

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Estudo do Efeito dos Elementos Residuais (Cr,
Ni e Cu) no Torneamento do Aço-de-Corte-Fácil
ABNT 12L14**

Autor: Marcos César de Almeida

Orientador: Prof. Dr. João Roberto Ferreira

Itajubá, Setembro de 2005.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Estudo do Efeito dos Elementos Residuais (Cr,
Ni e Cu) no Torneamento do Aço-de-Corte-Fácil
ABNT 12L14**

Autor: Marcos César de Almeida

Orientador: Prof. Dr. João Roberto Ferreira

Curso: Mestrado em Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Projeto e Fabricação

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Itajubá, Setembro de 2005.

M.G. – Brasil

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Estudo do Efeito dos Elementos Residuais (Cr,
Ni e Cu) no Torneamento do Aço-de-Corte-Fácil**
ABNT 12L14

Autor: Marcos César de Almeida

Orientador: Prof. Dr. João Roberto Ferreira

Composição da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Álisson Rocha Machado – LEPU/FEM/UFU

Prof. Dr. Ricardo Risso Chaves - IEM/UNIFEI

Prof. Dr. João Roberto Ferreira, Presidente - EPR/UNIFEI.

Dedicatória

Aos meus pais, Sebastião e Ana Maria.

Meus irmãos, Marcelo e Maria Rita.

Aos meus amigos que me acompanharam nessa jornada

E principalmente a Deus.

Agradecimentos

Ao meu Orientador, Prof. Dr. João Roberto Ferreira, pela competência, dedicação e amizade que demonstrou durante a elaboração deste trabalho.

Aos meus pais, Sebastião e Ana Maria; meus irmãos, Marcelo e Maria Rita; meus tios, Tio Joãozinho e Tia Rosinha, que sempre me incentivaram na formação e no desenvolvimento cultural.

Aos amigos, Thiago Arouca, Marcelo Zampieri, Thiago Geraldino, Daniel Detoni, Daniel Sneideris e primos João Roberto e João Ricardo pelo permanente incentivo, colaboração, amizade, convívio profissional e aos momentos de lazer inesquecíveis.

Ao Instituto de Engenharia Mecânica da UNIFEI, representado pelos seus Professores e Funcionários, pela oportunidade que me concedeu na realização deste trabalho.

À CAPES, através do Programa de bolsas, pelo apoio financeiro.

À empresa Aços Villares S.A. pela doação do material ensaiado.

À empresa Sandvik do Brasil S.A. pela doação das ferramentas.

Ao CNPq/FVA pelo apoio financeiro por meio do projeto processo nº 400607/2004-

Ao MSc. Nélis, pela amizade e suporte técnico dado durante a realização deste trabalho.

Aos funcionários da oficina mecânica da UNIFEI que ajudaram na preparação e execução dos ensaios.

A todos meus amigos que direta ou indiretamente contribuíram na conclusão deste trabalho e, principalmente a Deus que sempre me iluminou nessa jornada.

*“No final tudo dá certo.
Se ainda não deu é porque não chegou o fim”*

Resumo

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

Os aços de corte fácil são conhecidos por terem uma boa usinabilidade devido à facilidade de arranque de cavacos. A característica de boa usinabilidade é obtida, especialmente, através da especificação da composição química com altos teores de enxofre e de outros elementos como, por exemplo, o chumbo. É importante ressaltar que existem outros fatores que influenciam na usinabilidade dos aços como a presença dos elementos residuais cromo (Cr), níquel (Ni) e cobre (Cu). Assim, este trabalho faz uma investigação sobre a influência que estes elementos exercem na usinabilidade do aço ABNT 12L14, através de ensaios de curta duração de torneamento com ferramentas de aço rápido e metal duro. Para tanto, considerou-se a vida da ferramenta como o principal fator e a potência de usinagem e a rugosidade como dados informativos. Os ensaios experimentais mostraram que os elementos residuais têm uma influência significativa na usinabilidade deste material considerando-se a vida da ferramenta. A potência elétrica de usinagem e a rugosidade Ra não foram influenciadas pela variação percentual dos elementos residuais. Os ensaios foram planejados segundo a técnica de projeto de experimentos (DOE) e os resultados analisados utilizando fundamentos estatísticos.

Palavras-chave

Usinabilidade, Aço-de-Corte-Fácil ABNT 12L14, Elementos Residuais Cr, Ni e Cu.

Abstract

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

The free-machining steels are known by having a good machinability due to easiness of chip formation. The characteristic of a good machinability is determined, essentially, by the chemical composition of the material with high sulphur contents and other elements as, for example, the lead. It is important to point out that there are others factors that influence the machinability of steels such as the presence of the residual elements chrome (Cr), nickel (Ni) and cooper (Cu). However, concerning to the residual elements (Cr, Ni and Cu), the influence of their contents in the machinability of these steel is unknown. Thus, this work studies the influence these elements in the machinability of the ABNT 12L14 steel, through short duration tests with high-speed steel and cemented carbide tools. The results showed that the residual elements have a significant influence in the tool life. The electric power and the roughness parameter Ra were not influenced by the variation of the residual elements. The tests were planned according to technique of project of experiments (DOE) and the results analyzed using statistical procedures fundamentals.

Keywords

Machinability, Free-Machining Steel ABNT 12L14, Residuals Elements Cr, Ni and Cu.

Sumário

LISTA DE FIGURAS.....	iv
LISTA DE TABELAS	vi
LISTA DE EQUAÇÕES	ix
LISTA DE SÍMBOLOS	xi
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xiv
LISTA DE SÍMBOLOS GREGOS	xv
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	1
1.1 - Considerações Iniciais	1
2 - Objetivo	2
1.2.1 - Tema	2
1.2.2 – Delimitação do Tema	2
1.2.3 – Objetivo Principal	2
1.2.4 – Objetivos Específicos.....	2
1.2.5 – Objetivos Secundários.....	3
1.3 – Justificativas.....	3
1.4 – Limitações.....	4
1.5 – Metodologia de Pesquisa	4
1.6 – Estrutura do Trabalho	5
CAPÍTULO 2 – ALGUNS FUNDAMENTOS DA USINAGEM	6
2.1 – Considerações Iniciais	6
2.2 – Ferramentas de Corte	7
2.2.1 – Materiais para Ferramentas de Corte	7
2.2.1.1 – Aços-Rápidos	9

2.2.1.2 – Metal Duro	12
2.2.1.3 – Metal Duro com Cobertura.....	18
2.3 – Avarias e Desgaste da Ferramenta de Corte	20
2.3.1 – Tipos de Avarias e Desgaste	21
2.3.2 – Mecanismos Causadores dos Desgastes	25
2.3.3 – Medição dos Desgastes das Ferramentas	26
2.4 – Vida da Ferramenta.....	27
2.4.1 – Fatores que Influenciam na Vida da Ferramenta	28
2.5 – Acabamento Superficial.....	29
2.5.1 – Efeito de Alguns Parâmetros de Usinagem no Acabamento Superficial	30
2.6 – Potência de Corte	32
CAPÍTULO 3 – USINABILIDADE DOS MATERIAIS	34
3.1 – Considerações Iniciais	34
3.2 – Conceito de Usinabilidade	35
3.3 – Fatores Influentes na Obtenção do Índice de Usinabilidade.....	36
3.4 – Critérios Empregados nos Ensaios	37
3.5 – Propriedades e Fatores Metalúrgicos	40
CAPÍTULO 4 – AÇOS-DE-CORTE-FÁCIL E SUA USINABILIDADE.....	43
4.1 – Conceituação.....	43
4.2 – Composição Química dos Aços-de-corte-fácil	44
4.3 – Aplicação	46
4.4 – Usinabilidade dos Aços-de-corte-fácil.....	48
4.4.1 – Sulfetos.....	49
4.4.2 – Inclusões Metálicas	51
4.5 – Tecnologias Recentes para a Substituição do Chumbo	52
4.5.1 – Problemas com o Uso do Chumbo.....	53
4.5.2 – Alternativas Encontradas para Substituir o Chumbo	53
CAPÍTULO 5 – DOE – PROJETOS DE EXPERIMENTOS	56
5.1 – Conceituação.....	56
5.2 – O Projeto Padrão	57
5.3 – Fatoriais Completos	59
5.4 – <i>Center Points</i>	60
5.5 – Análise de Variância.....	61
5.5.1 – Teste de Hipótese	61

5.6 – Análise Gráfica	64
5.6.1 – Diagrama de Pareto	64
5.6.2 – <i>Factorial Plot</i>	65
CAPÍTULO 6 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	66
6.1 – Considerações Iniciais	66
6.2 – Materiais	67
6.2.1 – Corpo de Prova.....	67
6.2.2 – Ferramentas de Corte	68
6.2.3 – Máquina-ferramenta.....	69
6.2.4 – Fluido de Corte.....	69
6.3 – Condições de Corte.....	69
6.4 – Monitoramento do Processo	70
6.5 – Planejamento Experimental	71
6.6 – Execução dos Ensaios.....	74
CAPÍTULO 7 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	76
7.1 – Ensaio de Usinabilidade com Ferramenta de Aço-Rápido a Seco.....	76
7.1.1 – Análise Estatística para V_c 150 m/min	78
7.1.2 – Análise Estatística para V_c 160 m/min	81
7.1.3 – Análise Estatística para V_c 175 m/min	84
7.1.4 – Análise Estatística para V_c 140 m/min	86
7.1.5 – Análise Estatística para V_c 125 m/min	89
7.2 - Ensaio de Usinabilidade com Ferramenta de Aço-Rápido com Fluido	92
7.2.1 – Análise Estatística para V_c 175 m/min com Fluido.....	93
7.3 – Resultados com o aço-rápido.....	96
7.4 – Ensaios de Usinabilidade com Ferramenta de Metal Duro	98
7.4.1 – Análise Estatística para V_c 500 m/min	98
7.4.2 – Análise Estatística para V_c 450 m/min	101
7.4.3 – Análise Estatística para V_c 400 m/min	104
7.5 – Resultados com o metal duro.....	107
7.6 – Critérios de Fim de Vida das Ferramentas	109
7.6.1 – Ferramenta de Aço-Rápido	109
7.6.2 – Ferramenta de Metal Duro	110
7.7 – Potência Elétrica Consumida.....	112
7.8 – Avaliação da Rugosidade.....	113

CAPÍTULO 8 – CONCLUSÕES	115
8.1 – Conclusões	115
8.2 – Sugestões para Trabalhos Futuros	116
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	117

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Lista dos materiais para ferramentas de corte.....	9
Figura 2.2 - Influência da % cobalto e da temperatura na dureza do metal duro.....	13
Figura 2.3 – Exemplo da indicação das classes de metal duro da Sandvik Coromant.....	15
Figura 2.4 - Classes P, M e K tradicionais designadas pela Norma ISO	16
Figura 2.5 – Novas Classes N, S e H designadas pela Norma ISO.....	17
Figura 2.6 – Disposição dos principais revestimentos sobre o metal duro	20
Figura 2.7 – Lascamento da aresta de corte	22
Figura 2.8 – Trincas ou fissuras térmicas na aresta de corte.....	22
Figura 2.9 – Desgaste de flanco na aresta de corte.....	23
Figura 2.10 – Desgaste de cratera na superfície de saída do cavaco	24
Figura 2.11 – Quebra da ferramenta.....	24
Figura 2.12 – Aresta postiça de corte causada pela aderência	26
Figura 2.13 – Desgaste da ferramenta	27
Figura 4.1 - Exemplos de peças fabricadas de aço-de-corte-fácil	47
Figura 4.2 - Produção mensal dos tipos de aços-de-corte-fácil.....	47
Figura 4.3 - Produção total dos aços-de-corte-fácil.....	48
Figura 4.4 – Sulfetos de manganês envolto por uma capa de telureto de manganês	51
Figura 4.5 – MnS com capa de Pb metálico	52
Figura 5.1 – Relação entre Fatores, Resoluções e Quantidade de Experimentos	58
Figura 5.2 – Regiões de Rejeição e Aceitação de Ho para uma distribuição F.....	62
Figura 5.3 – Avaliação do erro de decisão	62
Figura 5.4 – Representação das Probabilidades α e β	63
Figura 5.5 – Exemplo de Diagrama de Pareto: efeitos dos elementos e suas interações .	64

Figura 5.6 – Exemplo de <i>Factorial Plot</i> para os Efeitos Principais.....	65
Figura 6.1 - Torno CNC Nardini do LAM – UNIFEI	69
Figura 6.2 - Sistema de monitoramento da potência elétrica consumida	71
Figura 6.3 – Rugosímetro utilizado nos ensaios.....	71
Figura 6.4 – Foto da caracterização do fim de vida da ferramenta de aço-rápido	75
Figura 7.1 – Comparação entre as vidas médias das corridas	77
Figura 7.2 – Diagrama de Pareto: efeitos dos elementos	80
e suas interações – Vc 150 m/min	
Figura 7.3 - Factorial Plot para os efeitos principais – Vc 150 m/min.....	80
Figura 7.4 – Diagrama de Pareto: efeitos dos elementos	83
e suas interações – Vc 160 m/min	
Figura 7.5 - Factorial Plot para os efeitos principais – Vc 160 m/min.....	84
Figura 7.6 – Diagrama de Pareto: efeitos dos elementos	88
e suas interações – Vc 140 m/min	
Figura 7.7 - Factorial Plot para os efeitos principais - Vc 140 m/min	88
Figura 7.8 – Diagrama de Pareto: efeitos dos elementos	91
e suas interações – Vc 125 m/min	
Figura 7.9 - Factorial Plot para os efeitos principais – Vc 125 m/min.....	91
Figura 7.10 – Diagrama de Pareto: efeitos dos elementos	95
e suas interações – Vc 175 m/min com fluido de corte	
Figura 7.11 - Factorial Plot para os efeitos principais	95
Vc 175 m/min com fluido de corte	
Figura 7.12 – Diagrama de Pareto: efeitos dos elementos	100
e suas interações – Vc 500 m/min	
Figura 7.13 - Factorial Plot para os efeitos principais – Vc 500 m/min.....	101
Figura 7.14 – Diagrama de Pareto: efeitos dos elementos	103
e suas interações – Vc 450 m/min	
Figura 7.15 - Factorial Plot para os efeitos principais – Vc 450 m/min.....	104
Figura 7.16 – Diagrama de Pareto: efeitos dos elementos	106
e suas interações – Vc 400 m/min	
Figura 7.17 - Factorial Plot para os efeitos principais – Vc 400 m/min.....	107
Figura 7.18 – Desgaste de flanco observado na ferramenta de aço-rápido	110
Figura 7.19 – Desgaste de cratera observado na ferramenta de aço-rápido	110
Figura 7.20 – Desgaste de flanco observado na ferramenta de metal duro	111

Figura 7.21 – Desgaste de cratera observado na ferramenta de metal duro 111

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Composição e características dos aços-rápidos	12
Tabela 2.2 – Comparação entre os processos CVD e PVD.....	18
Tabela 3.1 – Efeito das inclusões na usinabilidade	42
Tabela 4.1 – Composição química dos aços-de-corte-fácil	44
Tabela 4.2 – Usinabilidade de aços-de-corte-fácil	45
Tabela 4.3 – Classificação dos tipos dos aços-de-corte-fácil segundo a Norma DIN.....	45
Tabela 4.4 – Classificação dos tipos dos aços-de-corte-fácil segundo a Norma SAE	46
Tabela 4.5 – Propriedades Mecânicas	46
Tabela 4.6 – Tecnologias aplicadas para melhoria da usinabilidade	49
dos aços-de-corte-fácil	
Tabela 5.1 – Exemplos de níveis e fatores	59
Tabela 5.2 – Arranjo fatorial em 2 níveis para 2 fatores e uma réplica.....	60
Tabela 6.1 – Descrição das corridas e dimensões das barras	67
Tabela 6.2 – Composição química das corridas	67
Tabela 6.3 – Composição química dos elementos residuais e dureza do material.....	68
Tabela 6.4 – Geometrias conforme Norma ISO 3685	68
Tabela 6.5 – Planilha de contraste gerada no software Minitab®	72
para um fatorial completo com 3 fatores, 2 níveis, 1 réplica e 2 center points	
Tabela 6.6 – Planilha para a execução dos ensaios	73
Tabela 7.1 – Vidas das ferramentas de aço-rápido: $a_p= 1 \text{ mm}$, $f= 0,1 \text{ mm/v}$,.....	77
usinagem a seco	
Tabela 7.2 - Resultado de vida da ferramenta	78
para o fatorial completo ($V_c= 150 \text{ m/min}$)	
Tabela 7.3 – Análise fatorial com center point – $V_c 150 \text{ m/min}$	79

Tabela 7.4 - ANOVA (Fatorial completo) – Vc 150 m/min	79
Tabela 7.5 - Resultados da vida da ferramenta.....	81
para o fatorial completo – (Vc 160 m/min)	
Tabela 7.6 – Análise fatorial com center point – Vc 160 m/min.	82
Tabela 7.7 – ANOVA (Fatorial completo) – Vc 160 m/min.....	83
Tabela 7.8 - Resultados da vida da ferramenta.....	84
para o fatorial completo (Vc 175 m/min)	
Tabela 7.9 – Análise fatorial com center point – Vc 175 m/min.....	85
Tabela 7.10 – ANOVA (Fatorial completo) – Vc 175 m/min.....	85
Tabela 7.11 - Resultados da vida da ferramenta.....	86
para o Fatorial Completo (Vc 140 m/min)	
Tabela 7.12 – Análise fatorial com center point – Vc 140 m/min.....	87
Tabela 7.13 – Análise de Variância (Fatorial completo) – Vc 140 m/min.....	87
Tabela 7.14 – Resultados da vida da ferramenta	89
para o Fatorial Completo (Vc 125 m/min)	
Tabela 7.15 – Análise fatorial com center point – Vc 125 m/min.....	90
Tabela 7.16 – ANOVA (Fatorial completo) – Vc 125 m/min.....	90
Tabela 7.17 – Vidas para as condições de corte: ap= 1 mm, f= 0,1 mm,	92
usinagem a seco e com fluido.	
Tabela 7.18 – Teste Paired-t para usinagem com e sem fluido – Vc 175 m/min.....	93
Tabela 7.19 – Análise Fatorial com center point – Vc 175 m/min com fluido de corte...	94
Tabela 7.20 – ANOVA (Fatorial completo) – Vc 175 m/min com fluido de corte.....	94
Tabela 7.21 – Níveis dos elementos com contribuição	96
positiva na usinabilidade – Aço-rápido	
Tabela 7.22 – Nível e faixa da Corrida (E) de melhor usinabilidade – Aço-rápido.....	96
Tabela 7.23 – Níveis dos elementos com contribuição	97
negativa na usinabilidade – Aço-rápido	
Tabela 7.24 – Nível e faixa da Corrida (B) de pior usinabilidade – Aço-rápido.....	97
Tabela 7.25 – Resultados da vida da ferramenta	98
para o Fatorial Completo (Vc= 500 m/min)	
Tabela 7.26 – Análise do fatorial com center point – Vc 500 m/min.....	99
Tabela 7.27 – ANOVA (Fatorial completo) – Vc 500 m/min.....	100
Tabela 7.28 - Resultados da vida da ferramenta	102
para o Fatorial Completo Vc 450 m/min	

Tabela 7.29 – Análise fatorial com center point – Vc 450 m/min.....	102
Tabela 7.30 – ANOVA (Fatorial completo) – Vc 450 m/min.....	103
Tabela 7.31 - Resultados das vidas da ferramenta para o Fatorial Completo (Vc 400 m/min)	105
Tabela 7.32 – Análise fatorial com center point – Vc 400 m/min.....	106
Tabela 7.33 – ANOVA (Fatorial completo) – Vc 400 m/min.....	106
Tabela 7.34 – Níveis dos elementos com contribuição positiva na usinabilidade – Metal duro	107
Tabela 7.35 – Nível e faixa da Corrida (A) de melhor usinabilidade – Metal duro.....	108
Tabela 7.36 – Níveis dos elementos com contribuição negativa na usinabilidade – Metal duro	108
Tabela 7.37 – Nível e faixa da Corrida (D) de pior usinabilidade – Metal duro.....	108
Tabela 7.38 – Potência elétrica de usinagem consumida nos ensaios, ap= 1 mm e f= 0,1 mm/v	112
Tabela 7.39 – Análise de Variância da potência elétrica consumida.....	112
Tabela 7.40 – Rugosidade Ra medida durante os ensaios; ap= 1 mm e f= 0,1 mm/v.....	113
Tabela 7.41 – Análise de Variância da rugosidade Ra.....	114

Lista de Equações

Equação 2.1 – Potência de corte.....	33
Equação 2.2 – Potência de avanço	33
Equação 2.3 – Potência efetiva de corte.....	33
Equação 2.4 – Potência do motor.....	33
Equação 3.1 – Equação de Kinzle	38
Equação 3.2 - Índice comparativo de acabamento superficial	40
Equação 3.3 – Rugosidade máxima	40
Equação 5.1 – Modelo geral para os efeitos.....	60
Equação 5.2 – Efeito de um fator	65
Equação 6.1 – Número de experimentos.....	72
Equação 6.2 – Tempo de corte	74
Equação 7.1 – Vida da ferramenta na $V_c= 150$ m/min	78
Equação 7.2 – Vida da ferramenta na $V_c= 150$ m/min com os níveis dos fatores.....	79
Equação 7.3 – Vida da ferramenta na $V_c= 160$ m/min	82
Equação 7.4 – Vida da ferramenta na $V_c= 160$ m/min com os níveis dos fatores.....	82
Equação 7.5 – Vida da ferramenta na $V_c= 140$ m/min	86
Equação 7.6 – Vida da ferramenta na $V_c= 140$ m/min com os níveis dos fatores.....	87
Equação 7.7 – Vida da ferramenta na $V_c= 125$ m/min	89
Equação 7.8 – Vida da ferramenta na $V_c= 125$ m/min com os níveis dos fatores.....	90
Equação 7.9 – Vida da ferramenta na $V_c= 175$ m/min com fluido.....	93
Equação 7.10 – Vida da ferramenta na $V_c= 150$ m/min com fluido	94
com os níveis dos fatores	
Equação 7.11 – Vida da ferramenta na $V_c= 500$ m/min	99
Equação 7.12 – Vida da ferramenta na $V_c= 500$ m/min com os níveis dos fatores.....	99

Equação 7.13 – Vida da ferramenta na $V_c= 450$ m/min	101
Equação 7.14 – Vida da ferramenta na $V_c= 450$ m/min com os níveis dos fatores.....	101
Equação 7.15 – Vida da ferramenta na $V_c= 400$ m/min	104
Equação 7.16 – Vida da ferramenta na $V_c= 400$ m/min com os níveis dos fatores.....	105

Lista de Símbolos

Símbolos		Unidade
Al	Alumínio	[-]
Al ₂ O ₃	Alumina	[-]
ap	Profundidade de corte	[mm]
APC	Aresta postiça de corte	[-]
B ₂ O ₃	Óxido de boro	[-]
b	Largura de corte	[mm]
Bi	Bismuto	[-]
C	Carbono	[-]
Ca	Cálcio	[-]
CNC	Comando numérico computadorizado	[-]
Co	Cobalto	[-]
Cr	Cromo	[-]
Cr	Índice comparativo de acabamento superficial	[-]
Cu	Cobre	[-]
CVD	Deposição química por vapor	[-]
°C	Graus Celsius	[-]
D	Diâmetro do corpo de prova	[mm]
f	Avanço	[mm/v]
F	Distribuição F de Fisher e Snedecor	[-]
F _c	Força de corte	[N]
F _f	Força de avanço	[N]
f(x)	Função de transferência	[-]
h	Espessura de corte	[mm]

HB	Dureza Brinell	[kgf/mm ²]
HRC	Dureza Rockwell C	[-]
HV	Dureza Vickers	[-]
Ho	Hipótese nula	[-]
H1	Hipótese alternativa	[-]
k	Níveis dos fatores	[-]
KB	Largura da cratera	[mm]
Kc1.1	Força específica de corte	[N]
KM	Distância do centro da cratera à aresta de corte	[mm]
KT	Profundidade da cratera	[mm]
Lf	Comprimento usinado	[mm]
L/D	Fator de forma	[-]
MC	Matriz de carbonetos	[-]
Mn	Manganês	[-]
Mo	Molibdênio	[-]
MnSe	Seleneto de manganês	[-]
MnTe	Telureto de manganês	[-]
N	Número de experimentos	[-]
N2	Nitrogênio	[-]
Ni	Níquel	[-]
P	P-value	[-]
P	Fósforo	[-]
Pb	Chumbo	[-]
Pc	Potência de corte	[kW]
PCD	Diamante policristalino	[-]
PCBN	Nitreto cúbico de boro cristalino	[-]
Pe	Potência efetiva de corte	[kW]
Pel	Potência elétrica de usinagem	[kW]
Pf	Potência de avanço	[kW]
Pm	Potência do motor	[kW]
PVD	Deposição física por vapor	[-]
Ra	Rugosidade média	[μm]
Rmax	Rugosidade máxima	[μm]
rε	Raio de ponta da ferramenta	[mm]

S	Enxofre	[-]
Si ₃ N ₄	Nitreto de silício	[-]
Si	Silício	[-]
SiC	Carboneto de silício	[-]
St	Desvio padrão	[-]
T	Vida da ferramenta	[min]
t	t-student	[-]
T	Estatística de teste da significância dos efeitos	[-]
TaC	Carbeto de tálio	[-]
t _c	Tempo de corte	[min]
TiC	Carbeto de titânio	[-]
TiAlN	Nitreto de titânio-alumínio	[-]
V	Vanádio	[-]
VB	Desgaste de flanco	[mm]
VBB	Desgaste de flanco médio	[mm]
VB _{max}	Desgaste de flanco máximo	[mm]
V _c	Velocidade de corte	[m/min]
V _f	Velocidade de avanço	[m/min]
X	Variável independente	[-]
ZrO ₂	Óxido de zircônio	[-]
Y	Variável dependente	[-]
W	Tungstênio	[-]
1-mc	Coefficiente angular	[-]

Lista de Abreviaturas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADJ SS	Soma de Quadrados Ajustada
AISI	American Iron and Steel Institute-
ANOVA	Analysis of Variance
COEF	Coefficiente
DF	Degree of Freedom
DIN	Deutsches Institut für Normung
DOE	Design of Experiments
ISO	International Organization of Standardization
LAM	Laboratório de Automação Mecânica
MS	Média Quadrática
SAE	Society of Automotive Engineers
SE COEF	Erro Padrão do Coeficiente
SE MÉDIA	Erro Padrão da Média
\SEQ SS	Soma de Quadrados
UNIFEI	Universidade Federal de Itajubá

Lista de Símbolos Gregos

Símbolos		Unidade
α	Nível de significância	[-]
α_0	Ângulo de folga da ferramenta	[Graus]
$1-\beta$	Poder do teste	[]
γ	Ângulo de saída da ferramenta	[Graus]
ϵ_r	Ângulo da ponta da ferramenta	[Graus]
η	Rendimento	[-]
λ_s	Ângulo de inclinação da ferramenta	[Graus]
σ_{esc}	Tensão de escoamento	[kgf/mm ²]
σ_{rup}	Tensão de ruptura	[kgf/mm ²]
Φ	Diâmetro	[mm]
χ_r	Ângulo de posição	[Graus]

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 – Considerações Iniciais

No setor metal-mecânico a usinagem é sem dúvida um dos processos de fabricação mais utilizados. Assim, o segmento de mercado de usinagem é extremamente importante para os fornecedores de aços, não somente pelos altos volumes de matérias-primas produzidas, mas também pelos altos custos de operação envolvidos. Com o desenvolvimento acelerado das tecnologias das máquinas e ferramentas, aliado às exigências cada vez mais rígidas do mercado em termos de desempenho operacional, o fornecimento de matérias-primas adequadas torna-se um elo fundamental para manter a competitividade desta cadeia produtiva. Portanto, há uma contínua preocupação (pelas siderurgias) em disponibilizar aços que apresentem um desempenho diferenciado na usinabilidade em relação aos seus similares, sem que haja alterações nas propriedades requeridas para sua aplicação (Klujszo & Soares, 2003).

