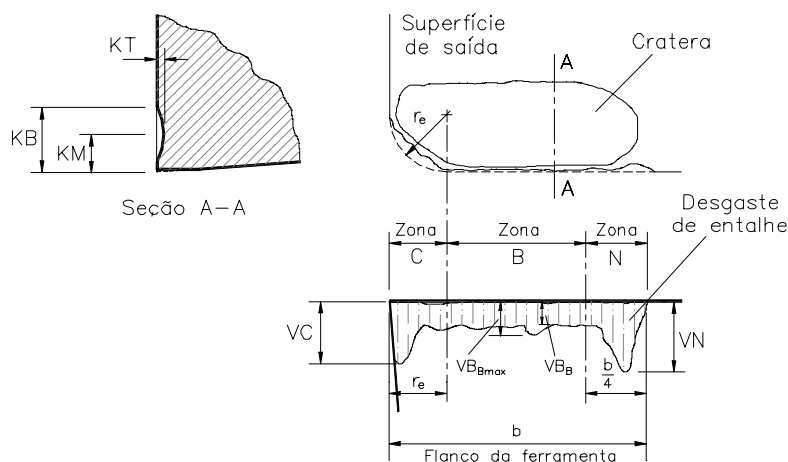


Figura 2.15. - Parâmetros utilizados para medir os desgastes das ferramentas de corte (ISO 3685, 1977).

É importante salientar que os valores sugeridos pela ISO 3685 dizem respeito à teste de vida de ferramenta de corte em laboratórios, sendo que industrialmente estes parâmetros podem assumir valores diferentes, pois eles dependem de vários fatores, que variam para cada empresa, tais como:

- rigidez da máquina ferramenta;
- precisão requerida da peça;
- acabamento superficial exigido;

2.1.6 Usinabilidade dos Materiais

A usinabilidade de um material segundo Ferraresi (1997) pode ser definida por alguns valores numéricos comparativo, que expressa um conjunto de propriedades de usinagem do material em relação a outro tomado com padrão. Industrialmente, a avaliação mais expressiva da usinabilidade de um material se faz através do custo necessário para produzir um grupo de peças em uma máquina operatriz. Neste trabalho utilizaremos um ensaio de usinabilidade através de vida ferramenta. Os ensaios de usinabilidade baseado na vida da ferramenta podem ser de longa ou curta duração. Os de curta duração apresentam a vantagem de consumir uma quantidade mínima de material e de serem realizados num tempo relativamente pequeno (Ferraresi, 1977). Porém quando se deseja traçar as curvas

de vida de uma ferramenta, para um determinado material, com uma precisão razoável, deve-se recorrer a ensaios de longa duração.

Fatores que influenciam na Usinabilidade

Segundo Ferraresi (1977), os fatores que influenciam na usinabilidade dos materiais são aqueles ligados ao:

- Material peça.
- Processo mecânico e condições de usinagem
- Tipo de critério de avaliação

Com relação ao material da peça os fatores que mais influem na usinabilidade são:

- Composição química
- Micro estrutura
- Dureza
- Propriedades das tensões ou deformação
- Rigidez da peça

Quanto aos processos mecânicos e condições de usinagem, os fatores que mais influenciam na usinabilidade são:

- Material da ferramenta
- Condições de usinagem (velocidade, avanço, profundidade, geometria da ferramenta, etc)
- Fluido 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).

Com relação ao tipo de critério de avaliação, o mesmo pode considerar:

- Desgaste ferramenta
- Força de usinagem
- Acabamento superficial
- Temperatura de corte
- Disposição do cavaco
- Etc.

2.1.7 Fluido de Corte

Na usinagem, o uso do fluido de corte é uma opção. Ele pode ser escolhido e usado apropriadamente para promover um aumento na produção, melhorar a qualidade superficial da peça e consequentemente aumentarem o lucro (Vieira, et al, 2001). Um fluido de corte deve ser capaz de: refrigerar, lubrificar, proteger a peça, a máquina e a ferramenta contra oxidação e limpar a região da usinagem. A lubrificação é importante em baixas velocidades de corte, para reduzir o atrito e a formação da aresta postiça de corte. Como refrigerantes, o fluido de corte diminui a temperatura de corte, tanto pelo aumento de dissipação de calor (refrigeração), como também pela redução da geração de calor (lubrificação). A ação de limpeza ocorre como consequência da aplicação do fluido de corte em forma de jato, cuja pressão facilita a remoção dos cavacos, deixando livre e limpa a zona de corte como inibidor de oxidação, ele protege a peça, a ferramenta e a máquina-ferramenta contra a corrosão. As razões para o uso do fluido de corte são reduzir o custo total das partes usinadas, ou então aumentar a taxa de produção proporcionando: aumento da vida da ferramenta, redução das forças de corte e da potência, melhora do acabamento superficial da peça e fácil remoção do cavaco.

Têm-se várias formas de classificar um fluido de corte, e não existe uma padronização que estabeleça entre as empresas fabricantes uma única. A classificação mais difundida agrupa os produtos da seguinte forma:

1) Ar;

2) Aquosos

- água;
- emulsões (óleos solúveis);
- soluções químicas;

3) Óleos

- óleos minerais;
- óleos graxos
- óleos compostos;
- óleos de extrema pressão;
- óleos de uso múltiplos;

O ar comprimido pode ser utilizado com o objetivo de resfriar a região de corte, por meio de um jato puro ou misturado a outro fluido, na interface, contra a superfície interna do cavaco, com razoável desempenho. Já a água, por ser altamente corrosiva aos materiais ferrosos, praticamente não é utilizada como fluido de corte.

Os óleos minerais são a base da maioria dos fluídos de corte. A eles são adicionados os aditivos, que são compostos que alteram e melhoram as características do óleo. Os aditivos mais utilizados são os antioxidantes e os agentes EP. Em geral, além desses aditivos, adiciona-se ao fluído de corte agentes biodegradáveis, anticorrosivo, biocidas e antiespumantes.

A seleção de um fluído de corte ideal é difícil, devido a grande variedade de produtos disponíveis no mercado com alto grau de competitividade. O custo é alto e a utilização de um fluído de corte tem que compensar economicamente, isto é, os benefícios devem superar o custo do produto, e a sua escolha depende do material a ser usinado, do tipo de operação de corte e da ferramenta usada.

Os fluídos de corte exigem algumas providências e cuidados no manuseio que garantem seu melhor desempenho nas operações de usinagem:

- 1) Armazenamento – devem ser armazenados em locais adequados, sem grandes variações de temperatura.
- 2) Purificação – os fluídos de corte podem ser contaminados por limalha, partículas de ferrugem, sujeiras diversas.
- 3) Controle de odor – emulsões, por conterem água, estão sujeitos à ação de bactérias presentes no ar e na água, produzindo odores desagradáveis.

2.2 Aços para Usinagem

Para peças feitas de aços de engenharia, são comuns que os custos de usinagem representem cerca de 50% do custo final da produção (Apple, 1989). Por isso têm crescido em grande escala as pesquisas nas indústrias siderúrgicas visando à obtenção de aços especiais, que proporcionam um menor custo na fabricação de um componente usinado. Entre estes aços especiais que apresentam melhoria na usinabilidade temos: os aços com usinabilidade melhorada e os aços de corte-fácil.

2.2.1 Aços de Usinabilidade Melhorada

Tantos aços de construção mecânica como aços inoxidáveis podem oferecer boa usinabilidade, possibilitando a redução do custo de fabricação, e que simultaneamente apresentar boas características em relação à resistência mecânica, ductilidade, resistência à fadiga e temperabilidade (Bas, 1995). A redução de custo com ferramentas pode ser obtida pelo aumento da vida da ferramenta, isto é, pela diminuição da taxa de desgaste, com a obtenção de um acabamento superficial superior, com a utilização de velocidades de corte

maiores, com a melhor remoção de cavaco ou, ainda, através da melhoria de outros parâmetros (redução da força de corte, temperatura e potência consumida). O principal mecanismo utilizado para esta melhoria é a desoxidação pelo cálcio.

2.2.1.1 Desoxidação pelo Cálcio

O tratamento ao cálcio é uma forma de controlar as composições, propriedades e morfologia dos óxidos (Yamanet, et al, 1991). Ele proporciona uma morfologia mais adequada dos sulfetos, que estão presentes na matriz do aço. Assim o tratamento ao cálcio aumenta a usinabilidade dos aços sem afetar outras propriedades (Apple, 1989). O tipo de inclusões formadas através do tratamento ao cálcio depende dos níveis de desoxidação do aço líquido e da presença de outros elementos desoxidantes como Al e Si. A figura 2.16 apresenta o processo de desoxidação por cálcio modificando as inclusões de alumínio.

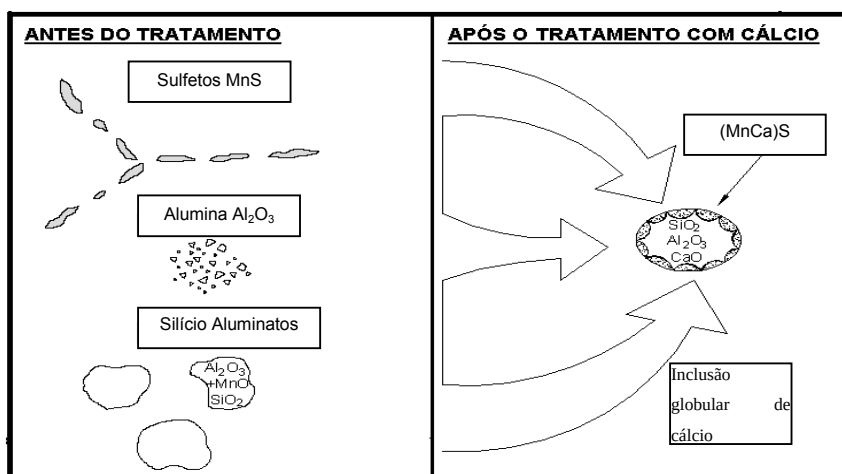


Figura 2.16 – Processo de desoxidação por cálcio modificando as inclusões de alumínio (Capuccio et al, 1996).

De acordo com Apple (1989) o tratamento ao cálcio pode melhorar a usinabilidade através de dois mecanismos distintos.

a) Modificação das inclusões de alumina. Desde que os aços de engenharia são desoxidados com alumínio, as aluminas são as mais comuns inclusões de óxidos encontradas nos mesmos, e são as maiores responsáveis pelo desgaste da ferramenta. São inclusões duras e pequenas (geralmente menores que $10\ \mu m$) normalmente dispostas de maneira alinhada. Estas inclusões, geralmente, ocupam uma pequena fração volumétrica no aço, que é normalmente abaixo de 0.05% e, mesmo com esta pequena porcentagem, elas têm um papel crucial na deterioração da ferramenta. A concentração de alumina pode ser

diminuída através da redução do nível de oxigênio no aço por meio de desgaseificação a vácuo, mas entretanto, mesmo em níveis reduzidos de oxigênio, a neutralização de qualquer alumina residual é desejável, e uma maneira efetiva de se conseguir isto é através da adição de pequenas quantidades de cálcio (na faixa de 20ppm a 60ppm). Este tratamento transforma as partículas discretas de alumina e os sulfetos tipo 2 em cálcio aluminatos, que são encapsulados por sulfetos. Este encapsulamento diminui as propriedades abrasivas das partículas e aumenta a vida da ferramenta.

b) Produção de óxidos deformáveis na conformação a quente, o que produz morfologia mais fina e melhor distribuída ao longo da barra laminada e conseqüentemente do produto final. Outra aplicação do tratamento ao cálcio é a sua adição em quantidades em torno de 20ppm a 100ppm em aços acalmados ao alumínio, com o objetivo de obter óxidos macios e de ponto de fusão relativamente baixo. Em condições especiais do processo de fabricação do aço, certas inclusões do sistema $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ podem reagir com o titânio presente nas ferramentas de metal duro, formando camadas de óxidos estáveis aderidas à superfície da ferramenta. Estes óxidos aderidos têm a propriedade de suprimir o desgaste difusivo, agindo diretamente na redução da craterização da ferramenta, que é freqüentemente o modo de falha predominante em altas velocidades de corte. Estas inclusões podem também agir como lubrificantes, reduzindo o desgaste na interface cavaco/ferramenta. Descobriu-se na prática que as inclusões no campo das anortitas (figura 2.17) são mais eficazes em formar a camada protetora de óxidos na superfície de saída da ferramenta. Portanto, a obtenção de óxidos no campo da anortitas é o principal objetivo do tratamento ao cálcio em aços de usinabilidade melhorada.

A desoxidação pelo cálcio visa, basicamente, controlar a plasticidade das inclusões de óxidos de modo a torná-las menos abrasivos durante o processo de usinagem e formar uma camada de óxido protetora. O tratamento com cálcio promove a obtenção de inclusões mais macias e arredondadas. Na grande maioria dos casos obtém-se um óxido modificado revestido por uma capa (Ca, MnS) visco-plástica que promove um menor desgaste na ferramenta (Evangelista, 2003).

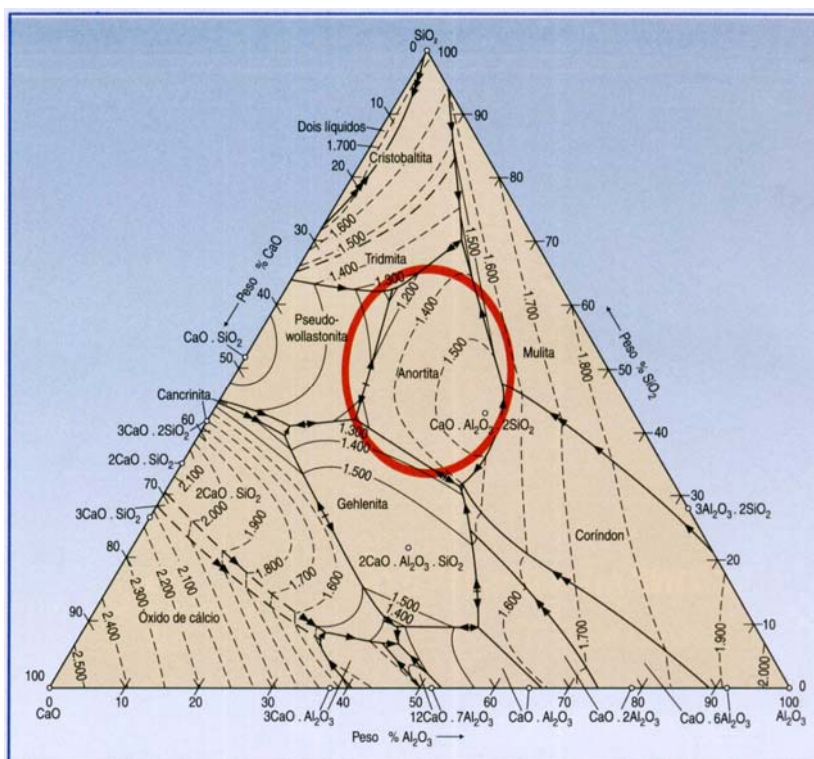


Figura 2.17. - $\text{SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$ sistema ternário mostrando a composição de alcance da anortita (Klusjzo e Soares, 2004)

2.2.2 Aços de Corte-Fácil

São aços especialmente projetados para oferecer melhores resultados mediante operações com arranque de cavaco, reduzindo o coeficiente de contato ou atrito com a ferramenta (Bass, 1995, Arfeld e Hanum, 1977). Em geral, estes aços têm que cumprir baixos valores de resistência em outras características, como resistência a fadiga e temperabilidade, etc. Por esta razão os principais elementos de liga que os constituem são destinados a melhoria da usinabilidade. São geralmente aços de baixo carbono com fortes adições de S, Pb, Te, Bi, etc... Existem também variantes destes aços com maior conteúdo de C, com o fim de se conseguir melhores respostas ao tratamento térmico, porém mantendo a usinabilidade como principal característica (Bas, 1995 e Kajoika, 1973). Estas melhorias reduzem o custo, através do aumento da vida da ferramenta, isto é, pela diminuição da taxa de desgaste. Para se obter estes aços são empregadas adições de enxofre em teores que variam de 0.1 a 0.3% e chumbo de 0.1 a 0.35%, que podem ser adicionados individualmente ou em combinação (Mill e Redford, 1983). A adição desses elementos em um aço submetido a usinagem permite utilizar velocidades de corte maiores,

para uma mesma vida ferramenta, quando comparado com um aço de classe equivalente, porém, sem adições. Estes elementos entretanto têm uma considerável segregação, que piora as propriedades mecânicas (Pierson, 1990). Eles são usados extensivamente para produção em massa de peças em tornos automáticos multifuso. Para esta aplicação utilizam-se normalmente barras de aço treiladas com diâmetros iguais ou menores que 50 mm, de forma que as velocidades de corte raramente ultrapassam aos 200 m/min (Wise e Milovic, 1988).

Quaisquer inclusões, sendo adicionadas intencionalmente ou aquelas inerentes ao processo de fabricação, influenciam de alguma forma a usinabilidade (Apple, 1989). As inclusões devem atuar de uma maneira que facilitem o cisalhamento do cavaco e iniciem a formação de trincas, fragilizando o cavaco. Elas devem produzir um bom acabamento superficial e não atacar abrasivamente a superfície da ferramenta (Vucetic et al, 1989).

Os tipos de inclusões de maior relevância na usinabilidade dos aços de engenharia são mostrados na tabela 2.2.

Tabela 2.2: tipos de inclusões (Evangelista, 2004).

Sulfetos	MnS, MnSe, MnTe
Inclusões metálicas	Pb e Bi
Inclusões de óxidos	Ca-Al-Silicate, Ca-Al-Mn-Silicate e Mn de Silicates
Inclusões não metálicas	Aluminatos e Nitretos

2.2.2.1 Classificação dos Aços de Corte-Fácil

Segundo o sistema SAE-AISI de classificação os aços ao carbono de corte-fácil são designados como se segue (ASM Handbook, 1990):

11xx aços resulfurados

12xx aços resulfurados e refosforados

onde xx representa o percentual de carbono.

Nos casos em que o chumbo também é adicionado a designação passa a ser xxLxx, onde os algarismos antes do L representam o grupo de aço, os algarismos após o L representam a quantidade de carbono e L vem de “lead” (chumbo em inglês).

As tabelas de 2.3 e 2.4 apresentam as composições químicas dos aços carbono de corte-fácil.

Tabela 2.3 - Tabela de composições químicas para aços carbono de corte-fácil (ressulfurados) (ASM Handbook,1990).

Designação SAE-AISI	Faixas e limites de composição química (a)			
	C	Mn	P máx.	S
1008	0,08-0,13	0,50-0,80	0,040	0,08-0,13
1110	0,08-0,13	0,30-0,60	0,040	0,08-0,13
1117	0,14-0,20	1,00-1,30	0,040	0,08-0,13
1118	0,14-0,20	1,30-1,60	0,040	0,08-0,13
1137	0,32-0,39	1,35-1,65	0,040	0,08-0,13
1139	0,35-0,43	1,35-1,65	0,040	0,13-0,20
1140	0,37-0,44	0,70-1,00	0,040	0,08-0,13
1141	0,37-0,45	1,35-1,65	0,040	0,08-0,13
1144	0,40-0,48	1,35-1,65	0,040	0,24-0,33
1146	0,42-0,49	0,70-1,00	0,040	0,08-0,13
1151	0,48-0,55	0,70-1,00	0,040	0,08-0,13

Tabela 2.4 - Composições químicas de aços carbono de corte-fácil (ressulfurados e refosforados) (ASM Handbook 1990).

Designação SAE-AISI	Faixas e limites de composição química (a)				
	C max.	Mn	P	S	Pb
1211	0,13	0,60-0,90	0,07-0,12	0,10-0,15	-
1212	0,13	0,70-1,00	0,07-0,12	0,16-0,23	-
1213	0,13	0,70-1,00	0,07-0,12	0,24-0,33	-
1215	0,09	0,75-1,05	0,04-0,09	0,26-0,35	-
12L14	0,15	0,85-1,15	0,04-0,09	0,26-0,35	0,15-0,35

2.2.2.2 Efeitos dos Elementos nos Aços de Corte-Fácil

a) Enxofre: É o principal elemento utilizado para melhoria da usinabilidade em aços especiais (Garvey e Tata, 1966). Favorece a formação do cavaco através da fragilização do mesmo na zona de corte (Molinero, 1985 e Yamanet, 1991). O enxofre forma partículas de sulfeto de manganês (MnS) sendo, por isso, necessário um teor de manganês

suficientemente alto ($Mn/S > 4$) para garantir que todo enxofre esteja presente nessa forma (Apple, 1989). O manganês é adicionado no aço para precaver a formação de sulfeto de ferro, que fragiliza o aço durante a deformação a quente (Apple, 1989). O FeS tem baixo ponto de fusão ($940^{\circ}C$) o que prejudica qualquer trabalho de deformação a temperaturas superiores. É necessário também, que seja feito um controle da forma, tamanho e distribuição das partículas de MnS, durante a fabricação. As partículas de MnS formam interfaces com a matriz. Durante a deformação nas zonas de cisalhamento aparecem microdefeitos nessas interfaces que se transformam em microtrincas, facilitando o cisalhamento do material (Bellot, 1978). A existência de microtrincas pode reduzir o desgaste de flanco da ferramenta de corte (Jiang et al, 1994). Na interface o MnS reduz o coeficiente de atrito entre a ferramenta e o cavaco, promovendo menor desgaste da ferramenta (Bas, 1995, Pierson, 1989, Tsunekage, et al, 2000).

Os sulfetos de manganês aumentam o ângulo de cisalhamento, diminuindo a tensão de cisalhamento a qual diminui a temperatura de corte, aumentando a vida da ferramenta de corte (Atwal et al, 1989, Jian, et al, 1996, Marston e Murray, 1970).

A morfologia dos sulfetos no aço foi classificado por Sims (1949). A classificação depende do nível de desoxidação do banho do aço líquido:

Sulfeto tipo 1: Sulfetos globulares aleatoriamente distribuídos, que são freqüentemente associados com uma segunda fase rica em oxigênio. Este tipo de sulfetos se forma quando o nível de oxigênio dissolvido é alto, aproximadamente, acima de 100 ppm em aços efervescentes ou semi alcalinizados com níveis muito baixos de alumínio e silício. Esse tipo de sulfeto é o que mais interessa a usinagem, por beneficiá-la. .

Sulfeto tipo 2: Sulfetos finos precipitados na forma de rede. Sua morfologia é predominante com um nível de oxigênio abaixo de 100 ppm. Este tipo de sulfeto é geralmente encontrado em aços alcalinizados ou desoxidado e são menos benéficos que os sulfetos tipo 1. A figura 2.18 mostra a morfologia representativa dos sulfetos tipo 1 e 2 normalmente encontrados em barras de aços resulfurados.

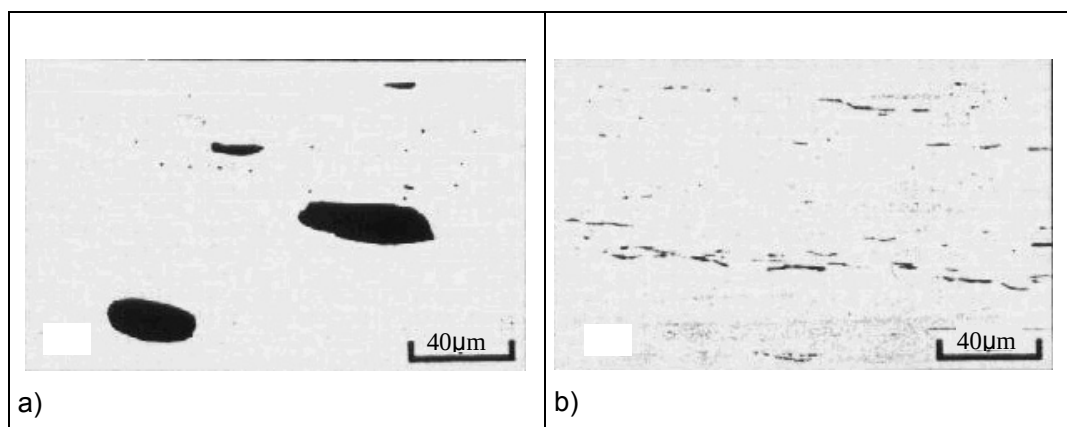


Figura 2.18. - Micrografia de um aço resulfurado: a) Sulfeto tipo 1, b) Sulfeto tipo 2 (Apple, 1989).

Para explicar os mecanismos de atuação dos sulfetos na usinabilidade, foram propostos vários modos através dos quais eles exercem influência no processo de deformação do cavaco e são suportados por evidências experimentais (Apple, 1989). Esses mecanismos caem em duas categorias:

- a) zona de cisalhamento primária;
- b) efeitos de atritos, aderência e fluxo na região de interface cavaco/ferramenta.

Na zona de cisalhamento primária suspeita-se que os sulfetos agem como concentradores de tensões e sítios de nucleação de vazios e microtrincas que promovem um cisalhamento instável, taxa de encruamento negativa menores tensões aparentes, com redução da ductilidade (Aple, 1989). A intensidade com que isto ocorre depende da fração volumétrica, tamanho, forma e distribuição do sulfeto, bem como sua deformabilidade em relação a matriz. Sulfetos que são maiores, menos deformáveis e globulares, isto é, sulfeto tipo 1, são provavelmente mais efetivos na geração de vazios (Ramalingam et al, 1975). Entretanto, mesmos sulfetos relativamente deformáveis podem ser capazes de gerar microtrincas através da separação interface sulfeto/matriz que é relativamente fraca (Tipinis e Cook, 1965).

Foi provado que inclusões de sulfetos de manganês causam uma mudança na faixa de velocidade de corte, em que ocorre na aresta postiça, aumentando e transferindo essas velocidades para velocidades de corte maiores. Este efeito é amplamente relacionado com a habilidade dos sulfetos, especialmente os maiores que reduzir as temperaturas de usinagem, para uma dada velocidade de corte (Yaguchi, 1986).

Quanto maior for a deformação nas inclusões de sulfetos, menor será a força de corte (Jiang et al, 1994). A quantidade de sulfetos também influencia a força. O gráfico da figura 2.19 mostra uma correlação entre a força de corte e o espaçamento entre os sulfetos.

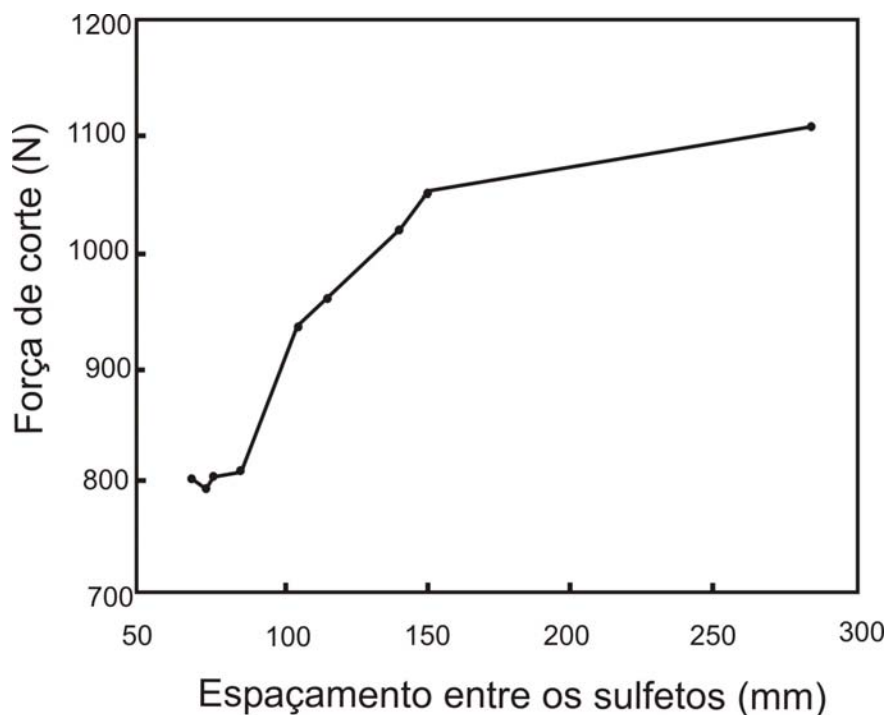


Figura 2.19. - Correlação entre a força de corte e o espaçamento entre os sulfetos (Jiang et al, 1994).

De acordo com Troiani (2004), um aumento na porcentagem de MnS, melhora a usinabilidade mas também incrementa a fragilidade do aço, sua tendência a trincas (principalmente nos carbonos mais altos) e crescem as dificuldades de laminação.

b) Chumbo: O chumbo é um elemento que possui solubilidade nula no ferro à temperatura ambiente, promovendo desta forma a precipitação de inclusões metálicas (Lagneborg, 1981). Sua presença típica no aço é de 0,15-0,35%. Conforme Bas (1995), o índice de usinabilidade apresentou um patamar ótimo para teores de chumbo de 0.25-0.30%. Logo um aço com 0.25% de chumbo têm usinabilidade similar a um com 0.35%, tendo assim um valor otimizado de chumbo em torno de 0.25%.

Os benefícios proporcionados pela adição de chumbo são devidos à redução da resistência ao cisalhamento do material, redução do atrito entre cavaco e ferramenta, pelo efeito lubrificante e uma proteção física das superfícies da ferramenta (Mill e Redford, 1983, Jah e Sharma, 1990).