1.2 – Objetivos

1.2.1 – Tema

O tema deste trabalho é verificar a influência do teor dos elementos residuais (Cr, Ni e Cu) na usinabilidade do aço-de-corte-fácil ABNT 12L14.

1.2.2 – Delimitação do Tema

Este trabalho vem fazer uma análise da influência dos elementos residuais (Cr, Ni e Cu) na usinabilidade do aço-de-corte-fácil ABNT 12L14 através do ensaio de usinabilidade. O ensaio de usinabilidade utilizado foi o ensaio de vida da ferramenta de curta duração, tendo o critério de fim de vida baseado no desgaste de flanco. Durante os ensaios mediram-se: o desgaste de flanco, tempo de vida da ferramenta, a rugosidade da peça e a potência elétrica consumida.

1.2.3 – Objetivo Principal

O objetivo principal deste trabalho é fazer um estudo do efeito dos elementos residuais (Cr, Ni e Cu) na usinabilidade do aço-de-corte-fácil através de ensaios de vida da ferramenta na operação de torneamento cilíndrico externo com ferramentas de aço-rápido e metal duro. Com essa análise, pretende-se determinar uma faixa adequada da composição química dos elementos residuais para a fabricação do aço-de-corte-fácil ABNT 12L14 melhorando sua usinabilidade.

1.2.4 – Objetivo Específico

Determinar a melhor faixa percentual da composição química dos elementos residuais para que a usinabilidade do aço ABNT 12L14 seja melhorada.

1.2.5 – Objetivos Secundários

O desenvolvimento deste trabalho, através da execução dos ensaios, pode produzir uma grande quantidade de informações. Embora não seja o foco principal do trabalho, podem-se tirar várias conclusões que, com certeza o valorizam e facilitam o entendimento do assunto da pesquisa em discussão. Entre as informações, podem-se citar o comportamento da rugosidade da peça, a potência elétrica consumida e a influência do fluido de corte na vida da ferramenta para a condição mais crítica dos ensaios com a ferramenta de aço-rápido.

1.3 – Justificativas

Os aços-de-corte-fácil são conhecidos por terem uma boa usinabilidade devido à facilidade de arranque de cavacos. A característica de boa usinabilidade é obtida, essencialmente, através da especificação de composição química de altos teores de enxofre e de outros elementos como, por exemplo, o chumbo. É importante ressaltar que existem outros parâmetros (fatores) que influenciam na usinabilidade dos materiais, como a presença dos elementos residuais cromo (Cr), níquel (Ni) e cobre (Cu), podendo haver uma diferença significativa dos percentuais desses elementos residuais que afetam diretamente o comportamento da usinabilidade do aço ABNT 12L14.

Em função das necessidades dos clientes usinarem peças com formatos cada vez mais complexos e sendo a operação de usinagem um dos mais importantes fatores no cálculo do custo final da peça, o desenvolvimento de aços com usinabilidade melhorada torna-se cada vez mais pertinente. Portanto, com este trabalho busca-se investigar a influência que os elementos residuais exercem sobre a usinabilidade do aço-de-corte-fácil ABNT 12L14, identificar uma faixa de composição química melhorada para esses elementos (Cr, Ni e Cu) e com isso fornecer subsídios aos fabricantes de aços-de-corte-fácil para prestar apoio técnico aos clientes e também criar bases para etapas futuras no desenvolvimento de aços de usinabilidade melhorada.

1.4 – Limitações

Esta dissertação de mestrado não esgota todas as questões sobre o assunto, o que, aliás, demandaria um período de estudo bem maior do que um objetivado para um mestrado. As limitações desta pesquisa, entretanto, servem em linhas gerais, para trabalhos futuros na área. O único critério de fim de vida utilizado nos ensaios de usinabilidade de vida da ferramenta de curta duração foi o desgaste de flanco e assim não se preocupou com a medição dos demais tipos de desgaste.

A medição da rugosidade e da potência elétrica consumida são apenas dados informativos para enriquecer o trabalho, não sendo, portanto, um parâmetro para medir a usinabilidade deste material. O trabalho limita-se à realização dos ensaios de usinabilidade do aço-de-corte-fácil ABNT 12L14 em operação de torneamento externo com ferramenta de aço-rápido e metal duro. As conclusões, porventura obtidas, não servirão para generalizar o comportamento dos elementos residuais em outros tipos de aços-de-corte-fácil.

1.5 – Metodologia de Pesquisa

Para conduzir o estudo proposto, foi escolhido como metodologia a Pesquisa Experimental, utilizando a Metodologia DOE (*Design of Experiments*).

Segundo Bryman et al (1989), a Pesquisa Experimental:

- Permite ao investigador estabelecer fortes relações de causalidade; ou seja, um experimento permite a identificação de uma função de transferência do tipo $Y=f(x)$;
- Apresenta uma maior facilidade no estabelecimento de relações de causa e efeito;
- É dotada de Validade Interna, ou seja, a capacidade de se concluir que as variáveis independentes (X) realmente afetam a variável dependente (Y);
- “... Controle é essencial”. Quando se utiliza a técnica experimental é necessário que se tenha controle sobre as variáveis de estudo, para que seja possível alterá-las segundo as necessidades do estudo. Esta é uma característica deste trabalho.

1.6 – Estrutura do Trabalho

Este trabalho está dividido em 8 capítulos, incluindo-se este capítulo.

No capítulo 2 é realizada uma revisão bibliográfica sobre alguns fundamentos do processo de usinagem: materiais de ferramentas, avarias e desgaste de ferramentas, medição dos desgastes das ferramentas, vida da ferramenta, potência de corte e rugosidade da peça;

Apresentá-se no capítulo 3 uma revisão bibliográfica sobre usinabilidade, conceituando-a, dando informações dos principais fatores que nela interferem; os tipos e critérios empregados na realização dos ensaios de usinabilidade;

No capítulo 4, abordam-se os aços-de-corte-fácil, mostrando a sua composição química, tipos existentes de acordo com as Normas ABNT/SAE e DIN, alguns exemplos de sua aplicação no setor industrial, sua usinabilidade e algumas tecnologias para a substituição do chumbo na fabricação do referido aço;

O capítulo 5 apresenta uma revisão bibliográfica dos recursos estatísticos encontrados no Planejamento de Experimentos (DOE) para fazer a análise dos resultados obtidos após a realização dos ensaios experimentais;

O capítulo 6 descreve como foi conduzido o trabalho experimental; os equipamentos utilizados, os softwares, os recursos e a abordagem metodológica;

O capítulo 7 apresenta os resultados experimentais após a realização dos ensaios e também uma análise e discussão detalhada dos resultados obtidos;

O capítulo 8 apresenta as conclusões obtidas, bem como as sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

ALGUNS FUNDAMENTOS DA USINAGEM

2.1 – Considerações Iniciais

A usinagem é conhecida como um processo de fabricação que se tem a remoção de material e este material removido é conhecido como cavaco. Cerca de 10% de toda produção de metais são transformados em cavacos. Por ser a usinagem um processo bem popular ela emprega dezenas de milhões de pessoas em todo mundo (Ferraresi, 1977; Shaw, 1984; Trent, 1991 e Machado & Silva, 2004).

O processo de usinagem, aparentemente simples, torna-se bem imprevisível. Isso devido à complexidade em determinar as suas condições ideais de corte, pois elas dependem de um grande número de variáveis podendo ser destacadas: parâmetros de corte (velocidade de corte, avanço, profundidade de corte), material da peça e da ferramenta, geometria da ferramenta, fluido de corte, tipo de usinagem e características da máquina. Shaw (1984) caracterizou o problema da seguinte forma: “... É praticamente impossível prever a desempenho no corte de metais. Entretanto, isto não quer dizer que estudos detalhados dos processos de usinagem não têm valor. Cada ponto fundamental que é detalhadamente investigado contribui para o entendimento do processo, e entendimento é o passo mais próximo da capacidade de prever”. Isso faz com que o estudo do processo de usinagem torne-se desafiador e motivador e assim novas tecnologias são descobertas.

2.2 – Ferramenta de Corte

Nos últimos anos, o desenvolvimento de ferramentas de corte foi o item que mais evoluiu no processo da usinagem dos materiais. Isso ocorreu devido a vários fatores: a descoberta de novos materiais; o intuito de melhorar as características e propriedades dos materiais já existentes, como a fragilidade, a tenacidade, a dureza; adequar-se às necessidades produtivas de parâmetros de corte (avanço, profundidade de corte, velocidade de corte); a produtividade, a durabilidade e o custo. Diante dessa realidade os fabricantes de ferramentas de corte perceberam a necessidade de investirem fortemente no desenvolvimento de novos materiais e geometrias, visando assim ter uma grande variedade de produtos para atender o mercado.

2.2.1 – Materiais para Ferramentas de Corte

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

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

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

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

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

O maior desafio no desenvolvimento de ferramentas de corte está exatamente no balanço entre a dureza e a tenacidade, visto que são duas propriedades de extrema importância para o desempenho da ferramenta de corte e que não são facilmente encontradas em um mesmo material (Figura 2.1). Atualmente, conseguem-se boas combinações de dureza e tenacidade, tanto em materiais do substrato da ferramenta quanto nos revestidos. As ferramentas revestidas buscam o equilíbrio entre as propriedades necessárias através do uso de um material base (o substrato), que confere propriedades de tenacidade e alguma dureza, e um revestimento, com alta dureza, resistência a abrasão e inércia química.

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

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

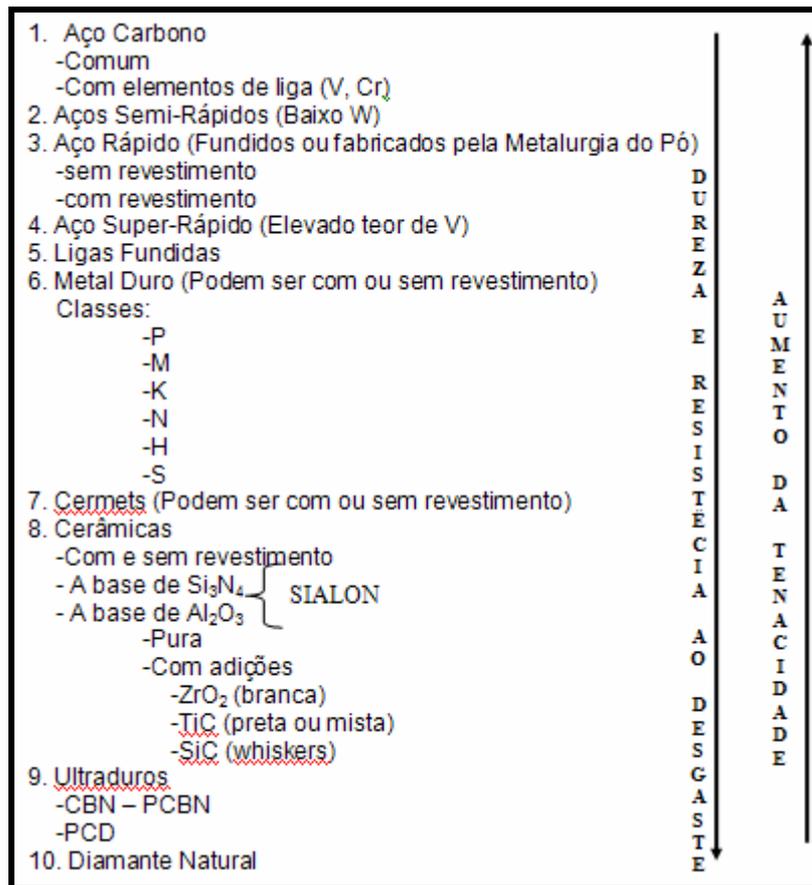


Figura 2.1 - Lista dos materiais para ferramentas de corte (Adaptado de Machado & Silva, 2004).

2.2.1.1 – Aços-Rápidos

Segundo Hoyle et al (1988), recebem esta definição devido a sua capacidade de reter elevadas durezas (1000 HV ou 65-70 HRC) mesmo quando utilizados em corte rápido de materiais. Além de elevada dureza, outra importante característica destes aços é a capacidade de manter durezas elevadas se submetidos a temperaturas de até 600°C (Roberts, 1980).

A microestrutura destes materiais é composta basicamente por carbonetos primários, cuja principal função é fornecer proteção contra desgaste abrasivo, e uma matriz de martensita revenida reforçada por carbonetos finamente dispersos (precipitados durante o revenimento, em um processo onde ocorre endurecimento secundário), cuja função é reter os carbonetos primários, mesmo sob as altas temperaturas e tensões cisalhantes criadas na interface entre a aresta de corte das ferramentas e o material que está sendo trabalhado na usinagem (Magnabosco, 1996).

Os aços-rápidos podem ser obtidos convencionalmente - por fusão, lingotamento e trabalho mecânico dos lingotes até a forma de barras, por exemplo – ou ainda por metalurgia do pó, onde o pó de determinada liga é compactado e sinterizado em formas muito próximas das que se deseja obter o produto final, obtendo inclusive uma maior isotropia (Hoyle, 1988)

A *American Iron and Steel Institute* (AISI) divide os aços-rápidos em duas categorias (Bayer, 1990):

- **Série T:** aços-rápidos ao tungstênio, onde os principais elementos além do tungstênio são o cromo, vanádio, cobalto e carbono.
- **Série M:** aços-rápidos ao molibdênio, onde os principais elementos além do molibdênio são também o cromo, o vanádio, o cobalto e o carbono. Esta série ainda apresenta uma subdivisão, classificada como aços-rápidos intermediários, os quais apresentam menores teores de elementos de liga e são empregados em aplicações onde a resistência ao desgaste dos aços carbono não é satisfatória e o custo dos aços-rápidos é muito elevado, como ferramentas para corte de madeira.

Ambas as séries citadas são equivalentes em desempenho; contudo, os aços-rápidos da série M mostram-se mais vantajosos, pois, além de terem tenacidade um pouco maior que os aços da série T equivalentes, quando temperados para obter a mesma dureza, apresentam menor custo inicial. Isto se deve ao fato do molibdênio (que nesta série substitui parcialmente o tungstênio) apresenta peso atômico igual à praticamente metade do peso atômico do tungstênio; desta forma, em peso, 1% de molibdênio equivale a aproximadamente 1,8% de tungstênio (Bayer, 1990).

A presença dos elementos de liga nos aços-rápidos tem sido objeto de estudo em muitos trabalhos, e estes buscam estabelecer o efeito deles sobre as propriedades destes materiais. Um resumo dos principais efeitos dos elementos de liga dos aços-rápidos está listado a seguir:

- **Molibdênio e tungstênio:** presença obrigatória para que um aço seja classificado como rápido. Adicionando-os, aumenta-se a resistência ao desgaste, a dureza a quente e a estabilidade térmica (Bayer, 1990). Apesar de o molibdênio apresentar maior eficiência no

aumento de dureza, tenacidade e temperabilidade, além de reduzir o custo inicial do aço, o seu uso substituindo totalmente o tungstênio não é tão vantajoso quanto à substituição parcial, pois este último fornece melhor proteção contra o crescimento de grão, descarbonetação e oxidação (Roberts, 1980). Além disso, os aços-rápidos ao molibdênio e tungstênio, em comparação aos aços-rápidos somente ao tungstênio, apresentam menor densidade. Deste modo, justifica-se o uso de aços ao tungstênio e molibdênio (série M), pois estes alcançam uma otimização de propriedades. O teor de tungstênio varia de 0 a 20% e o de molibdênio de 0 a 9%.

- **Cromo:** contribui substancialmente para a temperabilidade e eleva a dureza. O cromo também atua na redução da oxidação e formação de carepa nos tratamentos térmicos e operações de corte (Hoyle, 1988). Apesar de estar presente em teores de 3 a 5%, o teor de 4% parece apresentar o melhor compromisso entre dureza e tenacidade (Roberts, 1980). Sendo responsável pela formação de carbonetos $M_{23}C_6$ (e em alguns casos M_7C_3), presentes apenas no estado recozido, atuam como reserva de carbono que será responsável pela dureza da matriz (Hoyle, 1988).

- **Vanádio:** é o elemento formador de carbonetos do tipo MC (sua fórmula é, no entanto mais próxima de M_4C_3), que apresentam elevada dureza (o que favorece a resistência à abrasão) e estabilidade. Nos aços-rápidos, o teor de vanádio situa-se entre 1 e 5%. Devido à dificuldade de forjamento, ligas com mais de 5% de vanádio só são obtidas por metalurgia do pó (Hoyle, 1988).

- **Cobalto:** utilizado para aumentar a dureza e a estabilidade térmica. Existe uma dificuldade na afiação das ferramentas com alto teor de cobalto (Roberts, 1980). Provoca ainda redução na tenacidade e ductilidade, no entanto, seu emprego é justificado, pois melhora a capacidade de corte em temperaturas elevadas, aumentando a resistência ao amolecimento a quente (Wilson, 1975). Os teores típicos estão entre 5 e 12%, sendo que as adições de até 5% são as que fornecem as maiores melhorias em propriedades e adições acima de 8% fornecem as menores melhorias em propriedades.

- **Carbono:** responsáveis pela resistência ao desgaste e abrasão. Tem elevada dureza após têmpera e revenimento (Bayer, 1990). O aumento no teor de carbono provoca aumento na dureza, na estabilidade térmica, e diminui a forjabilidade do aço e a tenacidade (Roberts, 1980).

Fazendo-se uma análise do efeito que cada elemento químico provoca nas propriedades mecânicas do aço-rápido optou-se por um aço-rápido sem a adição de cobalto para realizar os ensaios. Assim o aço-rápido ao molibdênio, classificação SAE M2 foi escolhido e sua composição química e algumas características mecânicas estão apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Composição e características dos aços-rápidos (Adaptado Chiaverini, 2005)

Tipo de aço	Classificação SAE	% C	% Mn	% Si	% Cr	% V	% W	% Mo	% Co	Tenacidade	Resist. ao desg.	Dureza a quente
ao W	T1	0.70	0.30	0.25	4.00	1.00	18.00	-	-	Baixa	Muito Boa	Muito Boa
	T2	0.85	0.30	0.25	4.00	2.00	18.00	-	-			
	T3	1.00	0.30	0.25	4.00	3.00	18.00	-	-			
	T7	0.80	0.30	0.25	4.00	2.00	14.00	-	-			
	T9	1.20	0.30	0.258	4.00	4.00	18.00	-	-			
ao W-Co	T4	0.75	0.30	0.25	4.00	1.00	18.00	-	5.00	Baixa	Muito Boa	Excelente
	T5	0.80	0.30	0.25	4.00	2.00	18.00	-	8.00			
	T6	0.80	0.30	0.25	4.00	1.50	20.00	-	12.00			
	T8	0.80	0.30	0.25	4.00	2.00	14.00	-	5.00			
ao Mo	M1	0.80	0.30	0.25	4.00	1.00	1.50	8.00	-	Baixa	Muito Boa	Muito Boa
	M2	0.85	0.30	0.25	4.00	2.00	6.00	5.00	-			
	M3	1.00	0.30	0.25	4.00	2.75	6.00	5.00	-			
	M4	1.30	0.30	0.25	4.00	4.00	5.50	4.50	-			
	M10	0.85	0.30	0.25	4.00	2.00	-	8.00	-			
ao Mo-Co	M6	0.80	0.30	0.25	4.00	1.50	4.00	5.00	12.00	Baixa	Muito Boa	Excelente
	M30	0.85	0.30	0.25	4.00	1.25	2.00	8.00	5.00			
	M34	0.85	0.30	0.25	4.00	2.00	2.00	8.00	8.00			
	M35	0.85	0.30	0.25	4.00	2.00	6.00	5.00	5.00			
	M36	0.85	0.30	0.25	4.00	2.00	6.00	5.00	8.00			

2.2.1.2 - Metal Duro

Segundo Diniz et al (2003) o metal duro é um material de ferramentas mais utilizado na indústria, devido à combinação de dureza à temperatura ambiente, dureza a quente, resistência ao desgaste e tenacidade, obtida através de uma variação da composição química. O metal duro é um produto resultante da metalurgia do pó feito de partículas duras finamente divididas de carbonetos de metais refratários, sinterizados com um ou mais metais do grupo do ferro (ferro, níquel ou cobalto), formando um corpo de alta dureza e resistência à compressão. O metal duro é formado basicamente por dois constituintes:

• **Carbonetos de tungstênio:** extremamente duro e de alta resistência ao desgaste. Podem ser associados a outros carbonetos como os de titânio (TiC), de tântalo (TaC) e de nióbio (NbC) que conferem dureza a temperatura ambiente e sua retenção a altas temperaturas. O tamanho das partículas é geralmente de 1 a 10 μm e ocupam de 60 a 95% do volume do material. Hoje em dia já são produzidas partículas de ordem de 0,1 μm , fazendo com que a resistência ao desgaste e principalmente a tenacidade aumentem.

• **Elemento ou metal aglomerante:** trata-se de um metal do grupo do ferro, usualmente o cobalto, cuja função é aglomerar as partículas dos carbonetos, sendo responsável pela tenacidade do material. A diminuição da porcentagem de cobalto aumenta a dureza a quente do material como pode ser observado na Figura 2.2, tendo como referência o aço-rápido.

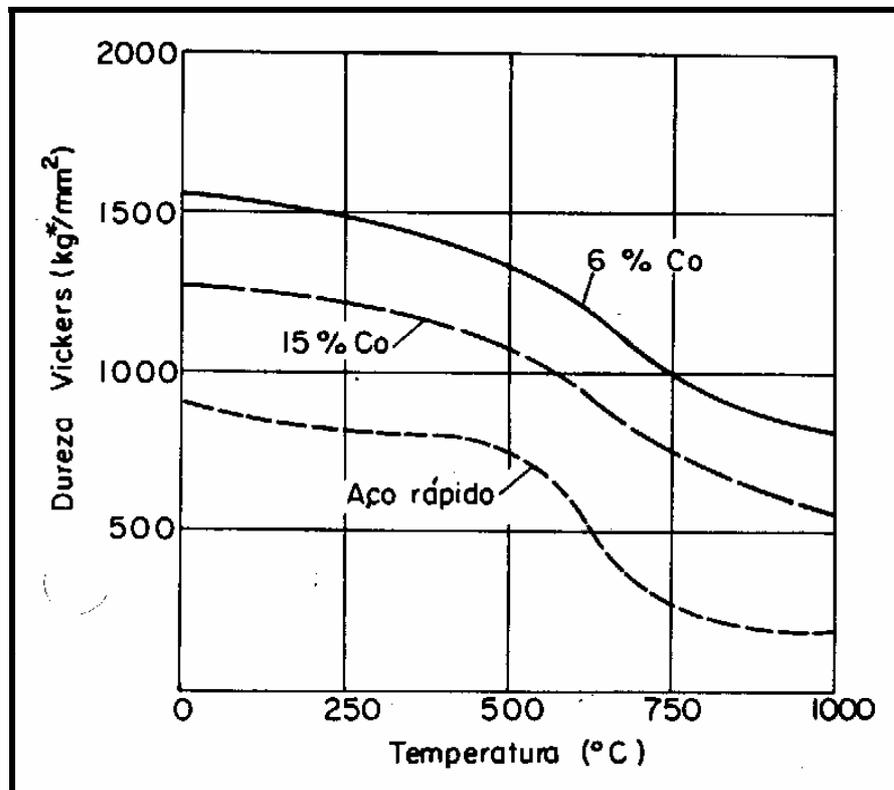


Figura 2.2-Influência da % cobalto e da temperatura na dureza do metal duro (Adaptado Diniz, 2003).