Nos aços contendo chumbo tem-se o efeito lubrificante, porque o chumbo é aquecido a uma temperatura além de seu ponto de fusão durante a usinagem e assim ele age como

um lubrificante, diminuindo o atrito entre ferramenta e o cavaco. Nesses aços, também, tem-se um efeito da fragilização por metal líquido que é devido a altas temperaturas alcançadas durante a usinagem, sendo que a área deformada na zona de cisalhamento primária torna-se frágil, a tensão de cisalhamento diminui e o cavaco torna-se mais susceptível às trincas e, portanto a fragmentação aumenta (Yaguchi, 1990).

Somekawa et al (2001), em testes com aços resulfurados contendo chumbo verificaram que o chumbo não é efetivo em diminuir o desgaste da ferramenta em velocidades de corte altas. Eles sugerem que isto se deve ao fato de que em altas velocidades as temperaturas alcançadas durante a usinagem são extremamente altas, e o comprimento de contato entre a ferramenta e o cavaco é muito curto. Nestas condições o chumbo assumirá a função de agente corrosivo da ferramenta a base de carbonetos (especialmente WC).

O uso extensivo do chumbo apresenta problemas dentro do processo de produção, quando se trabalha com grandes quantidades de chumbo ($>0.35\%$). Alguma segregação pode ocorrer e a qualidade superficial dos produtos laminados é afetada. Por outro lado por ser tóxico, a rigidez das leis ambientais e de saúde pública dificulta a manufatura e o uso desses aços ao chumbo (Hashimura et al, 2003). Estações de captação de pós especiais devem ser usadas na Aciaria, juntamente com a redução do tempo de exposição dos trabalhadores aos fumos de chumbo, ambos levando a uma grande redução na produção destes tipos de aços. Além disso, algumas das novas legislações européias sobre metais pesados podem afetar o consumo destes aços, como a lei dinamarquesa sobre produção, uso e comercialização do chumbo, e o último *EU Council Directive on End of Life Vehicles* (Conselho Diretor Europeu para o fim de vida de veículos) que proíbe a reciclagem de componentes de veículos que contenham metais pesados, incluindo o chumbo. Esta resolução afeta também o Brasil uma vez que nossos veículos são exportados para a Europa (Evangelista, 2003).

c) Bismuto: O bismuto pode ser utilizado como um substituto não tóxico do chumbo (Metals Handbook, 1989). Ele possui características similares ao chumbo, apresenta baixa solubilidade no aço sólido, forma inclusões metálicas, tem baixo ponto de fusão, tem densidade superior ao ferro e seu efeito principal é a ação de propagação de microtrincas (Bas, 1995, Somekawa, et al, 2001).

Embora o bismuto esteja localizado próximo ao chumbo na tabela periódica, ele acumula no corpo humano em quantidades bem menores que o chumbo. Não é cancerígeno, e não é considerado perigoso para a saúde do homem (Somekawa et al, 2001).

Comparativamente com o chumbo apresenta menor densidade, resultando numa menor tendência a segregar. Desta forma, obtém-se com o bismuto, melhor dispersão das inclusões metálicas (Bertrand e Couso, 1994).

Os aços ao bismuto promovem uma quebra de cavaco bem mais significativa que o aço ao chumbo. Também, a quantidade de bismuto a ser adicionada ao aço para se conseguir a mesma vida de ferramenta é cerca da metade do chumbo (Somekawa, et al, 2001).

Devido ao fato das partículas de bismuto serem de tamanho reduzido e estarem bem dispersas na matriz do aço, sua influência sobre a anisotropia é bem menor daquela exercida pelos sulfetos. Com isto, o bismuto não diminui de maneira significativa as propriedades transversais (Somekawa et al 2001).

O efeito do bismuto na usinabilidade se deve a dois mecanismos de ação: um efeito fragilizador e um efeito lubrificante. O efeito fragilizador se deve ao baixo ponto de fusão e a tensão superficial também baixa. O efeito lubrificante é devido à fusão do bismuto a temperatura de corte.

d) Telúrio: o telúrio é um elemento utilizado para melhoria da usinabilidade, formando inclusões de MnTe, que possuem propriedades similares ao MnS. Além do mecanismo principal, o MnTe promove globularização dos MnS, que também contribui para melhorar a usinabilidade (Echevaria e Corcuera, 1987). Assim o Te produz uma redução do atrito entre a ferramenta e o cavaco, diminuindo a força de corte e melhorando o acabamento superficial, devido aos baixos pontos de fusão dos compostos formados por ele (Aborn, 1977).

O telúrio, também controla as inclusões dos óxidos proporcionando aumento na usinabilidade (Akasawa, 2003). Os teores de telúrio usado nos aços variam em torno de 0.01% e 0.07%, sendo que a quantidade ótima de telúrio, para uma boa globularização dos sulfetos depende da quantidade de S, e se expressa por $Te/S \approx 0.15$ (Molinero e Bertrand, 1985).

e) Selênio: o selênio é um elemento utilizado para melhora da usinabilidade, devido a suas propriedades serem muito similares ao enxofre. Entre elas se destaca a tendência de formar selenetos de manganês que possuem propriedades similares ao MnS, porém apresenta a vantagem de não prejudicar outras características do aço (Malmberg et al, 1974).

O MnSe é completamente solúvel no MnS e sua dureza muito baixa. Existem combinações que conseguem obter uma redução na deformabilidade a quente do MnS,

obtendo-se sulfetos mais globulares (Echevaria e Corcuera, 1987). Esta globularização dos sulfetos provoca uma melhora nas propriedades transversais dos aços com S e uma maior isotropia.

A quantidade de selênio que se adiciona nos aços oscila entre 0.03% e 0.08% dependendo dos níveis de enxofre encontrados nos mesmos (Echevaria e Corcuera, 1987). Ele reduz a resistência ao cisalhamento, iniciando a formação de micro-trincas, facilitando-se assim a fratura do cavaco (Aborn, 1977).

f) Boro: é um elemento tradicionalmente usado no aumento da temperabilidade e tenacidade dos aços, para os quais deve estar sempre em solução sólida, na forma nitretos e carbonitretos. Para melhorar a usinabilidade o boro deve estar na forma de óxido B_2O_3 , que tem baixo ponto de fusão ($450^{\circ}C$) e a partir dos $210^{\circ}C$ se encontra no estado viscoso. Desta forma, apresenta-se como um lubrificante e protetor da ferramenta durante a usinagem dos aços (Echevaria e Corcuera, 1987).

A distribuição de B_2O_3 é uniforme por toda a matriz, sem estar associado a nenhuma inclusão (Bertrand et al, 1994). Os B_2O_3 atuam como reservas de oxigênio e durante a laminação devido a uma temperatura elevada, se produz uma difusão de oxigênio procedente destes óxidos para as inclusões de MnS, provocando sua globalização, e como consequência melhorando sua usinabilidade (Yeo, 1967).

2.2.2.3 Influência dos Elementos Residuais nos Aços de Corte-Fácil

Na tentativa de diminuir o custo do aço, algumas empresas utilizam na fabricação, sucatas sem o controle dos elementos químicos, isso por sua vez implica um aumento dos elementos residuais como cobre, níquel e cromo.

Fisher citado por Echevaria e Corcuera (1987), indica que nos aços de corte-fácil, os elementos residuais são prejudiciais posto que endurecem o aço e aceleram o desgaste da ferramenta. Para se ter um bom comportamento da usinabilidade tem-se que $Ni+Cr+Cu \leq 0,5\%$.

Os elementos residuais aumentam a resistência ao cisalhamento e endurecem a matriz, podendo levar a valores maiores que 200 HB, que é o limite aconselhável. Para Cianfrancesco, citado por Echevaria e Corcuera (1987) os elementos residuais produzem grande efeito prejudicial na Usinabilidade, principalmente o Cu e o Cr.

Vários autores, Garvey, Mills, Mill e Murry citados por Echevaria e Corcuera, (1987) dão um tratamento especial ao cobre. Garvey compara aços resulfurados, com Pb e baixo

teor de C (0.08%), estirado a frio, com teores de 0.09%, 0.27%, 0.4% e 0.56% de Cu, para determinar em qual quantidade este elemento eleva a solubilidade sólida na ferrita e não prejudica as propriedades mecânicas e a usinabilidade. Os resultados mostram que para uma velocidade de corte de 105m/min, um incremento do teor de 0.09% a 0.56% não origina uma diminuição apreciável no rendimento das ferramentas.

Entretanto (Echevaria e Corcuera, 1987) considera que os teores de cobre abaixo de 0,27% são benéfico à usinabilidade e teores acima são prejudiciais a usinabilidade. Já o cromo esses autores considera sempre prejudicial a usinabilidade.

Os elementos residuais diminuem o efeito fragilizante do Bi, prejudicando a usinabilidade. A quantia total dos elementos residuais deverá ser inferior a 60% do teor de Bi (Echevaria e Corcuera, 1987).

Portanto estas restrições são fundamentais:

$$\text{Ni} + \text{Cr} + \text{Cu} \leq 0.5\%$$

$$\text{Cr} + \text{Ni} + \text{Mo} + \text{Sn} + \text{Cu} \leq 0.7\%$$

$$\text{Cu} \leq 0.27\%$$

Os poucos trabalhos que tratam intrinsecamente sobre o efeito dos elementos químicos residuais na usinabilidade de aços foram ou estão sendo desenvolvidas por Evangelista (2004) e Almeida (2005). Nesses trabalhos os autores também avaliaram a influência dos elementos Cr, Ni e Cu na usinabilidade do aço ABNT 12L14, mesmo material dessa dissertação ver figura 1.2.

Evangelista (2004) ainda está desenvolvendo seu trabalho de doutorado, sem ter ainda publicado resultados até a presente data. Além dos testes de caracterização, por meio de ensaio de dureza, ensaio de tração e análises químicas e de microestrutura, o autor está investigando a usinabilidade do aço ABNT 12L14 por meio de ensaios de medição de força de usinagem, medição de temperatura de corte, rugosidade superficial e ensaios de quick-stop para analisar, com auxílio de microscópios, as superfícies das ferramentas e a raiz do cavaco.

Almeida (2005) já concluiu sua dissertação, onde investigou a influência desses elementos químicos residuais do aço ABNT 12L14, usando ensaios de vida de curta duração no torneamento, normalizados pela ISO 3685 (1993), com ferramentas de aço-rápido e metal duro. Para realizar os testes Almeida (2005) planejou experimentos através de um fatorial completo 2^k com um ponto central e uma replicação, totalizando 18 testes para cada velocidade de corte como mostra a tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Planilha do fatorial completo 2^k com $k = 3$ e um ponto central e uma replica

Ordem	Cr	Ni	Cu
1	1	1	-1
2	-1	1	-1
3	-1	-1	-1
4	-1	-1	1
5	1	1	-1
6	-1	-1	1
7	-1	-1	-1
8	1	-1	-1
9	-1	1	-1
10	0	0	0
11	-1	1	1
12	1	1	1
13	-1	1	1
14	1	-1	1
15	1	-1	1
16	0	0	0
17	1	1	1
18	1	-1	-1

Foram usadas as seguintes velocidades de corte para a ferramenta de aço-rápido na condição a seco: 125m/min, 140m/min, 150 m/min, 160 m/min, e 175 m/min. Com as ferramentas de metal duro as velocidades de corte utilizadas foram 400m/min, 450 m/min e 550 m/min. Sempre no corte a seco. Os principais resultados encontrados por Almeida nos ensaios com ferramentas de aço-rápido são apresentados na tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Vida das ferramentas de aço-rápido encontradas por Almeida (2005).

Ordem	Material	T [min] p/ Vc 125m/min	T [min] p/ Vc 140m/min	T [min] p/ Vc 150m/min	T [min] p/ Vc 160m/min	T [min] p/ Vc 175m/min	T [min] p/ Vc 175m/min c/ fluido
1	G	11,74	11,28	9,90	10,50	2,56	8,06
2	B	14,35	5,48	2,20	2,84	0,34	2,15
3	D	23,49	17,40	8,80	13,37	3,59	6,18
4	F	17,91	14,51	12,10	5,58	0,48	8,38
5	G	21,40	17,24	12,40	8,40	4,11	8,06
6	F	16,22	12,70	12,20	5,41	0,30	8,55
7	D	25,45	13,60	11,50	6,73	3,33	8,06
8	E	22,32	20,99	12,50	11,40	4,66	7,38
9	B	14,35	6,95	2,38	2,86	0,47	1,98
10	H	25,45	12,83	11,70	12,60	5,57	9,76
11	C	16,17	20,08	10,00	6,65	5,27	9,64
12	I	21,09	11,01	8,40	8,52	0,40	6,88
13	C	20,87	15,61	10,10	11,19	5,40	8,06
14	A	18,89	12,28	7,10	7,68	2,60	5,72
15	A	23,49	13,27	5,70	7,39	2,34	6,18
16	H	21,72	12,39	8,30	11,00	0,39	6,80
17	I	17,43	16,84	8,80	7,21	0,35	6,18
18	E	28,89	17,14	13,90	13,50	1,94	9,85

Com os resultados apresentados na tabela 2.6 Almeida (2005) utilizou a análise fatorial e análise de variância (ANOVA) para se ter melhor confiabilidade nos resultados e filtrar quais níveis dos elementos residuais são mais influentes na usinabilidade do aço SAE 12L14. Para a velocidade de corte $V_c = 175$ m/min o autor não pôde tirar conclusões consistentes, pois a velocidade de corte ultrapassou a faixa admitida quando se trabalha com ferramentas de aço-rápido a seco. Isto motivou a repetição dos testes nesta velocidade de corte com fluido de corte cujos, os resultados são apresentados na tabela 2.6.

Por meio da análise fatorial e de variância, Almeida (2005), encontrou com ferramentas de aço-rápido que o material E níveis residuais (Cr = 1, Ni = -1 e Cu = -1) foi o que possuiu melhor usinabilidade; e o material B níveis residuais (Cr = -1, Ni = 1 e Cu = -1) apresentou o pior usinabilidade.

Observa-se que os níveis baixos de Ni e Cu contribuíram para aumentar a usinabilidade, mas o material E possui o Cr na faixa alta, o que contraria as expectativas. Segundo Murphy (1971) citado por Almeida (2005), todos os três elementos residuais (Cr, Ni e Cu) aumentam a dureza do material por solução sólida o que reduz a vida das ferramentas. Segundo Almeida uma possível justificativa para o Cr (+1) ter apresentado melhores resultados, está nos efeitos dos demais elementos químicos da composição do aço principalmente o fósforo. Nesta corrida o teor de fósforo é relativamente alto (0,050%) o que pode ter contrabalançado o efeito do Cr alto.

Com relação à pior usinabilidade do material B, que possui apenas o Ni na faixa alta, Almeida justificou esse resultado ao alto teor relativo de carbono (0,14%) e o baixo teor relativo de fósforo (0,045%).

Os resultados com ferramentas de metal duro são apresentados na tabela 2.7.

Tabela 2.7 – Vida das ferramentas de metal duro encontrados por Almeida (2005).

Ordem	Material	T [min] p/ Vc 500m/min	T [min] p/ Vc 450m/min	T [min] p/ Vc 400m/min
1	G	10,35	18,68	21,04
2	B	12,51	17,67	21,6
3	D	9,06	11,99	17,24
4	F	13,8	17,84	25,36
5	G	11,82	19,89	26,10
6	F	14,55	20,07	27,64
7	D	8,37	12,76	18,34
8	E	13,8	18,68	24,58
9	B	11,10	21,55	28,33
10	H	12,51	14,89	18,34
11	C	11,82	19,39	28,08
12	I	11,82	17,76	21,06
13	C	13,05	20,07	26,80
14	A	13,80	20,07	38,62
15	A	13,17	20,72	35,10
16	H	14,55	13,50	17,56
17	I	10,35	15,54	26,8
18	E	11,82	15,54	21,06

Pela análise fatorial e de variância (ANOVA) Almeida (2005) encontrou para ferramentas de metal duro, que o material A níveis residuais (Cr = 1, Ni = -1 e Cu = 1) teve o melhor índice de usinabilidade e o material D níveis residuais (Cr = -1, Ni = -1 e Cu = -1) obteve o pior índice de usinabilidade.

A justificativa de Almeida (2005), para o material A ter apresentado melhor usinabilidade com ferramentas de metal duro, são devido basicamente aos seguintes motivos: o elemento cobre (0,26%), que foi significativo para a análise de variância, está favorecendo fortemente a usinabilidade do material, pois, para altas velocidades de corte em ferramentas de metal duro, o cobre estaria atuando como um elemento causador de fragilização a quente. Segundo Deeley (1981) citado por Almeida (2005), quando em atmosfera oxidante se têm teores de cobre acima de 0,20%, pode haver a formação de uma fase rica em cobre, de baixo ponto de fusão (em torno de 1090°C), nos contornos de grão. Esta fase, quando fundida, fragiliza o material, nos planos de cisalhamento, facilitando a formação do cavaco. Outro motivo foi que esta corrida apresentou o maior teor de chumbo (0,28%,), e o chumbo melhora intensamente a usinabilidade.

Para o material D, que apresentou o pior índice de usinabilidade, a justificativa apresentada por Almeida (2005), foi que este material possui um percentual de cobre menor que 0,20% e, devido a esse percentual baixo não ocorreu a fragilização do cavaco, mesmo em altas temperaturas.

2.2.2.4 Formadores de Inclusões Não-Metálicas Nocivas (Al, Si, O₂)

Estes elementos, que estão relacionados com a desoxidação, formam inclusões de elevada dureza e sua ação durante a usinagem é altamente nociva.

O Al é utilizado como elemento desoxidante na fabricação do aço, e produz, ao combinar-se com o oxigênio, inclusões de alumina de alta dureza, que aumenta o efeito de abrasão, reduzindo, portanto, a usinabilidade. Nos aços de corte-fácil com altos teores de oxigênio, o efeito desoxidante do Al reduz os teores de O₂ no banho, e condiciona a composição e morfologia dos sulfetos de manganês, dando lugar a piores resultados de usinabilidade. Assim os aços de corte-fácil devem evitar o emprego de Al. Porém nos aços de construção mecânica aptos ao tratamento térmico, a adição de alumínio é imprescindível como controlador de tamanho de grão. Assim, para garantir melhor usinabilidade, seria preciso evitar a desoxidação por alumínio na fabricação de aços de corte-fácil. No entanto, esta é uma prática adotada pelas Aciarias em função do efeito refinador do grão do Al.

O Si é usado também como elemento desoxidante, formando silicatos que também são prejudiciais a usinabilidade. O silício forma cadeias de silicatos menos abrasivas que as inclusões de Al_2O_3 , desse modo é mais interessante desoxidar com Si evitando o Al (Bas, 1987). Quanto menor o nível de Si, maior será a probabilidade de se conseguir sulfetos tipo 1 no aço (Vucetic et al, 1989, Garvey e Tata, 1966).

O oxigênio pode formar óxidos líquidos ou gasosos no aço fundido. Quando o aço se solidifica, alguns desses óxidos permanecem na forma de bolhas, outros, isolados ou combinados com outros óxidos, formando compostos, resultando em inclusões não-metálicas, cujo efeito será mais negativo quanto mais duras e abrasivas elas forem (Chiaverini, 1988).

Capítulo III

Análise Estatística

Para a realização de experimentos significativos e confiáveis deve-se utilizar um método científico de planejamento. Da mesma forma para o tratamento de dados experimentais e análise dos resultados é imprescindível o uso de métodos estatísticos. A seguir será apresentada uma breve revisão bibliográfica sobre alguns conceitos estatísticos, que serão utilizados neste trabalho.

3.1 Comparação de K tratamentos – Análise de Variância

Os modelos de análise de variância constitui um conjunto de técnicas estatísticas que permitem um estudo da relação existente entre uma variável dependente e uma ou mais variáveis independentes (fatores) (Montgomery, 2000). Esses modelos de análise de variância podem ser tanto empregados para analisar dados experimentais quanto dados observados. Para a realização da análise de variância em um experimento, deve-se considerar algumas hipóteses necessárias para validar o modelo.

Um modelo matemático de análise de variância pode ser descrito da seguinte forma: (Banzatto e Kronka, 1989).

$$Y_{ij} = \mu + \mu_j + \xi_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad j = 1, 2, \dots, n.$$

Onde:

Y_{ij} : corresponde à resposta de interesse (variável dependente) do j-ésimo tratamento no enésimo indivíduo;

μ : corresponde a media geral de todos os indivíduos;

μ_j : corresponde ao efeito do j-ésimo tratamento;

ξ_{ij} : corresponde ao efeito dos fatores não controláveis no experimento e é denominado também de erro residual;

As hipóteses básicas que devemos admitir para a validade da análise de variância são as seguintes: (Box et al, 1978).

- Aditividade: os efeitos dos fatores que ocorrem no modelo matemático devem ser aditivos.

- Independência: os erros ξ_i devidos aos efeitos dos fatores não controlados, devem ser independentes. Isto implica que os efeitos dos tratamentos sejam independentes ou seja não haja correlação entre eles.
- Homocedasticidade ou homogeneidade de variância: os erros ξ_{ij} , devido as efeitos dos fatores não controlados, deveram possuir uma variância em comum σ^2 . Isto significa que a variabilidade das repetições de um tratamento deve ser semelhante a dos outros tratamentos. Uma maneira de checar a veracidade dessa suposição é através de um gráfico de resíduos versus valores ajustados (preditos). Quando a variância do erro é constante, esse gráfico deve apresentar uma nuvem de pontos dispostos aleatoriamente sobre o eixo dos resíduos.
- Normalidade: Os erros ξ_{ij} , devido ao efeito dos fatores não controlados, devem possuir uma distribuição de probabilidade normal. A normalidade dos resíduos pode ser avaliada no gráfico de probabilidade normal dos erros. Esse recurso compara as freqüências observadas e esperadas dos resíduos sob a hipótese de que esses são provenientes de uma distribuição normal. Então, quanto mais próximos da reta estiverem os pontos, maior a garantia se tem com relação à normalidade dos resíduos.

Admitido o modelo e satisfeitas às hipóteses necessárias, pode-se passar a obtenção da análise de variância do experimento. Considerando-se um experimento com I tratamentos e J repetições. De acordo como modelo matemático, o valor observado na parcela que recebeu o tratamento i na repetição j, referente à característica em estudo, é denotado por y_{ij} , de forma que se pode organizar os valores observados no experimento, de acordo com o quadro (Banzatto e Kronka, 1989) mostrados na tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Quadro dos valores observados nos experimentos

Tratamentos	Repetições						Totais
	1	2	...	j	...	J	
1	y ₁₁	y ₁₂	...	y _{1j}	...	y _{1J}	$\sum_{j=1}^J y_{1j} = T_1$
2	y ₂₁	y ₂₂	...	y _{2j}	...	y _{2J}	$\sum_{j=1}^J y_{2j} = T_2$
.	.	.		.		.	
.	.	.		.		.	
.	.	.		.		.	
i	y _{i1}	y _{i2}	...	y _{ij}	...	y _{iJ}	$\sum_{j=1}^J y_{ij} = T_i$
.	.	.		.		.	
.	.	.		.		.	
.	.	.		.		.	
I	y _{I1}	y _{I2}		y _{Ij}		y _{IJ}	$\sum_{j=1}^J y_{Ij} = T_I$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J y_{ij} = G$$

A construção do quadro de análise de variância inicia-se com a soma de quadrados que são:

a) Soma de quadrados total, que corresponde à soma dos quadrados dos desvios de todos os dados em relação a média, e possui $IJ - 1$ grau de liberdade, sendo representada pela equação:

$$SQTO = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J y_{ij}^2 - C \quad \text{onde} \quad C = \frac{G^2}{IJ} \quad (3.1)$$

B) Soma de quadrados de tratamentos, que corresponde à soma dos quadrados de todos os efeitos de todos os tratamentos, e possui $I - 1$ grau de liberdade, sendo representado pela equação:

$$SQT = \frac{1}{J} \sum_{i=1}^I T_i^2 - C \quad (3.2)$$

C) Soma de quadrados de resíduos, que corresponde à diferença entre a soma de quadrados total e de tratamento, e possui $I(J - 1)$ grau de liberdade, sendo representado pela equação:

$$SOTR = SQTO - SQT \quad (3.3)$$

Para construção do quadro de análise de variância calcula-se o que é chamado de quadrado médio, que usualmente são obtidos dividindo cada soma de quadrados por seus respectivos graus de liberdade, da seguinte forma:

$$QMR = \frac{SQR}{I(J - 1)} \quad (3.4)$$

$$QMT = \frac{SQT}{I - 1} \quad (3.5)$$

3.1.1 A distribuição F

Enquanto outros testes de médias se baseiam na diferença entre dois valores, análise de variância utiliza a razão das duas estimativas, ou seja, os quadrados médios, através da estatística F.

$$F_{cal} = \frac{QMT}{QMR} \quad (3.6)$$

Esta razão entre as estimativas é usada para testar as seguintes hipóteses:

H_0 : A hipótese nula propõe, que qualquer diferença observada entre as amostras é considerada como uma ocorrência casual, mero resultado do erro amostral. Portanto, uma diferença, entre duas ou mais medias não representam, à luz da hipótese nula, uma verdadeira diferença entre as medias amostrais.

H_1 : A hipótese alternativa que afirma existir uma verdadeira diferença populacional.

Os processos que nos permitem aceitar ou rejeitar uma determinada hipótese, são denominados teste de hipótese ou teste de significância e tem-se que grandes valores de F_{cal} favorecem H_1 , pois QMT excederá QMR quando H_1 é verdadeira e por outro lado, valores de H_1 próximo de 1 beneficiam H_0 , tendo dessa forma QMT e QMR aproximadamente o mesmo valor esperado quando H_0 é verdadeira. Porém ao tomar a decisão de rejeitar ou aceitar uma hipótese, se sujeita a incorrer em um dos seguintes erros: erro tipo 1 que se comete ao rejeitar uma hipótese H_0 verdadeira, que deveria ser aceita, e erro tipo 2 que é cometido ao aceitar uma hipótese H_0 falsa, que deveria ser rejeitada. O erro tipo 1 é sempre o erro considerado como sendo o mais grave ou o menos desejado.

De um modo geral, controla-se apenas o erro tipo 1, através do nível de significância do teste, representado por α , e que consiste na probabilidade máxima com que sujeita-se a ocorrer o risco de cometer um erro tipo 1 ao se testar uma dada hipótese.

Na pratica, é comum (embora não seja obrigatório) fixar o nível de significância em 5% e 1%, isto é, $\alpha = 0.01$ ou $\alpha = 0.05$. Se, por exemplo, for escolhido o nível de 5% ($\alpha = 0.05$), isto indica que haverá 5 possibilidades em 100 de rejeitar a hipótese quando ela deveria ser aceita, ou seja, existe uma confiança de 95% de que tenhamos tomado uma decisão correta.

Utiliza-se a seguinte regra para controlar o nível de significância α do teste:

Se $F_{cal} \leq F_{(1-\alpha; i-1, l(J-1))}$, então não rejeita-se H_0 .

Se $F_{cal} \geq F_{(1-\alpha; i-1, l(J-1))}$, então rejeita-se H_0 , e aceita-se H_1 .

Onde $F_{(1-\alpha; i-1, l(j-1))}$ é o $(1-\alpha)100\%$ percentil de uma distribuição F com $(l-1)$ e $(l(J-1))$ grau de liberdade.

A figura 3.1 apresenta a região de aceitação de H_0 , RA e a, região critica de rejeição de H_0 , Rc.

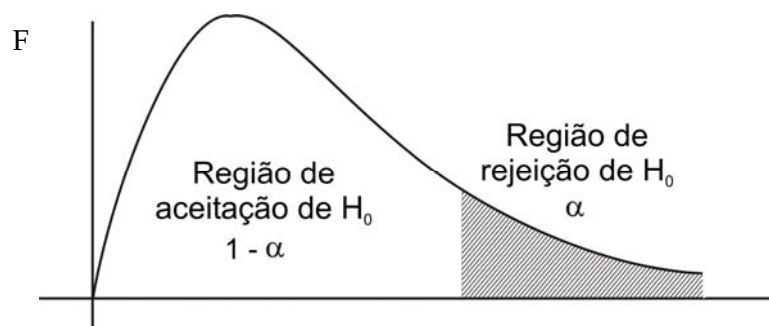


Figura 3.1 - Região de aceitação de H_0 RA e região crítica de rejeição R_c de H_0 .

Com base em todas as informações discutidas, consegue-se construir uma tabela de análise de variância, como mostra a tabela 3.2.

Quadro de análise de variância

Causa da variação	gl	soma de quadrados	quadrado médios	F
Tratamentos	$I-1$	$SQT = \frac{1}{J} \sum_{i=1}^I T_i^2 - C$	$QMT = \frac{SQT}{I-1}$	$F_n = \frac{QMT}{QMR}$
Resíduos	$I(J-1)$	$SQTR = SQTO - SQT$	$QMR = \frac{SQR}{I(J-1)}$	
Total	$IJ-1$	$SQTO = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J y_{ij}^2 - C$		

Após a verificação de que realmente existe diferença entre os tratamentos através da análise de variância faz-se a comparação de 2 tratamentos.