O metal duro é utilizado, na maioria das vezes, na forma de pastilhas soldadas ou intercambiáveis com fixação mecânica sobre um porta-ferramenta. Uma outra característica favorável do metal duro é o seu coeficiente de dilatação térmica. Este coeficiente tem um valor duas vezes menor comparado com o do aço em temperaturas ambiente e até 675°C. O

metal duro é classificado, segundo a Norma ISO, em seis classes, P, M, K, N, S e H (Sandvik, 2005). As Figuras 2.4 e 2.5 mostram estas designações dadas pela ISO:

- **Classe P:** constituídos de metais duros de elevado teor de $TiC+TaC$, conferindo assim à classe maior resistência ao desgaste e elevada dureza a quente. Esta classe é indicada para usinagem de materiais que produzem cavacos contínuos: aços, ferro fundido maleável e materiais dúcteis em geral. Por formarem uma área de atrito grande com a superfície de saída da ferramenta, desenvolvem altas temperaturas de corte e por isso tem um desgaste mais acentuado da ferramenta (desgaste de cratera).
- **Classe M:** possui propriedades intermediárias, sendo destinados a ferramentas com várias aplicações. Esta classe é indicada para usinagem de metais e ligas ferrosas que apresentam cavacos tanto longos como curtos, como por exemplo, o aço inoxidável.
- **Classe K:** composto de carbonetos de tungstênio aglomerados pelo cobalto. Esta classe é indicada para usinagem de metais e ligas ferrosas que apresentam cavacos curtos, de ruptura, e materiais não-metálicos: ferro fundido, aços temperados, metais não ferrosos (cobre, latão), plásticos e madeira. Este tipo de metal duro não é resistente ao mecanismo que gera o desgaste de cratera, quando usinando os ferrosos.
- **Classe N:** classe do metal duro que combina excelente resistência ao desgaste por abrasão e agudeza da aresta. Recomendada para metais não ferrosos e não metálicos.
- **Classe S:** classe de metal duro que combina boa resistência à deformação plástica, boa resistência ao desgaste por abrasão, tenacidade e boa resistência a altas temperaturas. Pode trabalhar tanto em altas como em baixas velocidades de corte. Recomendada para superligas resistentes ao calor incluindo as ligas de titânio.
- **Classe H:** classe de metal duro que combina boa resistência ao desgaste por abrasão e tenacidade para torneamentos de materiais endurecidos em baixas velocidades.

Segundo Diniz et al (2003), as ferramentas de metal duro podem usinar qualquer tipo de material, desde que este material não ultrapasse a dureza de 45 HRc. Nas operações de usinagem como torneamento, as ferramentas de metal duro podem trabalhar com velocidades

de corte bem maiores, comparadas com qualquer velocidade de corte de uma ferramenta de aço-rápido, no entanto há uma exigência de uma máquina com gama de velocidades maior e mais rígida, para prevenir vibrações.

Para melhorar ainda mais as propriedades mecânicas das ferramentas de metal duro foram desenvolvidas coberturas para elas. A finalidade principal dessas coberturas é aumentar a resistência ao desgaste da camada superior que entra em contato com o cavaco e com a peça.

As classes das ferramentas de metal duro designadas pela ISO são divididas pela Sandvik Coromant em classes representadas por letras e números conforme exemplo mostrado na Figura 2.3. A posição e o formato dos símbolos da classe indicam os campos adequados para a aplicação nas Figuras 2.4 e 2.5.

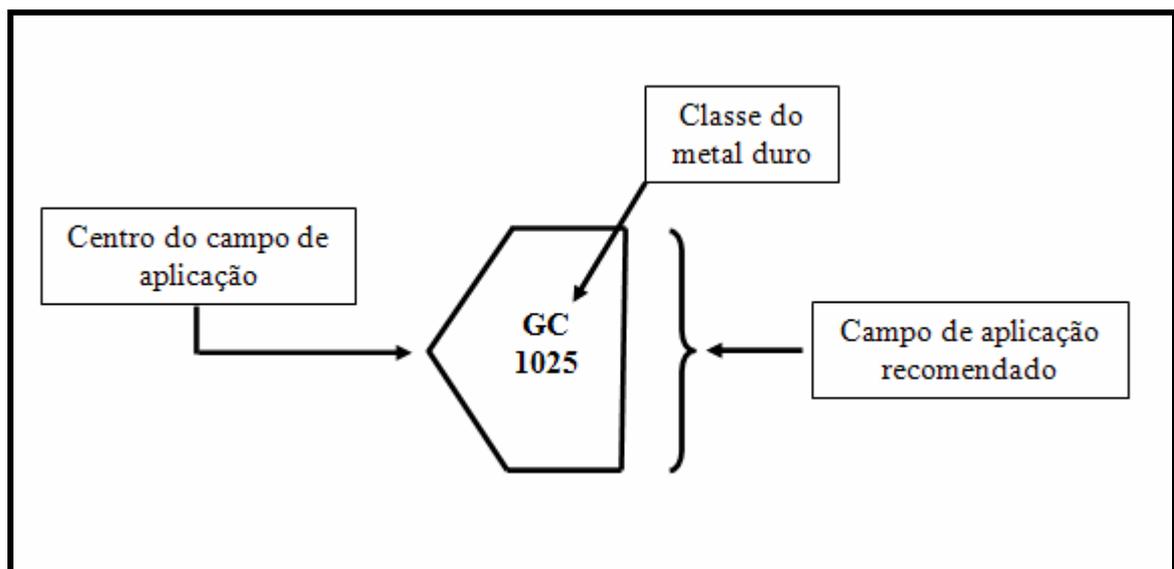


Figura 2.3 – Exemplo da indicação das classes de metal duro da Sandvik Coromant (Adaptada Sandvik, 2005).

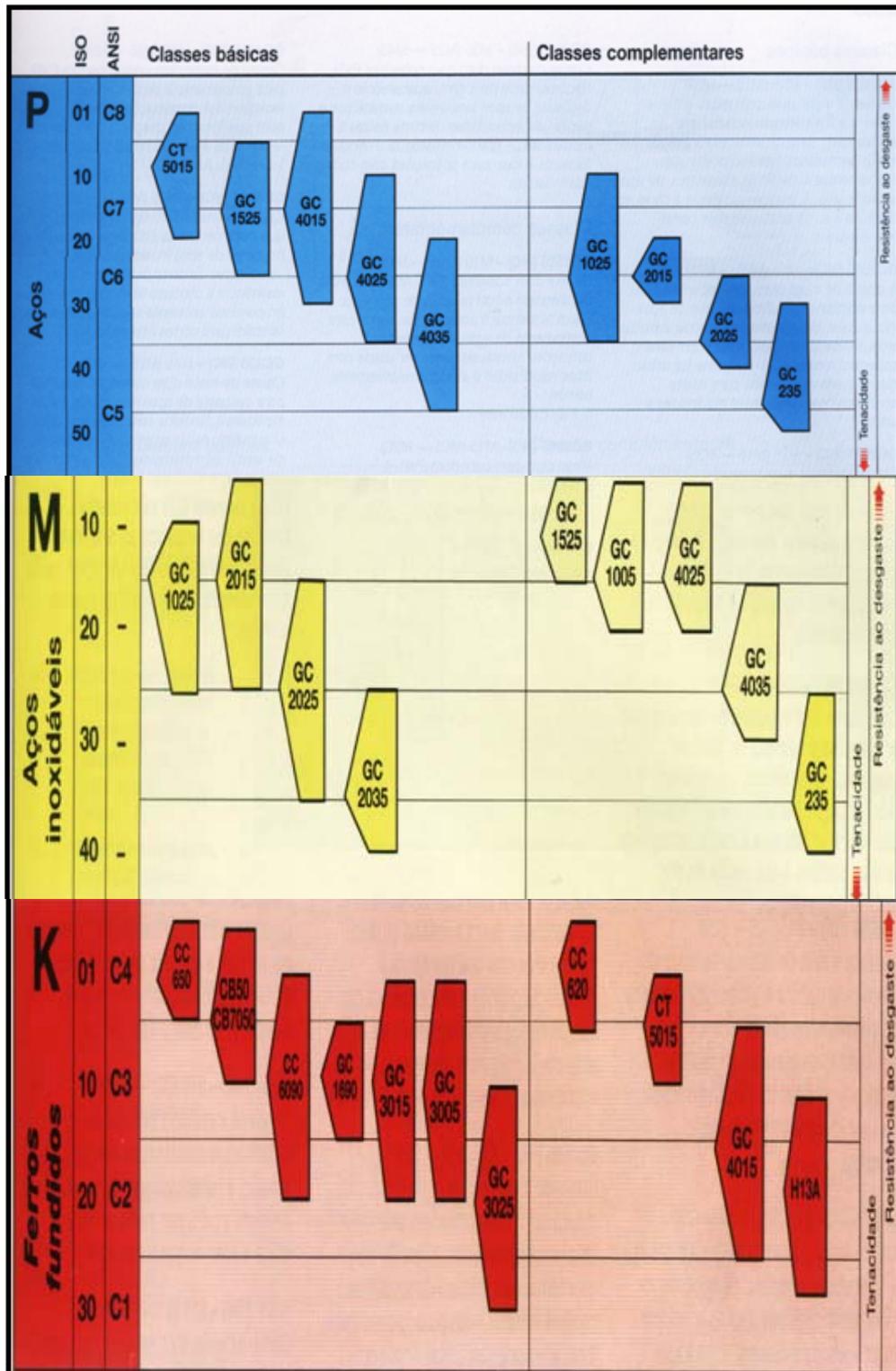


Figura 2.4 - Classes P, M e K tradicionais designadas pela Norma ISO (Adaptada Sandvik, 2005).

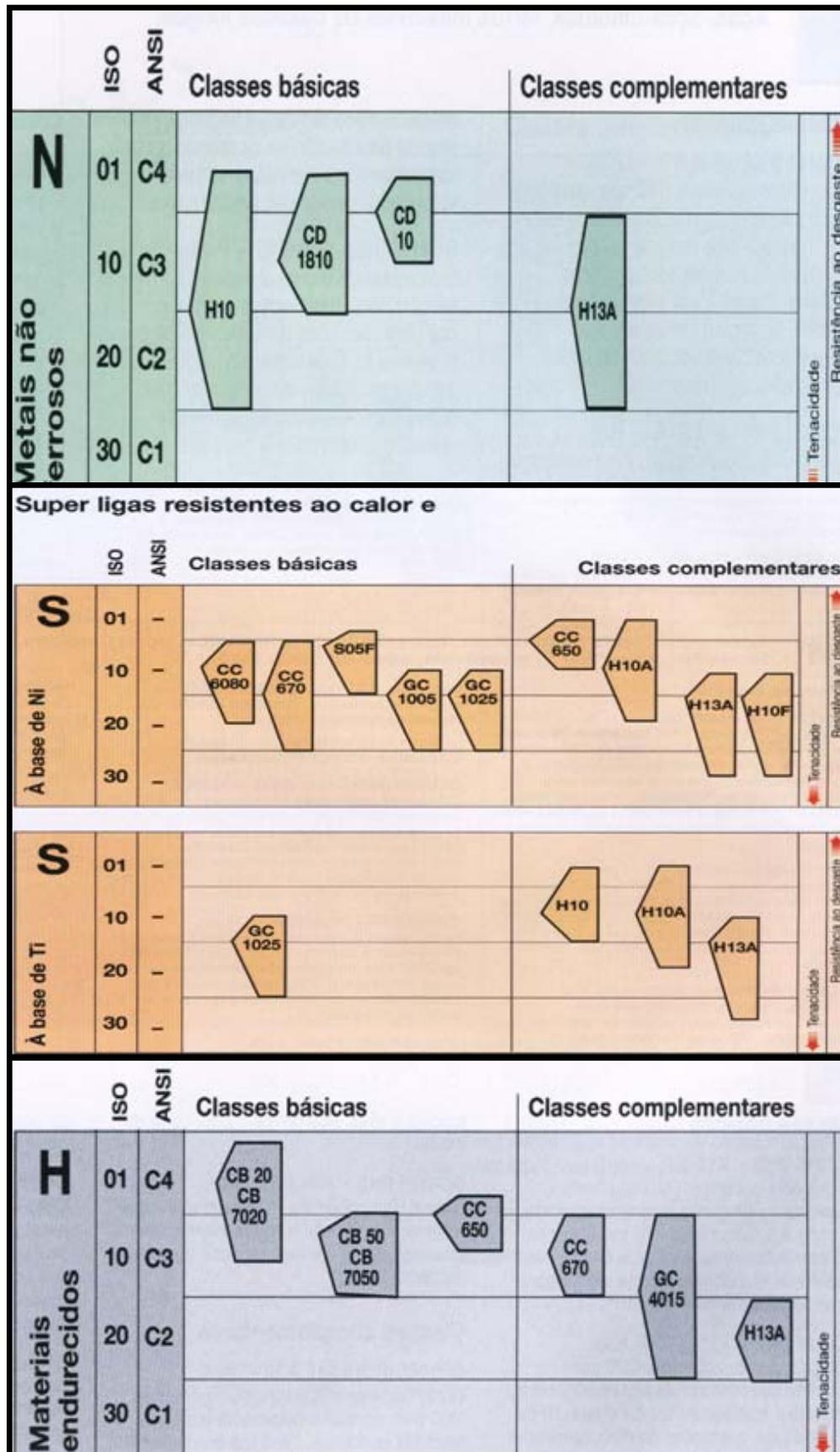


Figura 2.5 – Novas Classes N, S e H designadas pela Norma ISO (Adaptada Sandvik, 2005).

2.2.1.3 - Metal Duro com cobertura

Segundo Machado et al (2004), a utilização de ferramentas de metal duro com cobertura nas indústrias atinge cerca de 90%. Este número é consequência de um maior domínio das técnicas de revestimentos, apresentando custo mais acessível do produto e também do grande número de produtos fornecidos pelos grandes fabricantes de ferramentas.

Os revestimentos são aplicados em substratos de quaisquer classes do metal duro. Os metais duros podem receber o revestimento pelo processo PVD (Deposição Física por Vapor) e pelo processo CVD (Deposição Química por Vapor). Os fabricantes de ferramentas possuem em suas linhas de produtos ferramentas revestidas pelos dois processos. Pode ser observada na Tabela 2.2 uma comparação entre as ferramentas revestidas para ambos os processos, possuindo o mesmo substrato. O processo por PVD garante a mesma tenacidade do substrato e isso não ocorre com o processo CVD (Machado & Silva, 2004).

Tabela 2.2 – Comparação entre os processos CVD e PVD (Adaptada Machado & Silva, 2004)

	CVD – Deposição Química de Vapor	PVD – Deposição Física de Vapor
Temperatura de revestimento	Aprox.. 1000°C.	Aprox. 500°C.
Tenacidade	Reduzida.	Não é afetada.
Aresta de corte	Arredondamento requerido.	Pode ser quina viva.
Espessura do revestimento	Até 12 µm.	Até 4 µm.
Camadas	Multicamadas TiC-TiN, TiN-TiCN-TiN, TiC-Al ₂ O ₃ .	TiN, TiCN, TiAlN.
Principais aplicações	Torneamento e mandrilhamento.	Fresamento, roscamento e furação.
Vantagens	Maior resistência ao desgaste, maior resistência à craterização. Grande vida da ferramenta.	Substitui ferramenta sem revestimentos com mesma tenacidade, mesma configuração de aresta e mesma precisão. Reduz a formação da APC. Maior vida na ferramenta.

Segundo Diniz et al (2003) as principais características das camadas de revestimentos são (Figura 2.6):

- **Carbonetos de titânio (TiC):** possui excelente resistência ao desgaste por abrasão, funciona como elemento que promove a adesão das camadas de cobertura com o metal duro do núcleo. Possui baixa tendência de soldagem com o material da peça, dificultando o desgaste por adesão e a formação de aresta postiça de corte e baixo coeficiente de dilatação térmica. É o revestimento mais utilizado como primeira camada.
- **Óxido de alumínio (Al_2O_3):** garante a estabilidade térmica necessária em temperaturas elevadas por ser um material cerâmico refratário e por possuir alta resistência ao desgaste por abrasão, além de alta resistência a ataques químicos e à oxidação.
- **Nitreto de titânio (TiN):** reduz o coeficiente de atrito entre a pastilha e o cavaco. É quimicamente mais estável que o TiC por possuir menor tendência à difusão com aços.
- **Nitreto de titânio-alumínio (TiAlN) e nitreto de alumínio-titânio (AlTiN):** maior resistência à oxidação, permitindo o uso de temperaturas mais altas; baixa condutividade térmica, protege a aresta de corte e aumenta a remoção de calor através do cavaco; alta dureza a frio e a quente; alta estabilidade química, que reduz bastante o desgaste de cratera.

Existem alguns critérios para uma boa escolha de uma ferramenta de metal duro para uma determinada aplicação, podendo ser citados (Diniz, 2003):

- **Severidade da operação de usinagem:** classes de ferramentas com maior teor de Co são utilizadas em operações de desbaste, com avanço e profundidade de corte maior e cortes interrompidos, por criarem tensões elevadas na ferramenta.
- **Velocidade de corte:** classes de ferramentas com menor teor de Co e mais carbonetos são utilizadas em operação de acabamento, com maiores velocidades de corte, por necessitarem de maior resistência ao calor e à abrasão.
- **Condições da máquina-ferramenta:** classes com maior tenacidade, ou seja, maior teor de cobalto é recomendado para máquinas menos rígidas, menos potente, devido à relativa fragilidade desse material, embora ocorra uma redução da vida da ferramenta.

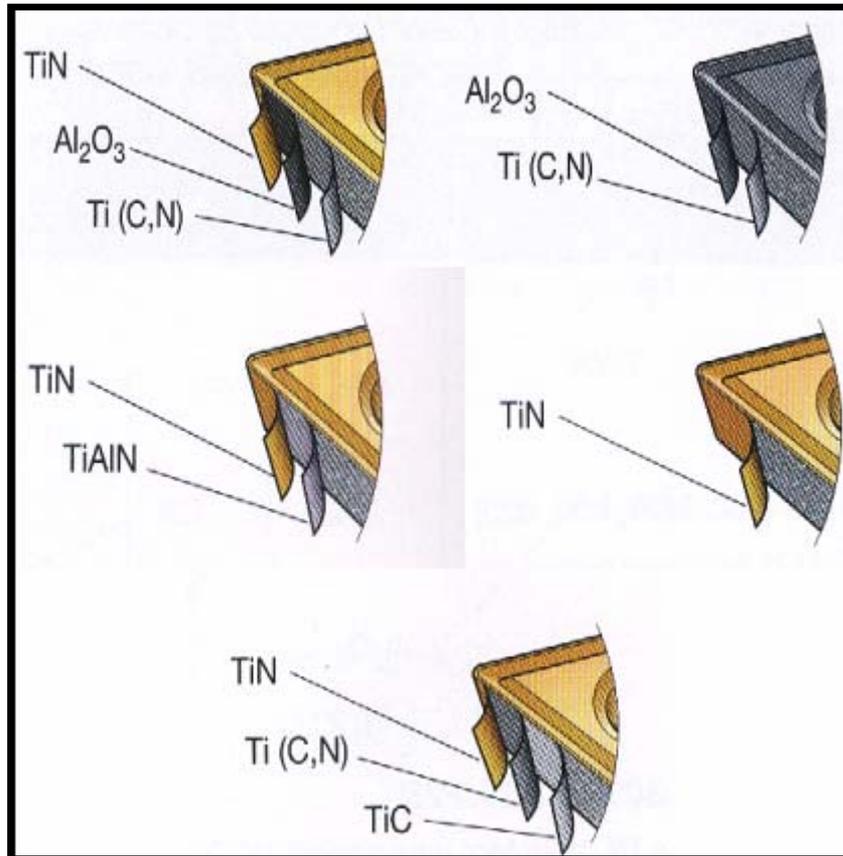


Figura 2.6 – Disposição dos principais revestimentos do metal duro (Adaptada Sandvik, 2005)

Para a realização dos ensaios deste trabalho com ferramentas de metal duro com cobertura, escolheu-se um metal duro com revestimento pelo processo CVD com multicamadas (TiN, Al₂O₃, Ti(C,N) classe ISO P35 (Sandvik GC4035) que possui uma maior tenacidade e uma menor resistência ao desgaste.

2.3 – Avarias e Desgaste da Ferramenta

Estudar e entender os processos de destruição das ferramentas de corte é muito importante. Através desse estudo podem-se encontrar soluções coerentes e eficazes para aumentar a vida da ferramenta. A destruição da ferramenta ocorre através de três formas: avaria, desgaste e deformação plástica (Machado & Silva, 2004).

- **Avarias:** processo de destruição da ferramenta de corte que ocorre de maneira repentina e inesperada, causado pela quebra, lasca ou trinca da ferramenta de corte. A avaria promove a perda de massa da ferramenta em muitos casos.

- **Desgaste:** segundo a Norma ISO 3685 (1993) o desgaste em ferramentas de corte ocorre quando há mudança de sua forma original durante o corte, resultante da perda gradual de material. No desgaste ocorre a perda de massa de maneira contínua e progressiva, e em proporções pequenas.

- **Deformação plástica:** é a mudança da geometria da ferramenta de corte pelo deslocamento de massa, ocasionado pelo cisalhamento devido às altas tensões atuantes nas superfícies das ferramentas de corte. A deformação plástica também pode ser considerada como uma forma de desgaste, uma vez que ambos promovem a mudança da geometria da ferramenta, que podem acarretar a destruição total da aresta de corte (Trent & Wright, 2000). Para evitá-la, deve-se selecionar uma classe de ferramenta com maior dureza e reduzir a velocidade de corte.

2.3.1 – Tipos de Avarias e Desgaste

Segundo Diniz et al (2003) os principais tipos de avarias e desgaste são:

- **Lascamento:** é um tipo de avaria da ferramenta. Partículas grandes de material são retiradas de uma só vez (Figura 2.7). Ocorre principalmente em ferramentas com material frágil e/ou quando a aresta de corte é pouco reforçada. Prejudicam o acabamento superficial da peça e pode levar até a quebra da ferramenta se continuar a crescer. Para evitar o lascamento, pode-se trabalhar com uma ferramenta mais tenaz, aumentar o raio de ponta e/ou o ângulo de cunha, suavizar o primeiro contato de ferramenta com a peça;

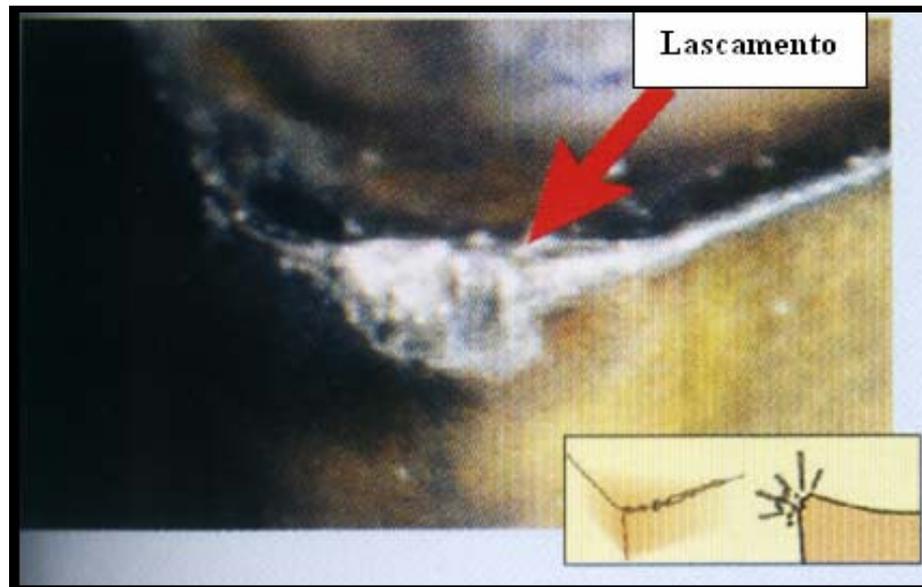


Figura 2.7 – Lascamento da aresta de corte (Adaptada Sandvik, 2005)

- **Trincas:** outro tipo de avaria da ferramenta. São causadas pela variação da temperatura e/ou pela variação dos esforços mecânicos. As trincas que ocorrem perpendicularmente à aresta de corte são de origens térmicas e quando ocorrem paralelas à aresta de corte são de origens mecânicas (Figura 2.8). O crescimento da trinca leva a quebra da ferramenta. Para se evitar a formação das trincas de origem mecânica pode-se escolher uma ferramenta mais tenaz, reduzir o avanço, aumentar a estabilidade da usinagem; para se evitar trincas de origens térmicas não utilizar fluido de corte e escolher também uma ferramenta mais tenaz.

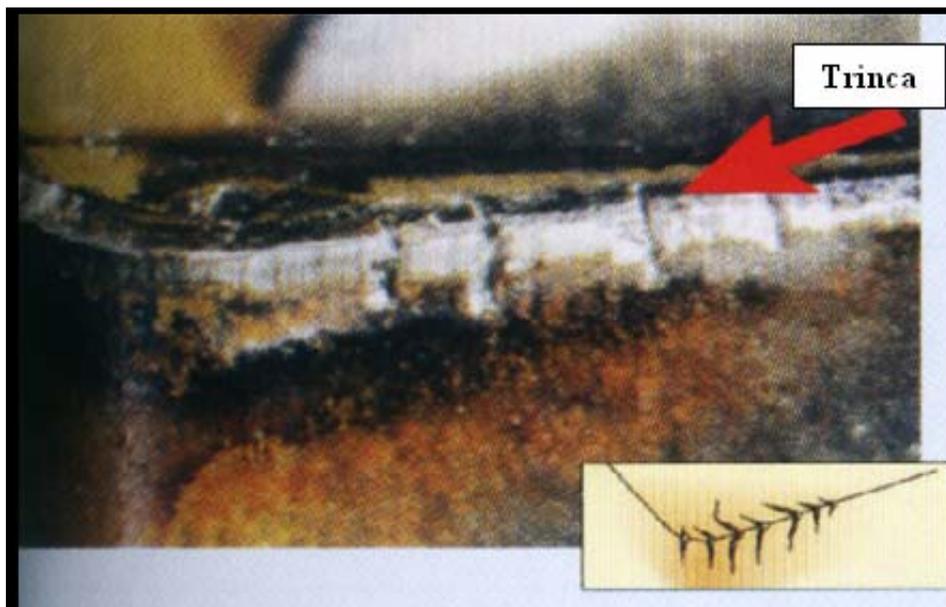


Figura 2.8 – Trincas ou fissuras térmicas na aresta de corte (Adaptada Sandvik, 2005).

- **Desgaste de flanco:** ocorre na superfície de folga da ferramenta de corte, causado pelo contato entre a ferramenta e a peça (Figura 2.9). Esse tipo de desgaste ocasiona deterioração do acabamento superficial da peça e, por modificar totalmente a forma da aresta de corte original, faz com que a peça mude de dimensão, podendo sair de sua faixa de tolerância. O desgaste é acelerado com velocidade de corte muito alta ou muito baixa na presença da aresta postiça de corte (APC), com resistência insuficiente da ferramenta com o fenômeno da abrasão. Para minimizar o desgaste deve-se trabalhar com velocidades adequadas e selecionar uma ferramenta que resista mais ao desgaste.