3.1.2 Comparação de 2 tratamentos

Na comparação de dois tratamentos tem-se a comparação com amostras grandes e comparação com amostras pequenas.

Para comparar dois tratamentos com amostra grandes deve-se se ter as seguintes suposições (Barroso, 2003):

- i) Seja $x_1, x_2, \dots, x_{n_1}$ uma a.a. de tamanho n_1 da população 1 com média populacional η_1 e desvio-padrão populacional σ_1
- ii) Seja $y_1, y_2, \dots, y_{n_2}$ uma a.a. de tamanho n_2 da população 2 com média populacional η_2 e desvio-padrão populacional σ_2
- iii) As amostras são independentes. Em outras palavras, as medidas dos dois tratamentos, não são relacionados entre si.

Na comparação de dois tratamentos utiliza-se o teste de hipótese explicado anteriormente, que é seguindo as seguintes observações:

- (i) Identificar a hipótese de nulidade (H_0) e a hipótese alternativa (H_1) em termos de parâmetros populacionais.
- (ii) Escolher o teste estatístico
- (iii) Estabelecendo um nível de significância α , determinar a região de rejeição
- (iv) Calcular o valor observado do teste estatístico a partir dos dados da amostra selecionada. Verificar se este valor observado está incluído na região de rejeição ou não.

O teste estatístico utilizado para determinar a diferença entre dois tratamentos, deve seguir uma distribuição aproximadamente normal, Z , para amostras grandes, com média

$$E(\bar{X} - \bar{Y}) = \eta_1 - \eta_2 \text{ e variância } \text{var}(\bar{X} - \bar{Y}) = \frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}.$$

Para a comparação de dois tratamentos com amostras pequenas n_1 e n_2 , além de considerar as suposições anteriores, deve-se também supor as seguintes suposições adicionais:

- (i) ambas populações são normais
- (ii) os desvios padrões das populações 1 e 2 são iguais, isto é, $\sigma_1 = \sigma_2$
- (iii) $x_1, x_2, \dots, x_{n_1}$ é uma a.a. de distribuição $N(\eta_1, \sigma^2)$

- (iv) $y_1, y_2, \dots, y_{n1}$ é uma a.a. de distribuição $N(\eta_2, \sigma^2)$
 (v) $x_1, x_2, \dots, x_{n1}$ e $y_1, y_2, \dots, y_{n1}$ são duas amostras independentes.

Depois de confirmado as suposições mencionadas anteriormente, utiliza-se o teste estatístico t e Student para amostras pequenas $n_1 + n_2 - 2$ graus de liberdade dado pela equação:

$$t = \frac{(\bar{x} - \bar{y}) - (\eta_1 - \eta_2)}{s_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \sim t_{n_1+n_2-2} \quad (3.7)$$

Onde s_p é um estimador comum para as variâncias dos dois tratamentos e é dado pela equação:

$$s_p = \frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \quad (3.8)$$

Depois de calcular o valor de t estipula-se um nível α de significância para verificar se rejeita ou não a hipótese nula, através de teste bilateral ou unilaterais apresentados a seguir.

Teste Bilateral: Apresenta duas regiões de rejeição da hipótese nula H_0 , situadas nos extremos da distribuição amostral, é utilizado para testar hipótese do tipo.

$$H_0 : \eta_A - \eta_B = 0$$

$$H_1 : \eta_A - \eta_B \neq 0$$

A figura 3.2 mostra as regiões de aceitação e rejeição de H_0 a um nível de significância α em um teste bilateral.

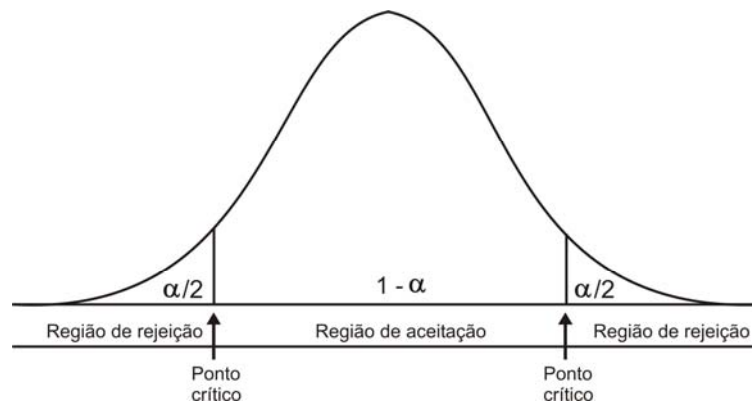


Figura 3.2 - Regiões de aceitação e rejeição de H_0 a um nível de significância α em um teste bilateral.

Teste Unilateral a Direita: Apresenta uma única região de rejeição da hipótese nula H_0 , sendo utilizado para testar as hipóteses do tipo:

$$H_0 : \eta_A - \eta_B = 0$$

$$H_1 : \eta_A - \eta_B > 0$$

A figura 3.3 mostra as regiões de aceitação e rejeição de H_0 a um nível de significância α em um teste unilateral a direita.

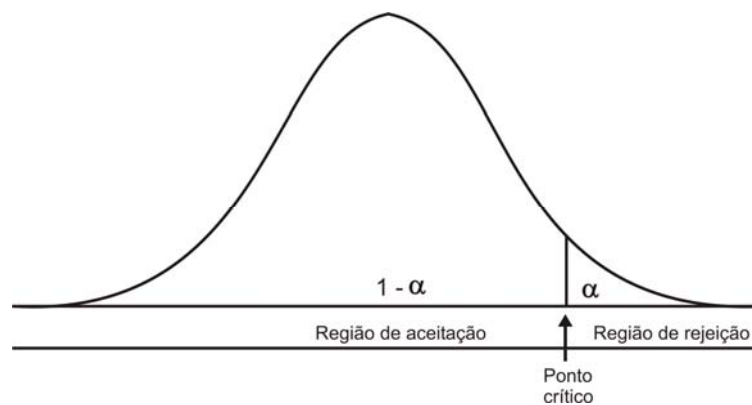


Figura 3.3 - Regiões de aceitação e rejeição de H_0 a um nível de significância α em um teste unilateral à direita.

Teste Unilateral a Esquerda: Apresenta uma região de rejeição da hipótese nula H_0 , situada no extremo inferior da distribuição amostral, é utilizado para testar as hipóteses do tipo:

$$H_0 : \eta_A - \eta_B = 0$$

$$H_1 : \eta_A - \eta_B < 0$$

A figura 3.4 mostra as regiões de aceitação e rejeição de H_0 a um nível de significância α em um teste unilateral a esquerda.

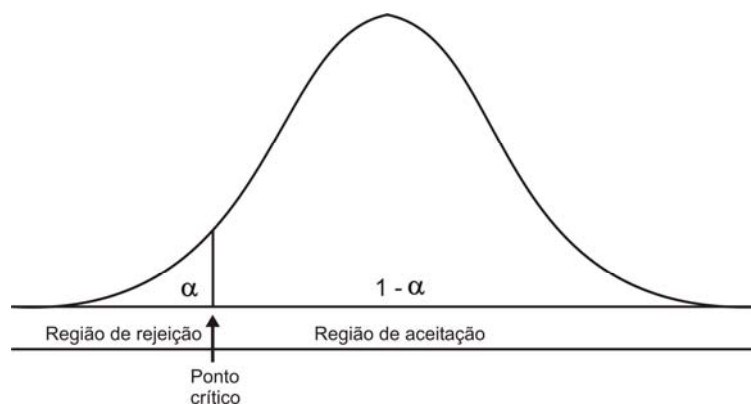


Figura 3.4 - Regiões de aceitação e rejeição de H_0 a um nível de significância α em um teste unilateral a esquerda.

Nesta pesquisa trabalhou-se com amostras pequenas então será utilizado o teste t de Student bilateral como mostrado anteriormente.

3.2 Planejamento de Experimentos

A organização de um planejamento fatorial consiste em selecionar os fatores (variáveis independentes do sistema) e escolher os níveis (valores assumidos pelas variáveis) que serão estudados. A determinação da quantidade de experimentos é feita de acordo com a quantidade de variáveis estudadas e com os níveis estipulados para essas variáveis. O planejamento é representado na forma de potência, fornecendo assim o número de experimentos a serem realizados. Por exemplo, um planejamento 2^k , sendo $k = 3$, indica que dois níveis foram escolhidos para três variáveis em estudo e que oito experimentos deverão ser realizados.

A Equação 3.9 mostra a codificação das variáveis independentes (BOX e WILSON, 1951):

$$x = \frac{\xi_i - \xi_0}{\frac{(\xi_1 - \xi_{-1})}{2}} \quad (3.9)$$

onde:

x é o valor da variável codificada;

ξ_i o valor original ou não codificado;

ξ_0 representa o valor original no nível central;

$\xi_{(1)}$ e $\xi_{(-1)}$ valores da variável não codificada referentes ao nível 1 e -1.

No planejamento 2^k a interação entre as variáveis pode ser incluída na regressão, por exemplo, supondo-se que os x_i e x_j são níveis pesquisados e que a resposta Y_i pode ser dada por:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_{ij} x_j + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j>1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon_j \quad (3.10)$$

Na Equação 3.10, β_0 , β_{ij} são coeficientes constantes e ε é o erro aleatório usado devido a incapacidade da equação em representar os valores reais da resposta (MYERS, 1976). Neste caso, $\beta_{ij}x_i x_j$ representam o desvio da linearidade, sendo equivalente a assumir que o efeito de x_j sobre a resposta Y depende do nível de operação de x_i . Os coeficientes da Equação 3.10 são obtidos pelo método dos mínimos quadrados e a avaliação da correlação é feita estatisticamente através do coeficiente de correlação, com testes de hipótese usando as distribuições F e t de Student, como explicado anteriormente, e pela análise de resíduos.

O quadrado do coeficiente de correlação múltipla (R^2) compara a variância dos pontos experimentais em relação ao ajuste proposto, com a variância da própria população de pontos experimentais (BOX et al., 1978). Um valor do coeficiente de correlação igual a 0,9, indica que 90% de variabilidade dos dados é explicada pela equação. Um valor zero indica que não existe correlação. Quanto mais próximo da unidade estiver o valor, do coeficiente de correlação, melhor será o ajuste proposto.

O resíduo da estimação é definido como a diferença entre os resultados experimentais e os previstos pela Equação 3.11. Na análise dos resíduos os gráficos devem ser aleatórios e independentemente distribuídos para comprovar a validade das equações.

$$\varepsilon = Y_{\text{exp}} - Y_t \quad (3.11)$$

Capítulo IV

Procedimento Experimental

Com o objetivo de verificar a influência dos elementos químicos residuais na usinabilidade de aços de corte-fáceis ABNT 12L14 utilizou-se ensaios de vida de ferramentas acelerados, normalizados pela Volvo (1989). Todos os testes foram realizados no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU), Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

Nove diferentes corridas deste material foram produzidas gerando aços com vários teores dos elementos químicos, residuais Cr, Ni e Cu. Os nove materiais que foram gerados através de um fatorial 2^k com $K=3$ e um ponto central como explicado no capítulo 3, foram testados, e os índices de usinabilidade obtidos foram comparados entre si. Para esta comparação será utilizada comparação de k tratamentos através da análise de variância, comparação de 2 tratamentos através do teste t de Student e análise de regressão para se ter uma melhor confiabilidade nos resultados.

O aço ABNT 1112 (sem chumbo) também foi testado apenas para servir de base comparativa da usinabilidade do material.

4.1 Materiais da Peça

O material da peça utilizado foi um aço-de-corte-fácil com 9 níveis residuais de Cr, Ni, Cu diferentes, fornecidos pela Aços Villares em forma de barras redondas com 1m de comprimento e diâmetro de 52,9mm. A tabela 4.1 mostra a composição química dos 9 materiais analisados neste trabalho. Nesta tabela o nível 1 é o nível alto do elemento residual, -1 nível baixo e 0 é o nível central.

Tabela 4.1 - Composição química dos materiais conforme o fabricante.

													Nível do fator		
Material	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Cu	%Mo	%Al	%Pb	%N2	Cr	Ni	Cu
A	0.090	0.03	1.24	0.046	0.273	0.15	0.08	0.26	0.020	0.001	0.280	0.0079	1	-1	1
B	0.140	0.03	1.20	0.045	0.280	0.09	0.17	0.18	0.020	0.001	0.270	0.0084	-1	1	-1
C	0.072	0.02	1.21	0.044	0.284	0.09	0.17	0.25	0.020	0.001	0.250	0.0080	-1	1	1
D	0.085	0.02	1.25	0.047	0.272	0.10	0.08	0.11	0.010	0.001	0.240	0.0070	-1	-1	-1
E	0.077	0.02	1.24	0.050	0.277	0.16	0.09	0.08	0.010	0.001	0.250	0.0080	1	-1	-1
F	0.084	0.02	1.23	0.048	0.297	0.10	0.08	0.27	0.030	0.001	0.230	0.0086	-1	-1	1
G	0.078	0.03	1.25	0.051	0.273	0.18	0.17	0.17	0.030	0.001	0.260	0.0072	1	1	-1
H	0.077	0.02	1.22	0.045	0.295	0.13	0.12	0.21	0.03	0.001	0.24	0.0086	0	0	0
I	0.078	0.03	1.25	0.052	0.279	0.19	0.18	0.26	0.040	0.001	0.250	0.0083	1	1	1

A tabela 4.2 apresenta a faixa de variação do teor de cada elemento químico de cada nível. Os níveis tiveram que ser fixados em faixas pela impossibilidade de fixação de valores pontuais, lembrando que as amostras foram tiradas da linha de produção normal da empresa.

Tabela 4.2 - Faixa de variação do teor de cada elemento químico de cada nível.

	Cr (%)	Ni (%)	Cu (%)
-1	0,08/0,13	0,08/0,13	0,10/0,15
0	0,12/0,18	0,12/0,18	0,18/0,23
1	0,15/0,20	0,17/0,22	0,25/0,30

A tabela 4.3 apresenta a composição química do aço ABNT 1112 sem chumbo.

Tabela 4.3 – Composição química do aço ABNT 1112 sem chumbo

%C	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	%Cu
0,10	0,85	0,01	0,19	0,20	0,25	0,06	0,35

As durezas dos materiais foram determinadas por um Durômetro Universal (WOLPERT) com penetrador de esfera de aço e uma carga de 187,5 Kg. Para o perfil de dureza foram feitas 7 impressões igualmente espaçadas, do centro para a superfície (ver

figura 4.1). Para a medida da dureza na superfície externa, as amostras foram fresadas e lixadas e posteriormente foram feitas 5 impressões aleatórias como ilustra a figura 4.1.

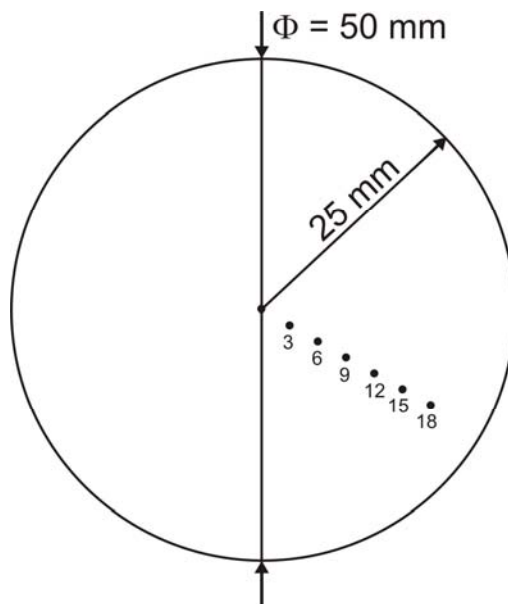


Figura 4.1 - Croqui da amostra para o perfil de dureza Brinell das amostras (sentido: superfície para o centro).

A Tabela 4.4 mostra os valores médios da Dureza Brinell de cada amostra de material.

Tabela 4.4 - Valores médios da dureza Brinell das nove amostras e do aço ABNT 1112.

Amostra	A	B	C	D	E	F	G	H	I	1112
HB	142	136	123	133	144	127	129	127	145	146

4.1.1 Preparação dos Corpos de Prova

Para preparação dos corpos de provas, cada material foi cortado com um comprimento de 150 mm e usinado até um diâmetro de 50 mm. A figura 4.2 mostra as dimensões dos corpos de provas utilizados neste experimento.

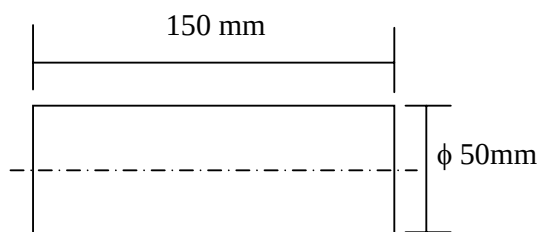


Figura 4.2. Desenho do corpo de prova.

4.2 Ferramentas

4.2.1 Ferramentas de Corte

As ferramentas de corte são barras de aço-rápido M3 com cobalto com dimensões quadradas de 16mm de lado e 80mm comprimento. A tabela 4.5 apresenta a faixa de composição química dessa ferramenta de corte.

Tabela 4.5 – Composição química das ferramentas de aço rápido (dados do fornecedor).

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo	%Ni
0,968	0,523	0,295	0,098	0,0125	4,098	4,859	0,191
%Al	%Co	%Cu	%Nb	%Ti	%V	%W	%Sn
0,0296	8,58	0,057	0,119	0,002	3,253	6,34	0,026

A figura 4.3 apresenta os ângulos da cunha cortante da ferramenta de corte utilizadas (conforme a norma Volvo, 1989).

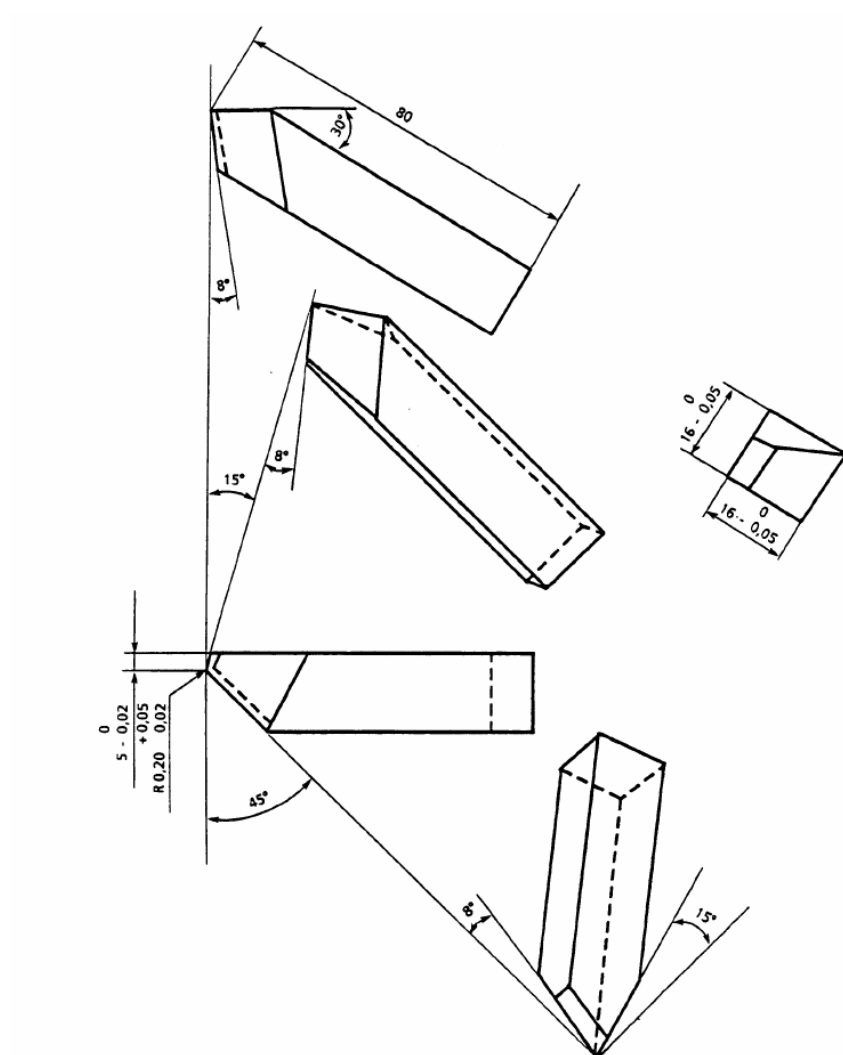


Figura 4.3 - Ângulos das ferramentas usadas nos ensaios (Volvo, 1989).

4.2.2 Suporte Porta-Ferramenta

Para realizar os testes foi fabricado um suporte especial, especificado pela norma Volvo (1989), apresentado na figura 4.4.



Figura 4.4 Foto do suporte especificado pela norma (Volvo, 1989).

4.3 Flúido de Corte

O flúido de corte utilizado foi o da marca Lion solúvel fabricada pela Lubri-Motor's Ind. Com. Import. e Exp. , a concentração usada foi de 4% em água e vazão de 2l/min.

4.4 Equipamentos

4.4.1 Máquina-Ferramenta

Os testes foram realizados em uma fresadora CNC fabricada pela Romi, modelo Interat IV, possuindo 7,5 CV de potência em seu eixo árvore e variação contínua de rotação (40 a 4000rpm) e avanço (0 a 4800mm/min) mostrada na figura 4.5.



Fig 4.5 - Foto da Fresadora Romi Interat IV

4.4.2 Microscópio Ferramenteiro

Para medição dos desgastes das ferramentas utiliza-se um microscópio ferramenteiro ilustrado na figura 4.6 desenvolvido pelo LEPU. Ele tem resolução de 0.01mm e ampliação de 40 vezes, conforme mostrado na figura.

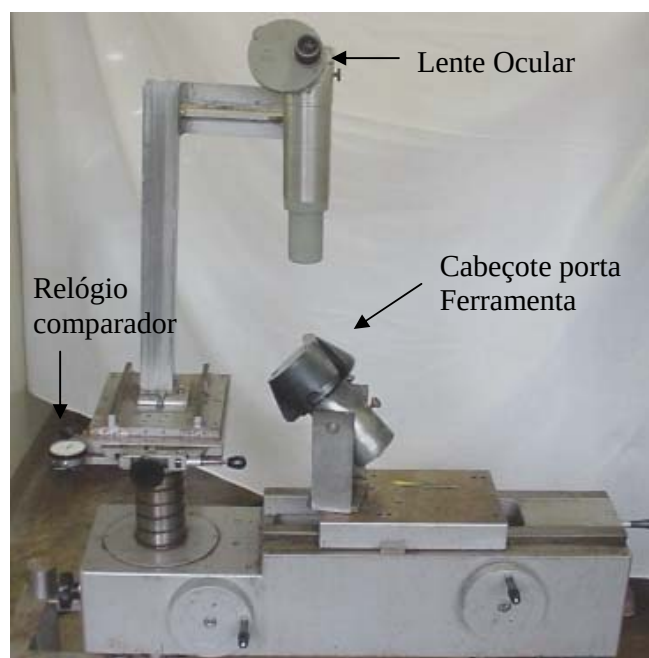


Figura 4.6. Representação do microscópio ferramenteiro utilizado para a medição de desgaste nas ferramentas de corte.

4.5 Procedimento Teste

As condições de corte utilizadas nos testes foram recomendadas pela norma Volvo (1989): profundidade de corte de 1.0mm, avanço de 0.01mm/volta e velocidade de corte que deve ser estipulada para cada material. Para o aço-de-corte-fácil analisado utilizou-se uma velocidade de 125m/min (rotação de 500 rpm). A norma aconselha a utilização de fluido de corte com uma vazão de 10 l/min. Neste experimento utilizou-se uma vazão inferior (2 l/min) para evitar excessivos respingos na área de trabalho uma vez que a máquina ferramenta utilizada não possui grades de proteção, evitando alto consumo de fluido.

Para se realizar os testes, a ferramenta foi presa na vertical do eixo arvore, cortando a peça teste na horizontal, onde em cada passada retira-se um volume de $1,96\text{cm}^3$ de material conforme figura 4.7. Após os passes, quando a peça atingia a dimensão mínima de 50 mm (utilizado para fixação da mesma), o corpo de prova era substituído. A figura 4.8 mostra à montagem do sistema em um teste.

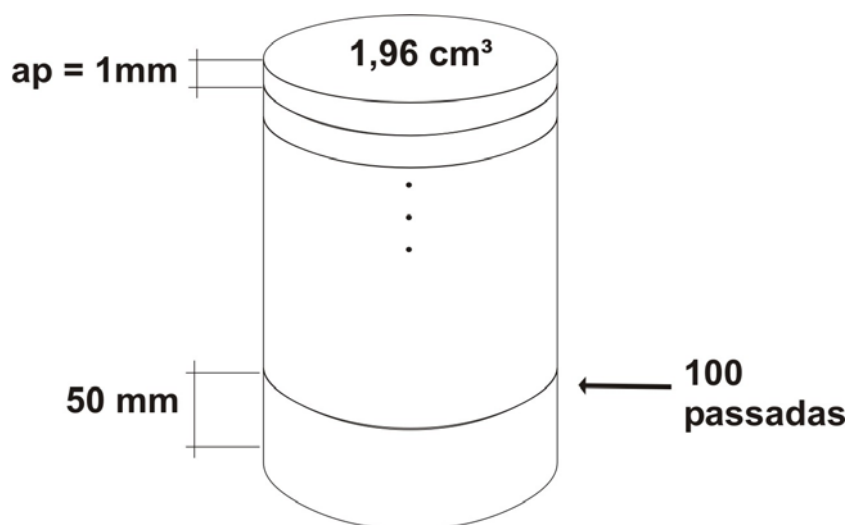


Figura 4.7 Peça teste na horizontal.



Figura 4.8 - Vista da montagem do sistema em um teste

A peça teste é usinada até que a ferramenta atinja o desgaste $VB_{Bm\acute{a}x} = 0.7\text{mm}$ na barra de aço rápido. A figura 4.9 mostra onde se mede o desgaste de flanco em uma ferramenta.

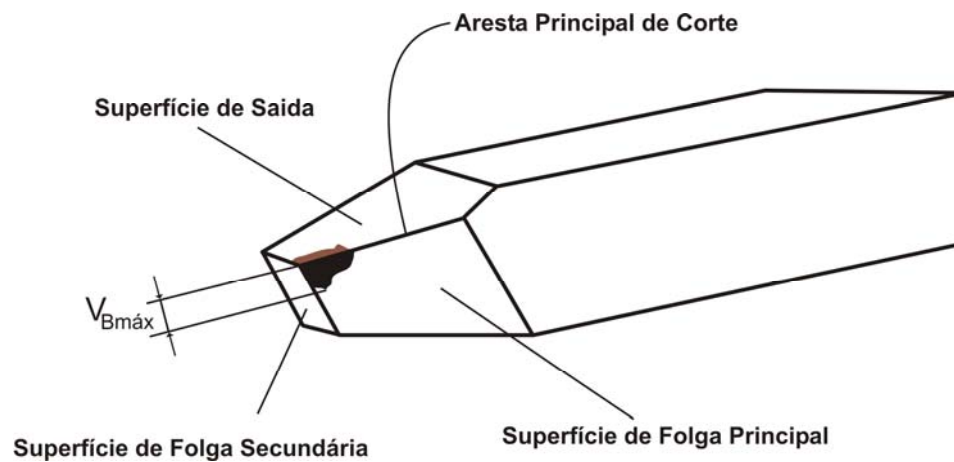


Figura 4.9 - Local onde se mede o desgaste de flanco máximo, usado como critério de fim de vida (Volvo, 1989).

4.6 Teste Volvo

O teste Volvo (1989) é direcionado para quantificar a usinabilidade de materiais através de um índice B. As vantagens de se usar o teste Volvo é devido a economia de material e de tempo, que chega a ser a uma razão de 1 para 70 em relação a testes tradicionais (DeArdo e Garcia, 1993). O Anexo 2 apresenta a norma Volvo na íntegra.

4.6.1 Determinação do Índice de Usinabilidade B

Este índice é levantado por meio de testes de fresamento frontal, cujos procedimentos são determinados pela norma. Nesta escala o aço de corte fácil SAE 1112 deve obter o índice 100. O índice B é determinado em um diagrama de velocidade de corte versus volume de material removido em escalas logarítmicas. A figura 4.10 mostra este gráfico.

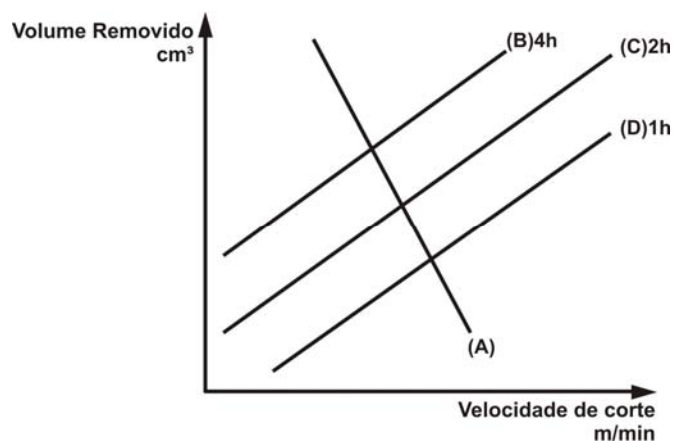


Figura 4.10 - Gráfico Log-log volume removido versus velocidade de corte (Volvo, 1989).

Neste gráfico traça-se uma linha retilínea (A) com resultados obtidos em diferentes velocidades de corte. São traçadas linhas paralelas entre si (B), (C) e (D), perpendiculares à linha (A), de forma que nas condições indicadas pela norma Volvo, corresponde a tempos constantes de retirada de cavaco. A linha (C) corresponde à 2h de tempo de total usinagem, que é escolhida como linha de referência e graduada com valores de B de acordo com as fórmulas:

$B = \text{volume removido (cm}^3\text{)}/2.5$ ou $B = \text{velocidade de corte (m/min)}/1.25$. Conforme mostra a figura 4.11.

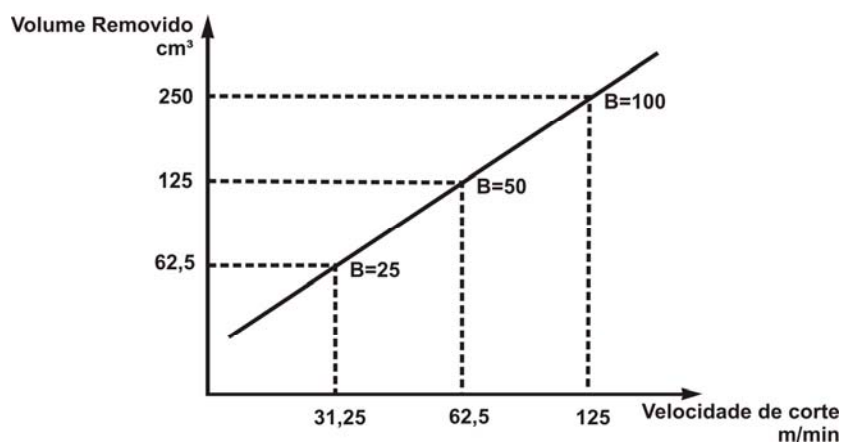


Figura 4.11 - Graduação da linha de referência (Volvo, 1989).

Na realidade, como o corte é interrompido e a peça tem dimensões pré-determinadas pode-se relacionar o tempo total com o tempo efetivo de retirado de cavaco, sendo que para o tempo total de 2h o tempo efetivo de retirada de cavaco é de 22 minutos (tempo ativo).

Sugere-se que a escolha da velocidade de corte inicial do teste seja feita de tal forma que após a primeira passada o desgaste de flanco esteja entre 0.05mm e 0.1mm. Para se determinar o índice B pode ser necessário utilizar duas velocidades de corte v_1 e v_2 de forma que o volume removido estimado no gráfico permaneça em lados opostos à linha de referência, onde o valor lido do cruzamento do segmento que liga v_1 e v_2 com a linha de referência nos fornece o índice B do material em teste, conforme mostra a figura 4.12.

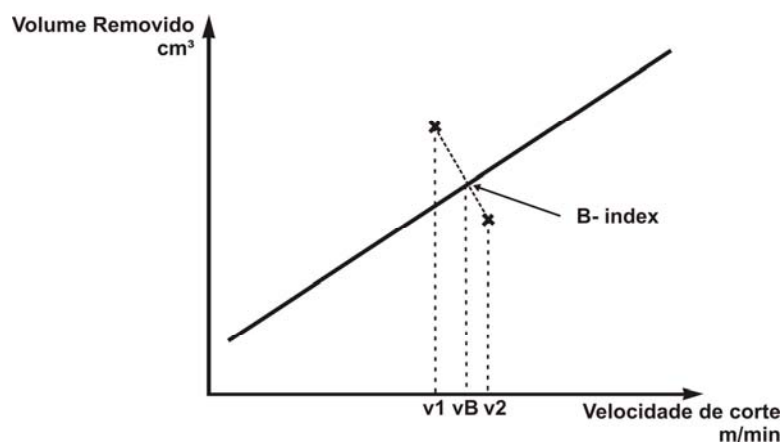


Figura 4.12 - Determinação do índice B

Caso não haja o cruzamento com a reta de referência, repetir o corte com outra velocidade de corte de modo que $0.2 > \frac{v_B - v_1}{v_B}$ ou $0.2 > \frac{v_2 - v_B}{v_B}$.

Para uma melhor precisão, e obter resultados estatisticamente confiáveis deve-se realizar no mínimo 3 testes e no máximo 6 testes nas mesmas condições para cada velocidade de corte empregada, dependendo da razão entre volume mínimo e máximo de material removido em cada teste. A tabela 4.6 fornece a regra para determinação do número de testes.

Tabela 4.6 - Regra para determinação do número de testes em cada velocidade de corte.

VRM _{min} /VRM _{max}	Número de testes
1.0-0.93	Três
0.93-0.87	quatro
0.87-0.81	cinco
0.81-0.75	seis
<0.74	Material não apropriado

VRM = volume de material removido até $v_{B_{\max}} = 0.7 \text{ mm}$

Após o teste usa-se uma avaliação estatística para determinar o índice B através de intervalos de confiança que são determinados para os volumes de material removido em cada velocidade de corte. A distribuição é considerada normal e o intervalo de confiança é determinado através da distribuição de t de Student com probabilidade de 95%, conforme mostra a figura 4.13.

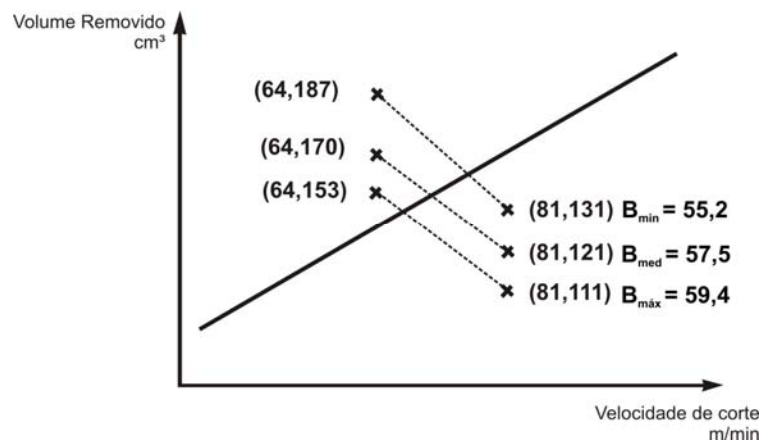


Figura 4.13 - Intervalos de confiança para determinação do índice B (Volvo, 1989)

Cálculo do intervalo de confiança com distribuição t de Student

$$\mu = \bar{x} \pm \frac{tp}{\sqrt{n}} \cdot s$$

(4.1)

onde:

s= desvio padrão

n= número de observações

tp= valor tabelado de student com 95% de probabilidade e n-1 grau de liberdade

A tabela 4.7 mostra alguns valores de volumes de material removido para duas velocidades de corte diferentes fornecidos por um exemplo dado pela Volvo (figura 4.14) e seus respectivos intervalos de confiança.

Tabela 4.7 Valores de volume de material removido para duas velocidades de corte diferentes.

Vc m/min	VRM cm ³	Valor médio cm ³	Desvio padrão	$\frac{tp}{\sqrt{n}}$	Intervalo de confiança
64	150,198,172,168,162,170	170	15,8	1,05	153-187
81	110, 130, 125, 116, 125	121	8,04	1,24	111-131

Os valores lidos em cada cruzamento dos segmentos determinados através da união dos pontos máximos, médios e mínimos de volume de material removido referente a cada velocidade de corte com a linha de referência serão os índices $B_{m\acute{a}x}$, B_{med} e $B_{m\acute{i}n}$, como mostra a figura 4.13.

A norma especifica que se o volume de material removido estiver situado na vizinhança da linha de referência, ou seja, a linha de 22 minutos de tempo ativo de remoção de cavaco, isto é, dentro do intervalo entre as linhas (B) e (D), que correspondem ao intervalo entre 15-30 minutos de remoção de cavaco durante o teste mostrado na figura 4.14, o índice B é então estabelecido traçando-se uma linha perpendicular à linha de referência sem necessidade de repetir o teste. A interseção desta linha com a linha de referência, determina o índice B.

Capítulo V

Resultados e Discussões

Nos testes realizados nessa pesquisa não foi preciso variar a velocidade de corte, para determinar o índice de usinabilidade B, pois os volumes de materiais removidos para todos os materiais, estavam situados dentro do intervalo de 15-30 minutos no diagrama da figura 4.15. Foram feitos um teste e duas réplicas para cada material, pois a razão entre o volume mínimo de material removido e máximo permaneceu dentro do intervalo de 1.0-0.93 de acordo com a tabela 4.6.

Em cada 10 passadas foi medido o desgaste de flanco máximo na barra de aço-rápido até atingir um desgaste $VB_{Bmáx} = 0.7$ mm. A título de ilustração a tabela 5.1 mostra os valores do desgastes medidos a cada 10 passadas para o primeiro teste do material A. OS resultados de todos os testes, de todos os materiais são apresentados no anexo 1.

Tabela 5.1 Valores do desgastes medidos a cada 10 passadas para o primeiro teste do material A.

Número de Passadas	VRM cm^3	$VB_{Bmáx}$
10	19,60	0,10
20	39,20	0,17
30	58,80	0,22
40	78,40	0,28
50	98,00	0,35
60	117,60	0,40
70	137,20	0,43
80	156,80	0,48
90	176,40	0,55
100	196,00	0,59
110	215,60	0,64
118	231,28	0,70
120	235,20	0,71

5.1 Resultados dos Índices de Usinabilidade B

A tabela 5.2 apresenta os resultados obtidos para o índice de usinabilidade B, bem como os valores médios resultantes dos 27 testes e a figura 5.1, mostra um diagrama com esses valores médios, sendo que estes índices são da forma de quanto maior melhor a usinabilidade do material.

Tabela 5.2. Valores dos índices de usinabilidade B encontrados nos nove materiais testados.

	Material A	Material B	Material C	Material D	Material E
Índice B	94,4	92,0	92,6	100,5	96,3
	93,7	91,5	94,4	102,8	98,0
	94,4	94,4	92,6	98,3	98,7
Média	94,1	92,6	93,2	100,5	97,6
	Material F	Material G	Material H	Material I	
Índice B	93,7	89,8	93,7	87,2	
	94,4	92,0	93,7	88,8	
	95,5	94,4	95,5	88,0	
Média	94,5	92,0	94,3	88,0	

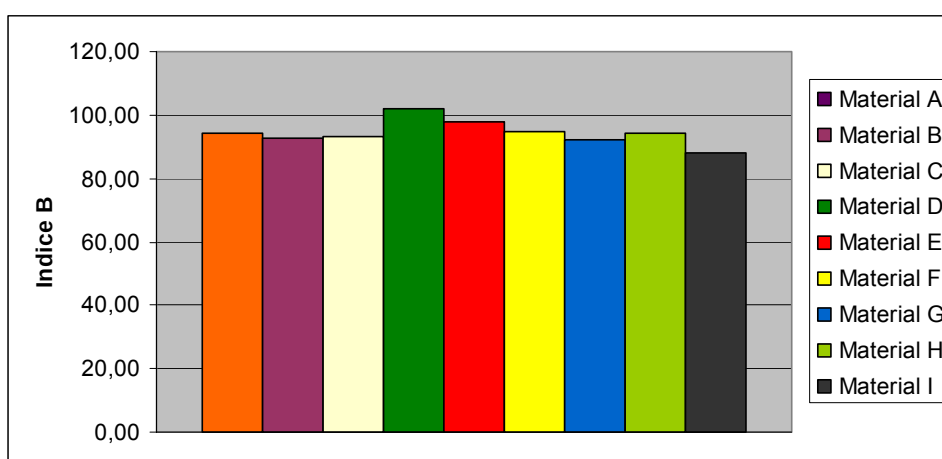


Figura 5.1 - Diagrama dos valores médios dos índices de usinabilidade B dos nove materiais

Observa-se que:

- O material I, cuja à soma $\%Cr + \%Ni + \%Cu = 0,53\%$, tem o pior índice de usinabilidade.
- O material G, cuja à soma $\%Cr + \%Ni + \%Cu = 0,52\%$, tem o segundo pior índice de usinabilidade.
- O material B, cuja à soma $\%Cr + \%Ni + \%Cu = 0,44\%$, tem o terceiro pior índice de usinabilidade. Entretanto este material possui um teor de carbono relativamente alto, comparando-se com os outros oitos materiais.
- O material C, cuja à soma $\%Cr + \%Ni + \%Cu = 0,51\%$, tem o quarto pior índice de usinabilidade.
- O material D, cuja à soma $\%Cr + \%Ni + \%Cu = 0,29\%$, tem o melhor índice de usinabilidade.
- O material E, cuja à soma $\%Cr + \%Ni + \%Cu = 0,33\%$, tem o segundo melhor índice de usinabilidade.
- O material F, cuja à soma $\%Cr + \%Ni + \%Cu = 0,45\%$, tem o terceiro melhor índice de usinabilidade.
- Material H cuja à soma $\%Cr + \%Ni + \%Cu = 0,46\%$, tem o quarto melhor índice de usinabilidade.
- Material A cuja à soma $\%Cr + \%Ni + \%Cu = 0,49\%$, tem o quinto melhor índice de usinabilidade.

Observando-se os resultados obtidos através da soma dos teores de Cr, Ni e Cu mostrado acima, tem-se que os materiais que tiveram a soma de seus teores de Cr, Ni e Cu acima de 0,5% foram os que tiveram piores índices de usinabilidade. Isto reforça a orientação de Echevaria e Corcuera, (1987), que recomendam $Ni + Cr + Cu \leq 0.5\%$. Observa-se também que quanto maior for o valor da soma da porcentagem dos teores de Cr, Ni e Cu pior é o índice de usinabilidade.

O material D que possui os mais baixos níveis de residuais $Cr = -1 (0,08/0,13\%)$, $Ni = -1 (0,08/0,13\%)$ e $Cu = -1 (0,10/0,15\%)$ teve um índice de usinabilidade médio 13% melhor que o material I que possui os mais elevados níveis residuais $Cr = 1 (0,15/0,20\%)$, $Ni = 1 (0,17/0,22\%)$ e $Cu = 1 (0,25/0,30\%)$.

Para se ter uma relação mais confiável nas repostas encontradas pelo teste Volvo uma análise estatística mais apurada se faz necessário. Primeiramente utilizou-se uma comparação de K tratamentos através da análise de variância exemplificada no capítulo 3, para verificar se realmente existe diferença entre os resultados dos materiais testados. Depois foi feita uma comparação de pares de resultados através de t de Student. Finalmente, para se modelar à faixa de teores residuais, foi empregado à análise de regressão, com superfícies de repostas.

5.2 Resultados da Análise de Variância

A tabela 5.3 mostra o quadro de análise de variância para os resultados dos índices de usinabilidade B.

Tabela 5.3 Quadro de análise de variância para os 27 testes

	SQ	g.l	Q.M	F	p
Média	239192,8	1	239192,8	119133,1	0,000000
Efeitos dos materiais	295,9	8	37,0	18,4	0,000000
Resíduo	36,1	18	2,0		

Adotando-se um nível de significância de 5%, tem-se que o valor de p é menor que este nível, então se rejeita H_0 e aceita-se H_1 como explicado no capítulo 3, portanto conclui-se que existe diferença entre pelo menos dois dos materiais.

Sabendo-se que existe uma diferença entre pelo menos dois materiais através da análise de variância, utilizou-se a comparação de 2 tratamentos através do teste t de Student com um nível de significância de 5 % como mencionado no capítulo 3. O gráfico de valores ajustados (preditos) versus resíduos mostrado na figura 5.2, apresenta uma nuvem de pontos dispostos aleatoriamente sobre o eixo dos valores preditos, portanto tem-se uma homogeneidade entre as variâncias entre os tratamentos.

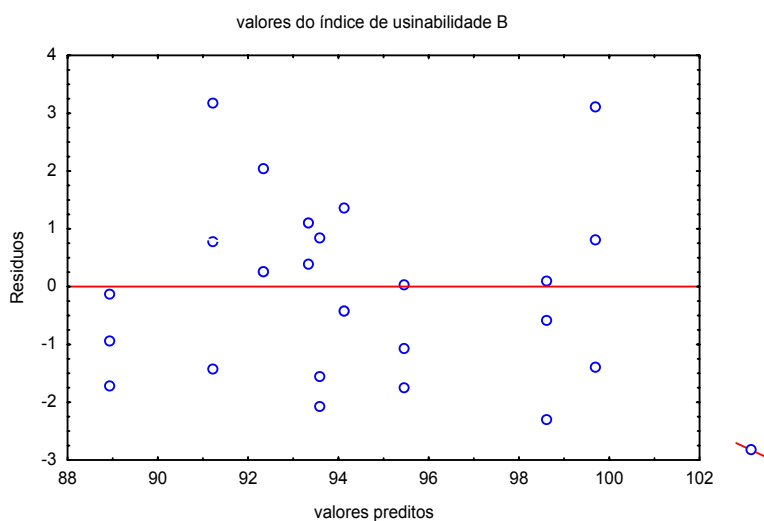


Figura 5.2. - Gráfico de valores ajustados (preditos) versus resíduos.

O gráfico de normalidade dos resíduos da figura 5.3 mostra que os pontos estão seguindo a normal, assim tem-se uma boa garantia da normalidade dos resíduos.

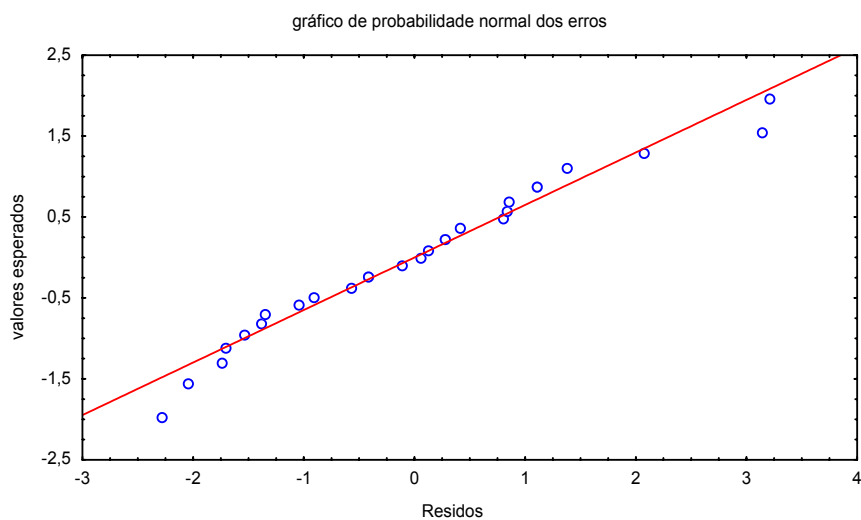


Figura 5.3 – Gráfico de normalidade dos resíduos.

5.3 Resultados da Comparação de 2 tratamentos através do teste t de Student

A tabela 5.4 mostra os materiais que tiveram $p < 0.05$ e, portanto se diferem estatisticamente.

Tabela 5.4 P-values dos pares de materiais menores que 0.05.

Materiais	P-values
A e D	0.0085
A e I	0.0003
B e D	0.0075
B e E	0.0117
B e I	0.01
C e D	0.0069
C e E	0.00687
C e I	0.0024
D e F	0.0128
D e G	0.0104
D e H	0.0121
D e I	0.0008
E e F	0.024
E e G	0.0206
E e H	0.0225
E e I	0.0003
F e I	0.0007
G e I	0.0445
H e I	0.0011

A seguir será feito uma comparação entre os materiais 2 a 2 utilizando a metodologia de comparação de 2 tratamentos, variando apenas um nível residual e deixando os outros dois constantes, para verificar quais desses elementos residuais mais influenciam na usinabilidade deste material.

Primeiramente será feita a comparação do material D que possui o melhor índice de usinabilidade B e os níveis residuais Cr = -1, Ni = -1 e Cu = -1 com o material E, que possui os níveis residuais Cr = 1, Ni = -1 e Cu = -1. Verifica-se que eles não se diferem estatisticamente, portanto nesta situação onde os níveis de níquel e cromo estão baixos a elevação do nível de cobre de -1 para 1 não influencia na usinabilidade. Este mesmo material D se difere estatisticamente do material B que possui níveis residuais Cr = -1, Ni = 1 e Cu = -1, concluindo-se, assim, que passando o nível de Ni -1 para 1 e permanecendo com os níveis residuais de cromo e cobre baixo tem-se um decréscimo na usinabilidade. Este resultado, entretanto é questionável, pois, o material B possui um teor de carbono superior

aos demais materiais ver tabela 4.1. O material D também se difere estatisticamente do material F que possui os níveis residuais Cr = -1, Ni = -1 e Cu = 1, portando tem-se que mudando o nível residual de Cu de -1 para +1 e conservando os níveis de Cr e Ni baixos tem-se também um decréscimo na usinabilidade.

Observando-se agora o material E que possui o segundo melhor índice de usinabilidade e níveis residuais Cr = 1, Ni = -1 e Cu = -1, verifica-se que ele se difere estatisticamente do material G, que possui níveis residuais Cr = 1, Ni = 1 e Cu = -1. Portanto, passando o nível de Ni de -1 para 1 conservando os níveis de Cr alto e o nível de Cu baixo tem-se um decréscimo na usinabilidade. Este mesmo material E não se difere estatisticamente do material A que possui níveis residuais Cr = 1, Ni = -1 e Cu = 1. Isto significa que passando o nível de Cu de -1 para 1, conservando o nível de Cr alto e o nível de Ni baixo não afeta a usinabilidade.

Continuando-se as análises, comparando o material G que possui o segundo pior índice de usinabilidade e níveis residuais Cr = 1, Ni = 1 e Cu = -1 como o material I que possui níveis residuais Cr = 1, Ni = 1, e Cu = 1 verifica-se que eles se diferem estatisticamente, então tem-se que passando nível de Cu de -1 para 1, permanecendo com os níveis de Cr e Ni altos, piora a usinabilidade.

Por último, comparando-se o material I com os materiais C, que possui níveis residuais Cr = -1, Ni = 1 e Cu = 1, A, que possui os níveis residuais Cr = 1, Ni = -1 e Cu = 1 e G que tem os seguintes níveis residuais Cr = 1, Ni = 1 e Cu = -1, verifica-se que eles se diferem estatisticamente. Conclui-se, então que passando o nível de qualquer elemento residual de 1 para -1, conservando os outros dois elementos altos tem-se uma melhora na usinabilidade.

Através da análise de variância e do teste t de Student, pode-se observar que os materiais D, que possui baixos elementos residuais, e E que possui alto nível residual de cromo e baixo nível residual de níquel e cobre, foram os que apresentaram melhores usinabilidade e o material I, que possui alto nível de residuais, foi o que apresentou pior usinabilidade.

Para se ter uma melhor confiabilidade nos resultados obtidos pela análise de variância e o teste t de Student, utilizar-se-á os fundamentos estatísticos da análise de regressão, mencionados no capítulo 3, para filtrar quais são as faixas dos elementos residuais que são mais significativas na usinabilidade do aço SAE 12L14 com chumbo.

A tabela 5.6 apresenta a análise de variância da regressão.

Tabela 5.6 Análise de variância da regressão

Termo	Coeficientes	Desvio padrão	t de Student	p
Intercept	94,12222	0,320094	294,0460	0,000000
Cr	-1,12500	0,339510	-3,3136	0,003466
Ni	-2,62500	0,339510	-7,7317	0,000000
Cu	-1,62500	0,339510	-4,7863	0,000113
CrNi	-0,31667	0,339510	-0,9327	0,362091
CrCu	-0,26667	0,339510	-0,7854	0,441399
NiCu	0,75000	0,339510	2,2091	0,039001

Observando-se os valores de p na tabela 5.6 pode-se concluir que os efeitos isolados dos elementos Cr, Ni e Cu são significativos, sendo que o efeito isolado mais significativo foi do níquel e o menos significativo foi do cromo e a interação entre os efeitos dos elementos NiCu também foi significativa.

Com os coeficientes da tabela 5.6 pode-se obter a equação (5.1), que representa a variação da resposta dos índices de usinabilidade B representado por INDB em função das variáveis significativas.

$$INDB = 94,12222 - 1,125Cr - 2,625Ni - 1,625Cu + 0,75NiCu \quad (5.1)$$

O índice de correlação R^2 como explicado no capítulo 3, indica a variabilidade dos dados representados pela equação. Nesta equação R^2 foi igual a 0,8333, o que significa que para este modelo de primeira ordem 83,33% da variabilidade dos dados foi explicado pela equação.

Sabendo-se que a resposta para o índice de usinabilidade B é do tipo quanto maior melhor, pode-se concluir pela equação 5.1 que os melhores níveis residuais são Cr = -1 (0,08/0,13%), Ni = -1 (0,08/0,13%) e Cu = -1 (0,10/0,15%) que estão de acordo com a análise feita anteriormente. Isto é o material com os níveis de elementos residuais mais baixos foi o melhor. Inversamente, o material com os níveis de elementos residuais mais altos, oferece pior usinabilidade.

5.5 Superfícies de Respostas

A seguir serão apresentadas através das figuras 5.3 a 5.11 as superfícies de respostas obtidas através da equação matemática 5.1, onde se terá uma variação dos valores de $X_1(\text{Cr})$, $X_2(\text{Ni})$ e $X_3(\text{Cu})$ em 0, -1 e 1.

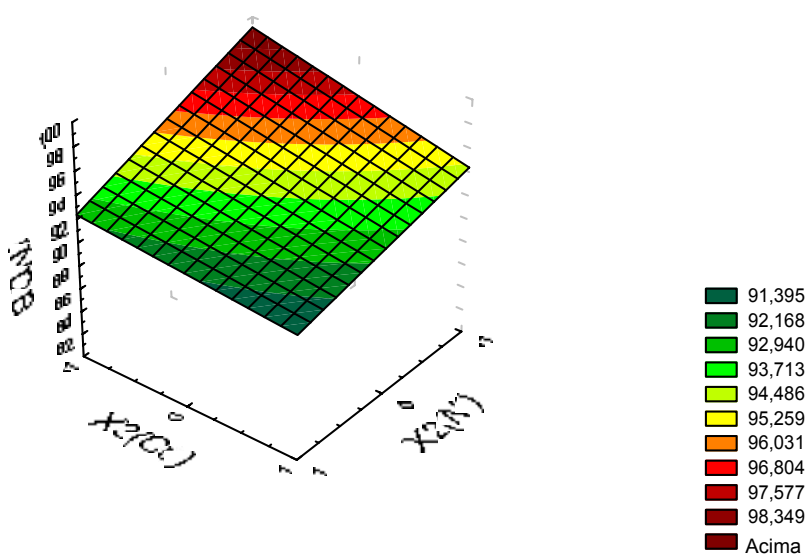


Figura 5.3 - Superfície de Resposta para o índice de usinabilidade B para um valor fixo $X_1(\text{Cr}) = 0$ na equação 5.1.

Pode-se observar através desta superfície que o índice de usinabilidade B tem um valor diferenciado para cada nível residual baixo (-1), central (0) ou alto (1). As regiões mais baixas (as esverdeadas) apresentam o pior índice de usinabilidade, as regiões amareladas têm um índice de usinabilidade intermediário e os melhores índices de usinabilidade são representados pelas áreas vermelhas.

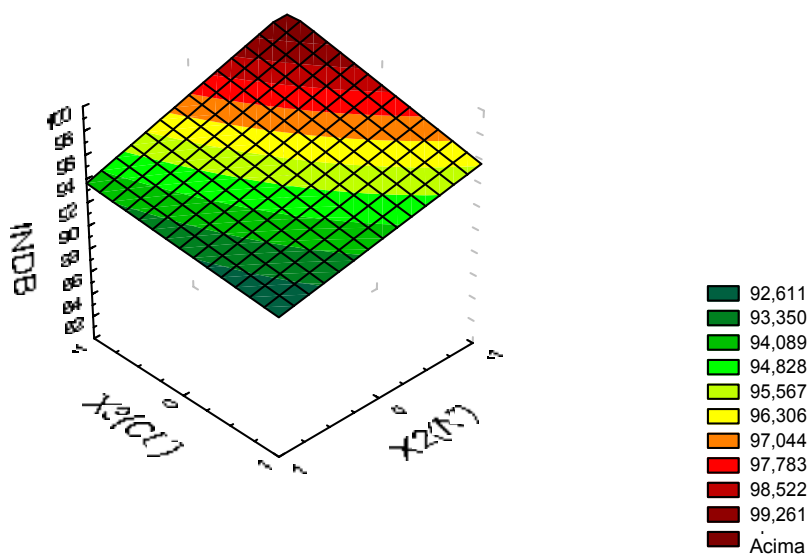


Figura 5.4 - Superfície de Resposta para o índice de usinabilidade B para um valor fixo $X_1(\text{Cr}) = -1$ na equação 5.1.