Figura 2.9 – Desgaste de flanco na aresta de corte (Adaptada Sandvik, 2005).

- **Desgaste de cratera:** é o tipo de desgaste que ocorre na superfície de saída da ferramenta de corte, causado pelo atrito entre ferramenta e cavaco, principalmente através do fenômeno da difusão (Figura 2.10). O crescimento do desgaste de cratera resulta na quebra da ferramenta, quando tal desgaste se encontra com o desgaste de flanco. Para evitar esse tipo de desgaste recomenda-se utilizar ferramentas de metal duro revestido ou ferramentas cerâmicas.

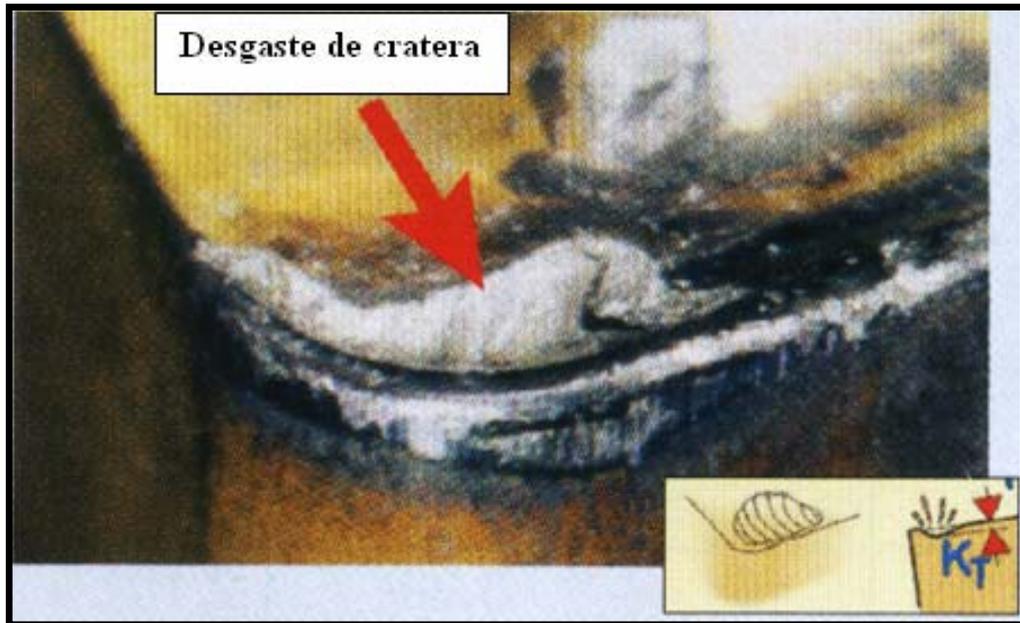


Figura 2.10 – Desgaste de cratera na superfície de saída do cavaco (Adaptada Sandvik, 2005).

- **Quebra:** é o resultado final da continuação das avarias e desgaste ou da soma dos dois (Figura 2.11). A quebra da ferramenta ocasiona não somente dano na ferramenta, mas também no porta-ferramenta e na própria peça. A quebra da ferramenta também pode ser resultante de uma má especificação da ferramenta ou das condições de trabalho.



Figura 2.11 – Quebra da ferramenta (Adaptada Sandvik, 2005).

2.3.2 – Mecanismos Causadores dos Desgastes

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

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

- **Aderência:** a aderência é formada por um extrato metálico quando duas superfícies metálicas são postas em contato sob cargas moderadas, baixas temperaturas e baixas velocidades de corte. A resistência desse extrato é elevada a tal ponto que, na tentativa de separar as superfícies, ocorre ruptura em um dos metais e não na superfície de contato. Assim partículas de um metal migram para a superfície do outro. Em geral, a zona de escorregamento, o corte interrompido, a profundidade de usinagem irregular ou falta de rigidez promovem o fluxo irregular do cavaco e facilitam o mecanismo de desgaste por aderência. Isso pode ser amenizado com a utilização de fluido de corte com efeito de lubrificante e com o revestimento da ferramenta com materiais de baixo coeficiente de atrito como o nitreto de titânio.

A aresta postiça de corte é formada pela aderência do cavaco à aresta de corte modificando o comportamento da aresta de corte em relação a força de corte, ao acabamento superficial da peça e ao desgaste da ferramenta (Figura 2.12). Em determinado momento esta aresta postiça se rompe bruscamente, causando uma perturbação dinâmica e arrancando partículas da superfície de folga da ferramenta, gerando um desgaste de flanco muito grande, mesmo em baixas velocidades de corte.

A forma do desgaste de flanco na presença da aresta postiça de corte é diferente da forma que se observa normalmente. Enquanto nas velocidades de corte maiores, onde não há aresta postiça de corte, a marca do desgaste é aproximadamente paralela à direção de corte, quando ela ocorre se apresenta inclinada em relação à direção de corte.



Figura 2.12 – Aresta postiça de corte causada pela aderência (Adaptada Sandvik, 2005).

- **Difusão:** a difusão entre ferramenta e cavaco é ativada pela temperatura na zona de corte. A difusão no estado sólido consiste na transferência de átomos de um metal a outro. Ela também depende da duração do contato e da afinidade físico-química dos metais envolvidos na zona de fluxo.
- **Oxidação:** altas temperaturas e a presença de ar e água, contida nos fluidos de corte, geram oxidação para a maioria dos metais. O tungstênio e o cobalto durante o corte formam filmes óxidos porosos sobre a ferramenta, que são facilmente removidos pelo atrito causando o desgaste. O desgaste gerado pela oxidação se forma especialmente nas extremidades do contato cavaco-ferramenta devido ao acesso do ar nesta região, sendo esta uma possível explicação para o surgimento do desgaste de entalhe.

2.3.3 – Medição dos Desgastes das Ferramentas

A medida dos desgastes sempre é feita no plano ortogonal da ferramenta, por convenção. Existem duas medidas de desgaste, uma medida do desgaste na superfície de saída da ferramenta e uma medida de desgaste na superfície de folga da ferramenta. Na superfície de saída têm-se os desgastes de cratera. Neste tipo de desgaste é medida a profundidade da cratera (KT), a largura da cratera (KB) e a distância do centro da cratera à aresta de corte

(KM) (Figura 2.13). Na superfície de folga têm-se os desgastes de flanco. Neste tipo de desgaste é medida a largura do desgaste de flanco (VB_B), que é um valor médio do desgaste na superfície de folga e a largura máxima do desgaste de flanco (VB_{Bmax}). Mede-se ainda o valor dos desgastes gerados na superfície de folga pelos entalhes (VB_N e VB_C) (Figura 2.9). Os valores desses parâmetros de medida são estipulados pela Norma ISO 3685 (1993).

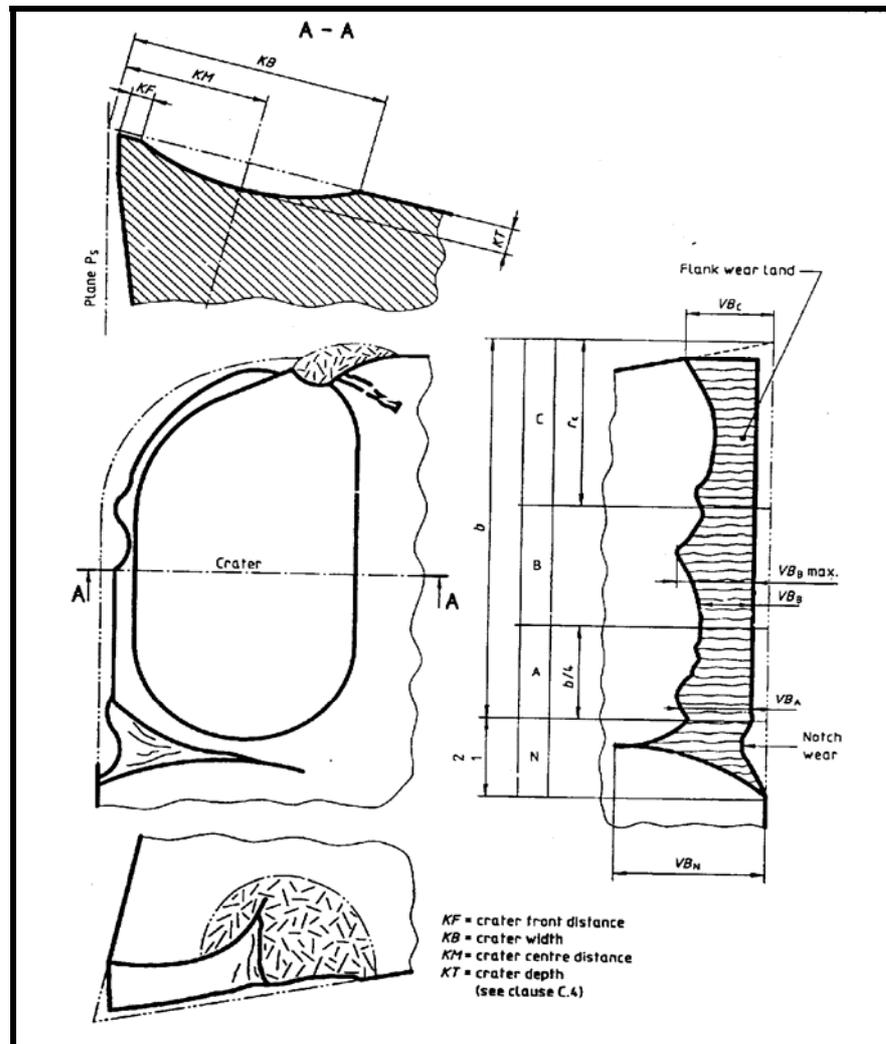


Figura 2.13 – Desgaste da ferramenta (Adaptado Norma ISO 3685, 1993).

2.4 – Vida da Ferramenta

Segundo Ferraresi (1977), citado por Machado et all (2004) a vida de uma ferramenta pode ser definida como sendo o tempo em que ela trabalha efetivamente, sem perder o corte ou até que se atinja um critério de fim de vida previamente estabelecido. Atingindo este tempo a ferramenta deve ser substituída ou reafiada. O fim de vida de uma

ferramenta de corte será definido pelo tamanho ou nível de desgaste estabelecido dependente de alguns fatores:

- Receio da quebra da aresta de corte;
- Temperaturas excessivas atingidas pela ferramenta;
- Quando tolerâncias dimensionais não são mais obedecidas;
- Acabamento superficial não é mais satisfatório;
- Aumento excessivo da força de usinagem;
- Como critério para avaliar a usinabilidade de um material.

2.4.1 – Fatores que Influenciam na Vida da Ferramenta

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

● Os fatores relativos à peça que afetam a vida da ferramenta são:

- Composição química;
- Tamanho de grão e microestrutura;
- Fusão e processo de fundição;
- Ao tipo de fabricação: fundido, forjado, laminado, trefilado.
- Ao tipo de tratamento térmico: recozimento, normalização, têmpera, revenimento.
- A propriedades mecânicas: resistência à tração, ductilidade, dureza, encruabilidade.
- Dimensões e forma;

● Os fatores relativos à ferramenta de corte que afetam a vida da ferramenta são:

- Composição química da ferramenta;
- Tratamento térmico;
- Dureza e resistência ao desgaste;
- Geometria;
- Tenacidade.

● Os fatores relativos às condições de corte e à máquina que afetam a vida da ferramenta são:

- Velocidade de corte;
- Avanço;
- Profundidade de corte;
- Tipo de máquina;
- Rigidez da máquina.

● **Os fatores relativos ao fluido de corte que afetam a vida da ferramenta são:**

- Propriedades refrigerantes;
- Propriedades lubrificantes;
- Forma de aplicação.

Para poder aproveitar o maior potencial da vida de uma ferramenta deve-se conciliar todos os fatores citados acima. No entanto, durante o processo de usinagem, levando-se em conta as condições de corte, o fator que é mais significativo para a vida da ferramenta é a velocidade de corte, pelo fato de ser ela a principal causadora da progressão do desgaste. Em seguida tem-se o avanço e por último a profundidade de corte (Machado & Silva, 2004).

2.5 – Acabamento Superficial

Segundo Silveira et al (1983) a qualidade da superfície de uma peça é caracterizada pelo acabamento obtido na usinagem e pelas propriedades físicas e mecânicas do metal na camada superficial. Estas propriedades são modificadas durante a operação de usinagem devido, principalmente a ação dos seguintes fatores:

- Pressão da ferramenta contra a peça;
- Atrito da superfície de incidência contra a peça;
- Atrito do material na região de deformação plástica;
- Calor gerado no processo de corte;
- Vibração da máquina e ferramenta;
- Fenômenos específicos do processo de formação do cavaco;
- Geometria da ferramenta;
- Condições de usinagem, principalmente a velocidade de corte.

O acabamento superficial de uma peça usinada está relacionado a alguns fatores (Juneja & Swkhon, 1987; Shaw, 1984; Schaffer, 1988; Drozda & Wick, 1983; Sata, 1963) citados por Machado (2004):

- **Rugosidade Superficial:** são irregularidades finas ou erros micro-geométricos da ação inerente do processo de corte. A rugosidade superficial é utilizada para controlar o processo de fabricação;
- **Ondulações:** são irregularidades superficiais cujos espaçamentos são maiores que o *cut-off* (aproximadamente 1 mm). Podem ser causada por vibrações e deflexões da ferramenta e/ou peça, devido a forças de corte e temperaturas de corte;
- **Falhas nas superfícies:** são interrupções na topografia típica da superfície de um componente, não intencionais, inesperadas e indesejáveis. Podem ser causadas por defeitos inerentes ao processo de corte, tais como: inclusões, trincas, bolhas, ou podem surgir também durante o processo de corte;
- **Marcas de avanço:** são marcas que denotam as direções predominantes das irregularidades superficiais. Elas dependem da orientação da peça e da ferramenta de corte na máquina e da natureza do movimento relativo entre as duas.

2.5.1 – Efeito de Alguns Parâmetros de Usinagem no Acabamento Superficial

O acabamento superficial sofre influência de vários fatores na usinagem, conforme mencionado anteriormente. Portanto, trabalhar adequadamente com esses fatores nos traz grandes benefícios. Em geral a rugosidade é menor, ou seja, melhor, quando (Drozda & Wick, 1983; Machado & Silva, 2004):

- Deflexões geradas por esforços de usinagem ou vibrações são pequenas;
- A ponta da ferramenta não é aguda;
- A ferramenta e a peça estão corretamente posicionadas e centradas, evitando desvios;

- O material da peça é inerentemente puro, livre de defeitos (trincas, bolhas e inclusões);
- O eixo principal da máquina ferramenta está corretamente alinhado e as guias sem desgaste;
- A aresta de corte sem quebras;
- Corte sem aresta postiça de corte.

O avanço e a profundidade de corte têm grande influência no acabamento superficial, principalmente o avanço. A altura dos picos e a profundidade dos vales das marcas de avanço tendem a aumentar com o avanço. A profundidade de corte aumenta as forças e, portanto as deflexões. As alturas das ondulações também são aumentadas com a profundidade de corte. É melhor trabalhar com velocidades de corte mais altas, acima da velocidade de corte crítica, para se evitar a formação da aresta postiça de corte.

Peças longas e finas são mais sensíveis às forças elásticas e dinâmicas. Como resultado, as ondulações são mais pronunciadas. Por outro lado, peças grandes (grandes seções transversais) são rígidas e as alturas das ondulações são pequenas.

As características geométricas também agem positiva e negativamente na rugosidade superficial, assim podemos tecer alguns comentários:

- **Ângulo de saída:** quanto maior for o ângulo de saída, menor será a força de usinagem e, portanto, as alturas das ondulações e deflexões serão menores;
- **Ângulo de folga:** deve ser suficiente para prevenir o atrito entre a ferramenta e a superfície usinada. O atrito gera forças adicionais que causam deflexões. O contato com o atrito tende a imprimir, na superfície usinada o perfil do desgaste da ferramenta;
- **Raio de ponta:** deve ser suficientemente grande para diminuir o efeito das marcas do avanço, com apreciável melhora no acabamento. Entretanto um raio de ponta excessivo pode gerar vibrações;
- **Ângulos de posição:** os efeitos desses ângulos são pequenos, mas uma redução no ângulo de posição diminui as marcas de avanço e melhora o escoamento do cavaco e acabamento.

Ângulo de posição muito pequeno pode causar vibrações. O aumento do ângulo de posição lateral aumenta a altura das marcas de avanço e prejudica o acabamento. É comum usar um ângulo de posição nulo por um pequeno comprimento de $1,5 \times "F"$ para remover parcialmente ou totalmente as marcas de avanço. Este método, entretanto, pode causar vibração.

Além do efeito das condições de corte e da geometria da ferramenta outros efeitos devem ser levados em consideração. A máquina ferramenta deve ser rígida, sem erros de alinhamento e com movimentos precisos, para não interferir no acabamento superficial. As principais características desejadas em uma máquina são:

- Potência da máquina suficiente para manter a velocidade e o avanço requerido, sem problemas;
- Adequada resiliência para evitar deflexões;
- Rigidez e amortecimento contra vibrações;
- Ter uma base (fundação) adequada para minimizar vibrações e transmissão para outras máquinas;
- Precisão na fabricação para reduzir ao mínimo o desalinhamento;
- Meios adequados para suportar rigidamente a peça e a ferramenta.

O fluido de corte diminui o desgaste da ferramenta e o atrito entre a ferramenta e a peça ou cavaco. Tudo isto, melhora o acabamento superficial. O fluido atuando como refrigerante, entretanto, pode aumentar a força de usinagem e aumentar a rugosidade da peça. Um revestimento aplicado sobre uma ferramenta para atuar como lubrificante, ou diminuir a afinidade química entre o material da peça e ferramenta pode também contribuir para melhorar o acabamento superficial (Machado & Silva, 2004).

2.6 – Potência de Corte

Para que ocorra a remoção de material da peça, é necessário que uma máquina-ferramenta forneça, através de seu eixo árvore, uma rotação capaz de executar o movimento de corte e de avanço. A potência gerada pela máquina é conhecida como potência de usinagem. Ela é calculada como sendo o produto das componentes da força de usinagem pelas respectivas componentes de velocidades de corte (Diniz, 2003).

• **Potência de corte (P_c):** é o produto da força de corte pela velocidade de corte, dada pela equação 2.1:

$$P_c = \frac{F_c \cdot V_c}{60 \cdot 1000} \quad (2.1)$$

P_c = potência de corte [kW];

V_c = velocidade de corte [m/min];

F_c = força de corte [N].

• **Potência de avanço (P_f):** é o produto da força de avanço pela velocidade de avanço, dada pela equação 2.2:

$$P_f = \frac{F_f \cdot V_f}{60 \cdot 10^6} \quad (2.2)$$

P_f = potência de avanço [kW];

V_f = velocidade de avanço [mm/min];

F_f = força de avanço [N].

Pode-se determinar a potência efetiva de corte (P_e), dada em [kW], que é a soma algébrica das potências de corte e avanço. Conforme equação 2.3:

$$P_e = P_c + P_f \quad (2.3)$$

Segundo Diniz et al (2003), há uma relação entre a potência de corte e a potência de avanço, e essa diz que a potência de avanço é 140 vezes menor que a potência de corte, para uma situação extrema. Assim para o dimensionamento do motor da máquina consideremos apenas a potência de corte. A potência fornecida pelo motor (P_m), é dada pela equação 2.4:

$$P_m = \frac{P_c}{\eta} \quad (2.4)$$

P_m = potência do motor [kW];

P_c = potência de corte [kW];

η = rendimento da máquina (maior que 90% para máquinas CNC).

Capítulo 3

USINABILIDADE DOS MATERIAIS

3.1 – Considerações Iniciais

Este capítulo tem o intuito de dar uma visão geral sobre a usinabilidade dos aços, conceituando-a, relatando fatores que nela interferem, tipos de ensaios e critérios de avaliação.

Os primeiros estudos sobre usinabilidade foram publicados por Taylor em 1906 em ensaios de longa duração, onde a quantidade de material usinado era muito grande. Posteriormente muitos métodos foram propostos e testados com o objetivo de simplificar e reduzir custos dos ensaios e aumentar a possibilidade do emprego dos testes pelas empresas (Parent, 1976).

Desde então, a busca constante para encontrar novas tecnologias para aumentar a usinabilidade dos aços vem ganhando espaço no setor metal-mecânico. Essas tecnologias vão desde o controle apurado do processo de fabricação/transformação do aço, passando pela adição de elementos químicos que promovam a fragilização do cavaco e/ou lubrificação da ferramenta de corte até mesmo a engenharia ou modificação das inclusões de óxidos resultantes do processo de desoxidação (Klujszo & Soares, 2005).

A usinabilidade é uma propriedade que depende da interação entre o processo de fabricação e as características do material da peça. No caso dos aços, a composição química, a microestrutura e os tratamentos térmicos e mecânicos têm um efeito acentuado na usinabilidade dessa classe de materiais metálicos (Baptista, 2002).

3.2 – Conceito de Usinabilidade

Existem várias definições para o termo “Usinabilidade”. Segundo Datsko (1967) e Ferraresi (1977), a usinabilidade é uma grandeza tecnológica comparativa que expressa por meio de um valor numérico (índice ou porcentagem) a capacidade que um material tem de ser usinado sob determinadas condições de corte com maior ou menor facilidade. O valor numérico que a expressa é chamado de “Índice de Usinabilidade”. Este índice expressa a usinabilidade de um determinado material comparado com outro tomado como padrão.

Micheletti et al (1970) afirmou: ”Ninguém sabe onde e como a usinabilidade realmente funciona, pois a facilidade de usinar pode ser medida de modos diferentes, que freqüentemente fornecem resultados contraditórios”.

Arfeld & Hanum (1977) comentam também que a usinabilidade de um material pode ser definida por um valor numérico comparativo, que expressa um conjunto de propriedades de usinagem de um determinado material em relação a outro tomado como referência. Essas propriedades são: vida da ferramenta de corte; força de usinagem; acabamento superficial da peça; temperatura de corte; produtividade da máquina operatriz; e as características do cavaco. Os resultados dessas medidas são difíceis de serem analisados devido ao número de variáveis que intervêm no processo.

A usinabilidade depende da reação dinâmica que ocorre entre o material da peça, a máquina-ferramenta, geometria da ferramenta, lubrificante utilizado e condições operacionais. Pode-se afirmar que a usinabilidade não é uma propriedade única do material que pode ser claramente definida e medida. Um produto mais usinável é aquele com maior potencial comercial. Um mesmo material pode ter diferentes graus de usinabilidade (Komanduri, 1993).

Para Weingaertner (1994), a usinabilidade de um material sempre está relacionada com o processo de usinagem utilizado, com o material de corte empregado e com as condições de corte escolhidas, e pode ser diferente de caso a caso. Em geral empregam-se quatro critérios para a análise de um material quanto à sua usinabilidade. Estes podem ser usados isoladamente ou em conjunto, sendo eles: a vida da ferramenta, forças de usinagem, qualidade superficial e formas de cavacos.

O tema “Usinabilidade” é muito complexo e demanda uma série de discussões visto que não podem ser comparadas as demais propriedades mecânicas dos materiais. O termo usinabilidade é muito amplo e o índice de usinabilidade expressa uma situação particularíssima de um par peça-ferramenta sob determinadas condições de usinagem e por outro lado é de grande interesse para os fabricantes e consumidores dos metais e das ferramentas. A literatura americana aponta os chamados índices comerciais de usinabilidade, onde o aço AISI B1112 é tomado como padrão, ao qual é atribuído o índice 100 de usinabilidade segundo Ferraresi (1977) citado por Diniz (2003).

3.3 – Fatores Influentes na Obtenção do Índice de Usinabilidade

Segundo Ferraresi et al (1977), os fatores que influenciam na usinabilidade dos materiais são:

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

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

- Composição química;
- Microestrutura;
- Dureza;
- Propriedades das tensões e deformações;
- Resistência mecânica e ductilidade.

Entre os processos mecânicos e condições de usinagem os que mais influem são:

- Material e geometria da ferramenta;

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

3.4 – Critérios Empregados nos Ensaios

A seguir estão relatados os critérios principais e práticos que avaliam a usinabilidade do material. Os critérios podem ser subdivididos em duas categorias: critérios básicos e critérios específicos (Ferraressi, 1977).

Os principais critérios básicos são:

• **Vida da ferramenta:** é o critério de maior importância na caracterização da usinabilidade de um material. A vida “T” é o tempo que uma ferramenta resiste do início do corte até sua utilização total.

A dependência entre a vida da ferramenta e a velocidade de corte obedece a uma curva exponencial, em um diagrama bilogarítmico é representada por uma reta. Os fatores mais importantes para o aparecimento do desgaste na ferramenta são as partículas duras e abrasivas da peça, bem como a resistência da matriz, além do material da ferramenta empregado (Weingaertner & Schroeter, 1991).

Considerando como critério a vida da ferramenta podemos realizar dois tipos de ensaios: ensaios de longa e curta duração. Os ensaios de longa duração são realizados com o objetivo de levantar curvas de vida da ferramenta e fatores que influem na sua forma, e assim, analisar as melhores condições econômicas de usinagem. Esse tipo de ensaio tem como desvantagem o elevado consumo de material e um tempo relativamente longo para sua execução. Geralmente os ensaios são realizados em condições normais de usinagem, onde o desgaste é verificado periodicamente até a dimensão previamente definida como fim de vida da ferramenta.

Os ensaios de curta duração são realizados em condições normais ou em condições forçadas de usinagem. Em condições forçadas, o ensaio consiste de usinagem em altas velocidades de corte onde o desgaste é preponderante por difusão; o tempo de vida da ferramenta é reduzido, e o volume de material usinado também. Esta é a grande vantagem deste método de ensaio, principalmente quando se trata de avaliar a usinabilidade relativa de vários materiais, com a mesma ferramenta de corte (Ferraresi, 1977). Nos ensaios de curta duração em que ferramentas são utilizadas até sua destruição/queima, utiliza-se geralmente ferramentas de aço-rápido.

Ainda com base no critério vida da ferramenta e ensaio de curta duração podemos citar outros métodos de ensaios: método de comprimento usinado, método do faceamento Brandsma, método do faceamento de Renault-Mathon, método do aumento discreto da velocidade na operação de torneamento cilíndrico e método do aumento contínuo da velocidade na operação de torneamento cilíndrico (AFNOR, 1975).