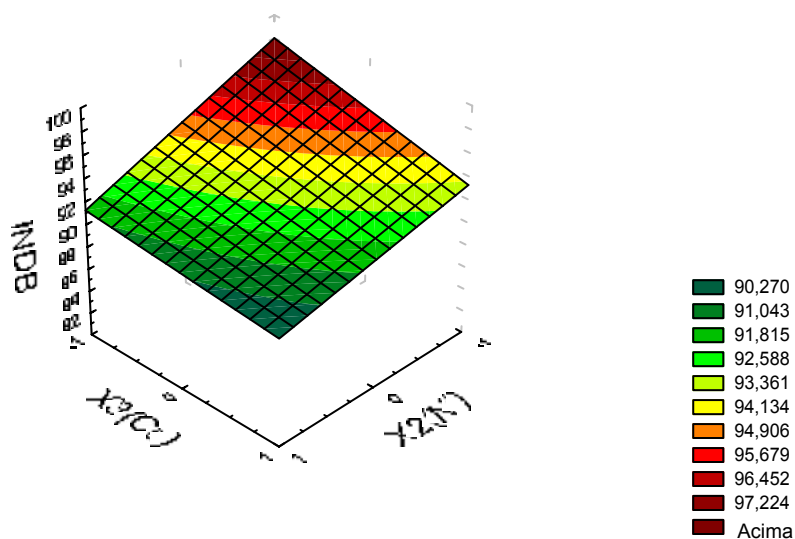


Figura 5.5 - Superfície de Resposta para o índice de usinabilidade B para um valor fixo $X_1(\text{Cr}) = 1$ na equação 5.1.

Analisando-se as superfícies de respostas das figuras 5.3, 5.4 e 5.5 as quais possuem valores fixo de $X_1(\text{Cr})$, observa-se que a mudança destes valores de 0 para 1 ou -1 não produz grandes variações nas faixas de valores e de inclinações destas superfícies entre si, portanto o Cr influencia menos na resposta que os demais componentes residuais conforme visto na análise de variância para a regressão.

Para essa mesma superfície observa-se que a variação da resposta com a variável, Cu apresenta um comportamento diferenciado para os níveis de Ni baixo (-1) e alto (1). Este fato confirma a significância da interação entre as variáveis, Cu e Ni, conforme mostrado na tabela 5.6.

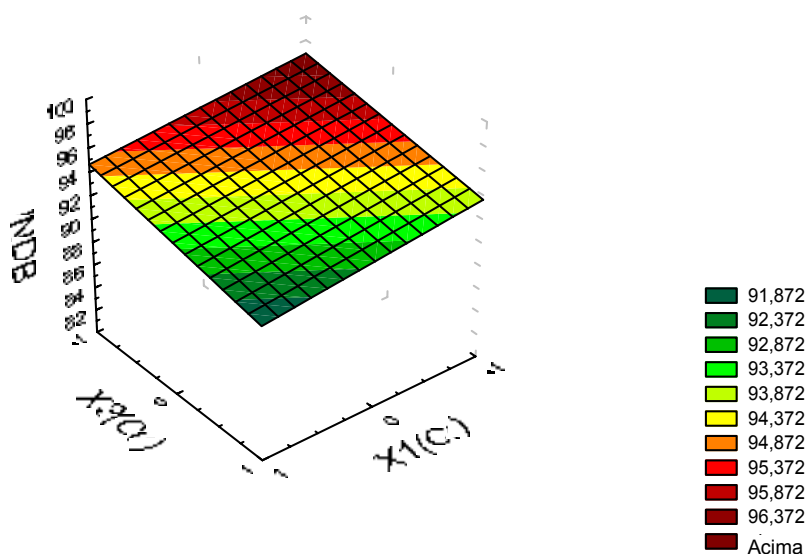


Figura 5.6 - Superfície de Resposta para o índice de usabilidade B para um valor fixo $X_2(\text{Ni}) = 0$ na equação 5.1.

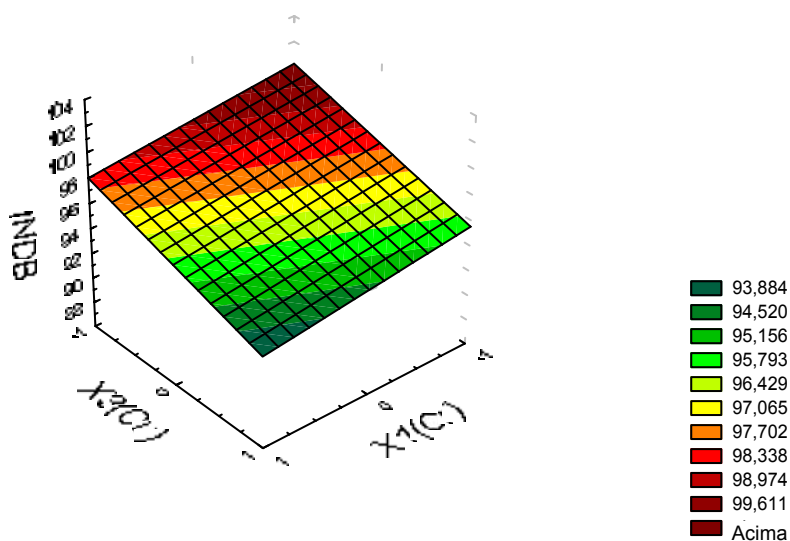


Figura 5.7 - Superfície de Resposta para o índice de usabilidade B para um valor fixo $X_2(\text{Ni}) = -1$ na equação 5.1.

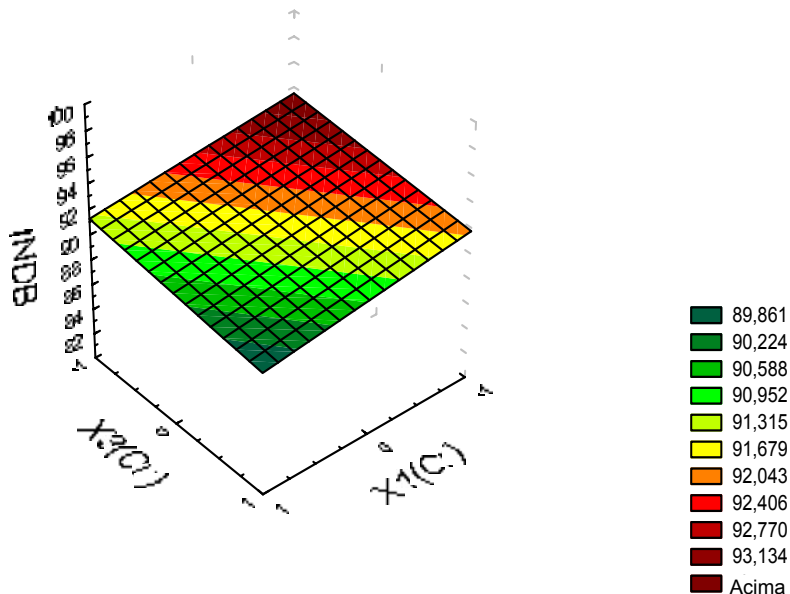


Figura 5.8 - Superfície de Resposta para o índice de usinabilidade B para um valor fixo $X_2(\text{Ni}) = 1$ na equação 5.1.

Observando as superfícies de respostas das figuras 5.6, 5.7 e 5.8, as quais possuem valores fixo de $X_2(\text{Ni})$, nota-se que a mudança destes valores de 0 para 1 ou -1 produz variações nas faixas de valores e inclinações destas superfícies entre si, sendo que o valor de -1 foi o que apresentou uma maior variação e o valor 1 uma menor variação.

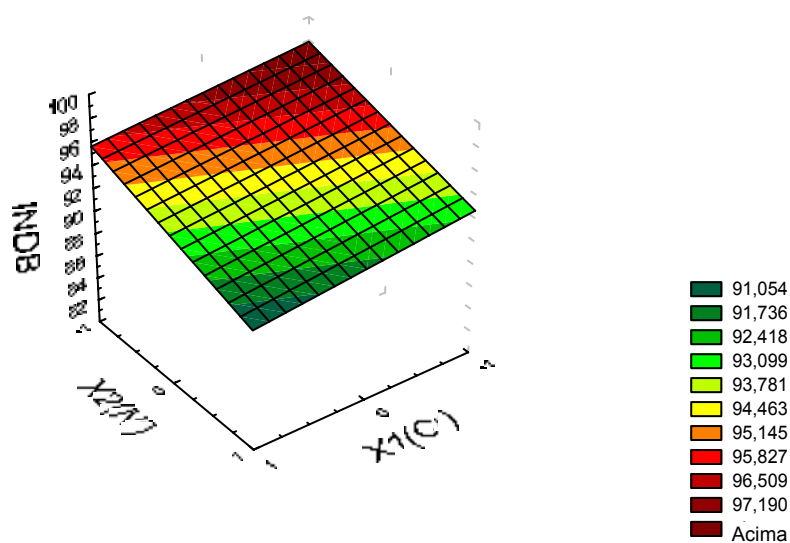


Figura 5.9 - Superfície de Resposta para o índice de usinabilidade B para um valor fixo $X_3(\text{Cu}) = 0$ na equação 5.1.

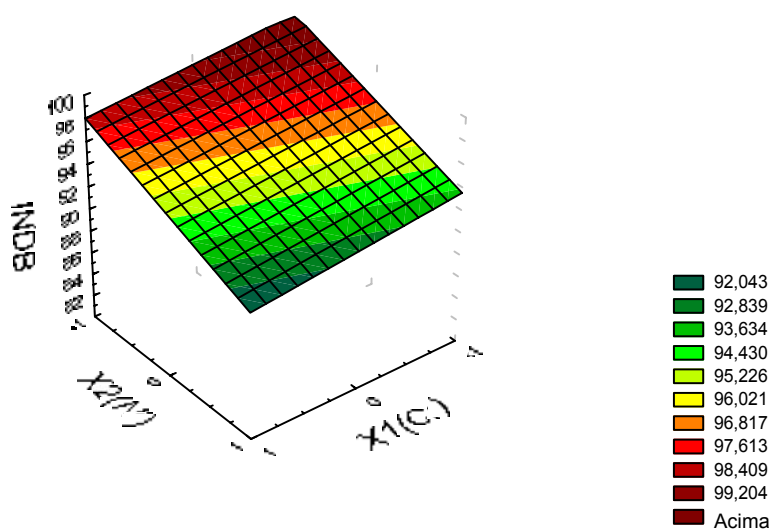


Figura 5.10 - Superfície de Resposta para o índice de usinabilidade B para um valor fixo $X_3(\text{Cu}) = -1$ na equação 5.1.

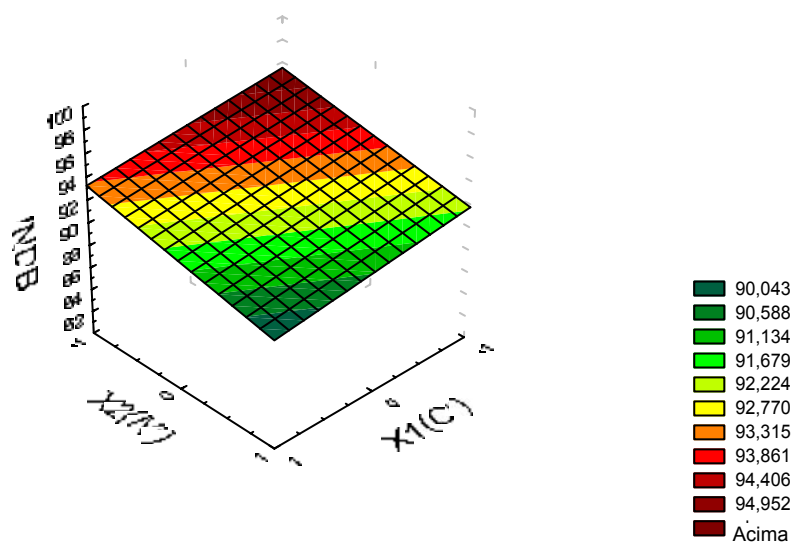


Figura 5.11 - Superfície de Resposta para o índice de usinabilidade B para um valor fixo $X_3(\text{Cu}) = 1$ na equação 5.1.

Por último, analisando as superfícies de respostas das figuras 5.9, 5.10 e 5.11, as quais possuem valores fixo de $X_3(\text{Cu})$, observa-se que a mudança destes valores de 0 para 1 ou -1 produz variações nas faixas de valores e inclinações destas superfícies entre si, sendo que o valor de -1 foi o que apresentou uma maior variação e 1 uma menor variação.

Como se sabe os elementos químicos residuais aparecem pelo uso de material reciclado e, particularmente os três elementos de estudo deste trabalho, Cr, Ni e Cu se apresentam como soluções sólidas, o que geralmente confere ao aço maiores resistência mecânica e dureza. A tabela 4.1 mostra que o material I, que possui os três elementos na faixa alta, é o que apresenta uma das maiores durezas (145 HB) e o material D, que possui os menores níveis residuais possui uma dureza intermediária (133 HB). As menores durezas apresentadas por outros materiais (C, F, H) podem ser devido aos teores de outros elementos como, por exemplo, o carbono. Dessa forma, já era de se esperar que o material I apresentasse pior usinabilidade uma vez que maiores resistência mecânica e dureza implicam em maiores restrições à formação do cavaco e, normalmente, maiores desgastes das ferramentas de corte (Murphuy e Aylward, 1971). Esta possibilidade não pode ser descartada, nem mesmo verificando que a análise de variância não mostrou a existência de uma relação direta entre a dureza e o índice de usinabilidade B. Portanto, deve haver outras variáveis que influenciam neste índice, não somente a dureza.

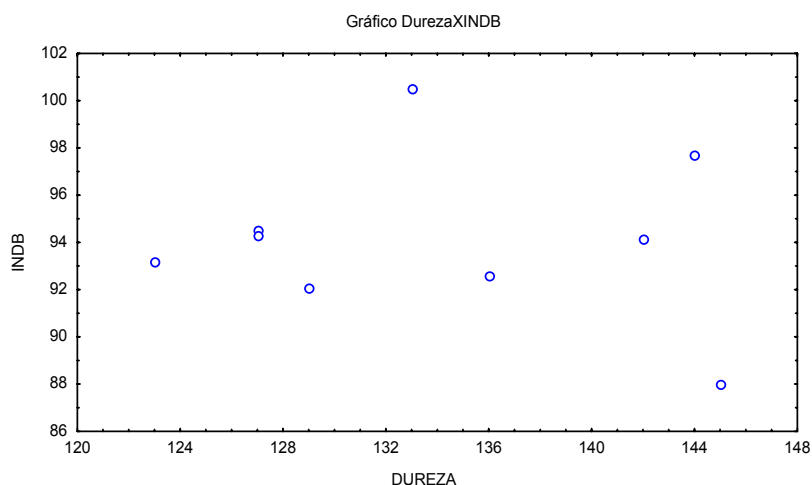


Figura 5.12 – Gráfico índice de usinabilidade B versus dureza.

De acordo com a figura 5.1, o segundo material a apresentar maior índice de usinabilidade B foi o material E, que possui teores de Ni e Cu na faixa baixa e o teor de Cr na faixa alta. Este resultado, de certa forma coincide com os obtidos no torneamento por Almeida (2005) que obteve o melhor índice de usinabilidade para o material E. A explicação oferecida pelo autor é de que outros elementos como o C e P podem ter inibido o efeito do teor mais elevado de Cr (+1). O teor de carbono no aço E é um dos mais baixos (0,077%) e o de fósforo um dos mais altos (0,50%), ambos o fato colaboraram para uma melhor usinabilidade (Garvey e Tata, 1965).

Como se trata de experimentos realizados nos mesmos materiais, é inevitável a comparação dos resultados encontrados neste trabalho com aqueles encontrados por Almeida (2005). Com ferramentas de aço-rápido Almeida encontrou o material E como o de melhor usinabilidade e o material B o de pior. Com ferramentas de metal duro o melhor resultado de Almeida foi o material A e o pior o material D. São resultados bastante diferentes dos obtidos nesse trabalho, exceção do material E que foi o segundo melhor no teste Volvo. Além disso, o material E difere do material D (melhor do teste Volvo) apenas pelo maior teor de cromo. Como este elemento se mostrou estatisticamente sem influência, os materiais podem, conseqüentemente, ser considerados iguais. A justificativa mais convincente pela variação nos resultados deve ser creditada na diferença de processos. O processo de torneamento, usado por Almeida, é contínuo, portanto com uma temperatura média superior ao processo interrompido (teste Volvo) usado no presente trabalho. Em velocidades de corte baixas das ferramentas de aço-rápido o efeito do Pb pode ser mais pronunciado no torneamento, que apresenta maiores temperaturas. Por outro lado, o processo de fresamento apresenta os impactos mecânicos freqüentes e naturais, ausentes no torneamento. Isto coloca o efeito de endurecimento dos elementos químicos residuais mais importantes no fresamento que no processo de torneamento.

Com relação aos resultados encontrados por Almeida (2005) com metal duro, são testes realizados em altas velocidades, o que dificulta a ação dos aditivos de corte-fácil. Normalmente, a camada protetora na superfície de saída das ferramentas não se forma nestas altas condições de corte para melhorar a usinabilidade (Wise e Milovic, 1988). Portanto, a repetição dos resultados não ocorreu nem dentro do mesmo processo de torneamento realizado por Almeida (2005), muito menos ocorreu com os testes Volvo. Aliás, o melhor material no fresamento (teste Volvo) foi exatamente o pior material no torneamento a alta velocidade com ferramentas de metal duro obtido por Almeida.

5.6 Resultados dos Índices de Usinabilidade B para o Aço ABNT 1112 (sem chumbo).

A tabela 5.7 apresenta os resultados obtidos para o índice de usinabilidade B, resultantes dos testes para o aço ABNT 1112 (sem chumbo). A figura 5.13 mostra um diagrama com os valores médios desses resultados e também dos índices B. Para comparação esta tabela e está figura apresentam, também os índices de usinabilidade B do melhor material (material D) e do pior material (material I).

Tabela 5.7. Valores e valores médios dos índices de usinabilidade B resultante dos materiais I, D e sem chumbo.

	Material sem chumbo	Material D	Material I
Índice B	84,10	100,50	87,20
	84,20	102,80	88,80
	83,80	98,30	88,00
Média	84,00	100,53	88,00

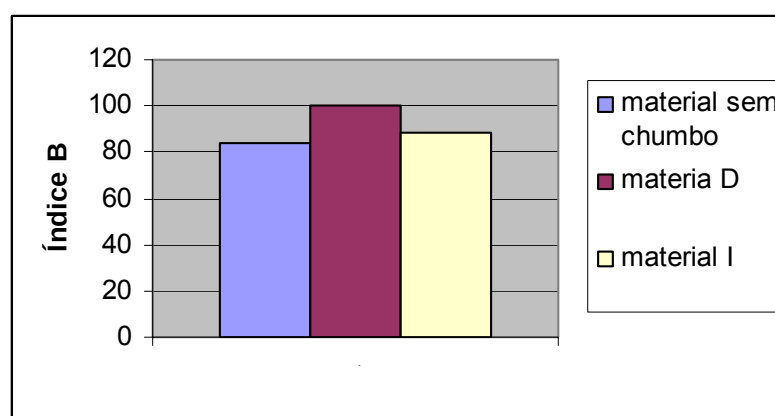


Figura 5.13 – Diagrama com os valores médios do índice de usinabilidade B apresentados na tabela 5.7

Para se ter uma melhor confiabilidade nos resultados encontrados na tabelas 5.7, utilizou-se à metodologia da comparação de dois tratamentos adotando um nível de significância de 5%. A tabela 5.8 apresenta os P- values encontrados para esta comparação e , através destes observa-se que os materiais D e I se diferem estatisticamente do material sem chumbo.

Tabela 5.8 – P-values dos pares de materiais da tabela 5.7.

Materiais	P-values
D e sem chumbo	0,001
I e sem chumbo	0,00000002

Observa-se que o material D que possui os mais baixos níveis residuais Cr = -1 (0,08/0,13%), Ni = -1 (0,08/0,13%) e Cu = -1 (0,10/0,15%) teve, um índice de usinabilidade médio 16,11% melhor que o material sem chumbo. Essa diferença pode ser parcialmente creditada à ausência do Pb no aço ABNT 1112. O Pb proporciona uma redução da resistência ao cisalhamento do material, redução do atrito entre cavaco e ferramenta, pelo

efeito lubrificante e uma proteção física das superfícies da ferramenta, aumentando a usinabilidade do material (Mill e Redford, 1983, Jah e Sharma, 1990). Entretanto, quando se compara o índice B deste material com o índice obtido pelo pior material (material I, que possui os mais altos níveis residuais Cr = 1 (0,15/0,20%), Ni = 1 (0,17/0,22%) e Cu = 1 (0,25/0,30%)), tem-se que o material I é apenas 5% superior ao aço sem chumbo. Isto significa que o alto percentual de residual ofusca a ação do chumbo no aço ABNT 12L14.

A tabela 4.3, que apresenta a composição química desse aço evidencia outros fatores que também podem estar contribuindo para esta pior usinabilidade. O teor de carbono é de 0,1% (contra aproximadamente 0,078% para o aço com Pb); os teores de S (0,19%) e Mn (0,85%) são mais baixos que os aços ao chumbo (faixa de 0,28% S e 1,24% Mn); o teor de P (0,01%) é menor quando comparado aos aços ao chumbo (faixa de 0,048%); os teores os elementos residuais Cr (0,20%), Ni (0,25%), e Cu (0,35%) são, também, superiores aos dos aços ao chumbo.

5.7 Desgaste das Ferramentas de Aço-Rápido.

Após os ensaios de usinabilidade, com as ferramentas no final de vida, as superfícies de folga foram fotografadas para análise do desgaste.

As figuras 5.14 a 5.17 mostram quatros exemplos de desgastes encontrados. São vistas frontais da superfície principal de folga, compreendendo a largura de corte, b , portanto destacando o desgaste de flanco.

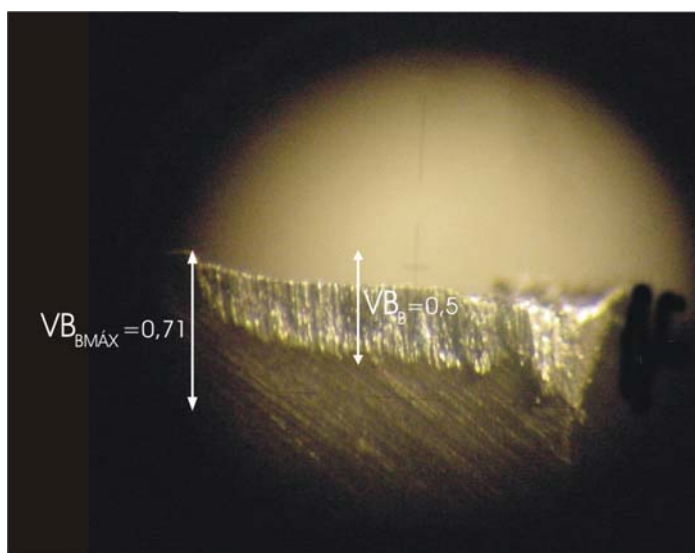


Figura 5.14 – Desgaste de flanco observado na ferramenta usada no primeiro teste do material A

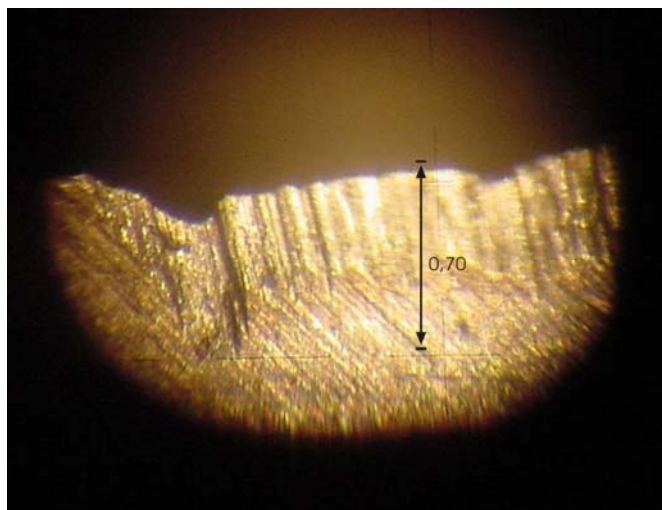


Figura 5.15 – Desgaste de flanco observado na ferramenta usada no terceiro teste do material C.

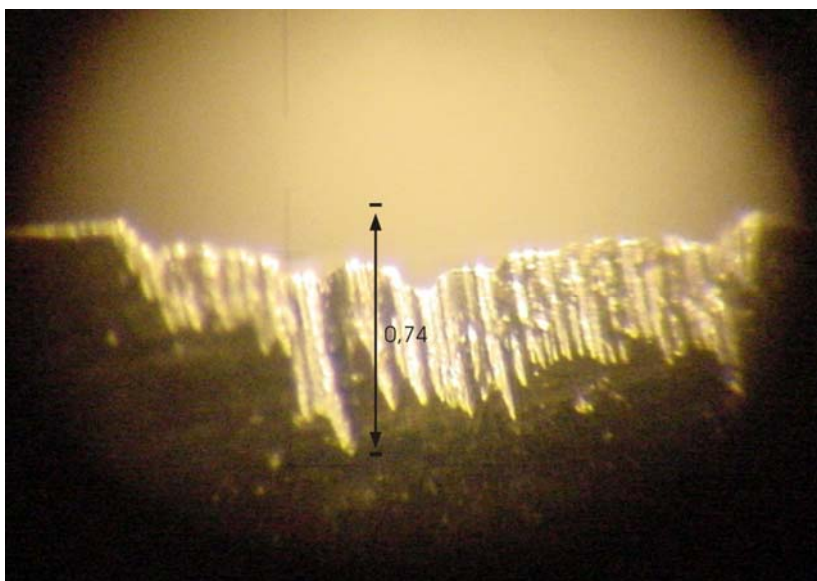


Figura 5.16 – Desgaste de flanco observado na ferramenta usada no terceiro teste do material E.

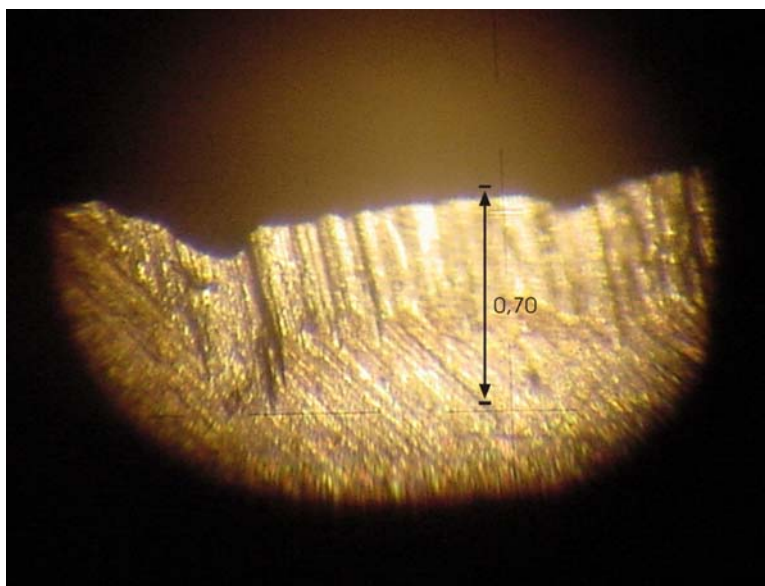


Figura 5.17 – Desgaste de flanco observado na ferramenta usada no primeiro teste do material C.

Observa-se que o desgaste de flanco médio, VB_B , se desenvolve por toda a largura de corte, b , tendo sempre a presença dos desgastes de flanco máximo, $VB_{Bmáx}$, em algumas regiões desse desgastes. Este padrão foi observado em todos os demais testes.

Os perfis de desgaste observados destacam a forte presença de sulcos na direção de fluxo de material da peça, evidenciando a ação do mecanismo de desgaste abrasivo. Como se trata de ferramentas de aço-rápido sem revestimento, e de material da peça de fácil usinagem, a abrasão só pode ter tido origem por grãos da própria ferramenta, destacados do corpo por *attrition* (adesão). Assim, sugere-se que ambos os mecanismos de *attrition* e abrasão são predominantes na evolução do desgaste. Importante salientar que os elementos químicos residuais não alteram este padrão, podendo apenas acelerar ou retardar o desgaste.

Capítulo VI

Conclusões e Sugestões Para Trabalhos Futuros

6.1 Conclusões

Em função dos resultados de usinabilidade obtidos através do teste Volvo (1989), pra verificar a influência dos elementos químicos residuais (Cr, Ni, Cu) no Aço SAE 12L14, pode-se concluir que:

Os elementos químicos residuais realmente influenciam na usinabilidade deste aço, sendo que os níveis residuais mais baixos Cr = -1 (0,08/0,13%), Ni = -1 (0,08/0,13%) e Cu = -1 (0,10/0,15%), correspondente ao material D, e os níveis Cr = 1, Ni = -1 e Cu = -1, que corresponde ao material E, foram os que apresentaram melhor usinabilidade

O material I, com os elementos residuais altos Cr = 1 (0,15/0,20%), Ni = 1 (0,17/0,22%) e Cu = 1 (0,25/0,30%), foi o que apresentou pior usinabilidade.

A diferença dos índices de usinabilidade “B” entre o melhor e o material foi de aproximadamente 13%.

Os elementos Cu e Ni que tiveram maior influencia, na usinabilidade deste aço, e Cr foi o elemento que menos influenciou.

Os materiais com maiores somas das percentuais dos teores de Cr, Ni e Cu, obtiveram os piores índices de usinabilidade.

Os testes com o Aço ABNT 12L14 mostraram que o chumbo tem uma grande ação na usinabilidade dos aços-de-corte-fácil, mas os elementos químicos residuais podem ofuscar a ação destes elementos químicos.

6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros.

Desenvolver um planejamento composto central (PCC), para trabalhar com equações de regressão de segunda ordem e estudar os níveis ótimos dos elementos residuais (Cr, Ni, Cu), através das superfícies e resposta dessas equações.

Analisar o comportamento das propriedades mecânicas na condição ótima.

Verificar a influência de outros elementos químicos residuais (Mo, Sn) usando a mesma metodologia aqui empregada, e as utilizadas por Almeida (2005) e Luiz (2004).

Fazer estudos econômicos para verificar a viabilidade financeira da produção de aços de corte-fácil com residuais ótimos para usinagem.

Capítulo VII

Referências bibliográficas

ABNT, NBR 6162, Movimentos e Relações Geométricas na Usinagem dos Metais - Terminologia, 1989.

ABNT NBR 6163, Conceitos Técnicos de Usinagem – Geometria da Cunha Cortante - Terminologia, 1980.

Aborn, R.A, Role Additives in the Machinability of Steel, International Symposium on Influence of Metallurgy on Machinability of Steel, Tokyo, Japan, pp 381-395, 1977.

Almeida, M.C, Estudo do Efeito dos Elementos Residuais (Cr, Ni e Cu) no Torneamento do Aço de Corte-Fácil ABNT SAE 12L14, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, Setembro de 2005.

Aksawa, T., Sakurai, H, Nakamura, M., Tanaka, T. and Takano, k., “Effects of free cutting additives on the machinability of austenitic stainless steels, Journal of Materials Processing Technology, pp 66-71, 2003.

Apple, C.A, The Relationship Between Inclusions and the Machinability of Steel, Mechanical Working and Steel Processing Proceedings, pp 415-426, 1989.

Arfeld, E. D., Hanum, A. L., Aços de corte Fácil de Baixo, Metalurgia-ABM, Vol. 33, dez, 1977

Atwal, K. S., Reeder, A. and Pike, T. J., Product Characteristics and machinability of bloom cast, free cutting steels; Ironmaking and Steelmaking, vol.16 No 6, pp 419-425, 1989.

Bathia, S. M, Pandey, P.C., Shan, H.S, The Thermal Condition on the Tool Cutting Edge in Intermittent Cutting, Wear, vol 61, pp. 21-30, 1986.

Bas, J., Influencia de las incusones em la maquinabilidade de los aceros, II Jornada de Maquinabilidad de Los Metales, pp. 17, 1985.

Bas, J., A Usinabilidade dos Aços Especiais, Relatório Interno Gerdau S.A, Charquea, Rs, 1995.

Barrozo, M. A. S, Planejamentos de Experimentos. Programa de Pós Graduação em Engenharia Química”, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia Mg, 2003.

Banzatto, D. A e Kronka, S. N., Experimentação Agrícola, Funep Unesp, Jaboticabal SP, pp 245, 1989.

Bellot, J., Aciers pour construction mecanique – Problemes de mise em forme par usinage. CESSID – Centre d’Etudes Supérieures de la Sidérurgie Française, 1977.

Bertrand, C., Couso, J., Desarrollo de Aceros de Construcción Mecánica con Adición de Bismuto para Melhorar la Maquinabilidade sin Deteriorar otras Características de Empleo, ECSC Informe EUR 16830 ES, 1994.

Bertrand, C., Del, S. M, Can we survive without Lead Steels, 4th International Conference on Behaviour of Materials in Machining: Opportunities and Prospects for Improved Operations. IOM Communications Ltd. ISBN 1-86125-086-X. London, pp 123-132, 1988.

Box, G. E and Hunter, J.S., Statistics for Experiments, Printed in the United States of America, 1978.

Box, G. E, Wilson, K. B, On the experimental attainment of optimum condition, J Roy Statistical Soc B 13, citado por Myers, R.H, 1951.

Capuccio, G., Ferrante, A. e Bas, J. – “Aços inoxidáveis austeníticos com óxidos controlados – uma tecnologia Corfac”, Anais do 5º. Seminário Brasileiro do Aço Inoxidável – Inox 96, pp. 223-238, São Paulo, novembro, 1996.

Chakraverti, G., Pandey, P. C., and Metha, N. K, Proceeding of 5th International Conference on Production Engineering, Tokyo, pp. 209-215, 1984.

Chiaverini, V., Aços e Ferros Fundidos, 4ª Edição, ABM, São Paulo, 1979.

DeArdo, A.J., Garcia, C.I, A Better way to assess Machinability, American Machinist, may 1993.

Diniz, A. E, Marcondes, F. C. e Coppini, N. L, Tecnologia da Usinagem dos Metais, 2ª edição, Art Liber Editora, São Paulo, 2000.

Echevarría, E. e Corcuera, P., Influencia de Los Elementos Residuales En La Maquinabilidad y El Coste de Los Aceros de Facil Maquinabilidad, Agrupación I+D Aceros Especiais, 1987.

Echevarria, E. e Corcuera, P., Influencia de La Composicion Quimica En LA Maquinabilidade, Agrupación I+D Aceros Especiais, 1987.

Eriksson, U, The Quantitative Assessement of Machinability, Machinability Research and Development Center Volvo AB, Trollathan, Sweden, 1992.

Ferraresi, D., Fundamentos da Usinagem dos Metais, ed. Edgard Blucher, São Paulo, 1977.

Garvey, T.M, Tata , H. J. Factor Affecting the Machinability of Low-Carbon Free-Machining Steels, Mechanical Working of Steel, New York, v.2, n.26, pp 99-132, 1965.

Garvey, T.M, Tata , H. J., Machinability na Mettallurgy of Ressulfuirized Low-Carbon Free-Machining Steels, American Society of Tool and Manufacturing Engineers, 1966.

Hashimura, M., Kanisawa, H., Hirata, H. and Naito, K., Development of Lead Free Micro Alloyed Steel for Crank Shafts, Nippon Steel Technical Report, No 88 july, pp 76-80, 1990.

Jha, G. and Sharma, S., “Desenvolpment of Free Machining Steels, Tool & Alloy Steels, pp.5-12, 1990, 2003.

Jiang, L., Cui, Kun and Hannu, H., Effects of the Composition, Shape Factor and Area Fraction of Sulfide Inclusions on the Machinability of Re-Sulfurized Free Machining Steel”, Journal of Materials Processing Technology, pp 160-165, 1994.

Kajoika, H., Free-Cutting Steel, Nippon Steel Techninical Report, Overseas nº 3 June, pp 49-66, 1973.

Klujszo, L. A. C. e Soares, R. B., Elementos que melhoram a usinabilidade de aços, Congresso de Usinagem, São Paulo, SP, outubro, 2004.

Lagneborg, R., The influence os Non-Metallic Inclusions on Properties in Steel-A review, Swedish Symposium on Non-Metallic Inclusions in Steel, Spondored by Swedish Institue for Metal Research, April 27-29 pp 285-352, 1981.

Luiz, N. E., Estudo do Efeito de Residuais Metálicos (Cr, Ni e Cu) sobre a Usinabilidade do Aços de Corte Livre – Baixo Carbono, Qualificação de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia , Uberlândia, MG, julho 2005.

Luiz, N.E., Galvanini, L., Machado, A.R, Tecnologia da Melhoria da Usinabilidade dos Aços Uma Revisão, 9º Colóquio de Usinagem, Universidade Federal de Uberlândia, 2003.

Machado, A.R. e da Silva. M.B., Usinagem dos Metais, Apostila Didática, 6ª edição, Universidade Federal de Uberlândia, MG, 2004.

Machado, A.R, Rede Em Materiais Avançados Com Usinabilidade Melhorada 400607/2004-2 - FVA 01/03 APQ 2 fase/Edital FVA/CNPq 01/2003 - Nanotecnologias e Materiais Avançados , 2004.

Malmberg, T., Runnsjo, G., Aronsson, B., The Addition of Selenium and Tellurium to Carbon Steels: Their Recovery and Effect on Inclusions and Machinability, Sacandinavian Jurnal of Metallurgy 3, pp 169-172., 1974.

Marston, G.J., Murray, J.D, Machinability of Low-Carbon Free-Cutting Steel, Journal of The Iron and Steel Institue , pp. 568-575, June, 1970.

Metals Handbook, vol 16 (1989), 9th Edition, -Machining – ASM International, USA.

Mill, B. and Redford, A.H, Machinability of Engineering Materials, Apliede Science Publishers, London and New York, pp 98-107, 1989.

Molinero, J y Bertrand, C, El dominio del control de las inclusions de sulfuro, Informe PR3-3 de Agrupación I+D Aceros Especiales, 1985.

Molinero, J. y Jimenez, A. M., Estudio Teorico de Adiciones Especiales Para Mejorar La Maquinabilidad, Agrupación I+D Aceros Especiales, 1987.

Motogomery, D.C, Design and Anlysis of Experiments, 5^o edição, Ed John Wiley & Sons, 2000.

Motta, M. F, Influência do Fluído de Corte no Torneamento do Aço ABNT 8640, Disstertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlânida, MG, dezembro de 1995.

Murphy, D. W., Aylward, P. T., Machinability of Steel, New York, Gordon and Breach Science Publishers, 39 p, 1971.

Myers, R. H., Response Surface Methodology, Ann Arbos, Mich , Edwards Brothers (Distributon), Virginia, 1976.

Norma Iso 3685, (1993), Tool life testing with single-point turning tools, International Standard 2^a Edition.

Palmai, Z., Cutting Temperature in Intermittent Cutting, International Journal of Machine Tools Manufacture, vol 27(02), pp. 262-274, 1987.

Padro, E. L, Pimentel, M.F., Usinabilidade de Aços de Cote Fácil baixo carbono. Artigo publicado na Revista Siderúrgica Brasil, Grips Editora – Ano 5, N^o 20, setembro/outubro de 2004.

Padro, E. L, Pimentel, M.F., Produção de Aços de Cote Fácil na Aços Villares, Worshop de Materiais Avançados com Usinabilidade Melhorada, Campinas, SP., julho 2004.

Pierson, G., Free machinig steels: evolution of process and product performance, 59th Annual convention of the Wire Associantion Internacional, Atlanta, GA ,april, pp 40-45, 1990.

Ramalingam,S., Thomann, B., Basu, K. and Hazra, J., The Role of Sulfide Type and of Refractory Inclusions in the Machinability of Free Cutting Steels, Influence of Metalurgy on Machinability, American Society for Metals, Metals Park, pp 111-129, 1975.

Sandvik., Modern Metal Cutting — A Practical Handbook, Sandvick Coromant, Sweeden, 1994.

Sims, C.E, Effects of Various Deoxidizers on the Structure of Sulfide Inclusions, Trans. Afs, vol. 57, pp.233-248, 1949.

Somekawa, M., Kaiso, M. and Matsushima, Y., Free Cutting Non-Lead Steels, Kobelco Techonology Review No 24, pp 9-13, 2001.

The Volvo Laboratory for Mfg Research, Trollhattan, Sweden, The Volvo Standard Machinability Test, Std. 1018.712, 1989.

Tipnis V. A. and Cook N. H., Influence of MnS-Bearing Inclusions on Flow and Fracture in Machining Shear Zone , Mechanical Working and Steel processing 4, Proc. Eighth Mechanical Working and Steel Processing Conference,Pitssburgh, November 29 to December 3, pp 285-308, 1965.

Troiani, F., Aços Ressulfurados de Corte Fácil, Artigo Publicado na revista o Mundo da Usinagem, editora Sandvik, Brasil, 2004.

Trent, E. M. and Wright, P.K, Metal Cutting , 4rd Edition, Butherwords, London, ISBN 0408108568, pp 245., 2000.

Tsunekage, N., Kobayashi, K. and Tsubakino, H., Machinability and Properties of Ferrite-Perlite Type Microalloyed Steels Containing Sulfur-Calcium-Hexagonal Doron Nitiride or Bismuth-Boron”, Proceedings of the International Conference on Steel and Society, Osaka, Japan, pp. 299-302, 2000.

Vieira, J.M, Machado, A.R and Ezugwu, Performance of cutting fluids during face milling os steels, Journal od Materials Processing Technology, 1997.

Vucetic, F.J., Fernandes C. P. Souza, R.P. , Lima, P. W. e Silva, A.J ,1989, Relatório de Aços Ressulfurados, pp 45, 1989.

Yaguchi, H., Effect of MnS inclusion Size on Machinability of Low Carbon, Leaded, Resulfurized Free Machining Steel, J.Aplied Metalworking, vol 4, pp 249-257, 1986.

Yaguchi , H., 1990, Effect os soft additives (Bi, Pb) on formation of bult-up-edge, Bismuth Institue Bulletin, 1990.

Yamanet, Y., Hayashi, K. and Narutaki, N., Free Cutting Cast Irons Base don Non-Metalic Inclusions, Second Internacional Conference on the Behaviour of Materiais in Machining, 1991.

Yeo, R.B.G, 1967, The effect of oxygen in ressulfurized steels, Journal of Metals, pp 29-32, 1967.

Whang, k. K., Tsao, K. C., Wu, S. M, Investigation of Face-Milling Tool Temperatures by Simulation Techniques, Journal of Engineering for Industry, pp. 772-780, august 1969.

Wise, M. L. H., Milovic, R., Ranges of Application of free-cutting steels and recommended tool materials”, Materials and Science Technology, October Vol 4, pp 933, 1988.

Anexos

Anexo 1

Valores do desgastes medidos a cada 10 passadas de todos os materiais utilizados neste trabalho.

A1			A2			A3		
Número de Passada	Volume Removido cm ³	Vb Máx	Número de Passada	Volume Removido cm ³	Vb Máx	Número de Passada	Volume Removido cm ³	Vb Máx
10	19,6	0,10	10	19,6	0,11	10	19,6	0,10
20	39,2	0,17	20	39,2	0,18	20	39,2	0,15
30	58,8	0,22	30	58,8	0,24	30	58,8	0,21
40	78,4	0,28	40	78,4	0,28	40	78,4	0,27
50	98	0,35	50	98	0,32	50	98	0,35
60	117,6	0,40	60	117,6	0,37	60	117,6	0,38
70	137,2	0,43	70	137,2	0,42	70	137,2	0,42
80	156,8	0,48	80	156,8	0,48	80	156,8	0,47
90	176,4	0,55	90	176,4	0,54	90	176,4	0,52
100	196	0,59	100	196	0,60	100	196	0,59
110	215,6	0,64	110	215,6	0,66	110	215,6	0,66
118	231,28	0,70	117	229,32	0,70	118	231,28	0,70
120	235,2	0,71	120	235,2	0,72	120	235,2	0,71

B1			B2			B3		
Número de Passada	Volume Removido cm ³	Vb Máx	Número de Passada	Volume Removido cm ³	Vb Máx	Número de Passada	Volume Removido cm ³	Vb Máx
10	19,60	0,12	10	19,60	0,13	10	19,6	0,12
20	39,20	0,20	20	39,20	0,22	20	39,2	0,2
30	58,80	0,27	30	58,80	0,29	30	58,8	0,27
40	78,40	0,33	40	78,40	0,34	40	78,4	0,34
50	98,00	0,39	50	98,00	0,4	50	98	0,4
60	117,60	0,44	60	117,60	0,45	60	117,6	0,45
70	137,20	0,49	70	137,20	0,5	70	137,2	0,51
80	156,80	0,54	80	156,80	0,54	80	156,8	0,56
90	176,40	0,59	90	176,40	0,59	90	176,4	0,61
100	196,00	0,64	100	196,00	0,64	100	196	0,66
110	215,60	0,68	110	215,60	0,68	108	231,28	0,7
114	223,44	0,70	113	221,48	0,7	110	215,6	0,71
115	225,40	0,71	115	225,40	0,72			

C1			C2			C3		
Número de Passada	Volume Removido cm ³	Vb Máx	Número de Passada	Volume Removido cm ³	Vb Máx	Número de Passada	Volume Removido cm ³	Vb Máx
10	19,60	0,12	10	19,60	0,12	10	19,60	0,12
20	39,20	0,20	20	39,20	0,20	20	39,20	0,2
30	58,80	0,26	30	58,80	0,26	30	58,80	0,26
40	78,40	0,32	40	78,40	0,32	40	78,40	0,31
50	98,00	0,37	50	98,00	0,38	50	98,00	0,36
60	117,60	0,42	60	117,60	0,43	60	117,60	0,41
70	137,20	0,48	70	137,20	0,48	70	137,20	0,46
80	156,80	0,52	80	156,80	0,53	80	156,80	0,51
90	176,40	0,57	90	176,40	0,58	90	176,40	0,56
100	196,00	0,62	100	196,00	0,63	100	196,00	0,61
110	215,60	0,67	110	215,60	0,68	110	215,60	0,66
115	225,40	0,70	118	231,28	0,70	115	225,40	0,7
			120	235,20	0,71	120	235,20	0,73

D1			D2			D3		
Número de Passada	Volume Removido cm ³	Vb Máx	Número de Passada	Volume Removido cm ³	Vb Máx	Número de Passada	Volume Removido cm ³	Vb Máx
10	19,60	0,80	10	19,60	0,090	10	19,60	0,090
20	39,20	0,15	20	39,20	0,160	20	39,20	0,170
30	58,80	0,20	30	58,80	0,230	30	58,80	0,220
40	78,40	0,24	40	78,40	0,290	40	78,40	0,270
50	98,00	0,30	50	98,00	0,340	50	98,00	0,320
60	117,60	0,35	60	117,60	0,390	60	117,60	0,370
70	137,20	0,40	70	137,20	0,430	70	137,20	0,420
80	156,80	0,44	80	156,80	0,480	80	156,80	0,470
90	176,40	0,48	90	176,40	0,530	90	176,40	0,520
100	196,00	0,53	100	196,00	0,570	100	196,00	0,570
110	215,60	0,58	110	215,60	0,600	110	215,60	0,620
120	235,20	0,63	120	235,20	0,640	120	235,20	0,670
130	254,80	0,70	130	254,80	0,680	126	246,96	0,700
			133	260,68	0,700	130	254,80	0,720
			135	264,60	0,720			

E1			E2			E3		
Número de Passada	Volume Removido cm ³	Vb Máx	Número de Passada	Volume Removido cm ³	Vb Máx	Número de Passada	Volume Removido cm ³	Vb Máx
10	19,60	0,10	10	19,60	0,11	10	19,60	0,09
20	39,20	0,18	20	39,20	0,18	20	39,20	0,17
30	58,80	0,25	30	58,80	0,24	30	58,80	0,23
40	78,40	0,30	40	78,40	0,28	40	78,40	0,29
50	98,00	0,34	50	98,00	0,33	50	98,00	0,34
60	117,60	0,40	60	117,60	0,38	60	117,60	0,38
70	137,20	0,44	70	137,20	0,43	70	137,20	0,42
80	156,80	0,50	80	156,80	0,47	80	156,80	0,46
90	176,40	0,54	90	176,40	0,51	90	176,40	0,51
100	196,00	0,57	100	196,00	0,55	100	196,00	0,58
110	215,60	0,61	110	215,60	0,60	110	215,60	0,63
120	235,20	0,67	120	235,20	0,67	120	235,20	0,68
124	243,04	0,70	125	245,00	0,70	126	246,96	0,70
130	254,80	0,72	130	254,80	0,73	130	254,80	0,74

F1			F2			F3		
Número de Passada	Volume Removido cm ³	Vb Máx	Número de Passada	Volume Removido cm ³	Vb Máx	Número de Passada	Volume Removido cm ³	Vb Máx
10	19,60	0,10	10	19,60	0,11	10	19,60	0,10
20	39,20	0,18	20	39,20	0,18	20	39,20	0,18
30	58,80	0,25	30	58,80	0,25	30	58,80	0,25
40	78,40	0,31	40	78,40	0,30	40	78,40	0,30
50	98,00	0,37	50	98,00	0,35	50	98,00	0,36
60	117,60	0,42	60	117,60	0,40	60	117,60	0,42
70	137,20	0,47	70	137,20	0,45	70	137,20	0,47
80	156,80	0,52	80	156,80	0,50	80	156,80	0,51
90	176,40	0,57	90	176,40	0,56	90	176,40	0,56
100	196,00	0,61	100	196,00	0,60	100	196,00	0,67
110	215,60	0,65	110	215,60	0,65	110	215,60	0,65
117	229,32	0,70	118	231,28	0,70	120	235,20	0,70
120	235,20	0,72	120	235,20	0,71			

G1			G2			G3		
Número de Passada	Volume Removido cm ³	Vb Máx	Número de Passada	Volume Removido cm ³	Vb Máx	Número de Passada	Volume Removido cm ³	Vb Máx
10	19,60	0,12	10	19,60	0,13	10	19,60	0,13
20	39,20	0,22	20	39,20	0,19	20	39,20	0,22
30	58,80	0,30	30	58,80	0,25	30	58,80	0,30
40	78,40	0,37	40	78,40	0,30	40	78,40	0,36
50	98,00	0,42	50	98,00	0,35	50	98,00	0,42
60	117,60	0,47	60	117,60	0,41	60	117,60	0,47
70	137,20	0,52	70	137,20	0,47	70	137,20	0,52
80	156,80	0,56	80	156,80	0,51	80	156,80	0,58
90	176,40	0,60	90	176,40	0,56	90	176,40	0,63
100	196,00	0,65	100	196,00	0,62	100	196,00	0,68
110	215,60	0,70	110	215,60	0,67	118	231,28	0,70
			114	223,44	0,70	110	215,60	0,72
			115	225,40	0,71			

H1			H2			H3		
Número de Passada	Volume Removido cm ³	Vb Máx	Número de Passada	Volume Removido cm ³	Vb Máx	Número de Passada	Volume Removido cm ³	Vb Máx
10	19,60	0,12	10	19,60	0,10	10	19,60	0,10
20	39,20	0,20	20	39,20	0,18	20	39,20	0,18
30	58,80	0,26	30	58,80	0,25	30	58,80	0,24
40	78,40	0,31	40	78,40	0,31	40	78,40	0,28
50	98,00	0,37	50	98,00	0,36	50	98,00	0,34
60	117,60	0,42	60	117,60	0,41	60	117,60	0,40
70	137,20	0,45	70	137,20	0,45	70	137,20	0,43
80	156,80	0,49	80	156,80	0,50	80	156,80	0,48
90	176,40	0,54	90	176,40	0,55	90	176,40	0,53
100	196,00	0,60	100	196,00	0,61	100	196,00	0,58
110	215,60	0,66	110	215,60	0,66	110	215,60	0,64
117	229,32	0,70	117	229,32	0,70	120	235,20	0,70
120	235,20	0,72	120	235,20	0,72			

I1			I2			I3		
Número de Passada	Volume Removido cm ³	Vb Máx	Número de Passada	Volume Removido cm ³	Vb Máx	Número de Passada	Volume Removido cm ³	Vb Máx
10,00	19,60	0,14	10,00	19,60	0,13	10,00	19,60	0,14
20,00	39,20	0,24	20,00	39,20	0,23	20,00	39,20	0,25
30,00	58,80	0,31	30,00	58,80	0,32	30,00	58,80	0,30
40,00	78,40	0,37	40,00	78,40	0,38	40,00	78,40	0,38
50,00	98,00	0,42	50,00	98,00	0,43	50,00	98,00	0,44
60,00	117,60	0,47	60,00	117,60	0,48	60,00	117,60	0,49
70,00	137,20	0,52	70,00	137,20	0,52	70,00	137,20	0,53
80,00	156,80	0,58	80,00	156,80	0,56	80,00	156,80	0,58
90,00	176,40	0,63	90,00	176,40	0,60	90,00	176,40	0,63
100,00	196,00	0,68	100,00	196,00	0,66	100,00	196,00	0,68
105,00	205,80	0,70	108,00	211,68	0,70	106,00	207,76	0,70
110,00	215,60	0,73	110,00	215,60	0,72	110,00	215,60	0,74

Anexo 2

Neste anexo será apresentado a versão original da Norma Volvo

The English language version is the original and the reference in case of dispute.

Den engelska språkversionen är originalversion och skall åberopas i händelse av tvist.

TEST METHOD

Machinability

Steel, nickel, cobalt and titanium alloys

Orientation

This issue differs from issue 2 in that editorial changes have been made.

The standard has also been given a new layout. The note "The English language version is the original and the reference in case of dispute" has also been added.

Contents

- 1 Scope and field of application
- 2 Equipment
- 3 Test pieces
- 4 Test procedure
- 5 Results
- Appendices

1 Scope and field of application

This test method determines a material's machinability by the measurement of cutting tool wear. The method is used to determine the level of machinability and its variations in materials.

Other factors influencing the machinability of a material are cutting force, chip shape, adhesiveness of material (BUE = build up edge and BUL = build up layer) and surface properties. The most important factor is, however, cutting tool wear and, for this reason, this test method is based on this alone.

The machinability of a material is given in the form of an index indicating the ratio (in per cent) of the machinability to the machinability of a free-cutting steel whose machinability has been given the index 100. The index is preceded by the letter B (B-index).

PROVNINGSMETOD

Skärbarhet

Stål-, nickel-, kobolt- och titanlegeringar

Orientering

Denna utgåva skiljer sig från utgåva 2 genom att redaktionella ändringar gjorts.

Standarden har även fått en ny layout. Noten "Den engelska språkversionen är originalversion och skall åberopas i händelse av tvist" har också lagts till.

Innehåll

- 1 Omfattning och tillämpning
- 2 Utrustning
- 3 Provkropp
- 4 Provning
- 5 Resultat
- Bilagor

1 Omfattning och tillämpning

Med denna provningsmetod bestäms ett materials skärbarhet genom mätning av skärverktygets förslitning. Metoden används för att bestämma nivån och variationerna i materialets skärbarhet.

Andra faktorer som påverkas av ett materials skärbarhet är skärkraft, spånform, påkletning (BUE = build up edge och BUL = build up layer) och ytegenskaper. Skärverktygets förslitning är dock den dominerande faktorn och den enda som ingår i denna provningsmetod.

Ett materials skärbarhet anges med ett index som anger skärbarhetens procentuella förhållande till skärbarheten hos ett automatstål vars skärbarhet satts till 100. Indexet föregås av bokstaven B (B-tal).

2 Equipment

- MACHINE: Milling machine or lathe with a special tool holder. Output min 2 kW
- TOOL HOLDER: Milling cutter head as per App. 1
- CUTTING TOOL: High speed steel tool as per App. 2
- SETTING LUG: Tool for fixing the cutting tool in position in the tool holder. See App. 1.
- SHARPENING FIXTURE: When sharpening the cutting tool in a surface grinding machine, a fixture as per Appendix 2 shall be used.
- TEST PIECE HOLDER: Standard chuck or other clamping device adapted to the type of machine used. See example in App. 4.
- CUTTING FLUID: Fine emulsion without EP additives. Concentration 3-5%.
- MEASURING MICROSCOPE: 20-50 times magnification.

3 Test piece

A cylindrical test piece with the following dimensions:

Diameter $50 \pm 0,1$ mm

Length approx. 150 mm

In special cases, a test piece with a diameter down to $32 \pm 0,1$ mm may be used.

The cylinder surface of the test piece shall be machined using a sharp cutting tool (max flank wear 0,2 mm) with cutting data close to the data specified in section 4.2.

4 Test procedure

4.1 Principle

At the machinability test a test piece is machined until a specified wear on the cutting tool has been obtained. Once this wear limit has been reached, the volume of the removed material is calculated. The cutting speed and the removed volume determine the B-index.

The test shall be repeated with different speeds and the values shall be plotted in a logarithmic diagram as shown in diagram. 1. The test results will form a line that is almost straight (A). Lines for constant time have been drawn (B, C and D). These lines are straight and parallel.

2 Utrustning

- MASKIN: Fräsmaskin eller svarv med en speciell verktygshållare. Effekt min 2 kW
- VERKTYGSHÅLLARE: Fråshuvud enligt bil 1
- SKÄRVERKTYG: Snabbstålsverktyg enligt bil 2
- INSTÄLLNINGSKLACK: Verktyg för inställning av skärverktygets läge i verktygshållaren. Se bil 1
- SKÄRPFIXTUR: Vid skärpning av skärverktyget i en planslipmaskin används en fixtur enligt bil 2
- PROVKROPPSHÅLLARE: Standardchuck eller annan fastspänningsanordning anpassad till den typ av maskin som används. Se exempel i bil 4
- SKÄRVÄTSKA: Finemulsion utan EP-tillsatser. Koncentration 3-5 %
- MÄTMIKROSKOP: Förstoring 20-50 gånger

3 Provkropp

En cirkulär cylindrisk kropp med följande dimensioner:

Diameter $50 \pm 0,1$ mm

Längd ca 150 mm

I speciella fall får provkropp med diameter ned till $32 \pm 0,1$ mm användas.

Provkroppens mantelyta skall vara maskinbearbetad med användande av skärdata som är nära de som föreskrivs i avsnitt 4.2 och med ett skarpt skärverktyg (max fasförslitning 0,2 mm).

4 Provning

4.1 Princip

Vid skärbarhetsprovningen bearbetas en provkropp tills en bestämd förslitning erhållits på skärverktyget. När denna förslitningsgräns har nåtts beräknas den avverkade materialvolymen. Skärhastigheten och den avverkade materialvolymen bestämmer B-talet.