● **Força de usinagem:** a grandeza da força de usinagem, que pode ser decomposta em força de corte, força de avanço e passiva, é um critério de usinabilidade, pois geralmente, materiais de difícil usinagem também apresentam forças de trabalho maiores. As forças de usinagem estão ligadas a dois fenômenos importantes no corte: cisalhamento do material diante do ângulo de corte; e atrito na interface ferramenta-cavaco. O trabalho necessário ao corte é composto pelos trabalhos de cisalhamento e pelo atrito. Qualquer redução desses trabalhos implica a redução do aquecimento e dos esforços no corte e, conseqüentemente há um menor desgaste das ferramentas (Weingaertner & Schroeter, 1991).

As componentes da força de usinagem são influenciadas principalmente pelo material da peça, pelas condições de corte e pela geometria da ferramenta. Elas obedecem a vários modelos de estimação de valores de forças dentre os quais se destaca a equação 3.1 de Kinzle, que relaciona as características do material, a seção de usinagem e a força de corte. Para a força de corte vale a seguinte equação:

$$\frac{F_c}{b} = K_{C1.1} \cdot h^{(1-m_c)} \quad (3.1)$$

Fc = força de corte [N];

b = largura do corte [mm];

h = espessura de corte [mm];

$1 - m_C$ = coeficiente angular [-];

$K_{C 1.1}$ = força específica de corte para a seção de 1mm^2 .

A influência do material é dada pelo expoente $(1-m_C)$ e pela força específica $K_{C 1.1}$. Não é possível estabelecer uma relação perfeita entre a estrutura do material e a força específica de corte, assim como o coeficiente angular, devido aos diversos fatores de influência que surgem. Normalmente a força de corte cai com o aumento da temperatura na zona de corte. Ao mesmo tempo, todas as medidas que facilitam o fluxo do cavaco (fluido de corte, grande ângulo de saída) levam a uma diminuição das forças (Weingaertner & Schroeter, 1991).

- **Acabamento superficial da peça:** obtido na usinagem, pode ser um critério para a determinação dos parâmetros de entrada. É de grande importância na usinabilidade dos materiais. Verifica-se experimentalmente que materiais manufaturados nas mesmas condições de usinagem, com a mesma ferramenta e máquina operatriz, podem apresentar rugosidades superficiais diferentes. Para defini-las utilizam-se parâmetros e símbolos gráficos normalizados por diferentes países (Ferraresi, 1977).

A rugosidade é decorrente da forma da ponta de corte da ferramenta e do movimento relativo entre a peça e ferramenta. No torneamento, ela é influenciada principalmente pela forma do raio de ponta da ferramenta e pelo avanço. A rugosidade aumenta com o aumento do avanço e diminui com o aumento do raio de ponta. Com relação a velocidade de corte, ela inicialmente tende a aumentar com o aumento da velocidade de corte, diminuindo após uma certa velocidade. Isso se deve à formação da aresta postiça de corte, que pode ocorrer a pequenas velocidades de corte, fator que desaparece com o emprego de velocidades de corte mais altas. O desgaste da ferramenta tem influência sobre a qualidade superficial da peça (Weingaertner & Schroeter, 1991).

Segundo Ferraresi et al (1977), uma relação que se poderia tomar como índice comparativo de acabamento superficial (C_r) é dado pela Equação 3.2:

$$Cr = \frac{(R \max)_{teórica}}{R \max} \quad (3.2)$$

Onde a rugosidade máxima (Rmax) é obtida no ensaio e a rugosidade máxima teórica (Rmax)_{teórica} é dada pela equação 3.3:

$$(R \max)_{teórica} \cong \frac{f^2}{8 \cdot r_\epsilon} \quad (3.3)$$

(Rmax)_{teórica} = rugosidade máxima teórica [μm]

f = avanço [mm/volta];

r_ε = raio de ponta da ferramenta [mm].

Neste tipo de critério para verificar a usinabilidade do material é recomendável que a rugosidade seja medida com dois rugosímetros diferentes, sendo um deles do tipo registrador, para se basear no princípio de medidas diferentes para comparar resultados.

3.5 – Propriedades e Fatores Metalúrgicos

Sabe-se que a usinabilidade pode ser definida como uma grandeza que indica a facilidade ou dificuldade de arrancar cavacos do material. Porém, não se pode relacioná-la com o raciocínio de que um material mole possui uma boa usinabilidade e que o material duro possui uma baixa usinabilidade. A dureza é o fator mais predominante na usinabilidade, mas outros fatores também o são, como a tendência ao empastamento do cavaco do material na superfície de saída da ferramenta (ductilidade), a condutividade térmica, o encruamento, a microestrutura, a quantidade das inclusões e aditivos e a quantidade de partículas duras, (Diniz, 2003).

Segundo Diniz et al (2003), pode-se definir algumas propriedades e fatores metalúrgicos que influenciam na usinabilidade dos materiais:

- **Dureza e resistência mecânica:** valores baixos de dureza e resistência mecânica normalmente favorecem a usinabilidade. Quando se trata de materiais muito dúcteis a baixa

dureza pode causar problemas, pois facilita a formação da aresta postiça de corte. Neste caso, é bom que a dureza seja aumentada através de trabalho a frio.

- **Ductilidade:** baixos valores de ductilidade são geralmente benéficos à usinabilidade, pois facilitam a formação de cavacos curtos. No entanto, pode-se conseguir baixa ductilidade com alta dureza e vice-versa obtendo uma ótima usinabilidade.

- **Condutividade térmica:** alta condutividade térmica favorece a usinabilidade do material. Essa propriedade evita o aquecimento rápido da ferramenta e seu desgaste, prolongando sua vida. Deve-se aqui considerar que quando o material tem alta condutividade térmica é necessário que haja uma refrigeração eficiente, com a finalidade de se evitar excessivas dilatações térmicas da peça para não danificar a sua estrutura superficial.

- **Taxa de encruamento:** uma alta taxa de encruamento significa que a resistência do material é aumentada consideravelmente, para um determinado nível de deformação plástica. Se o material possui uma alta taxa de encruamento, ele requer muita energia para a formação do cavaco. Com isso, o corte acarretará um substancial aumento de dureza numa fina camada da superfície usinada, facilitará a formação da aresta postiça de corte e assim tornar o material com baixa usinabilidade.

- **Microestrutura:** é o fator que melhor caracteriza a usinabilidade. Em função da possibilidade de transformação da microestrutura do aço, sem alteração da composição química, ela se constitui em um importante fator de influência na usinabilidade. Os microconstituintes alteram as características de ductilidade e de fragilidade em função da sua presença, quantidade e forma, promovendo diferentes condições de quebra de cavaco, abrasividade, força e temperatura de corte (Ferraresi, 1977).

- **Composição química:** a influência da composição química pode se dar de três maneiras: a primeira seria quando os elementos que aumentam a proporção de perlita diminuem o teor de carbono no ponto eutetóide causando endurecimento por solução sólida. A segunda é quando os elementos atuam na fragilização da ferrita. Uma terceira maneira é quando os elementos residuais, provenientes da fusão/vazamento, podem promover efeitos diversos, além da presença de inclusões (Arfeld & Hanum, 1977; Amaro, 1982).

A adição de elementos de liga produz modificações microestruturais, conduzindo a um endurecimento, que tem reflexo sobre as propriedades mecânicas obtidas e sobre a usinabilidade, dependendo da quantidade, da forma e distribuição dos mesmos (Oliveira, 1987). Os elementos de liga também podem formar partículas duras e abrasivas que prejudicam a usinabilidade (Tessler & Barbosa, 1993).

● **Inclusões:** a presença de partículas que são insolúveis no material e que interrompem a continuidade da matriz, tanto pode exercer efeitos benéficos, quanto prejudiciais à usinagem, o que vai depender da sua dureza, forma e distribuição (Oliveira Jr., 1987). As inclusões podem consistir em um dos maiores nucleadores de danos no interior dos materiais metálicos, podendo originar poros e trincas conforme se processa a deformação. Esses defeitos funcionariam como uma heterogeneidade na espessura do material e seriam condições suficientes para o aparecimento de estrição localizada, especialmente quando próxima à superfícies do material, favorecendo assim, o trabalho de corte (Baptista, 2002). A Tabela 3.1 mostra um resumo das inclusões e seus efeitos na usinabilidade dos aços.

Tabela 3.1 – Efeito das inclusões na usinabilidade (Adaptada Prado & Pimentel, 2004)

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

(*) dependente das condições de usinagem.

Capítulo 4

AÇOS-DE-CORTE-FÁCIL E SUA USINABILIDADE

4.1 – Conceituação

Aços-de-corte-fácil podem ser definidos como sendo aqueles aços especialmente desenvolvidos para oferecer os melhores resultados mediante operações com arranque de cavacos. As demais características mecânicas como ductilidade, resistência à tração, resposta ao tratamento térmico e outras são consideradas como secundárias para este tipo de aço. Esse tipo de aço possui baixo teor de carbono e alto teor de enxofre, além de um teor de manganês que garanta uma relação manganês-enxofre propícia para a formação de sulfetos de manganês, em vez de sulfetos de ferro. Os aços-de-corte-fácil são caracterizados por boa usinabilidade e por gerarem cavacos facilmente quebráveis (Klujszo, 2003; Machado, 2004).

Importantes pesquisas metalúrgicas nos últimos anos estão sendo realizadas com o objetivo de aumentar o desempenho da usinagem (usinabilidade) dos aços devido a razões econômicas (Bertrand, 1998). Através dessas pesquisas surgiram os aços de usinabilidade melhorada que tem como objetivo cumprir as características mecânicas de emprego e também aumentar sua aptidão a usinagem por razões econômicas (Machado, 2004). As técnicas no desenvolvimento dos aços de usinabilidade melhorada variam desde um controle apurado do processo de fabricação/transformação do aço, passando pela adição de elementos químicos que promovam a fragilização do cavaco e/ou lubrificação da ferramenta de corte e até mesmo

a engenharia ou modificação das inclusões de óxidos resultantes do processo de desoxidação (Klujszo, 2003). Nos aços-de-corte-fácil também existe uma investigação e desenvolvimento para incrementar a sua resposta à usinagem. Além das soluções citadas anteriormente para melhorar a usinabilidade dos aços, existem as soluções clássicas, como o uso de enxofre ou do chumbo e soluções através de metalurgia secundária, como adição de Te e Se para controle das inclusões de sulfetos de manganês; ou o tratamento ao cálcio ou controle de alumínio para se ter um total controle da morfologia de inclusões (Machado, 2004).

4.2 – Composição Química dos Aços-de-corte-fácil

Os aços-de-corte-fácil são caracterizados por apresentarem baixo teor de carbono ($\leq 0,15\%C$) na sua composição química. A Tabela 4.1 mostra a composição química dos aços-de-corte-fácil conforme as normas ABNT-NBR 6006 (ABNT, 1980) e SAE J403 (SAE, 2003). Pode-se verificar que nos aços-de-corte-fácil existe a introdução de fósforo e enxofre além dos teores normais com o intuito de melhorar sua usinabilidade. Esses aços são conhecidos como aços refosforados e resulturados (Chiaverini, 2005).

Tabela 4.1 – Composição química dos aços-de-corte-fácil (Adaptado ABNT-NBR 6006, 1980; SAE J403, 2003).

Aço	Composição química (%)				
	C	Mn	P	S	Pb
ABNT/SAE 1212	$\leq 0,13$	0,70 a 1,00	0,07 a 0,12	0,16 a 0,23	-
ABNT/SAE 1213	$\leq 0,13$	0,70 a 1,00	0,07 a 0,12	0,24 a 0,33	-
ABNT/SAE 1215	$\leq 0,09$	0,75 a 1,05	0,04 a 0,09	0,26 a 0,35	-
ABNT/SAE 12L14	$\leq 0,15$	0,85 a 1,15	0,04 a 0,09	0,26 a 0,35	0,15 a 0,35

A Tabela 4.2 indica a usinabilidade dos principais tipos de aços-de-corte-fácil tomando-se como padrão o aço especificação ABNT/SAE 1212. Nota-se que os aços-de-corte-fácil possuem uma boa usinabilidade e essa pode ser aumentada através da adição de alguns elementos como bismuto, selênio e telúrio.

Tabela 4.2 – Usinabilidade de aços-de-corte-fácil (Adaptado Chiaverini, 2005).

Tipo do Aço	Usinabilidade, %	Dureza Brinell
ABNT/SAE 1212 (a)	100	.
ABNT/SAE 1213 (a)	136
ABNT/SAE 1215 (a)	136
ABNT/SAE 12L14 (a)	160	163
ABNT/SAE 12L14 (b)	190	137
ABNT/SAE 12L14 (c)	235	137
ABNT/SAE 12L14 (d)	295	137
(a) Todos os valores são para aços encruados		
(b) Tipo alternativo ao 12L14		
(c) Tipo alternativo ao 12L14, contendo bismuto.		
(d) Tipo alternativo ao 12L14, contendo bismuto, selênio e telúrio.		

As composições químicas dos aços-de-corte-fácil não se limitam apenas aos elementos carbono, manganês, fósforo, enxofre e chumbo. Existe também a presença de outros elementos como o silício, molibdênio, alumínio e os chamados elementos residuais: cromo, níquel e cobre. A Norma DIN 1651 e a norma ABNT/SAE classificam os principais tipos de aços-de-corte-fácil conforme as Tabelas 4.3 e 4.4 respectivamente:

Tabela 4.3 – Classificação dos tipos dos aços-de-corte-fácil segundo a Norma DIN 1651.

NORMA DIN 9SMn28											
Elemento	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)	Al (%)	Cu (%)	Pb (%)
Min.			0,900		0,270						-
Máx.	0,140	0,050	1,300	0,100	0,330	0,200	0,250	0,060	0,005	0,350	-
NORMA DIN 9SMn36											
Elemento	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)	Al (%)	Cu (%)	Pb (%)
Min.			1,100		0,340						-
Máx.	0,150	0,050	1,500	0,100	0,400	0,200	0,250	0,060	0,005	0,350	-
NORMA DIN 9SMnPb28											
Elemento	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)	Al (%)	Cu (%)	Pb (%)
Min.			0,900		0,270						0,150
Máx.	0,140	0,050	1,300	0,100	0,330	0,200	0,250	0,060	0,005	0,350	0,350
NORMA DIN 9SMnPb36											
Elemento	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)	Al (%)	Cu (%)	Pb (%)
Min.			1,100		0,340						0,150
Máx.	0,150	0,050	1,500	0,100	0,400	0,200	0,250	0,060	0,005	0,350	0,350

Tabela 4.4 – Classificação dos tipos dos aços-de-corte-fácil segundo a Norma ABNT/SAE.

NORMA ABNT/SAE 12L14 com ou sem Telúrio											
Elemento	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)	Al (%)	Cu(%)	Pb (%)
Min.			0,850	0,040	0,260						0,150
Máx.	0,150	0,050	1,150	0,090	0,350	0,200	0,250	0,060	0,005	0,350	0,350
NORMA ABNT/SAE 12Bi14											
Elemento	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)	Al (%)	Cu(%)	Bi (%)
Min.			0,900	0,040	0,260						0,050
Máx.	0,140	0,030	1,150	0,090	0,320	0,200	0,250	0,060	0,005	0,350	0,150

A Tabela 4.5 apresenta algumas propriedades mecânicas de alguns aços-de-corte-fácil.

Tabela 4.5 – Propriedades Mecânicas (Adaptada Prado & Pimentel, 2004)

Aço	Dureza (HB)	Propriedades de tração			
		σ_{rup} (kgf/mm ²)	σ_{esc} (kgf/mm ²)	Redução de área (%)	Alongamento (%)
ABNT/SAE 1213	114	38.6	21.8	58.0	26.3
ABNT/SAE 1213 c/ Bi	117	40.8	25.0	59.5	32.9
ABNT/SAE 12L14	114	40.1	21.3	47.0	27.2

4.3 – Aplicação

Os aços-de-corte-fácil são amplamente aplicados na produção de peças em tornos automáticos multifuso. Para esta aplicação utilizam-se normalmente barras de aços treiladas com diâmetros iguais ou menores que 50 mm, de forma que as velocidades de corte raramente ultrapassam 200 m/min (Machado, 2004). Ele também é muito utilizado para fabricação de componentes para bombas, buchas, pistões, componentes de aparelhos domésticos, etc (Prado & Pimentel, 2004).

Entre os tipos de aços-de-corte-fácil, o aço ABNT/SAE 12L14 destaca-se por possuir uma maior demanda de produção comparando aos demais tipos.



Figura 4.1 - Exemplos de peças fabricadas de aço de corte fácil (Prado & Pimentel, 2004).

A Figura 4.2 mostra a produção mensal dos aços-de-corte-fácil e a Figura 4.3 mostra a produção total dos aços-de-corte-fácil no período de janeiro a maio de 2004 da empresa Aços Villares. A produção do aço ABNT/SAE 12L14 corresponde em torno de 80% da produção total dos aços-de-corte-fácil da empresa Aços Villares. Este dado estatístico comprova a aplicabilidade do aço ABNT/SAE 12L14 nos processos de fabricação do setor industrial.

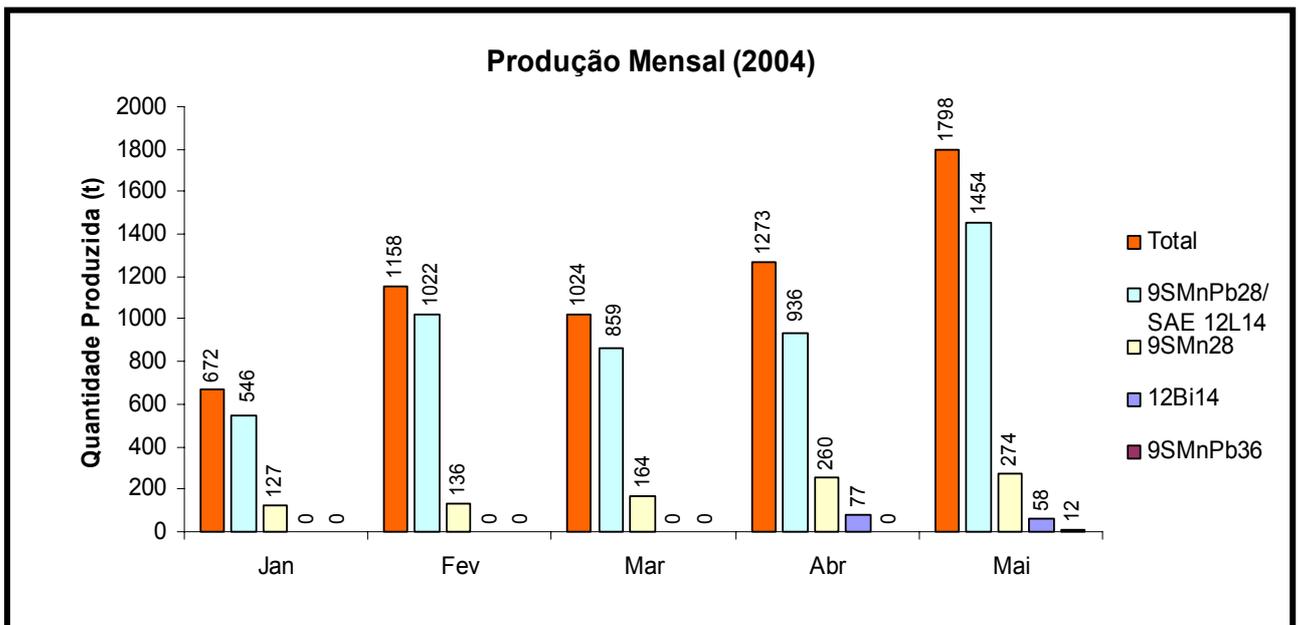


Figura 4.2 - Produção mensal dos tipos de aços-de-corte-fácil da Aços Villares (Prado & Pimentel, 2004).

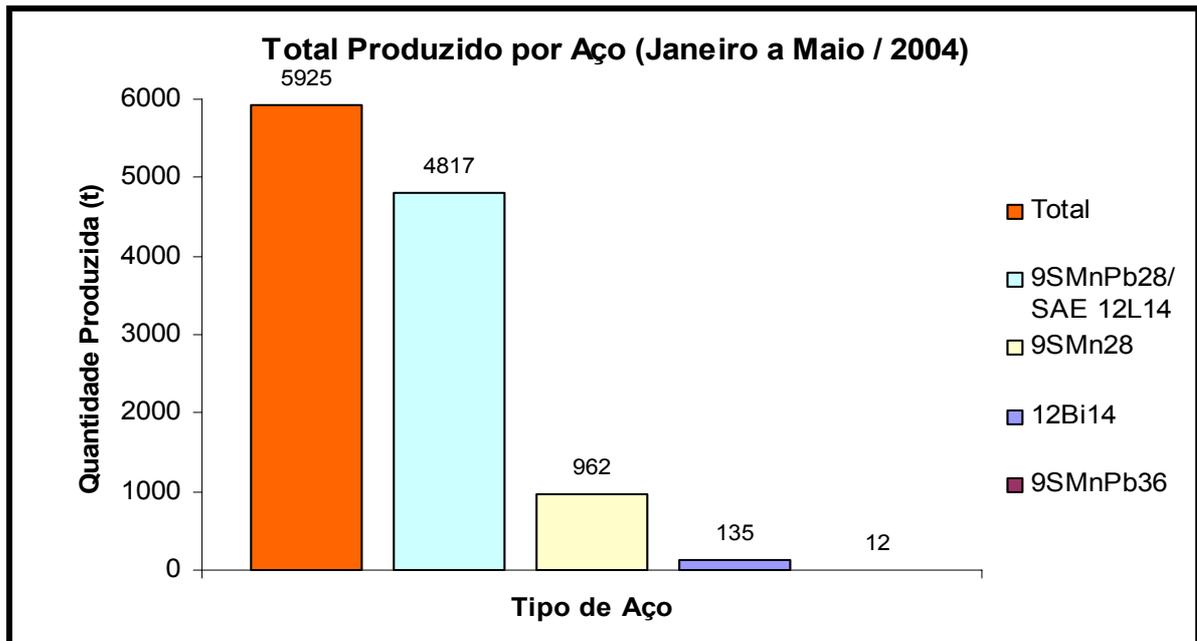


Figura 4.3 - Produção total dos aços-de-corte-fácil da Aços Villares (Prado & Pimentel, 2004).

4.4 – Usinabilidade dos Aços-de-corte-fácil

A usinabilidade dos aços-de-corte-fácil está relacionada diretamente à formação de sulfetos e inclusões metálicas. A formação dos sulfetos é ocasionada pelo controle do oxigênio ativo durante o processo de fabricação, pela adição de enxofre, telúrio e selênio. As inclusões metálicas são formadas pela adição dos elementos chumbo e bismuto. A adição de alguns aditivos como o boro e o tratamento com o cálcio contribuem para a melhora da usinabilidade dos aços-de-corte-fácil (Bas, 1995; Barreto, 2000). A Tabela 4.6 mostra algumas tecnologias que obtiveram sucesso para melhorar a usinabilidade dos aços-de-corte-fácil.

Tabela 4.6 – Tecnologias aplicadas para melhoria da usinabilidade dos aços-de-corte-fácil
(Adaptada Bas (1995); Barretos, 2000)

APLICAÇÃO	CARACTERÍSTICAS	RESULTADO
Controle no nível de atividade do oxigênio no aço líquido.	Controlar a morfologia dos sulfetos de manganês durante a solidificação do aço	Aumento da usinabilidade. Vc* baixas/médias.
Enxofre	Formação de sulfetos de manganês	Aumento da usinabilidade. Vc* baixas/médias.
Tratamento ao cálcio	Óxidos controlados	Aumento da usinabilidade. Vc* altas
Pb/Bi Inclusões Metálicas	Formar inclusões metálicas	Aumento da usinabilidade. Vc* baixas.
Se/Te/B Aditivos	Sulfetos controlados. Óxidos visco-pásticos	Aumento da usinabilidade. Vc* baixas/médias.
*Vc - velocidade de corte [m/min]		

4.4.1 Sulfetos

O controle do oxigênio ativo durante o processo de fabricação do aço é importante para a formação dos sulfetos. O controle deste processo impactará diretamente no tipo, distribuição e morfologia de inclusões de sulfetos de manganês (MnS) geradas na estrutura do material. As inclusões de sulfetos de manganês são obtidas através da adição de enxofre combinado com o manganês. Todo enxofre presente nos aços-de-corte-fácil está na forma de sulfetos.

Para Bellot et al (1978) a influência dos sulfetos sobre a usinabilidade se explica por vários modos de ação:

- Como o sulfeto apresenta propriedades bem diferentes da matriz do aço, ele tem o efeito de uma descontinuidade do material (vazio). Devido a sua forma alongada aparece um efeito de entalhe que aumenta localmente a tensão de cisalhamento aplicada e diminui a tensão de ruptura na zona de formação do cavaco. O MnS é formado seguindo o plano de cisalhamento do cavaco e seu tamanho influencia a usinabilidade do aço;

- Diminui a força de corte, reduz consideravelmente as dimensões da aresta postiça de corte e estende seu domínio;
- Forma uma camada protetora sobre a superfície de saída da ferramenta, reduzindo a força de atrito entre o cavaco e a ferramenta, agindo como lubrificantes.

Segundo Leskovar e Grum (1986) quanto mais arredondados os sulfetos, com fator de forma tendendo a um ($L/D \rightarrow 1$), maior o índice de usinabilidade. O controle da morfologia dos sulfetos pode ser realizada pela adição de elementos como o telúrio e selênio que promovem um decréscimo na deformabilidade à quente dos sulfetos de manganês (Joseph, 1975).

O telúrio tem forte papel na globulização dos MnS. O telúrio apresenta-se parcialmente dissolvido nos MnS em concentrações de até 0,12% e formando principalmente MnTe, e este se localiza preferencialmente nas bordas dos MnS, conforme mostrado na Figura 4.4. Yaguchi et al (1990) apresenta quatro teorias para justificar o efeito do telúrio:

- Aumenta a usinabilidade devido à obtenção de sulfetos mais globulares;
- Reduz o atrito entre a ferramenta e o cavaco, devido aos baixos pontos de fusão dos compostos formados pelo telúrio;
- Reduz a resistência ao cisalhamento aparente pelo aumento do número de trincas nucleadas, devido ao líquido fragilizante do telúrio metálico e seus compostos;
- Apresenta superfícies extremamente ativas, formando um filme entre a matriz e a outra face como carbonetos, sulfetos ou teluretos;

O selênio é um elemento utilizado para melhora da usinabilidade, apresentando propriedades muito similares ao enxofre. Apresenta forte tendências a formar selenetos de manganês (MnSe) o qual apresenta propriedades similares ao MnS, no entanto com a vantagem de não prejudicar outras características dos aços. O MnSe é completamente solúvel no MnS e sua dureza é muito baixa, porém existem combinações que conseguem obter uma redução na deformabilidade a quente do MnS, obtendo-se sulfetos mais globulares (Machado, 2004). Contudo o selênio e o telúrio não tiveram o êxito esperado, devido ao custo elevado de seu emprego e também por eles poderem emitir gases tóxicos (Chiaverini, 2005).

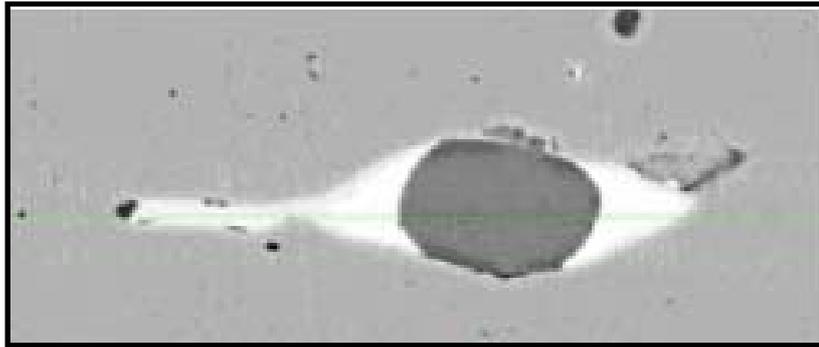


Figura 4.4 – Sulfetos de manganês envolto por uma capa de telureto de manganês (Adaptada Barretos et al, 1999).

4.4.2 – Inclusões Metálicas

O efeito das inclusões metálicas de chumbo (Pb) e bismuto (Bi) na usinabilidade dos aços-de-corte-fácil está amplamente discutido no meio científico. Yaguchi et al (1990) defende alguns fundamentos para o efeito das inclusões metálicas na usinabilidade do aço-de-corte-fácil oriundas da adição de chumbo e bismuto:

- As inclusões metálicas de Pb e Bi têm efeito lubrificante entre o cavaco e a aresta de corte da ferramenta, onde as partículas atuam como lubrificantes na interface;
- As inclusões metálicas de Pb e Bi quando líquidas fragilizam o aço, reduzindo a resistência ao cisalhamento aparente, ocorrendo a formação de micro trincas a partir do metal líquido fragilizante.
- As propriedades mecânicas diferentes entre as inclusões metálicas versus a matriz promovem um efeito de concentração de tensões. Este argumento sugere um efeito semelhante à formação de vazios na interface, reduzindo a resistência aparente ao cisalhamento do MnS que está envelopado pelas inclusões metálicas. Adicionalmente sugere-se que as inclusões metálicas que estão em pequenas adições, acomodariam as deformações, reduzindo a energia necessária para obter a deformação total.

O Pb é um elemento que possui solubilidade baixíssima no ferro à temperatura ambiente, promovendo desta forma a precipitação de inclusões metálicas. Normalmente estando associadas aos MnS, conforme pode ser observado na Figura 4.5, onde uma inclusão de MnS apresenta um envoltório de chumbo.

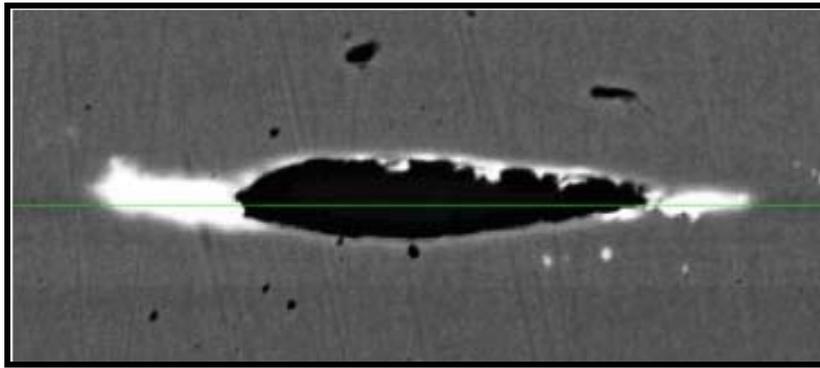


Figura 4.5 – MnS com capa de Pb metálico (Adaptada Barretos et al, 1999).

O emprego do bismuto para melhorar a usinabilidade dos aços-de-corte-fácil é recente e surgiu como alternativa aos aços ao chumbo, devido ele ser um elemento não tóxico.

O bismuto apresenta propriedades similares ao chumbo (Machado, 2004):

- Baixa solubilidade no aço sólido, formando inclusões metálicas;
- Baixo ponto de fusão;
- Densidade superior a do ferro;
- Apresenta-se em forma de inclusões metálicas e envelopando o MnS.

Comparativamente com o chumbo, o bismuto apresenta menor densidade, resultando em uma menor tendência a segregar, obtendo-se assim melhor dispersão das inclusões metálicas.

O boro é um elemento largamente usado no aumento da temperabilidade e tenacidade dos aços, onde o boro deve estar em solução sólida e não em forma de óxidos, nitretos e carbonitretos. O uso do boro para aumento da usinabilidade está baseado na formação do B_2O_3 que tem baixo ponto de fusão ($459^\circ C$) e a partir dos $210^\circ C$ se encontra no estado viscoso. Desta forma, apresenta-se como lubrificante e protetor da ferramenta durante a usinagem dos aços (Bertrand, 1998).

4.5 – Tecnologias recentes para a Substituição do Chumbo

O elemento chumbo é ainda muito utilizado na fabricação dos aços-de-corte-fácil. Cerca de 3 milhões de toneladas de aços ao chumbo são produzidas anualmente no mundo. Isto significa que cerca de 4500 toneladas de chumbo são adicionadas aos aços-de-corte-fácil

sendo este mercado estimado em aproximadamente de 1 bilhão de dólares. (Bertrand, 1998; AUTM, 1999).

4.5.1 – Problemas com o uso do chumbo

O uso do elemento chumbo na fabricação dos aços-de-corte-fácil apresenta alguns problemas dentro do seu próprio processo produtivo. Um bom aço ao chumbo deve apresentar uma fina dispersão de pequenas partículas de chumbo com tamanhos médios de 6 a 7 μm sendo que estas partículas apresentam-se livres ou envolvendo as inclusões de sulfetos de manganês. Isto é difícil de conseguir quando o teor de chumbo é superior a 0,35%. Nestes casos alguma segregação pode ocorrer e a qualidade superficial dos produtos laminados é prejudicada (Bertrand, 1998).

Um outro problema relacionado à utilização dos aços ao chumbo está ligado as leis ambientais e a problemas de saúde dos trabalhadores. A evolução das leis ambientais e de saúde dificulta ou impedem a produção e o uso dos aços ao chumbo. Estações especiais de captação de pós e fumos devem ser usadas nas usinas de aço, juntamente com uma restrição ao tempo de exposição dos trabalhadores. Além do mais, a nova legislação européia em metais pesados pode afetar o uso de aços ao chumbo, como a “*Danish law on the production, use and trade of lead*”, 1997, ou o último EU “*Council Directive on End of Life Vehicles*”, 1997. A Dinamarca, por exemplo, proíbe totalmente a utilização industrial do chumbo dentro de suas fronteiras. Estas resoluções também afetam o Brasil uma vez que nossos veículos são exportados para todo o mundo. Dessa forma, as pressões ambientais têm levado cada vez mais os metalurgistas a buscarem alternativas para o aço ao chumbo (Somekawa, 2001; Subramanian, 1996; Deardo, 1999).

4.5.2 – Alternativas encontradas para substituir o chumbo

Fabricantes dos aços-de-corte-fácil revelaram que as adições de chumbo nestes aços estão com os dias contados. Desta maneira, a busca por substitutos ao chumbo passa a ser prioridade (Machado, 2004).

Segundo DeAdro et al 2002, descobriu-se que o estanho poderia desempenhar papel semelhante ao do chumbo na interface dos contornos de grão. Uma característica da adição de estanho é que ela dá uma fragilização mais acentuada na faixa de temperaturas características dos processos de usinagem em baixas e médias velocidades de corte. O nível de estanho empregado (0,04 a 0,08%) e o teor de elementos (cobre < 0,05%) que possam competir pela localização preferencial nos contornos de grão devem ser bem controlados para que os efeitos positivos do estanho não desapareçam.

Em outro desenvolvimento recente adiciona-se titânio (Ti) ao aço para promover a formação de carbosulfetos de titânio. Estas inclusões teriam o mesmo efeito que o sulfeto de manganês na melhoria da usinabilidade e mais a vantagem de apresentarem-se finamente dispersas na matriz o que provocaria uma diminuição da rugosidade superficial das peças usinadas. Este novo aço apresenta também teores reduzidos de oxigênio para evitar a formação de inclusões de alumina e silicatos. Este aço contempla também elevadas adições de fósforo para melhorar o acabamento superficial. O autor afirma que o zircônio teria o mesmo papel do titânio na formação dos carbosulfetos (Hayaishi et al, 2003).

Uma tecnologia alternativa seria controlar a microestrutura do aço. Yokokawa (1977) utilizou terras raras para provocar grafitização nos aços-de-corte-fácil. Segundo ele, a grafita apresenta um efeito lubrificante sólido na interface, além de facilitar a quebra do cavaco.

A empresa Mitsubishi apresentou patente do aço *Non-Pb Super Free-Machining Steel*, em que o nível de enxofre nos aços-de-corte-fácil é aumentado até o máximo de 0,65% (Fukuzumi, 2004). Os efeitos negativos de uma forte adição de enxofre no aço são evitados de várias maneiras: a formação de sulfeto de ferro, com sua consequência da ductilidade a quente, é evitada através do aumento do teor de manganês no aço; os efeitos prejudiciais de níveis elevados de enxofre nas propriedades mecânicas são diminuídos através de uma fina dispersão das partículas de sulfetos na matriz de aço. Essa dispersão é conseguida através do uso de nucleadores de sulfetos, particularmente de nitretos que teriam a propriedade de nuclear a formação de sulfetos de forma uniforme e com tamanho pequeno.

Trabalho conduzido por Catanoiu et al (2002) argumenta que o uso de silício ao redor de 0,20% aumenta a camada de sulfetos de manganês depositado nas ferramentas de

corte revestidas quando usinando aços-de-corte-fácil, melhorando assim a usinabilidade do aço.

O aço Ecoscut, patenteado pela empresa japonesa *Aichi Steel*, utiliza-se da combinação de magnésio, cálcio e enxofre para melhorar a usinabilidade sem a utilização do elemento nocivo chumbo. Não existem maiores referências na literatura especializada que descrevam o mecanismo de atuação do magnésio na melhoria das características de corte do material.

Por fim, o uso de cálcio combinado com o titânio é capaz de reduzir o tamanho das inclusões de sulfetos de manganês em aço-de-corte-fácil sem chumbo, desenvolvido em parceria pelas empresas Daido e Honda. Esta melhoria na distribuição das inclusões aumenta o poder de lubrificação da ferramenta de corte pelo aço, além de fragilizar o cavaco, facilitando sua remoção (Shiiki et al, 2003).

Capítulo 5

DOE – PROJETO DE EXPERIMENTOS

5.1 – Conceituação

O Projeto de Experimentos (Design of Experiments - DOE) é uma técnica relativamente antiga, desenvolvida entre 1920 e 1930 por Fisher, sendo posteriormente incrementada por importantes pesquisadores na área de estatística como Box, Hunter e Taguchi, entre outros (Prvan & Street, 2002).

Uma estratégia para avaliar a magnitude de várias fontes de variação que influenciam uma ou mais respostas, pode ser expressa por uma seqüência de 6 passos, conforme descrito a seguir (Montgomery, 1997):

1° - Identificar e selecionar fatores que possam contribuir para a variação total da resposta de estudo. Geralmente, sessões de *Brainstorming*, Fluxogramas e Diagramas de causa-efeito realizados por especialistas no processo, podem contribuir para a escolha apropriada destes fatores (Ross, 1991).

2° - Selecionar um modelo que inclua os fatores escolhidos no passo 1. A escolha deve determinar também se o efeito provocado pelo fator é fixo ou aleatório.

3° - Projetar experimentos eficientes para estimar os efeitos dos fatores incluídos no modelo. Esta escolha considera dois aspectos: a disponibilidade de recursos para a realização

dos experimentos e a precisão desejada com as estimativas. A viabilidade do estudo deve ser levada em consideração. Experimentos exploratórios ou dados históricos devem ser utilizados para se avaliar o número de níveis adotados para cada fator. A aleatorização do experimento é algo importante e desejável para garantir que a variação incontrollável seja proveniente apenas da mudança de níveis dos fatores e do erro aleatório (Gunst, 2000). A chance de má interpretação dos resultados é reduzida com esta técnica. Algo também desejável é a replicação (Anderson & Kraber, 1999) e a blocagem (Box & Behnken, 1960; Ross, 1991).

4° - Realizar os experimentos de acordo com o planejado (Montgomery, 1997). Detectar, documentar e analisar as anormalidades que ocorrerem na condução experimental. Quando for realizado, é vital que o processo experimental seja monitorado cuidadosamente, de modo que possa garantir que tudo está sendo feito de acordo com o planejamento pré-estabelecido. Erros no procedimento experimental nesse estágio, usualmente irão destruir a validade do ensaio. Os aspectos logísticos e de planejamento não devem ser subestimados.

5° - Estimar os efeitos dos fatores incluídos no modelo sobre a variação total da resposta. Métodos estatísticos devem ser usados para analisar as relações entre os fatores (variáveis independentes) e as respostas obtidas (variáveis dependentes), no intuito de se construir um modelo adequado para o produto ou o processo em estudo.

6° - Interpretar e discutir os resultados, recomendar melhorias, avaliando os resultados experimentais. Determinados parâmetros de projeto poderão tornar-se evidentes na melhoria dos níveis de satisfação desejados (Anderson & Kraber, 1999).

5.2 – O Projeto Padrão

Um bom projeto experimental necessita ter alguns elementos essenciais. Entre eles, estão: a replicação e a aleatorização. Existe uma diferença entre replicação e repetição. Quando um experimento é repetido, um conjunto de fatores está sendo aplicado em uma única unidade experimental. A replicação ocorre quando os experimentos são conduzidos com unidades experimentais diferentes (Paiva, 2004). Nesse caso, a variação no resultado dos experimentos pode ser avaliada, e o erro, se existir, identificado. Quando, por exemplo, dois protótipos idênticos são lançados simultaneamente, a diferença de desempenho entre os dois pode ser comparada, e as causas desta variação avaliadas (Montgomery, 1997).

Outro critério também importante é a aleatorização. Quando se aleatoriza um experimento, aumenta-se sua validade, porque se dilui a influência de fatores incontroláveis e se diminui a possibilidade de uma condução tendenciosa (Anderson & Kraber, 1999; Montgomery, 1997). Quando se conhece previamente a configuração de um experimento, pode-se contribuir para a ocorrência de seu resultado. A aleatorização garante que o resultado do experimento seja independente da ordem na qual ele foi executado.

Uma vez selecionados os fatores e seus respectivos níveis, passa-se à fase de execução dos experimentos. A ordem-padrão usada pelo DOE (*Design of Experiments*) para experimentos que estão balanceados, ou seja, os dois níveis dos fatores se repetem um igual número de vezes. Esse procedimento é um planejamento fatorial em dois níveis e pode ser representado por $N = 2^k$, onde N representa o número de experimentos em dois níveis para K fatores (Paiva, 2004).

Pode-se visualizar também o número de experimentos através de uma Figura 5.1, adaptada do software estatístico Minitab®, notando-se que pode haver diversas resoluções para certo número de fatores e experimentos.

		Factors													
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Runs	4	Full	III												
	8		Full	IV	III	III	III								
	16			Full	V	IV	IV	IV	III						
	32				Full	VI	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV
	64					Full	VII	V	IV						
	128						Full	VIII	VI	V	V	IV	IV	IV	IV

Figura 5.1 – Relação entre fatores, resoluções e quantidade de experimentos (Software Minitab®).

Em um *design* de Resolução III, os fatores principais confundem-se com interações de 2ª ordem; em um de Resolução IV, os fatores principais confundem-se com interações de 3ª ordem e as interações duplas confundem-se entre si e assim, sucessivamente. Segundo Montgomery et al (1997), deve-se sempre utilizar o design que possua a resolução mais alta.

5.3 – Fatoriais Completos

Um planejamento fatorial é completo quando todas as possíveis combinações entre os fatores envolvidos são experimentadas (Box, Hunter & Hunter, 1978). Quando um determinado conjunto de parâmetros é aplicado a um objeto de estudo pode-se determinar uma resposta inicial para o ensaio. Quando se altera o nível dos parâmetros, a resposta inicial pode sofrer uma alteração. Essas mudanças denominam-se tratamentos (Paiva, 2004).

Para se descobrir se dois ou mais tratamentos (conjunto de níveis dos diferentes fatores) são significativamente diferentes, é necessário se quantificar as variações ocorridas na variável de resposta quando os tratamentos específicos são aplicados. Uma vez que a variável de resposta é função dos tratamentos, um modelo estatístico pode ser definido para descrever o comportamento das observações (Paiva, 2004).

O objetivo de uma análise fatorial é determinar que fatores e respectivos níveis sejam significativos para a variação na resposta Y . Considere-se o exemplo descrito na Tabela 5.1, onde as respostas dos experimentos estão em funções de duas variáveis: Pressão e Temperatura.

Tabela 5.1 – Exemplos de níveis e fatores (Adaptada Paiva, 2004)

FATORES	NÍVEIS DOS FATORES	
	INFERIOR (-)	SUPERIOR (+)
A (Pressão) – em PI	60	80
B (Temperatura) – em °C	225	250

O número máximo de experimentos que se pode realizar com esse conjunto de dois fatores em dois níveis é igual a 2^2 (4) experimentos e com uma réplica (8) experimentos.

Atribuindo-se aos níveis destas variáveis os códigos (+1) para o nível superior e (-1) para o nível inferior, e, considerando-se todas as combinações de fatores e respectivas respostas, pode-se estabelecer o arranjo da Tabela 5.2.

A resposta Y do experimento é função exclusiva das variáveis X_1 (Temperatura) e X_2 (Pressão), o que pode ser generalizado como: $Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$.

Tabela 5.2 – Arranjo fatorial em 2 níveis para 2 fatores e uma réplica (Adaptada Paiva, 2004)

ORDEM	TEMPERATURA	PRESSÃO	Y
1	-1	-1	130
2	+1	-1	150
3	-1	+1	34
4	+1	+1	136
5	-1	-1	155
6	+1	-1	188
7	-1	+1	40
8	+1	+1	122

Escrevendo-se um modelo geral para esse conjunto de fatores, tem-se que a equação 5.1:

$$Y = \text{Constante} + \text{Efeito da Temperatura} + \text{Efeito da Pressão} + \text{Efeito da Interação} \quad (5.1)$$

5.4 – Center Points

Na maioria dos experimentos, assume-se que o modelo linear é adequado. Entretanto, para se confirmar se existe ou não falta de ajuste devem-se utilizar os *center points*. De acordo com Box et al (1978), tal procedimento consiste em adicionar ao fatorial completo, pontos que sejam intermediários. No caso dos níveis +1 e -1, o *center point* é 0 (Zero). Serão adicionados tantos níveis ZERO quantos forem os K fatores do experimento. Evidentemente, quando se acrescentar o nível ZERO, estará se assumindo que o fator K é uma variável quantitativa.

Se em um fatorial 2^2 , com uma replicação apenas ($n_f=4$), e com 5 *center points* ($n_c=5$), a diferença entre a média das respostas entre os fatoriais e os *center points* for pequena, então o *center point* cai dentro ou próximo ao plano que passa através dos pontos do fatorial, e nesse caso, não existirá curvatura. Se, ao contrário, esta diferença for grande, haverá curvatura presente.

5.5 – Análise de Variância

A Análise de Variância (ANOVA) é uma técnica utilizada para se testar a igualdade entre médias de vários grupos (Montgomery & Runger, 2003; Neto, 2002). Quando dois níveis de um fator geram respostas médias estatisticamente iguais, significa que o fator não influencia a resposta. Quando, ao contrário, a resposta média em um nível específico é estatisticamente diferente daquela obtida nos outros níveis, o fator é significativo (Paiva, 2004).

O parâmetro de teste utilizado pela ANOVA para verificar a igualdade entre as médias baseia-se na relação existente entre a variação dentro de um tratamento (*Within*) e a variação entre tratamentos (*Between*) (Montgomery & Runger, 2003).

A variação dentro origina-se das replicações. Calculando-se a média das replicações, obtém-se a média dentro do tratamento. Quanto mais as replicações diferirem desta média, maior será a variação dentro deste tratamento. Dividindo-se a variação Entre pela variação Dentro obtém-se a Estatística de Teste F, que, quando comparada com um valor de *F crítico*, definido segundo o nível de significância e o número de graus de liberdade (Figura 5.2), possibilita a aceitação ou rejeição da hipótese nula, acerca da igualdade entre as médias dos níveis dos fatores (Balestrassi, 2003).

5.5.1 – Teste de Hipótese

Sempre que se toma uma decisão ou se faz uma inferência sobre uma população a partir de dados amostrais corre-se o risco de se cometer algum tipo de erro. Hipótese é tão somente uma afirmação que se deseja testar, tendo como fonte de provas os dados provenientes da análise da amostra (Paiva, 2004).

Existem dois tipos de erro mutuamente exclusivos que podem ser cometidos em um teste de hipóteses (Figura 5.3). O primeiro é o erro tipo I, que consiste em se rejeitar a hipótese nula quando ela é verdadeira. A probabilidade de se cometer este tipo de erro é α , denominado nível de significância do teste (Lewis, 2000). O segundo tipo é o erro tipo II, que

consiste em se aceitar a hipótese nula quando ela for falsa. A probabilidade de se cometer este tipo de erro é β .

A probabilidade de se aceitar a hipótese nula quando ela é verdadeira é $1-\alpha$, e é denominado nível de confiança do teste. A probabilidade de se rejeitar a hipótese nula quando ela for falsa é $1-\beta$, e é chamada de Poder do Teste (Neto, 2002; Montgomery & Runger, 2003; Lewis, 2000; Triola, 1999).

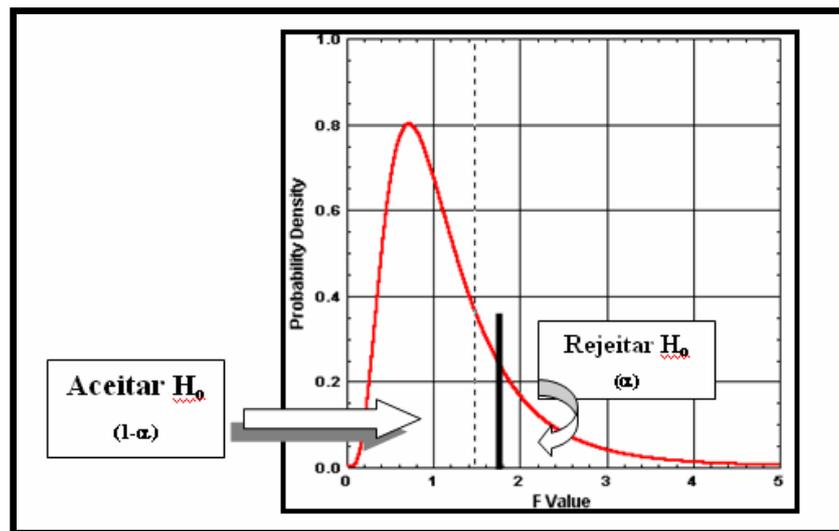


Figura 5.2 – Regiões de rejeição e aceitação de H_0 para uma distribuição F.(Adaptado Neto, 2002; Devor, 1992).

Conforme pode ser visto na Figura 5.4, os dois tipos de erro não podem ser cometidos simultaneamente.

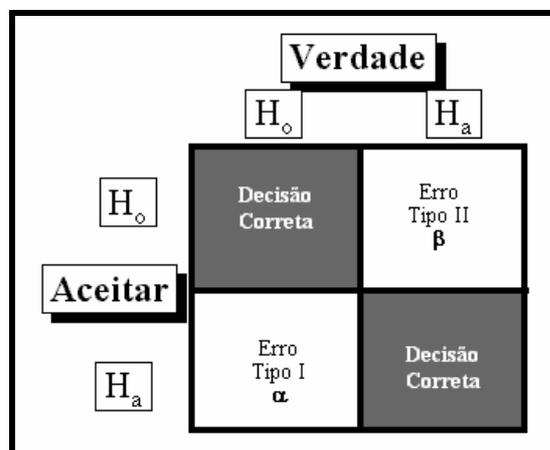


Figura 5.3 – Avaliação do erro de decisão (Adaptada Paiva, 2004).

A amostra fornece a estatística de teste, parâmetro que quando comparado ao valor crítico determinado por α , conduz à aceitação ou rejeição da hipótese nula. Ao conjunto de todos os valores da estatística de teste que levam à rejeição da hipótese nula dá-se o nome de Região Crítica (Triola, 1998).

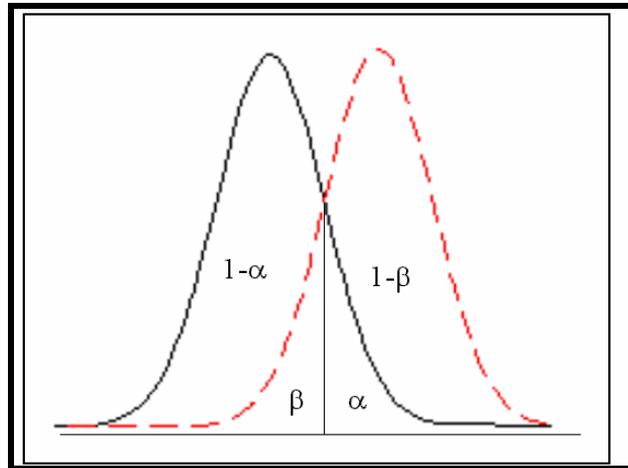


Figura 5.4 – Representação das probabilidades α e β (Adaptada Paiva, 2004)

Cada estatística de teste está associada a uma distribuição de probabilidade (*t*-student, F-Fisher, Qui-quadrado, normal padronizada, etc)(Galdamez, 2002). No caso da ANOVA (do inglês *Analysis of Variance*), a distribuição utilizada para o teste de hipótese é a Distribuição F (Neto, 2002).