Provet upprepas med olika skärhastigheter och resultaten förs in i ett logaritmiskt diagram enligt diagram 1. Resultaten kommer att beskriva en approximativt rät linje (A). I diagrammet finns linjer för konstant tid inlagda (B, C och D). Dessa är räta och parallella.

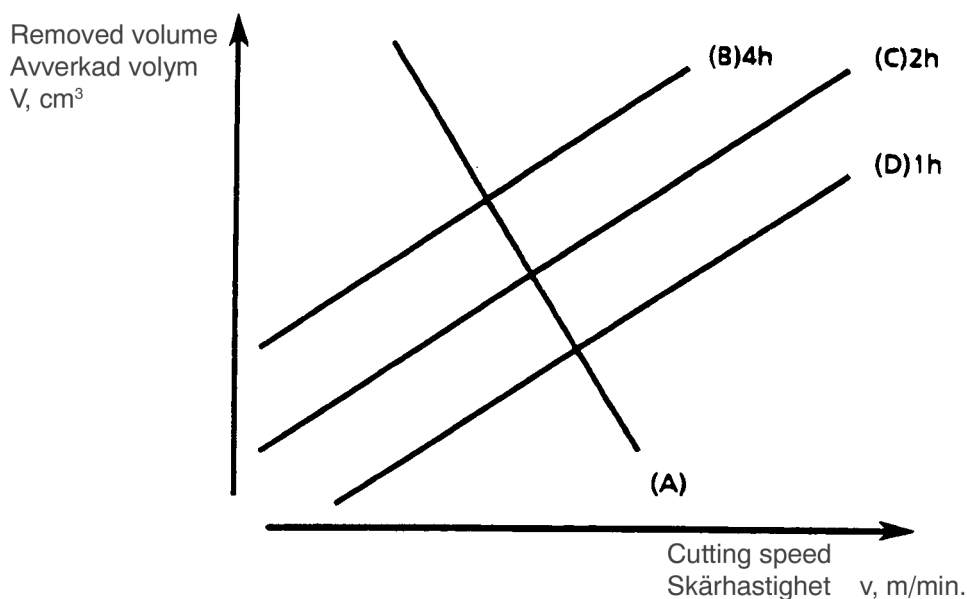


Diagram 1 Log-log diagram of removed volume and cutting speed
Log-log-diagram över avverkad volym som funktion av skärhastigheten

The line for a constant time of two hours (C) is chosen as reference line and graduated in B-values according to the formula

$$B = \frac{\text{Removed volume (cm}^3\text{)}}{2,5}$$

or

$$B = \frac{\text{Cutting speed (m / min)}}{1,25}$$

See diagram 2.

Two hours running time corresponds to approx. 22 minutes of edge contact time. See diagram 6, App. 6.

Linjen för två timmar (C) har valts som referenslinje och graderats i B-tal enligt formeln

$$B = \frac{\text{Avverkad volym (cm}^3\text{)}}{2,5}$$

eller

$$B = \frac{\text{Skärhastighet (m / min)}}{1,25}$$

Se diagram 2.

Två timmars körning motsvarar ungefär 22 min ingreppstid för verktyget. Se diagram 6, bil 6.

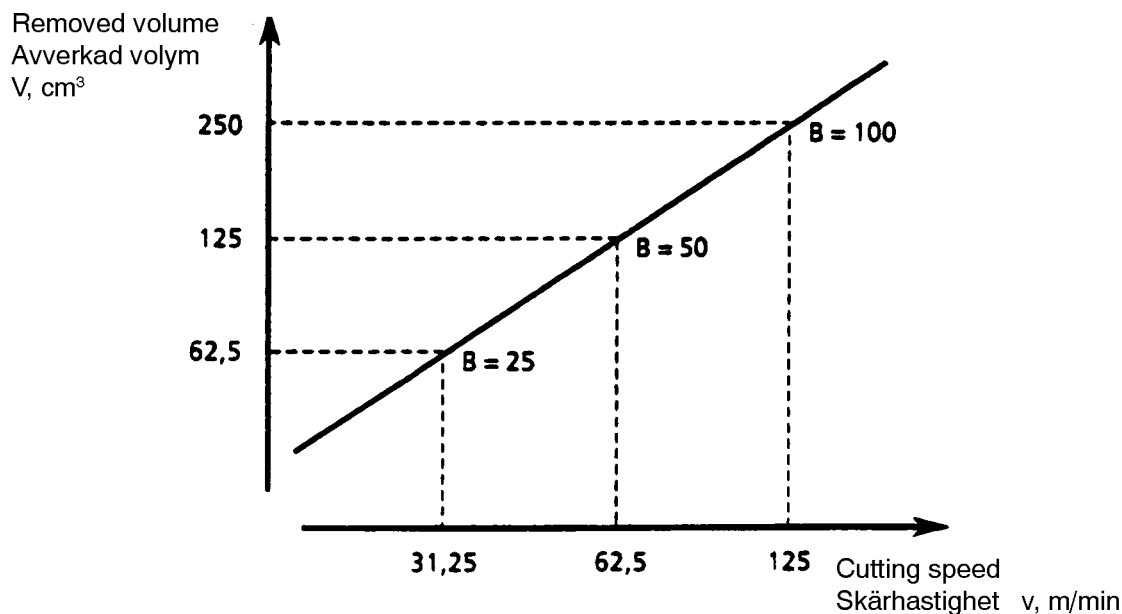


Diagram 2 - Graduation of reference line / Referenslinjens gradering

The intersection between the line of removed volume at the attained wear limit (line A in diagram. 1) and the reference line (line C in diagram. 1) gives the B-index value.

To establish the B-index, it could be necessary to use two different cutting speeds chosen so that the mean values for the removed volumes are placed below and above the reference line. When the mean value is on or close to the reference line only one cutting speed is necessary. See diagram 3.

The cutting speeds selected (v_1 and v_2) must not deviate from the cutting speeds corresponding to the B-index value more than

$$0,2 > \frac{v_B - v_1}{v_B} \text{ och } 0,2 > \frac{v_2 - v_B}{v_B}$$

The number of sub-tests required for each cutting speed can be seen from table 1.

Skärningspunkten mellan linjen för avverkad volym vid uppnådd förslitningsgräns (linjen A i diagram 1) och referenslinjen (linjen C i diagram 1) ger B-talet.

För att fastställa B-talet är kan det vara nödvändigt att använda två olika skärhastigheter valda så att medelvärdena för de avverkade volymerna faller under respektive över referenslinjen. När medelvärdet är på eller nära referenslinjen krävs endast en skärhastighet. Se diagram 3.

De valda skärhastigheterna (v_1 och v_2) får inte avvika från den mot B-talet svarande skärhastigheten (v_B) mer än att

$$0,2 > \frac{v_B - v_1}{v_B} \text{ och } 0,2 > \frac{v_2 - v_B}{v_B}$$

Erforderligt antal delprover vid varje skärhastighet framgår av tabell 1.

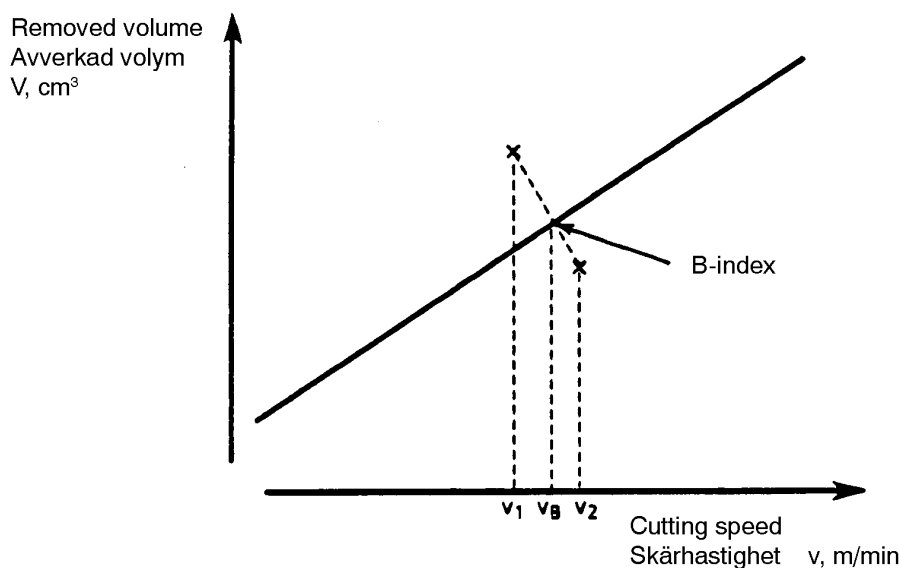


Diagram 3 Interpolation of B-index / Interpolering av B-tal

4.2 Cutting data

Depth of cut:	1,0 ± 0,05 mm
Feed:	0,1 ± 0,005 mm/r (0,1 mm/tooth)
Cutting speed:	Cutting speed shall be adapted to r
Cutting fluid:	Rich flow, approx. 10 l/min
Removed volume:	1,96 cm ³ /cut at 50 mm test piece c
Number of cuts:	In each test, the number of cuts required to reach the established wear limit shall be made

4.2 Skärdata

Skärdjup:	1,0 ± 0,05 mm
Matning:	0,1 ± 0,005 mm/r (0,1 mm/tand)
Skärhastighet:	Skärhastigheten anpassas till prov-materialet
Skärvätska:	Rikligt flöde, ca 10 l/min
Avverkad volym:	1,96 cm ³ /skär vid 50 mm provstavsdiameter
Antal skär:	I varje prov görs erforderligt antal skär för att uppnå den fastställda förslitningsgränsen

4.3 Number of sub-tests

A minimum of three and a maximum of six sub-tests shall be made for each cutting speed. The number depends on the variation in the test results and can be seen from table 1. The variation referred to is the relationship between the minimum and maximum volume of material removed (min and max number of cuts).

4.3 Antal delprov

Minst tre och högst sex delprov görs vid varje vald skärhastighet. Antalet är beroende på spridningen i provningsresultaten och framgår av tabell 1. Med spridning avses här förhållandet mellan min och max avverkad volym (min och max antal skär).

Table / Tabell 1

Ratio / Förhållande min / max	Number of tests Antal delprov
1,0 - 0,93	3
0,93 - 0,87	4
0,87 - 0,81	5
0,81 - 0,75	6
< 0,75	See note / Se anm

Note: If ratios $< 0,75$ are obtained, the material is not approved with respect to machinability

4.4 Wear limit

The wear limit is reached when the maximum flank wear of the cutting tool is 0,7 mm.

Details on measurement of wear are given in Appendix 3.

4.5 Sharpening of cutting tool

The sharpening of the tool shall be carried out in accordance with Appendix 2.

4.6 Procedure

Fix the test piece in the holder. The projecting portion of the test piece shall not exceed the diameter of the test piece, that is, normally max. 50 mm.

Trim the end surface of the test piece. Use a newly sharpened "trimming tool" of the same kind as the cutting tools for the test except for the fact that it need not be wet blasted. The cutting tool shall be fixed in the tool holder by means of the setting lug.

Trimming shall always be carried out on new test pieces and between the sub-tests if one and the same test piece is used for several sub-tests.

Choose a cutting speed for the trimming operation which corresponds to the anticipated speed or somewhat less and a feed of 0,1 mm/r.

The cutting depth shall be such that the end surface of the test piece is trimmed.

During trimming, the flank wear of the cutting tool must not exceed 0,2 mm. If greater tool wear is obtained, an additional trimming operation shall be run at a lower cutting speed.

Change to a newly sharpened and wet blasted cutting tool. Use the setting lug when fitting the tool in the tool holder. Set the cutting feed desired for the test and check that the feed is the one specified, 0,1 mm/r. (In order not to use too much test material and time when trying out a suitable cutting speed, it is recommended to start with a speed that is somewhat too high rather than one that is too low.)

The flank wear after the first cut gives an indication of the suitability of the cutting speed. If a suitable speed has been chosen, the flank wear ought to be within the range 0,05-0,10 mm. After five cuts, a more reliable assessment of the suitability of the cutting speed can be made, that is, if the removed volume gives a value near the reference line once the wear limit is attained.

Anm. Om förhållandet blir $< 0,75$ är materialet inte godkänt med avseende på skärbarhet

4.4 Förslitningsgräns

Förslitningsgränsen nås när skärverktygets maximala fasförslitning uppgår till 0,7 mm.

Mätning av fasförslitningen beskrivs i bilaga 3.

4.5 Skärpning av skärverktyg

Skärpning av verktyget skall utföras enligt beskrivning i bilaga 2.

4.6 Utförande

Spänn fast provkroppen i hållaren. Provkroppens utskjutande del skall inte vara större än provkroppsdiametern, dvs normalt max 50 mm.

Skär ren provkroppens ändyta. Använd ett nyskärt "renskärsverktyg" som skall vara av samma sort som skärverktygen för provet med undantag av att det inte behöver vara blästrat. Skärverktyget fixeras i verktygshållaren med hjälp av inställningsklacken.

Renskar skall alltid göras på ny provkropp och mellan delproven om samma provkropp används för flera delprov.

Välj en skärhastighet för renskåret som överensstämmer med den tilltänkta eller är något lägre och matningen 0,1 mm/r.

Välj skärdjupet så att provkroppens ändyta blir renskuren.

Vid renskåret får skärverktygets fasförslitning inte överstiga 0,2 mm. Erhålls större fasförslitning körs ett nytt renskar med lägre skärhastighet.

Byt till ett nyskärt och blästrat skärverktyg. Använd inställningsklacken när verktyget monteras i verktygshållaren. Välj för provet önskad skärhastighet och kontrollera att matningen är den föreskrivna, 0,1 mm/r. (För att inte förbruka för mycket provmaterial och tid vid utprovning av lämplig skärhastighet rekommenderas att hellre börja med en något för hög hastighet än med en för låg).

Fasförslitningen efter första skäret ger en indikation om skärhastigheten är lämplig. Vid lämpligt vald skärhastighet bör fasförslitningen ligga inom intervallet 0,05-0,10 mm. Efter fem skär kan en säkrare bedömning göras om skärhastigheten är lämplig, dvs om den avverkade volymen när förslitningsgränsen nås ger ett värde tillräckligt nära referenslinjen.

If the cutting speed is considered suitable, the test shall be continued. The number of cuts between the measurements of the flank wear shall be selected taking the obtained wear and the anticipated volume removed into consideration so that 5 to 10 measurements need to be made before the wear limit is reached. Measurements shall be made at closer intervals when approaching the limit size of 0,7 mm flank wear.

If required, the test piece shall be moved outwards in the test piece holder. If the test piece is moved during a sub-test, no extra trimming shall be made after the move.

When three sub-tests have been made, the relationship between the smallest and largest volume removed shall be calculated and table 1 shall be checked to see if additional sub-tests are required. After each additional sub-test it shall be checked if the relationship has been changed, thus leading to a modification in the number of sub-tests.

At a repeated test, with a different cutting speed, the speed should be chosen so that the estimated volume removed in the diagram lies closer to the reference line and preferably on the opposite side compared with the preceding test.

If the first value obtained lies in the immediate vicinity of the reference line, i.e. within the interval 15-30 min of edge contact time acc. to the diagram in Appendix 6, no further test is needed. The B-index is then established by drawing a line through the test value at right angles to the reference line. The intersection between this line and the reference line gives the B-index.

5 Result

5.1 Statistical evaluation

The statistical evaluation is intended to indicate the B-index and its tolerance zone.

Bedöms skärhastigheten lämplig fortsätts provet. Antalet skär mellan mätningarna av fasförslitningen väljs nu med hänsyn till erhållen förslitning och beräknad avverkningsvolym så att 5 till 10 mätningar behöver göras fram tills förslitningsgränsen nås. Tätare mätningintervall väljs när man närmar sig gränsvärdet 0,7 mm fasförslitning.

Vid behov flyttas provkroppen utåt i provkroppshållaren. Vid flyttning under pågående delprov görs inget extra renskär efter flyttningen.

När tre delprov körts beräknas förhållandet mellan minsta och största avverkade volym och i tabell 1 kontrolleras om fler delprov erfordras. Efter varje ytterligare delprov kontrolleras om förhållandet ändrats så att antalet delprov påverkas.

Vid upprepat prov med annan skärhastighet bör denna väljas så att beräknad avverkad volym i diagrammet ligger närmare referenslinjen och helst på dess motsatta sida jämfört med föregående prov.

Ligger det först erhållna värdet i omedelbar närhet av referenslinjen, dvs inom intervallet 15-30 minuters ingreppstid enligt diagrammet i bilaga 6, behöver inget ytterligare prov köras. B-talet bestäms då genom att en linje dras genom provvärdet vinkelrätt mot referenslinjen. Skärningspunkten med referenslinjen ger B-talet

5 Resultat

5.1 Statistisk utvärdering

Den statistiska utvärderingen har till syfte att ange B-talet och dess toleransområde.

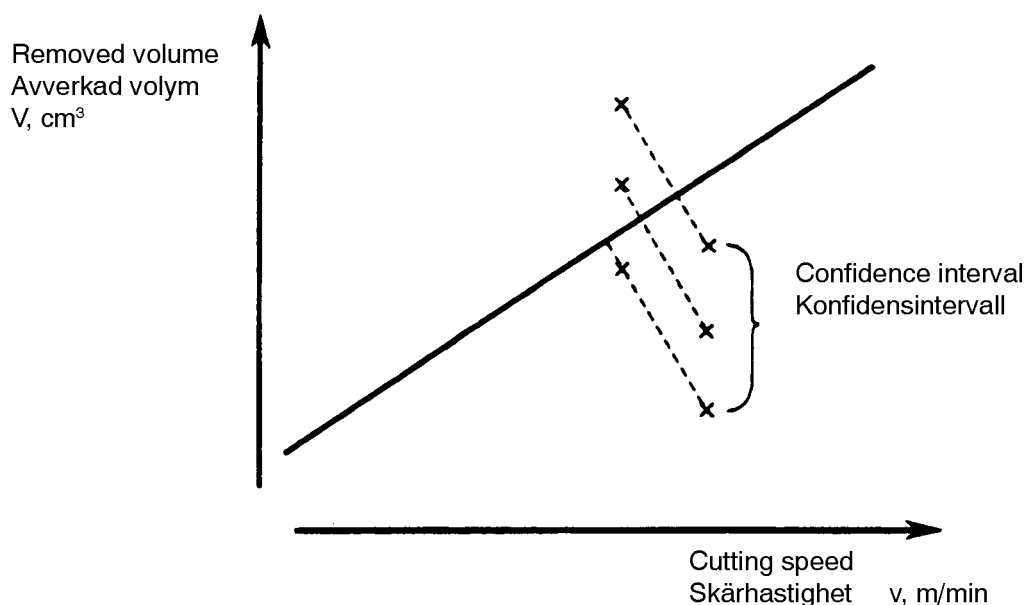


Diagram 4 Confidence intervals of removed volume / Konfidensintervall för avverkad volym

To determine the confidence interval of the B-index a confidence interval shall be determined for the volume of removed material at each cutting speed. See diagram. 4.

The distribution is considered to be normal and the confidence interval shall thus be determined using the Student T-distribution. The confidence interval shall be a symmetrical interval with a 95 % probability.

The corresponding confidence interval for the B-index can be read off on the reference line and is limited by the lines between the upper and lower confidence limits for the volume removed. If the lower confidence lines do not intersect the reference line, the point of intersection can be determined through extrapolation. See diagram 4. Formulas and tables for calculation can be found in Appendix 5.

För att beräkna B-talets konfidensintervall beräknas först ett konfidensintervall för den vid varje skärhastighet avverkade materialvolymen. Se diagram 4.

Spridningen anses vara normalfördelad och konfidensintervallet skall således beräknas med användande av Student T-fördelning. Konfidensintervallet skall vara ett symmetriskt intervall med 95 % sannolikhet.

Motsvarande konfidensintervall för B-talet avläses på referenslinjen och begränsas av linjerna mellan övre och undre konfidensgränserna för den avverkade materialvolymen. Om de sistnämnda linjerna inte skär referenslinjen kan skärningspunkten bestämmas genom extrapolering. Se diagram 4. Formler och tabeller för beräkning återfinns i bilaga 5.

Appendix / Bilaga 1

Tool holder

The drawing for the tool holder, drawing No. 9 029 321 can be ordered from Volvo Technology Corporation, Dept 6858, M1.6, S-405 08 GÖTEBORG, Sweden.

Verktugshållare

Ritning på verktygshållaren, ritning nr 9 029 321, kan beställas från Volvo Technology AB, Avd 6858, M1.6, 405 08 GÖTEBORG.

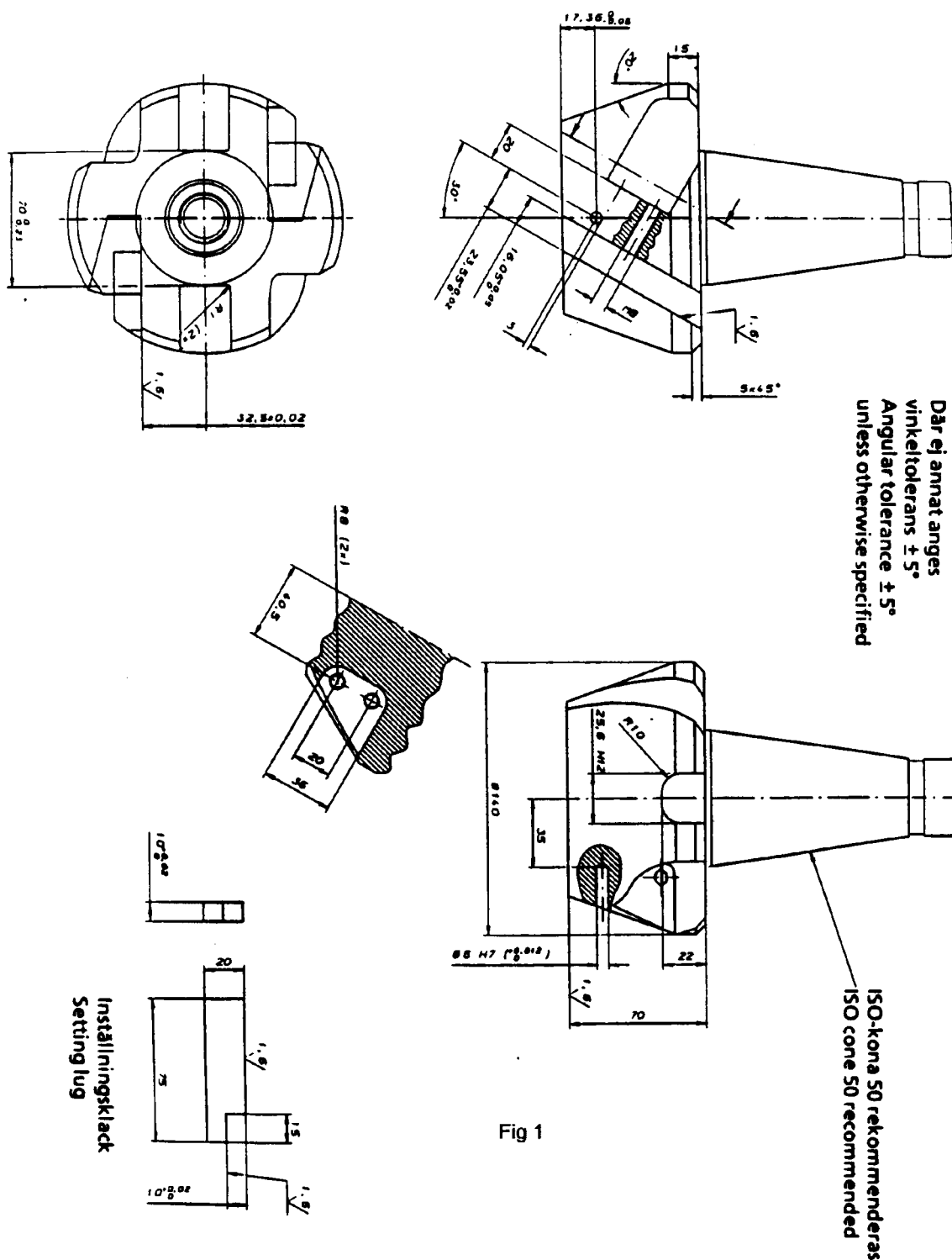


Fig 1

Fig. 1

Appendix / Bilaga 2

Cutting tools

1 Material

The cutting tool should be made of powder high speed steel. The composition of the material shall be as per Table 2.

1.1 Composition

Table / Tabell 2

	C	Si	Mn	Cr	Mo	W	Co	V	P	S
min %	0.82	0,15	0,20	4,3	0,8	18,2	10.2	1.5	-	-
max %	0.85	0,30	0,40	4,8	1,2	18,8	10.8	1.7	0.030	0.020

1.2 Heat treatment

Annealing max 850 °C for max 10 hours

Hardening 1290 ± 10 °C, quenching in salt bath
450 - 500 °C

Tempering 1 x 1 h at 570 ± 5 °C and 1 x 1 h at
560 ± 5 °C

1.3 Austenite grain size

The mean diameter shall be 20-25 µm. The grain size shall be determined as per [STD 1013,141](#), method 1.2.

1.4 Hardness

Mean hardness 62,5-63,5 HRC.

The hardness shall be measured at three different points on the cutting tool and the mean hardness shall be calculated. Individual results shall be within a range of 61,5 - 64,5 HRC.

The hardness is determined as per [STD 1014,312](#). If the hardness does not fall within the given tolerances, an adjustment tempering be done at max 590 °C for max one hour.

Skärverktyg

1 Material

Skärverktyget skall vara tillverkat av pulversnabbstål. Materialets sammansättning skall vara enligt Tabell 2.

1.1 Sammansättning

1.2 Värmebehandling

Glödgning max 850 °C i max 10 timmar

Härdning 1290 ± 10 °C, kylning i saltbad
450 - 500 °C

Anlöpning 1 x 1 h vid 570 ± 5 °C och 1 x 1 h vid
560 ± 5 °C

1.3 Austenitkornstorlek

Medeldiametern skall vara 20-25 µm. Kornstorleken bestäms enligt [STD 1013,141](#), metod 1.2.

1.4 Hårdhet

Medelhårdhet 62,5-63,5 HRC.

Hårdheten mäts på tre olika ställen på skärverktyget och medelhårdheten beräknas. Enskilt mätvärde skall ligga inom intervallet 61,5-64,5 HRC.

Hårdheten bestäms enligt [STD 1014,312](#). Om hårdheten ej hamnar inom givna toleranser, kan en justerande anlöpning ske vid max 590 °C i max en timma.

1.5 Correction factor

Every cutting tool, that is delivered from Volvo's Bearbetningslaboratorium at Volvo Flygmotor AB in Trollhättan, has been "tagged" with a correction factor, which is a calibration value, based on a test in the reference material to eliminate small variations between individual cutting tools.

The correction factor is used for calculation of the machined material volume. This in turn gives the B-index.

2 Form

The form and dimensions of the tool can be seen from figure 2.

3 Marking

The cutting tools shall be marked so that each tool is given a unique designation.

1.5 Korrektionsfaktor

Varje skärverktyg, som levereras från Volvos Bearbetningslaboratorium vid Volvo Flygmotor AB i Trollhättan, har försetts med en korrektionsfaktor, som är ett kalibreringsvärde, baserat på prov i referensmaterialet, för att eliminera små variationer mellan individuella skärverktyg.

Korrektionsfaktorn används vid beräkning av avverkad materialvolym, som i sin tur ger B-talet.

2 Form

Verktygets form och dimensioner framgår av figur 2.

3 Märkning

Skärverktygen skall märkas så att varje verktyg får en unik beteckning.