O procedimento estatístico de confirmação para uma resposta é realizado através da análise do *P*. Segundo Triola et al (1999), “*P* é a probabilidade de se obter um valor da estatística amostral de teste no mínimo tão extremo como o que resulta dos dados amostrais, na suposição de a hipótese nula ser verdadeira”.

O teste de hipótese é feito da seguinte maneira (Balestrassi, 2003):

- H_0 = o fator não tem efeito sobre a resposta;
- H_1 = o fator tem um efeito sobre a resposta;
- Se $P > \alpha$: Aceita-se H_0 ;
- Se $P < \alpha$: Rejeita-se H_0 ;

Onde α é o nível de significância e para esse trabalho vamos utilizar um $\alpha = 0,05$ que fornece um resultado do teste com 95 % de confiança.

5.6 – Análise Gráfica

A análise gráfica em um projeto de experimentos tem duas finalidades: examinar o comportamento dos fatores principais, interações e avaliar a natureza dos resíduos.

5.6.1 – Diagrama de Pareto

O diagrama de Pareto é um histograma ordenado de maneira decrescente disponível no software MINITAB® que permite expressar-se graficamente uma priorização. O diagrama de Pareto procura separar as poucas causas vitais das muitas causas triviais.

Dentro da metodologia de Projeto de Experimentos (DOE), este diagrama é usado para demonstrar que efeitos e interações são significativos para um determinado modelo. Quando há replicações dos experimentos, a linha de referência desenhada sobre o diagrama de Pareto é dada pela Estatística *t de student*(α ; $df(MSE)$), onde α é o nível de significância e $df(MSE)$ são os graus de liberdade da média quadrática do erro. Qualquer efeito padronizado que ultrapasse a linha de referência é tido como significativo (Figura 5.5) Neste exemplo a temperatura e a pressão foram significativas para a resposta, pois atravessaram a linha de referência vertical. O efeito padronizado é encontrado dividindo-se o valor do coeficiente do fator pelo respectivo erro padrão (SE) (Paiva, 2004).

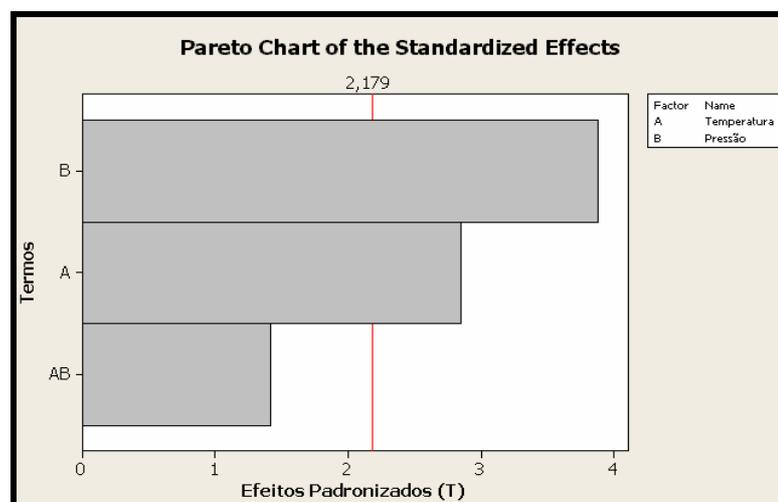


Figura 5.5 – Exemplo do diagrama de Pareto: efeitos dos elementos e suas interações (Adaptada Paiva, 2004)

5.6.2 – Factorial Plot

O *Factorial Plot* é um gráfico disponível no software MINITAB® que permite avaliar como se comportam os níveis dos fatores envolvidos na experimentação em relação à resposta desejada (Paiva, 2004).

Segundo Box et al (1978), o efeito de um fator é a mudança causada na resposta de um experimento quando se altera de -1 para $+1$ o nível de um fator (Figura 5.6). De maneira semelhante, o coeficiente de um fator é a mudança causada na resposta de um experimento quando um fator se altera de -1 para 0 , ou de 0 para $+1$. Dessa maneira, pode se escrever que a equação 5.2:

$$\text{Coeficiente} = \frac{\text{Efeito}}{2} \quad (5.2)$$

Os coeficientes dos fatores são os coeficientes de regressão de um polinômio ajustado que inclui um termo constante, termos lineares e os produtos dos termos lineares. Observando-se a Figura 5.6, nota-se que, se a resposta do experimento for do tipo “quanto maior, melhor”, a otimização da resposta seria obtida com os níveis (+) da temperatura e (-) da pressão. Assim, estabelece-se um padrão operacional otimizado para o processo (Paiva, 2004).

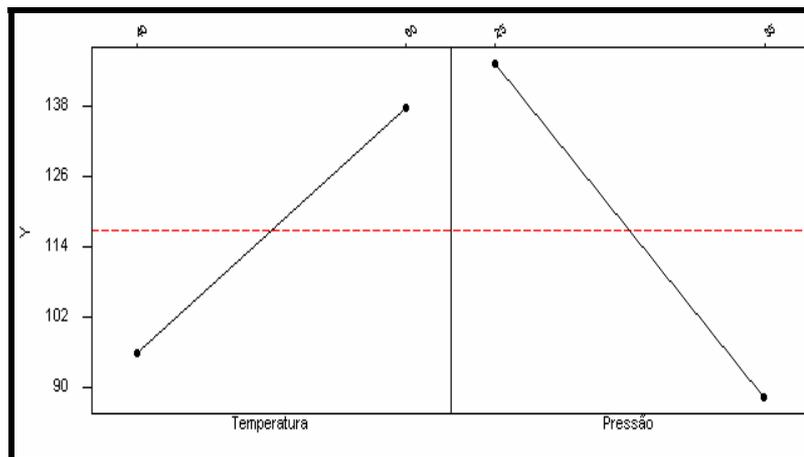


Figura 5.6 – Exemplo do *Factorial Plot* para os efeitos principais (Adaptada Paiva 2004)

Capítulo 6

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

6.1 – Considerações Iniciais

Os experimentos realizados neste trabalho foram executados no Laboratório de Automação Manufatura (LAM) da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Com a realização dos experimentos obteve-se um conjunto de dados que permitiram fazer uma análise do efeito dos elementos residuais (Cr, Ni e Cu) na usinabilidade do aço de corte fácil ABNT 12L14 e encontrar uma faixa percentual adequada da composição química que contribua positivamente para a melhora da usinabilidade deste material.

Assim este capítulo apresenta o planejamento experimental e a metodologia utilizada nos ensaios, descrevendo características do material usinado, as especificações das ferramentas de corte, da máquina-ferramenta, do monitoramento da potência elétrica e do desgaste de flanco, da medição da rugosidade.

6.2 – Materiais

6.2.1 – Corpo de prova

O material dos corpos de provas utilizados nos ensaios foi o aço de corte fácil especificação ABNT 12L14 fornecido pela Empresa Aços Villares S.A. Este material foi fornecido em nove corridas conforme Tabela 6.1, com a composição química apresentada na Tabela 6.2.

Tabela 6.1 – Descrição das corridas e dimensões das barras.

Corrida	Comprimento (mm)	Bitola (mm)
A	1.000/1.010	52,39
B	1.002/1.012	52,39
C	1.000/1.005	52,39
D	1.005/1.010	52,39
E	1.010/1.020	52,39
F	1.050/1.100	52,39
G	1.000/1.005	52,39
H	1.004/1.050	52,39
I	1.010/1.020	52,39

Tabela 6.2 – Composição química das corridas

Corrida	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cr	% Ni	% Cu	% Al	% Mo	% Pb	% N2
A	0,090	0,030	1,240	0,046	0,273	0,150	0,080	0,260	0,001	0,020	0,280	0,0079
B	0,140	0,030	1,200	0,045	0,280	0,090	0,170	0,180	0,001	0,030	0,270	0,0084
C	0,072	0,020	1,210	0,044	0,284	0,090	0,170	0,250	0,001	0,010	0,250	0,008
D	0,085	0,020	1,250	0,047	0,272	0,100	0,080	0,110	0,001	0,010	0,240	0,0070
E	0,077	0,020	1,240	0,050	0,277	0,160	0,090	0,080	0,001	0,030	0,250	0,0080
F	0,084	0,020	1,230	0,048	0,297	0,100	0,080	0,270	0,001	0,020	0,230	0,0086
G	0,078	0,030	1,250	0,051	0,273	0,180	0,170	0,170	0,001	0,030	0,260	0,0072
H	0,077	0,020	1,220	0,045	0,295	0,130	0,120	0,210	0,001	0,040	0,240	0,0086
I	0,078	0,030	1,250	0,052	0,279	0,190	0,180	0,260	0,001	0,030	0,250	0,0083

Como o objeto de estudo é fazer uma análise dos elementos residuais, a Tabela 6.3 mostra a variação da faixa percentual dos elementos residuais e a dureza do aço ABNT 12L14 para cada corrida.

Tabela 6.3 – Composição química dos elementos residuais e dureza do material.

	Cr	Ni	Cu	Corrida	Cr	Ni	Cu	Dureza Brinell
1a	0,15/0,20	0,08/0,13	0,25/0,30	A	0,15	0,08	0,26	142
2a	0,08/0,13	0,17/0,22	0,10/0,15	B	0,09	0,17	0,18	136
3a	0,08/0,13	0,17/0,22	0,25/0,30	C	0,09	0,17	0,25	123
4a	0,08/0,13	0,08/0,13	0,10/0,15	D	0,1	0,08	0,11	133
5a	0,15/0,20	0,08/0,13	0,10/0,15	E	0,16	0,09	0,08	144
6a	0,08/0,13	0,08/0,13	0,25/0,30	F	0,1	0,08	0,27	127
7a	0,15/0,20	0,17/0,22	0,10/0,15	G	0,18	0,17	0,17	129
8a	0,12/0,18	0,12/0,18	0,18/0,23	H	0,13	0,12	0,21	127
9a	0,15/0,20	0,17/0,22	0,25/0,30	I	0,19	0,18	0,26	145

Os corpos de prova para realizar os ensaios foram retirados das corridas com as dimensões $\Phi 50 \times 295$ mm, rigorosamente identificados de acordo com sua origem nas corridas para que não ocorressem trocas durante a execução dos ensaios e confusões dos resultados.

6.2.2 – Ferramentas de corte

As ferramentas de corte utilizadas neste trabalho foram: (i) Bits quadrado (5/8" x 6") de aço-rápido classificação SAE M2 com dureza entre 64-65 HRC; (ii) metal duro classe ISO P35 revestido com três coberturas (Ti(C,N), Al_2O_3 , TiN), (GC 4035 Sandvik) na geometria ISO SNMG 09 03 04 – PM e o suporte designação ISO DSBNL 1616H 09.

A ferramenta de aço-rápido possui baixa dureza a quente e o metal duro classe ISO P35 possui baixa resistência ao desgaste em relação às demais classes. A opção por esses materiais de ferramentas foi devido às características mecânicas apresentadas por eles estarem adequadas para realização de ensaios de usinabilidade tendo como critério a vida da ferramenta. As geometrias de ambas as ferramentas estão apresentadas na Tabela 6.4.

Tabela 6.4 – Geometrias conforme Norma ISO 3685* (1993).

Material da ferramenta de corte	Ângulo de saída da ferramenta γ	Ângulo de folga da ferramenta α_o	Ângulo de inclinação da ferramenta λ_s	Ângulo de posição da ferramenta χ_r	Ângulo da ponta da ferramenta ϵ_r
Aço-rápido	25°	8°	0°	75°	90°
Metal duro	+ 6°	5°	0°	75°	90°

* Norma utilizada para ensaio de vida da ferramenta em torneamento.

6.2.3 – Máquina-Ferramenta

Os experimentos foram realizados em um torno CNC da marca NARDINI, modelo LOGIC 175. Ele possui as seguintes características: comando numérico CNC MCS Série 500, potência de 7,5 CV, rotação máxima do eixo árvore de 4000 rpm, torre porta-ferramenta com 8 posições, diâmetro máximo 100 mm e comprimento máximo torneável de 300 mm, entre pontas (Figura 6.1).



Figura 6.1 - Torno CNC Nardini do LAM – UNIFEI.

6.2.4 – Fluido de Corte

O fluido de corte utilizado no ensaio para a condição mais crítica de usinagem, utilizando a ferramenta de aço-rápido, foi o fluido de corte Sintético R Avanço HP, solúvel em água a 10%, aplicado sobre a aresta de corte a uma vazão de 2,5 l/min.

6.3 – Condições de Corte

A determinação das condições de corte, velocidade, avanço e profundidade de corte para a realização dos ensaios de usinabilidade tomaram-se como base a Norma ISO 3685 (1993). Para o ensaio com a ferramenta de aço-rápido adotou-se como velocidade de corte

inicial $V_c = 150$ m/min, avanço $f = 0,1$ mm/v e profundidade $a_p = 1$ mm. Depois variou apenas a V_c para cima (160 e 175 m/min) e para baixo (140 e 125 m/min).

Para o ensaio com a ferramenta de metal duro adotou-se como velocidade de corte inicial $V_c = 500$ m/min, $f = 0,1$ mm/v e $a_p = 1$ mm. Prosseguiram-se os ensaios com a diminuição da velocidade de corte para $V_c = 450$ e 400 m/min.

O critério de fim de vida da ferramenta foi estabelecido conforme a Norma ISO 3685 (1993) com base no desgaste de flanco máximo (VB_{Bmax}) para o aço-rápido e o desgaste de flanco médio (VB_B) para o metal duro. A ferramenta de aço-rápido tem fim de vida quando atingir $VB_{Bmax} = 0,6$ mm e a ferramenta de metal duro quando atingir $VB_B = 0,3$ mm.

6.4 – Monitoramento do Processo

Durante o processo de torneamento monitorou-se a potência elétrica consumida, o desgaste de flanco máximo (VB_{Bmax}) na ferramenta de aço-rápido, o desgaste de flanco médio (VB_B) no metal duro e a rugosidade da peça.

A potência elétrica consumida para o corte foi monitorada através da aquisição da corrente e tensão. Estes sinais eram processados por uma placa de aquisição, e analisado pelo programa MONITEK, via computador (Figura 6.2). Primeiro monitorava-se a potência elétrica em vazio, ou seja, a placa girando apenas com o corpo de prova sem cortar o material, e depois, durante intervalos de tempo durante a execução do corte do material, monitorava-se a potência elétrica total consumida. Obteve-se o valor médio da potência elétrica consumida no corte subtraindo do valor da potência elétrica total consumida, o valor da potência em vazio.

Para a ferramenta de aço-rápido o desgaste de flanco máximo (VB_{Bmax}) foi monitorado no final de cada passe da usinagem por uma lupa graduada de 0 a 10 mm com resolução de 0,01 mm e aumento de oito vezes até o valor de $VB_{Bmax} = 0,6$ mm. Para a ferramenta de metal duro o VB_B foi monitorado a partir do terceiro corpo de prova e no final de cada passe da usinagem até $VB_B = 0,3$ mm. Para ambas as ferramentas os valores

medidos dos desgastes foram confirmados em um microscópio metalográfico (estereoscópio). As fotos dos desgastes foram registradas em um microscópio eletrônico.



Figura 6.2 - Sistema de monitoramento da potência elétrica consumida.

A rugosidade foi medida após o primeiro passe da usinagem, após um passe intermediário e após o passe final do torneamento por um rugosímetro *Surtronic 3⁺ Taylor Hobson* (Figura 6.3), utilizando um *cut-off* de 0,25 mm.

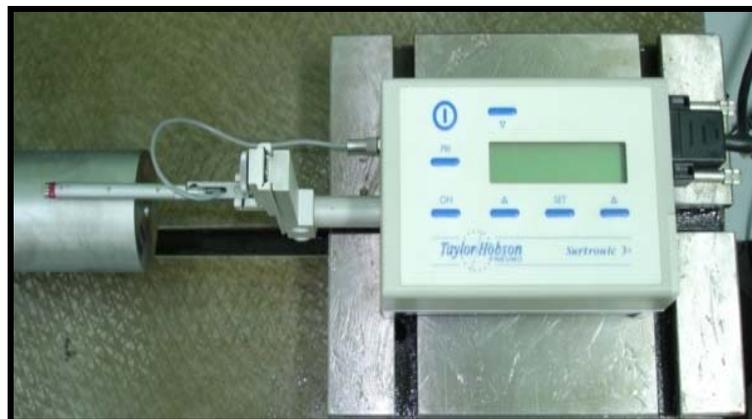


Figura 6.3 – Rugosímetro utilizado nos ensaios.

6.5 – Planejamento Experimental

O planejamento dos experimentos partiu de um *Baseline* mostrado na Tabela 6.3, contendo a seguinte configuração: 3 fatores (%Cr, %Ni e %Cu) em dois níveis (-1 e +1) e 1 *center point*. Para a determinação do número dos corpos de prova fez-se um planejamento

fatorial completo. O número dos corpos de prova para cada ensaio foi determinado segundo a equação 6.1:

$$\text{Número de experimentos } N = (2 \text{ níveis})^{(3 \text{ fatores})} = 8 \text{ experimentos} \quad (6.1)$$

Então, fazendo um fatorial completo com uma réplica e dois *center points* obteve-se um total de 18 experimentos aleatorizados para cada ensaio (Tabela 6.5).

Tabela 6.5 – Planilha de contraste gerada no software Minitab® para um fatorial completo com 3 fatores, 2 níveis, 1 réplica e 2 *center points*.

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

Para identificar os corpos de prova de cada experimento atribuiu-se os níveis para cada composição química dos elementos de acordo com a Tabela 6.3:

% Cr : nível -1 = faixa de 0,08/0,13

nível +1 = faixa de 0,15/0,20

% Ni : nível -1 = faixa de 0,08/0,13

nível +1 = faixa de 0,17/0,22

% Cu : nível -1 = faixa de 0,10/0,15

nível +1 = faixa de 0,25/0,30

Assim, após fazer a analogia dos níveis de cada elemento da Tabela 6.5 com as corridas da Tabela 6.3 obteve-se a Tabela 6.6, que mostra a planilha para a execução dos ensaios com a identificação dos corpos de prova.

Tabela 6.6 – Planilha para a execução dos ensaios.

Ordem	CenterPt	Blocks	% Cr	%Ni	% Cu	Corrida
1	1	1	1	1	-1	G
2	1	1	-1	1	-1	B
3	1	1	-1	-1	-1	D
4	1	1	-1	-1	1	F
5	1	1	1	1	-1	G
6	1	1	-1	-1	1	F
7	1	1	-1	-1	-1	D
8	1	1	1	-1	-1	E
9	1	1	-1	1	-1	B
10	0	1	0	0	0	H
11	1	1	-1	1	1	C
12	1	1	1	1	1	I
13	1	1	-1	1	1	C
14	1	1	1	-1	1	A
15	1	1	1	-1	1	A
16	0	1	0	0	0	H
17	1	1	1	1	1	I
18	1	1	1	-1	-1	E

O *center point* foi identificado como sendo a corrida H com as seguintes faixas dos elementos residuais: %Cr = 0,12/0,18;%Ni = 0,12/0,18;%Cu = 0,18/0,23.

Com essa análise determinou-se o número de corpos de prova utilizados nos ensaios de usinabilidade. Para a ferramenta de aço-rápido fizeram-se ensaios para cinco condições de cortes diferentes, variando a velocidade de corte ($V_c = 125, 140, 150, 160$ e 175 m/min) e mantendo constante o avanço ($f = 0,1$ m/v) e a profundidade de corte ($a_p = 1$ mm). Assim realizou-se 90 experimentos, sem o uso de fluido de corte. Ainda para uma análise comparativa da vida da ferramenta realizou-se um ensaio (18 experimentos) para a condição mais crítica encontrada, ou seja, o ensaio que obteve a menor vida da ferramenta para a maior velocidade de corte (175 m/min) com o uso do fluido de corte. Assim temos um total de 108 experimentos que correspondem ao número de arestas de corte da ferramenta de aço-rápido.

Para o metal duro obedeceu-se o mesmo critério citado para a ferramenta de aço-rápido, no entanto utilizado três velocidades de corte ($V_c = 400, 450$ e 500 m/min), sendo

necessários 270 corpos de prova e 54 experimentos. O número de corpos de prova nesse caso foi maior devido ao fato de que foram necessário cinco corpos por aresta da ferramenta de metal duro.

6.6 – Execução dos Ensaios

Para a realização dos ensaios foi obedecida a ordem da Tabela 6.6, gerada pelo software Minitab®, acrescentado mais colunas à direita, onde foram colocadas as respostas, ou seja, as vidas das ferramentas para a respectiva corridas e velocidades de corte.

Iniciaram-se os ensaios com as ferramentas de aço-rápido, sem fluido de corte, com $V_c = 150$ m/min, $a_p = 1$ mm e $f = 0,1$ mm/v. O tempo de corte (T_c) foi calculado ao término de cada passe da usinagem pela equação 6.2. A vida da ferramenta foi obtida através da soma dos tempos resultantes até que a ferramenta apresentasse $VB_{B_{max}} = 0,6$ mm. Em muitos casos a vida da ferramenta de aço-rápido acabava em um determinado ponto do passe. Isso era claramente presenciado quando iniciava uma faísca contínua entre a peça e a ferramenta (Figura 6.4). Observado o fato, a operação era interrompida e realizavam-se as medidas. Em seguida aumentou-se a velocidade para $V_c = 160$ e 175 m/min e depois reduziu-se para $V_c = 140$ e 125 m/min. Após a execução dos ensaios a seco realizou-se o ensaio com a ferramenta de aço-rápido utilizando o fluido de corte a uma vazão de $2,5$ l/min, na velocidade de corte 175 m/min. O procedimento para determinar a vida da ferramenta foi o mesmo usado na usinagem a seco.

$$t_c = \frac{\pi \cdot D \cdot L_f}{1000 \cdot f \cdot V_c} \text{ [min]} \quad (6.2)$$

D = diâmetro do corpo de prova após o passe em [mm];

L_f = comprimento usinado no passe ou até o ponto de fim de vida da ferramenta em [mm];

f = avanço em [mm/v];

V_c = velocidade de corte do ensaio em [m/min];

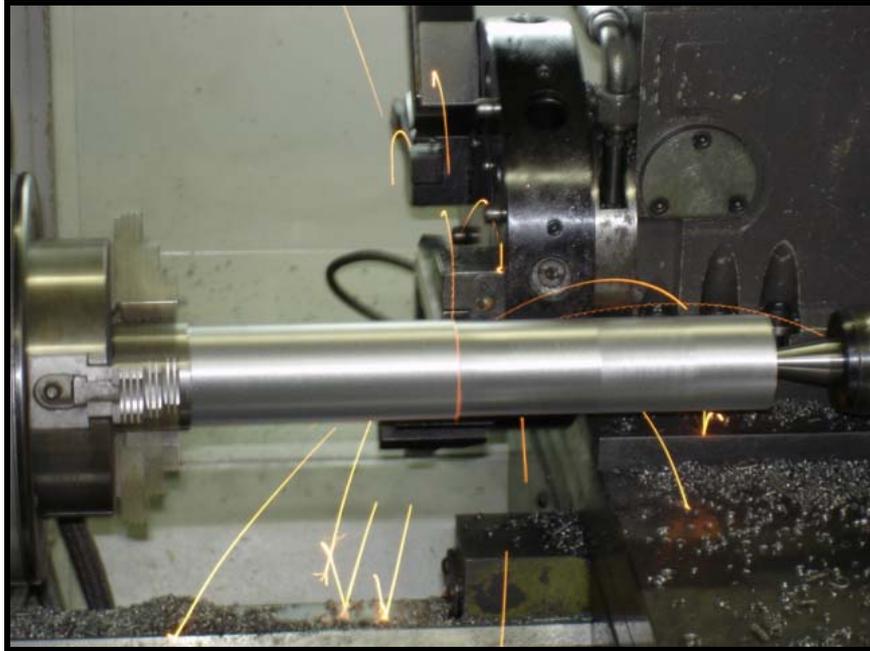


Figura 6.4 – Foto da caracterização do fim de vida da ferramenta de aço-rápido

Os ensaios com a ferramenta de metal duro foram realizados a seco, iniciando com a $V_c = 500$ m/min, $a_p = 1$ mm e $f = 0,1$ mm/v. Também foi calculado o tempo de corte no fim de cada passe pela equação 6.2 e a vida da ferramenta obtida através da somatória dos tempos de corte até que a ferramenta apresentasse $VB_B = 0,3$ mm. O mesmo procedimento foi feito para as velocidades 450 e 400 m/min mantendo-se constantes a_p e f .

Capítulo 7

RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.1 – Ensaio de Usinabilidade com Ferramenta de Aço-rápido a Seco

A Tabela 7.1 apresenta as vidas das ferramentas de aço-rápido resultante dos 18 experimentos planejados no capítulo 6 e nas condições de corte estabelecidas pela norma ISO 3685 (1993). Com esses resultados obteve-se a Figura 7.1 mostrando o comportamento da vida da ferramenta em relação às velocidades de corte e às nove corridas do aço ABNT 12L14. Observa-se aparentemente na Figura 7.1 que a corrida (E) foi que apresentou maiores vidas da ferramenta (melhor usinabilidade) e a corrida (B) foi que apresentou menores vidas (pior usinabilidade). Este tipo de análise é muito superficial, não relatando corretamente o comportamento dos elementos residuais na usinabilidade do aço ABNT 12L14, podendo existir uma confusão na resposta. Então, para fazer a análise da influência da composição química dos elementos residuais (Cr, Ni e Cu) na usinabilidade deste aço de forma mais precisa, utilizar-se-á os fundamentos estatísticos do Projeto de Experimentos (DOE) mencionados no capítulo 5, para filtrar qual faixa dos elementos residuais são mais significativos na influência da usinabilidade do aço ABNT 12L14.