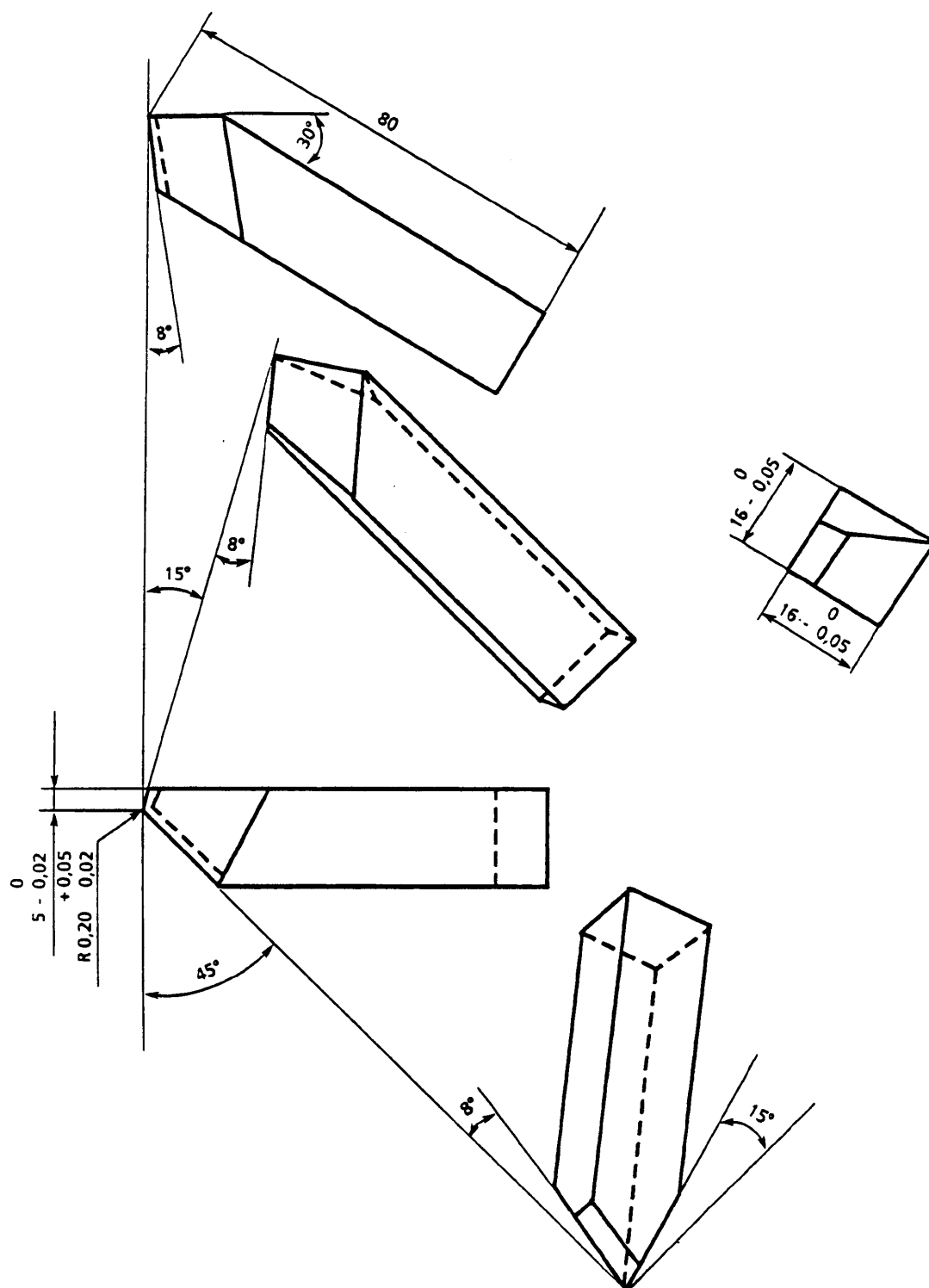


Fig. 2 Cutting tools / Skärverktyg

4 Sharpening

4.1 Standardized method

Sharpening in surface grinding machine using a fixture as shown in figure 3.

4 Skärpning

4.1 Standardiserad metod

Skärpning i planslipmaskin med hjälp av en fixtur enligt figur 3.

The drawing for the sharpening fixture, drawing No. 9 029 322 can be ordered from Volvo Technology Corporation, Dept 6858, M1.6, S-405 08 GÖTEBORG, Sweden.

Method: Surface grinding with wheel edge and reciprocating table.

Grinding wheel: Designation, White A60 H8V

Peripheral speed: 35 m/s + 0 / -15 %

Table speed: Min 25 m/min, max 50 m/min.

Coolant: Synthetic cutting fluid or fine emulsion.

Grinding shall always be carried out towards the edge of the cutting tool.

Before the cutting tool is sharpened, setting of cuts shall be made with a work allowance of 0,65 mm on the clearance side of the edge. For this purpose, a setting gauge for size 0,65 mm shall be used.

Ritning på skärpfixturen, ritning nr 9 029 322, kan beställas från Volvo Technology AB, Avd 6858, M1.6, 405 08 GÖTEBORG.

Metod: Planslipning med skivans periferi och växelgående bord.

Slipskiva: Beteckning, Vit A60 H8V

Periferihastighet: 35 m/s + 0 / -15 %

Arbetsbordets rörelsehastighet: Min 25 m/min, max 50 m/min

Kylmedel: Syntetisk skärvätska eller finemulsion

Slipriktningen skall alltid vara mot skärverktygets egg.

Vid inspanning av skärverktyget i slipfixturen matas verktyget fram 0,65 mm på släppningssidan. Därvid används ett inställningsmått för 0,65 mm.

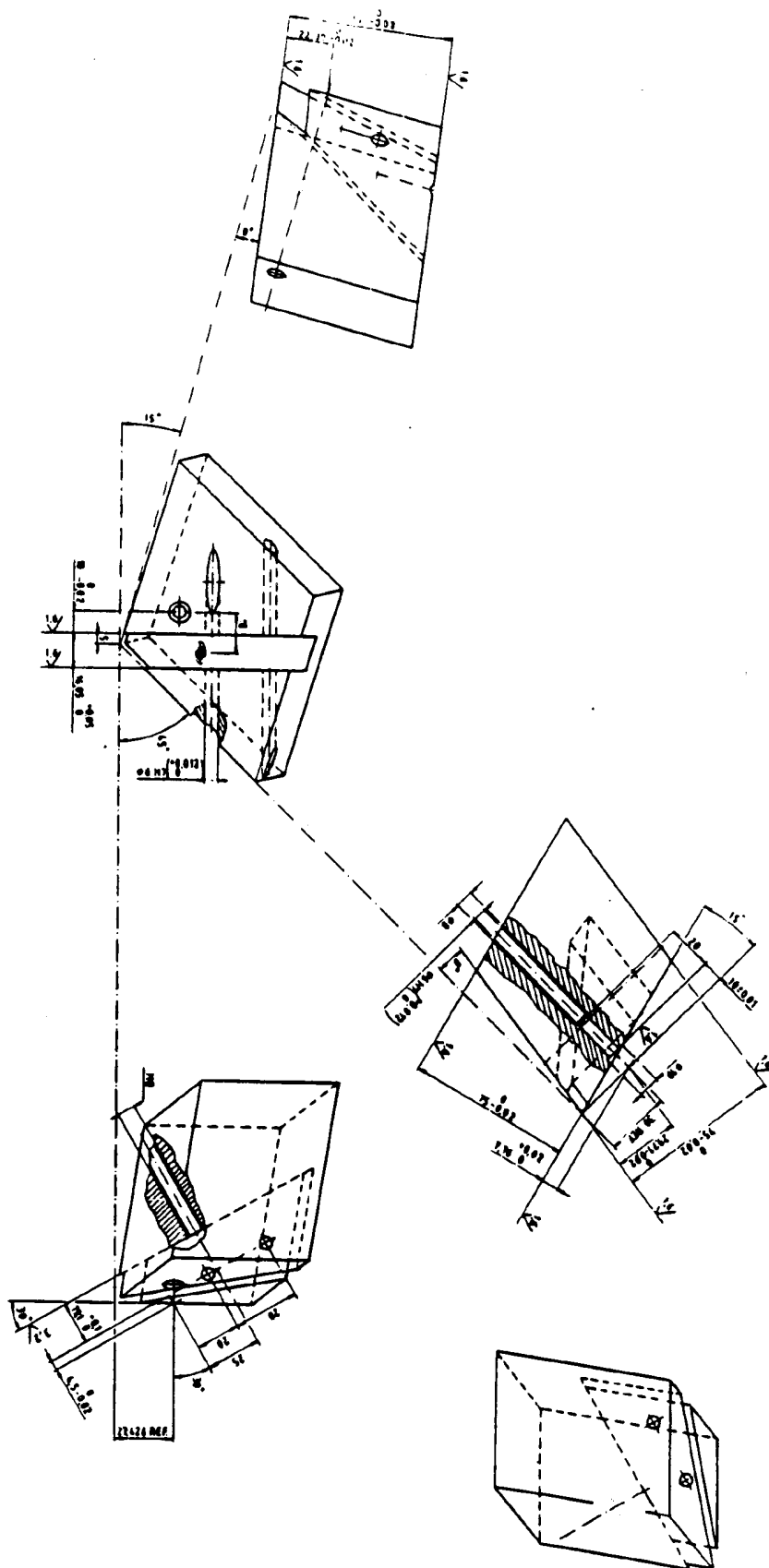


Fig. 3 Sharpening fixture / Skärpfixtur

Rough grinding, 3 sides

Feed 4 µm/pass using the entire grinding wheel width. Material to be removed 0,5-0,65 mm.

Finish grinding, 3 sides

Two cuts of 5 µm down feed. Then a down feed of 0 µm and a cross feed of 0,5 mm/pass. Material to be removed: 0,01 mm

Honing

The nose radius shall be honed by hand, $r=0,2-0,25$ mm.

Wet blasting

The edge shall be wet blasted with aluminium oxide, grain size 320, on the rake and clearance surfaces for 7 s per side.

The nozzle shall be placed 40 mm from the cutting edge and directed at right angles to the edge and at an angle of 45° to the respective surface.

After blasting, the surface finish of the tool shall be $R_a = 0,4$ µm and the edge sharpness (roundness of edge) 8-12 µm.

This operation guarantees a high quality edge and eliminates any residual austenite in the surface layer of the tool.

4.2 Alternative method**Grinding in tool grinding machine**

Grinding wheel 1 Standard wheel, shape type 11V9, dimensions 125 x 40 x 32 (20) mm

Grinding wheel 2 Standard wheel, shape type 12A2, dimensions 125 x 23 x 32 (20) mm

Designation (composition) B151 R75 B8-3 alt. B107 R100 B8-3.

Peripheral speed: 35-40 m/s

Table speed: As high as possible to avoid grind burning

Coolant: Same as for the standardized method but with a somewhat higher concentration for best results

Rough grinding: Down feed 0,02 mm

Finish grinding: Down feed: 0,005 mm

Honing and wet blasting: Same as for the standardized method

Grovslipning, 3 sidor

Matning 4 µm/slag med användande av slipskivans hela bredd. Ca 0,5-0,65 mm material skall slipas bort.

Finslipning, 3 sidor

Två skär med 5 µm nedmatning. Därefter 0 µm nedmatning och 0,5 mm tvärmattning per slag. 0,01 mm skall slipas bort.

Bryning

Nosradien brynes för hand, $r = 0,2-0,25$ mm.

Våtblästring

Eggen våtblästras med aluminiumoxid, kornstorlek 320, på spån- och släppningsytorna i 7 s per sida.

Munstycket skall vara på 40 mm avstånd från skärebben och riktat vinkelrätt mot eggen och 45° mot respektive yta.

Efter blästring skall verktygets ytfinitet vara $R_a = 0,4$ µm och eggskärpan (eggens avrundning) 8-12 µm.

Denna behandling ger hög kvalitet på skärebben och eliminerar eventuell restaustenit i verktygets ytskikt.

4.2 Alternativ metod**Slipning i verktygsmaskin**

Slipskiva 1 Standardskiva, form typ 11V9, dimensioner 125x40x32 (20) mm

Slipskiva 2 Standardskiva, form typ 12A2, dimensioner 125x23x32 (20) mm

Beteckning (sammansättning) B151 R75 B8-3 alternativt B107 R100 B8-3.

Periferihastighet: 35-40 m/s

Arbetsbordets rörelsehastighet: så hög som möjligt för att undvika slipbränningar

Kylmedel: Samma som för den standardiserade metoden men med något högre koncentration för att uppnå bästa resultat.

Grovslipning: Matning 0,02 mm

Finslipning: Matning 0,005 mm

Bryning och våtblästring: Samma som för den standardiserade metoden

Appendix / Bilaga 3**Mätning av fasförslitningen**

Skärverktygets maximala fasförslitning, VB, mäts enligt figur 4. Mätningen görs med ett mätmikroskop vid 20-50 gångers förstoring.

Förslitningsgränsen nås när verktygets maximala fasförslitning är 0,7 mm. Då det av praktiska skäl inte går att avgöra exakt när förslitningsgränsen nås görs en linjär interpolering utgående från förslitningsvärden så nära gränsvärdet 0,7 mm som möjligt.

Measurement of flank wear

The maximum flank wear, VB, of the cutting tool, shall be measured as shown in figure 4. The measurement shall be made with a reading microscope with 20-50 times magnification.

The wear limit is reached when the maximum flank wear of the tool is 0,7 mm. Since, for practical reasons, it is not possible to determine exactly when the wear limit is reached, a linear interpolation shall be made using wear values as close as possible to the limit value 0,7.

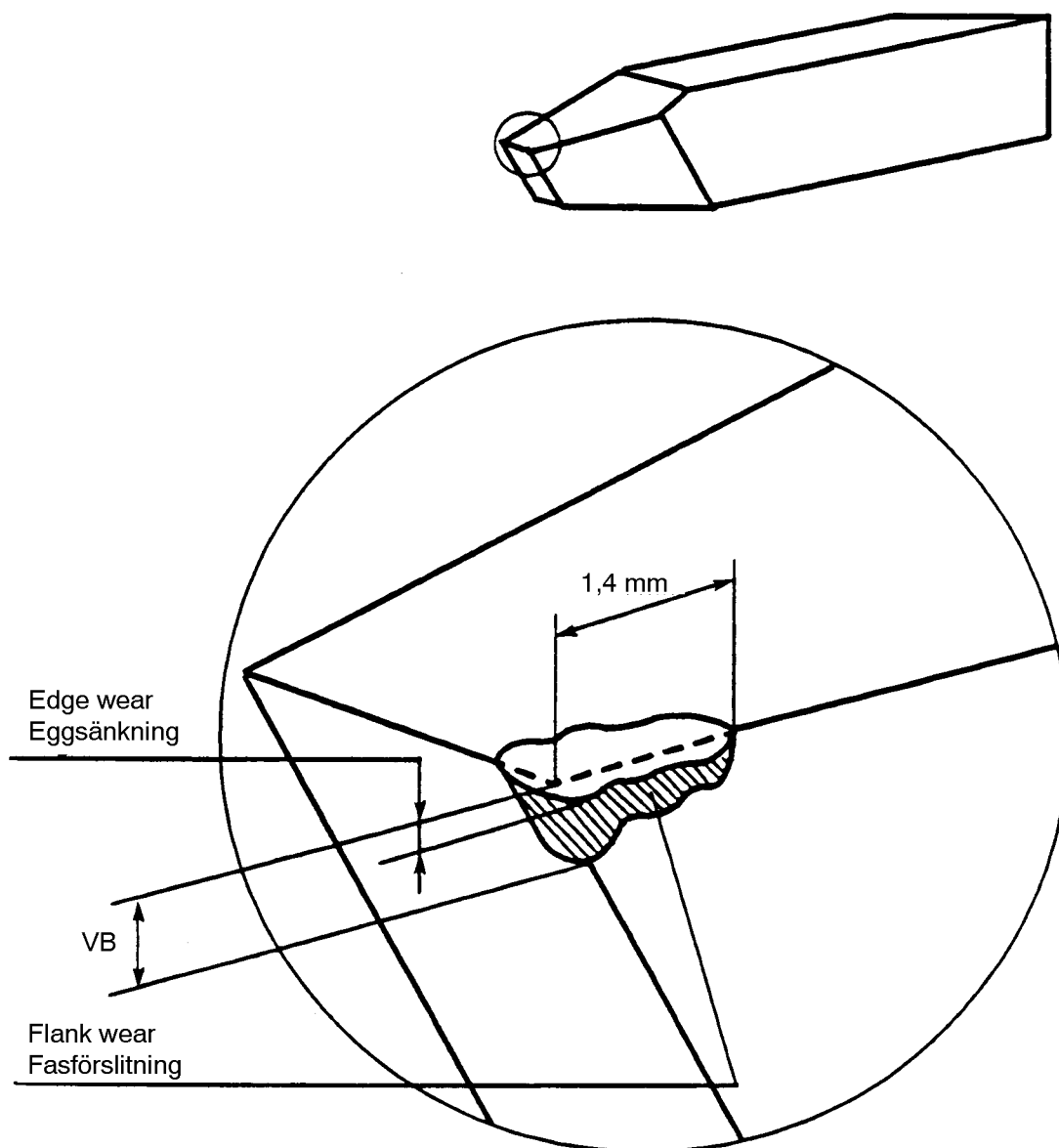


Fig. 4 Maximum flank wear, VB / Maximal fasförslitning, VB

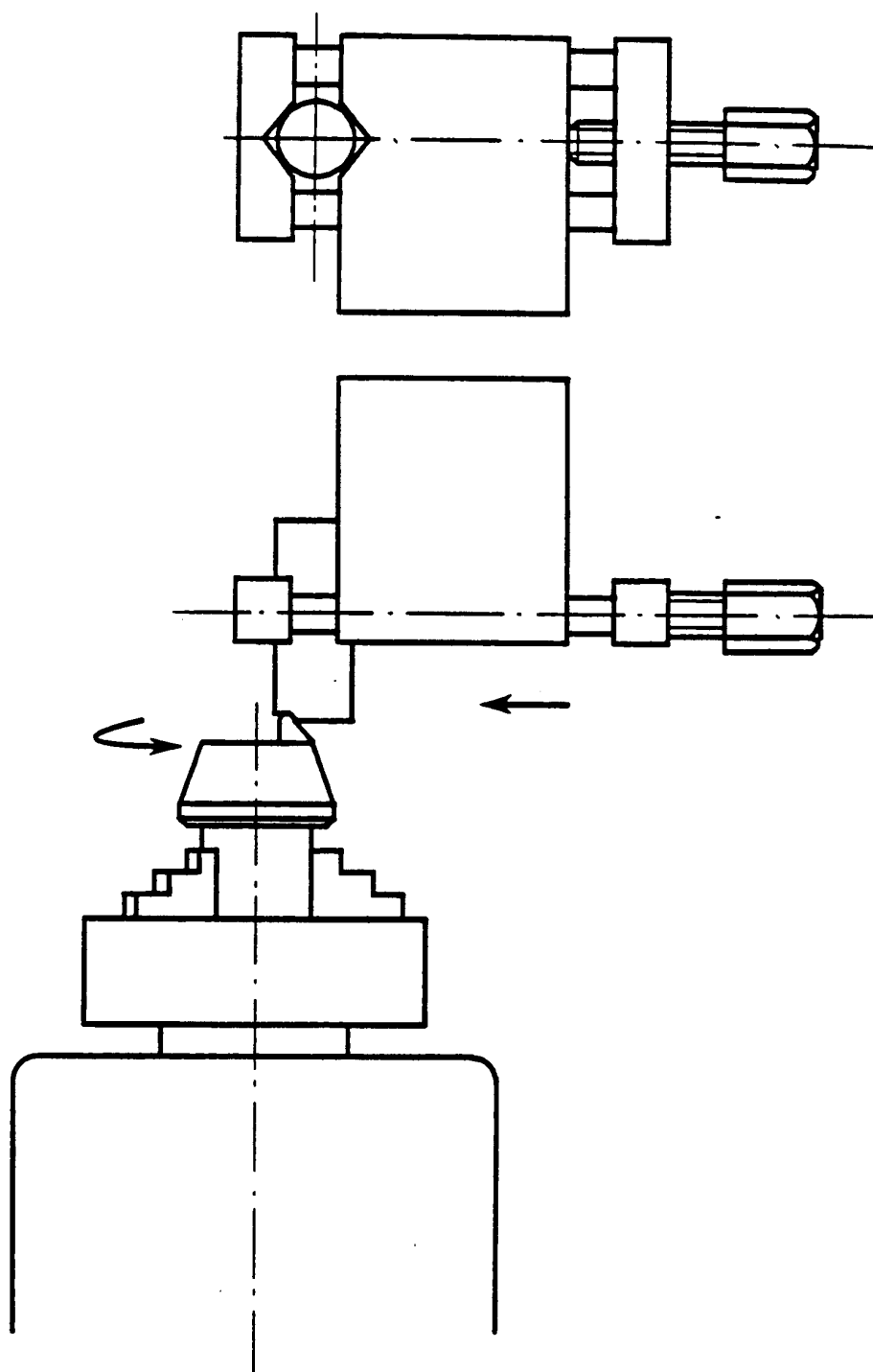
Appendix / Bilaga 4**Clamping device for use in lathes****Uppspänningsanordning för användning i svarv**

Fig. 5

Appendix / Bilaga 5**Calculation**

Calculation of the confidence interval with Student-t-distribution.

For a probability of P, the interval is:

$$\bar{x} = \pm \frac{t_p}{\sqrt{n}} \cdot s$$

s = standard deviation =

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \bar{x}^2}{n-1}}$$

$\bar{x}$ = mean value

n = number of observations

x_i = observed value

t_p = Student-t-factor for actual degree of freedom (here n-1) and corresponding probability (here (1+P)/2)

Table of $\frac{t_p}{\sqrt{n}}$ for P = 95%.

For n greater than 6 see mathematical tables.

Beräkning

Beräkning av konfidensintervall med användande av Student-t-fördelning.

För sannolikheten P är intervallet:

$$\bar{x} = \pm \frac{t_p}{\sqrt{n}} \cdot s$$

s = standardavvikelse =

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \bar{x}^2}{n-1}}$$

$\bar{x}$ = medelvärde

n = antal observationer

x_i = observerat värde

t_p = Student-t-faktor för aktuell frihetsgrad (här n-1) och motsvarande sannolikhet (här (1+P)/2)

Tabell över $\frac{t_p}{\sqrt{n}}$ för P = 95%.

För n större än 6 se matematiska tabeller.

Table / Tabell 3

n	$\frac{t_p}{\sqrt{n}}$
2	8,98
3	2,48
4	1,59
5	1,24
6	1,05

To interpolate and extrapolate in a V-v diagram (volume-cutting speed) (see page 20, Diagram 6):

$$B = \left(\frac{1,25^k}{2,5} \cdot V_x \cdot v_x^{-k} \right)^{\frac{1}{1-k}}$$

The steepness of the wear line is given by

$$k = \frac{\lg V_1 - \lg V_2}{\lg v_1 - \lg v_2}$$

where (V_1, v_1) and (V_2, v_2) are two points in the diagram.

För interpolering och extrapolering i ett V-v- (volym-skärhastighet)-diagram gäller (se sid 20, Diagram 6):

$$B = \left(\frac{1,25^k}{2,5} \cdot V_x \cdot v_x^{-k} \right)^{\frac{1}{1-k}}$$

Förlitningslinjens lutning erhålls ur formeln

$$k = \frac{\lg V_1 - \lg V_2}{\lg v_1 - \lg v_2}$$

där (V_1, v_1) och (V_2, v_2) är två punkter i diagrammet.

For most materials, k is around -2,5.

Example:

A test has given the following results:

För flertalet material är k ungefär -2,5.

Exempel:

Ett prov har gett följande resultat:

Table / Tabell 4

Skärhastighet Speed m/min	Avverkad volym Removed volume		Standard- avvikelse Standard deviation cm ³	$\frac{t_p}{\sqrt{n}}$	Konfidens- intervall Confidence interval cm ³
	Provvärden Test values cm ³	Medelvärde Mean value cm ³			
64	150, 198, 172 168, 162, 170	170	15,8	1,05	153 - 187
81	110, 130, 125 116, 125	121	8,04	1,24	111 - 131

The points to interpolate between will then be according to diagram 5.

Interpolering görs då mellan de i diagram 5 markerade punkterna.

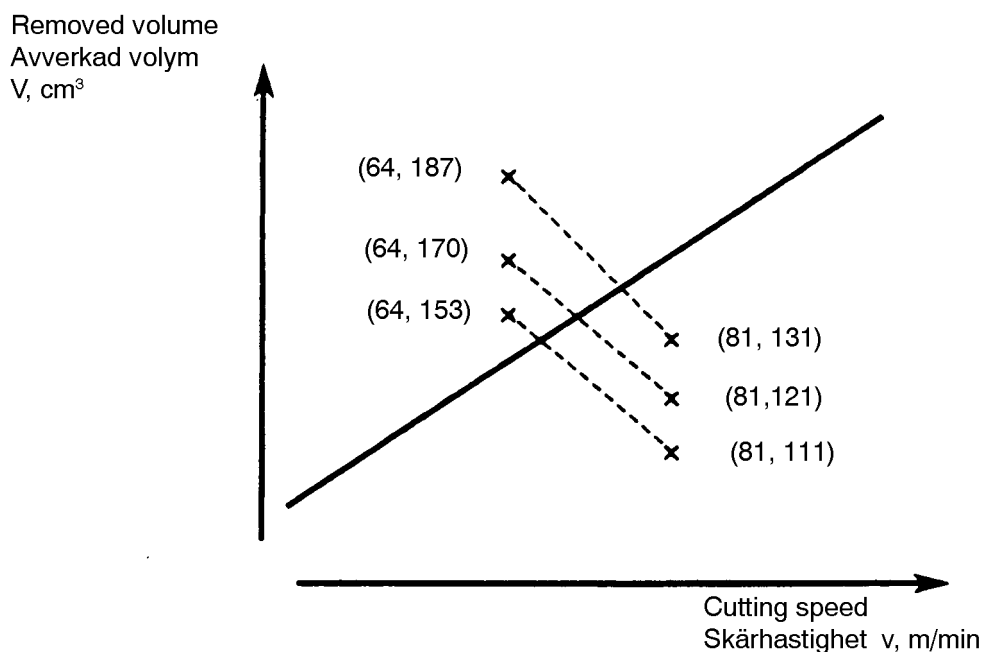


Diagram 5

The following value will be obtained:

Upper limit: k = -1,51. B-index = 59,4

Mean: k = -1,44. B-index = 57,5

Lower limit: k = -1,36. B-index = 55,2

B-index of material = 57,5 ± 2

Följande värde erhålls:

Övre gräns: k = -1,51. B-tal = 59,4

Medelvärde: k = -1,44. B-tal = 57,5

Undre gräns: k = -1,36. B-tal = 55,2

Materialets B-tal = 57,5 ± 2

Appendix / Bilaga 6

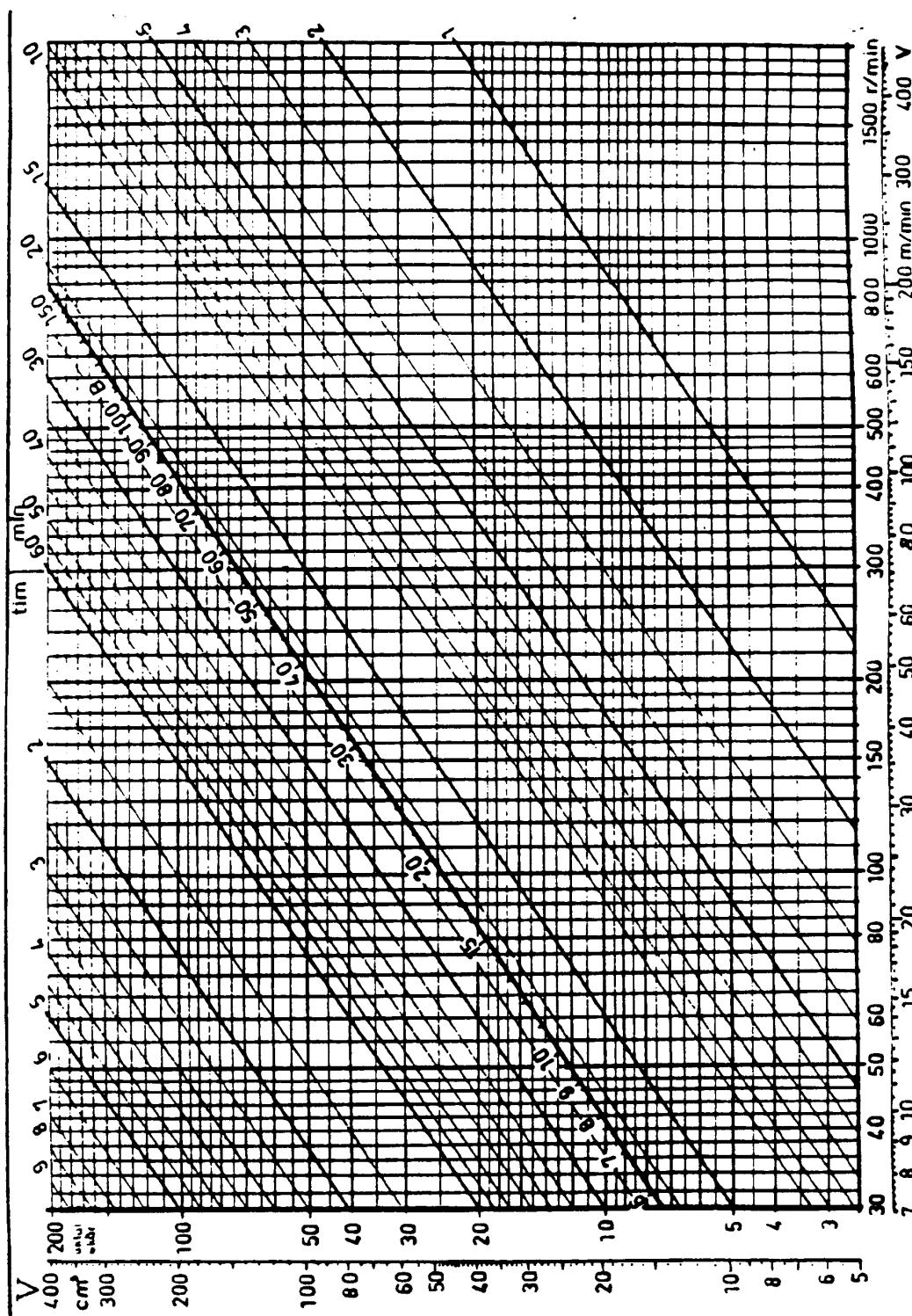


Diagram 6 - Graphical determination of B-number in V-v diagram / Grafisk bestämning av B-tal i V-v-diagram