Tabela 7.1 – Vidas das ferramentas de aço-rápido: $ap= 1 \text{ mm}$, $f= 0,1 \text{ mm/v}$, usinagem a seco.

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

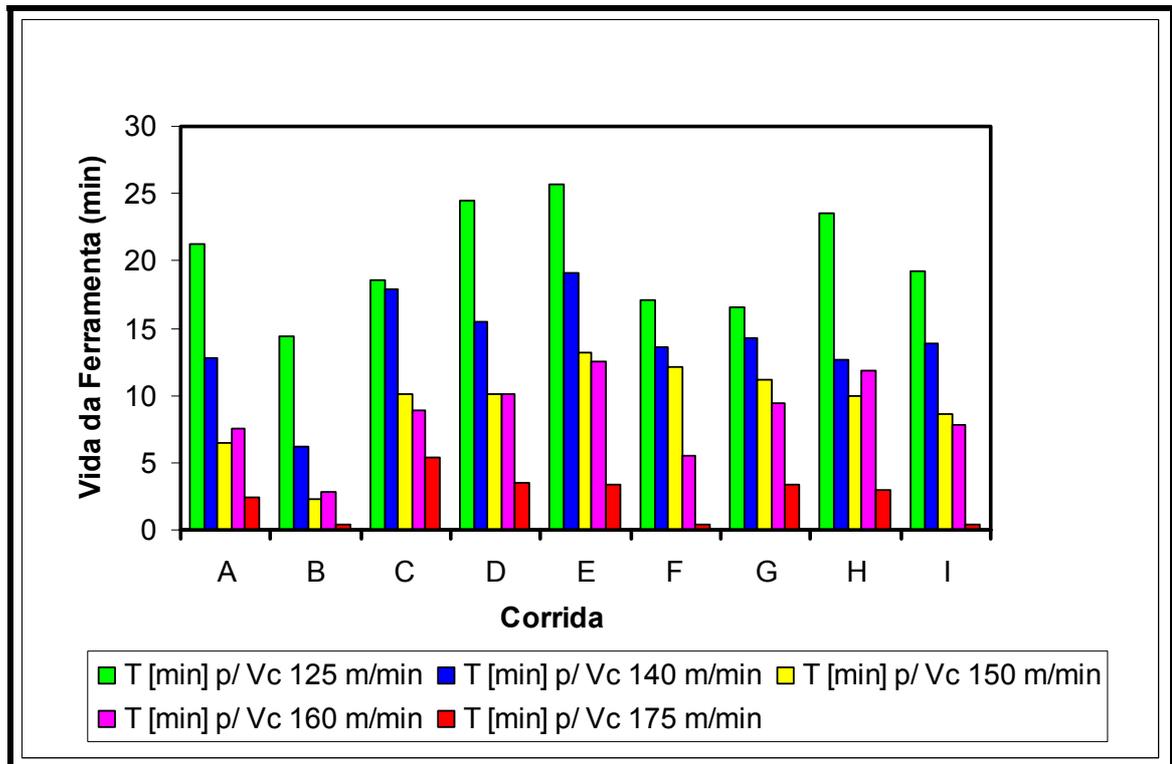


Figura 7.1 – Comparação entre as vidas médias das ferramentas de aço-rápido.

7.1.1 – Análise Estatística para Vc 150 m/min

Os resultados das vidas das ferramentas de aço-rápido obtidos nos 18 experimentos aleatorizados utilizando-se o software estatístico Minitab® estão apresentados na Tabela 7.2. Para a análise dos dados adotou-se um nível de significância $\alpha=0,05$.

Tabela 7.2 - Resultado de vida da ferramenta para o fatorial completo (Vc= 150 m/min)

Ordem	Corrida	% Cr	%Ni	% Cu	T [min]
1	G	1	1	-1	9,90
2	B	-1	1	-1	2,20
3	D	-1	-1	-1	8,80
4	F	-1	-1	1	12,10
5	G	1	1	-1	12,40
6	F	-1	-1	1	12,20
7	D	-1	-1	-1	11,50
8	E	1	-1	-1	12,50
9	B	-1	1	-1	2,38
10	H	0	0	0	11,70
11	C	-1	1	1	10,00
12	I	1	1	1	8,40
13	C	-1	1	1	10,10
14	A	1	-1	1	7,10
15	A	1	-1	1	5,70
16	H	0	0	0	8,30
17	I	1	1	1	8,80
18	E	1	-1	-1	13,90

Observando-se os valores de P na Tabela 7.3 e, atentando-se para os critérios dispostos no capítulo 5, pode-se concluir que o %Ni, as interações de 2ª ordem entre os elementos %Cr%Ni, %Cr%Cu, %Ni%Cu foram significativos para a usinabilidade do aço ABNT 12L14, uma vez que $P < 0,05$. Com os coeficientes da Tabela 7.3 monta-se a equação 7.1 para a resposta, ou seja, para a vida da ferramenta (T):

$$T=9,249+(0,589\%Cr)+(-1,226\%Ni)+(0,051\%Cu)+(1,264\%Cr\%Ni)+(-2,389\%Cr\%Cu)+ \\ +(1,251\%Ni\%Cu) \quad (7.1)$$

Sabendo-se que a resposta para a vida da ferramenta T é do tipo “quanto maior melhor” pode-se melhorar a equação 7.1, respeitando o principio da hierarquia e atribuindo os níveis (-1)%Ni, (+1)%Cr e (-1)%Cu conforme mostrado na equação 7.2:

$$T = 9,249 + (0,589(+1)(-1,226. (-1)) + (0,051(-1)) + (1,264 (+1).(-1)) + (-2,389.(+1).(-1)) + (1,251.(-1).(-1)) \quad (7.2)$$

Resolvendo a equação 7.2 encontra-se uma vida $T = 13,389$ min.

Tabela 7.3 – Análise fatorial com *center point* – V_c 150 m/min.

TERMO	EFEITO	COEF	SE COEF	T	P
Constante		9,249	0,319	29,030	0,000
% Cr	1,178	0,589	0,319	1,850	0,098
% Ni	-2,453	-1,226	0,319	-3,850	0,004
% Cu	0,103	0,051	0,319	0,160	0,876
%Cr * % Ni	2,528	1,264	0,319	3,970	0,003
%Cr * % Cu	-4,778	-2,389	0,319	-7,500	0,000
%Ni * % Cu	2,503	1,251	0,319	3,930	0,003
%Cr*%Ni*%Cu	-0,378	-0,189	0,319	-0,590	0,568
Center Points		0,751	0,956	0,790	0,452

Para a $V_c = 150$ m/min os níveis da composição química dos elementos residuais nas faixas: (+1) %Cr: 0,15-0,20; (-1)% Ni: 0,08-0,13; (-1)%Cu: 0,10-0,15 da corrida (E) foram os que apresentaram melhor usinabilidade.

Complementando a análise fatorial, a Tabela 7.4 apresenta a Análise de Variância para o experimento. Nota-se que os efeitos principais e as interações de 2ª ordem são significativos, uma vez que os valores de P são inferiores ao nível de significância de 5%.

Tabela 7.4 - ANOVA (Fatorial completo) – V_c 150 m/min

FONTE	DF	SEQ SS	ADJ SS	MS	F	P
Efeitos Principais	3	29,647	29,647	9,8824	6,090	0,015
Interações 2ª.Ordem	3	141,901	141,901	47,3004	29,130	0,000
Interações 3ª.Ordem	1	0,570	0,570	0,5700	0,350	0,568
Curvatura	1	1,003	1,003	1,0033	0,620	0,452
Erro Residual	9	14,616	14,616	1,6240		
Erro Puro	9	14,616	14,616	1,6240		
Total	17	187,738				

A Figura 7.2 expressa que apenas o %Ni e as interações de 2ª ordem entre os elementos %Cr%Ni, %Cr%Cu, %Ni%Cu são significativos para a usinabilidade do aço ABNT 12L14 pois seus efeitos ultrapassaram a linha de referência vertical.

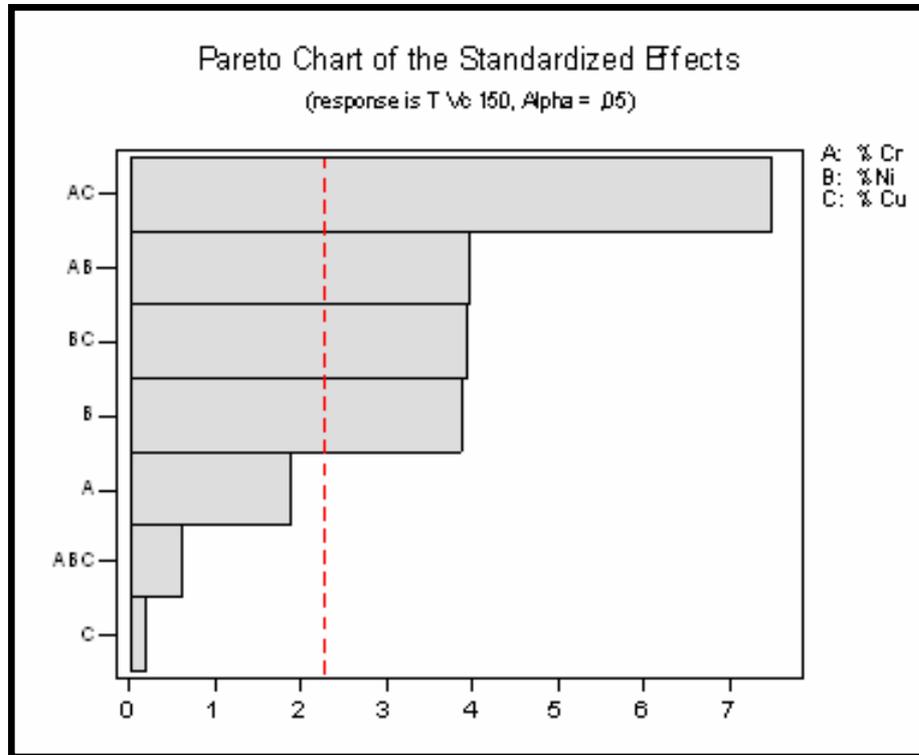


Figura 7.2 – Diagrama de Pareto: efeitos dos elementos e suas interações – Vc 150 m/min.

A Figura 7.3 mostra o efeito dos níveis dos fatores dos elementos residuais na usinabilidade do aço ABNT 12L14.

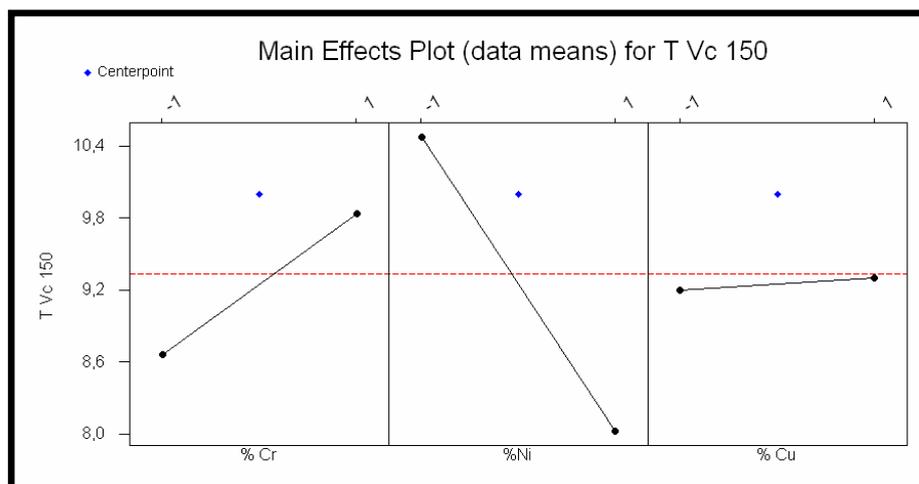


Figura 7.3 - Factorial Plot para os efeitos principais – Vc 150 m/min.

Através de uma análise similar feita nos dados estatísticos anterior, quanto maior melhor, os níveis dos elementos são dados pelos pontos da reta que estão acima da linha vermelha da Figura 7.3. Assim identificamos os seguintes níveis: (+1)%Cr, (-1)%Ni e para % Cu pode ser o nível (-1) ou (+1) porque o elemento Cu isolado não foi significativo na resposta. Com a análise gráfica pode-se dizer que existem duas composições químicas dos elementos residuais que tem melhor influência na usinabilidade na $V_c = 150$ m/min, que são as corridas (E) e (A).

7.1.2 – Análise Estatística para V_c 160 m/min

Os resultados das vidas das ferramentas de aço-rápido obtidos a 160 m/min nos 18 experimentos aleatorizados utilizando-se o software estatístico Minitab® estão apresentados na Tabela 7.5. Para a análise dos dados adotou-se um nível de significância $\alpha = 0,05$.

Tabela 7.5 - Resultados da vida da ferramenta para o fatorial completo – (V_c 160 m/min)

Ordem	Corrida	% Cr	%Ni	% Cu	T [min]
1	G	1	1	-1	10,50
2	B	-1	1	-1	2,84
3	D	-1	-1	-1	13,37
4	F	-1	-1	1	5,58
5	G	1	1	-1	8,40
6	F	-1	-1	1	5,41
7	D	-1	-1	-1	6,73
8	E	1	-1	-1	11,40
9	B	-1	1	-1	2,86
10	H	0	0	0	12,60
11	C	-1	1	1	6,65
12	I	1	1	1	8,52
13	C	-1	1	1	11,19
14	A	1	-1	1	7,68
15	A	1	-1	1	7,39
16	H	0	0	0	11,00
17	I	1	1	1	7,21
18	E	1	-1	-1	13,50

Observando-se os valores de P na Tabela 7.6 pode-se dizer que o elemento %Cr, a interação de 2ª ordem entre os elementos %Ni%Cu e o *center point* foram significativos para a usinabilidade do aço ABNT 12L14, uma vez que $P < 0,05$. Dessa maneira pode-se montar a equação 7.3 para a resposta de vida T para a ferramenta de aço-rápido:

$$T=8,0777+(1,248\%Cr)+(-0,806\%Ni)+(-0,623\%Cu)+(0,138\%Cr\%Ni)+(-1,002\%Cr\%Ni)+ \\ +(1,744.\%Ni.\%Cu) \quad (7.3)$$

Sabendo-se que a resposta para a vida da ferramenta T é do tipo “quanto maior melhor” pode-se aperfeiçoar a equação 7.3. Respeitando o princípio da hierarquia e atribuindo os níveis (+1)%Cr, (-1)%Ni e (-1)%Cu, monta-se a equação 7.4:

$$T = 8,0777+(1,248.(+1)) +(-0,806(-1)) +(-0,623(-1)) + (0,138(+1)(-1))+(-1,002(+1)(-1))+ \\ +(1,744.(-1).(-1)) \quad (7.4)$$

Resolvendo a equação 7.4 encontra-se uma da vida T= 13,363 min.

Para a $V_c= 160$ m/min os níveis da composição química dos elementos residuais nas faixas: (+1) %Cr: 0,15-0,20; (-1)%Ni: 0,08-0,13; (-1)%Cu: 0,10-0,15, da corrida (E) foram os que apresentaram melhor usinabilidade.

Tabela 7.6 – Análise fatorial com center point – V_c 160 m/min.

TERMO	EFEITO	COEF	SE COEF	T	P
Constante		8,077	0,5201	15,530	0,000
% Cr	2,496	1,248	0,5201	2,400	0,040
% Ni	-1,611	-0,806	0,5201	-1,550	0,156
% Cu	-1,246	-0,623	0,5201	-1,200	0,261
%Cr * % Ni	0,276	0,138	0,5201	0,270	0,797
%Cr * % Cu	-2,004	-1,002	0,5201	-1,930	0,086
%Ni * % Cu	3,489	1,744	0,5201	3,350	0,008
%Cr*%Ni*%Cu	-1,824	-0,912	0,5201	-1,750	0,113
Center Points		3,723	1,560	2,390	0,041

De maneira complementar a análise fatorial, a Tabela 7.7 apresenta a Análise de Variância para o experimento. Nota-se que as interações 2ª ordem e a curvatura foram significativas, uma vez que os valores de P são inferiores ao nível de significância de 5%. Neste caso é interessante ressaltar a significância da curvatura. Isto indica, segundo disposto no capítulo 5, que os níveis dos elementos residuais estão numa região de ótimo.

Tabela 7.7 – ANOVA (Fatorial completo) – Vc 160 m/min

FONTE	DF	SEQ SS	ADJ SS	MS	F	P
Efeitos Principais	3	41,520	41,520	13,8410	3,200	0,077
Interações 2ª.Ordem	3	65,050	65,050	21,64-84	5,010	0,026
Interações 3ª.Ordem	1	13,300	13,300	13,3040	3,070	0,113
Curvatura	1	24,640	24,640	24,6430	5,690	0,041
Erro Residual	9	38,960	38,960	4,3280		
Erro Puro	9	38,960	38,960	4,3280		
Total	17	183,480				

A Figura 7.4 expressa que o %Cr e a interação de 2ª ordem %Ni%Cu são significativos para a usinabilidade do aço ABNT 12L14 na Vc= 160 m/min.

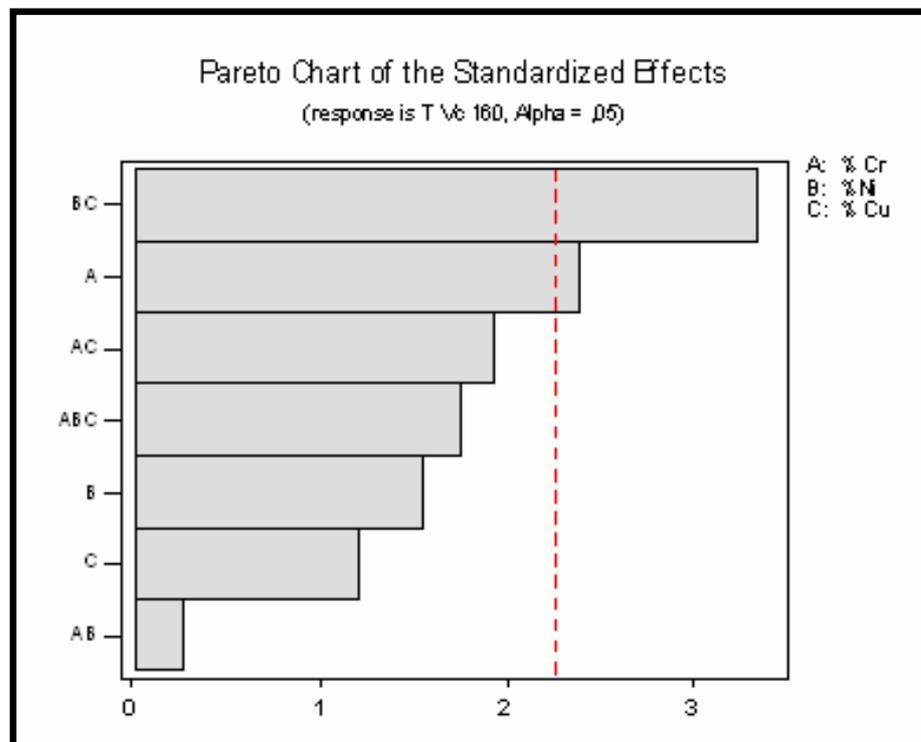


Figura 7.4 – Diagrama de Pareto: efeitos dos elementos e suas interações – Vc 160 m/min.

A Figura 7.5 mostra o efeito dos níveis dos fatores dos elementos residuais na usinabilidade do aço ABNT 12L14. Pela Figura 7.5 os níveis definidos para os elementos são: (+1)%Cr, (-1)%Ni e (-1)%Cu. Com a análise gráfica pode-se dizer que a composição química dos elementos residuais da corrida (E) apresentou melhor usinabilidade na Vc= 160 m/min.

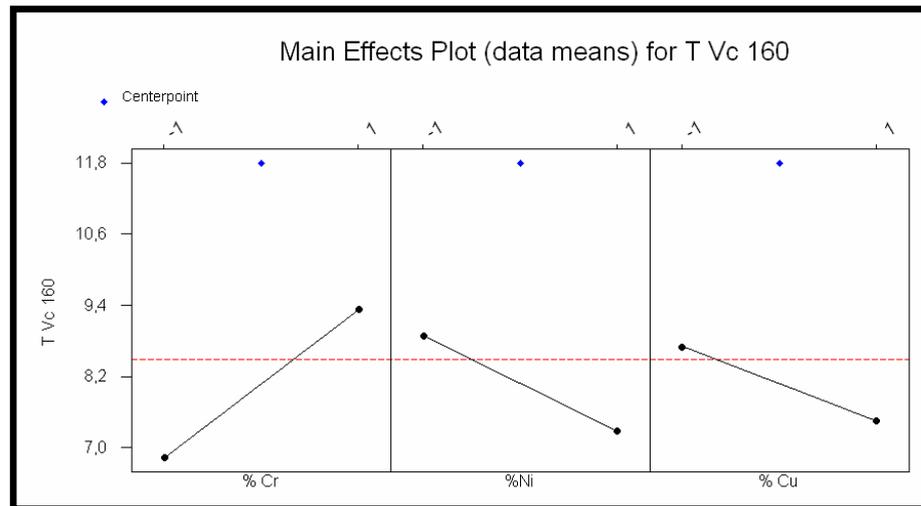


Figura 7.5 - Factorial Plot para os efeitos principais – Vc 160 m/min.

7.1.3 – Análise Estatística para Vc 175 m/min

Os resultados de vida da ferramenta de aço-rápido estão apresentados na Tabela 7.8.

Tabela 7.8 - Resultados da vida da ferramenta para o fatorial completo (Vc 175 m/min)

Ordem	Corrida	% Cr	%Ni	% Cu	T [min]
1	G	1	1	-1	2,56
2	B	-1	1	-1	0,34
3	D	-1	-1	-1	3,59
4	F	-1	-1	1	0,48
5	G	1	1	-1	4,11
6	F	-1	-1	1	0,30
7	D	-1	-1	-1	3,33
8	E	1	-1	-1	4,66
9	B	-1	1	-1	0,47
10	H	0	0	0	5,57
11	C	-1	1	1	5,27
12	I	1	1	1	0,40
13	C	-1	1	1	5,40
14	A	1	-1	1	2,60
15	A	1	-1	1	2,34
16	H	0	0	0	0,39
17	I	1	1	1	0,35
18	E	1	-1	-1	1,94

Com os dados gerados pelo software estatístico Minitab® com $\alpha = 0,05$ apresentados na Tabela 7.9 e observando-se os valores de P nota-se que apenas a interação de 3ª ordem

entre os elementos %Cr, %Ni e %Cu foi significativa para a usinabilidade do aço ABNT 12L14, uma vez que $P < 0,05$.

Tabela 7.9 – Análise fatorial com center point – Vc 175 m/min.

TERMO	EFEITO	COEF	SE COEF	T	P
Constante		2,384	0,3576	6,670	0,000
% Cr	-0,028	-0,014	0,3576	-0,040	0,970
% Ni	-0,043	-0,021	0,3576	-0,060	0,954
% Cu	-0,482	-0,241	0,3576	-0,670	0,517
%Cr * % Ni	-0,987	-0,494	0,3576	-1,380	0,201
%Cr * % Cu	-1,412	-0,706	0,3576	-1,970	0,080
%Ni * % Cu	1,468	0,734	0,3576	2,050	0,070
%Cr*%Ni*%Cu	-2,532	-1,226	0,3576	-3,540	0,006
Center Points		0,596	1,073	0,560	0,592

Para a velocidade de corte $V_c = 175$ m/min não dá para saber claramente quais níveis dos fatores deve-se considerar para determinar a corrida que teve a melhor usinabilidade, já que os elementos isolados não foram significativos e nem suas interações de 2ª ordem. Esse fato está ligado ao tipo da ferramenta de corte utilizada, no caso o aço-rápido. A velocidade de corte $V_c = 175$ m/min ultrapassou a faixa de velocidades admitida quando se trabalha com ferramentas de aço-rápido a seco e devido a isso os resultados não foram claros. Os próprios valores de vidas da ferramenta obtidos demonstram isto.

Tabela 7.10 – ANOVA (Fatorial completo) – Vc 175 m/min.

FONTE	DF	SEQ SS	ADJ SS	MS	F	P
Efeitos Principais	3	0,9415	0,9415	0,3138	0,150	0,925
Interações 2ª.Ordem	3	20,4955	20,4955	6,8318	3,340	0,070
Interações 3ª.Ordem	1	25,6542	25,6542	25,6542	12,540	0,006
Curvatura	1	0,6320	0,6320	0,6320	0,310	0,592
Erro Residual	9	18,4186	18,4186	2,0465		
Erro Puro	9	18,4186	18,4186	2,0465		
Total	17	66,1418				

7.1.4 – Análise Estatística para Vc 140 m/min

Os resultados das vidas das ferramentas de aço-rápido obtidos nos 18 experimentos aleatorizados utilizando-se o software estatístico Minitab® estão apresentados na Tabela 7.11. Para a análise dos dados adotou-se um nível de significância $\alpha = 0,05$.

Tabela 7.11 - Resultados da vida da ferramenta para o Fatorial Completo (Vc 140 m/min)

Ordem	Corrida	% Cr	%Ni	% Cu	T [min]
1	G	1	1	-1	11,28
2	B	-1	1	-1	5,48
3	D	-1	-1	-1	17,40
4	F	-1	-1	1	14,51
5	G	1	1	-1	17,24
6	F	-1	-1	1	12,70
7	D	-1	-1	-1	13,60
8	E	1	-1	-1	20,99
9	B	-1	1	-1	6,95
10	H	0	0	0	12,83
11	C	-1	1	1	20,08
12	I	1	1	1	11,01
13	C	-1	1	1	15,61
14	A	1	-1	1	12,28
15	A	1	-1	1	13,27
16	H	0	0	0	12,39
17	I	1	1	1	16,84
18	E	1	-1	-1	17,14

Observando-se os valores de P na Tabela 7.12 pode-se concluir que as interações de 2ª ordem entre os elementos %Cr%Cu e %Ni%Cu foram significativos para a usinabilidade do aço ABNT 12L14 uma vez que $P < 0,05$. Dessa maneira pode-se montar a equação 7.5 para a resposta, ou seja, para a vida da ferramenta (T):

$$T = 14,149 + (0,857\%Cr) + (-1,088\%Ni) + (0,389\%Cu) + (0,174\%Cr\%Ni) + (-2,045\%Cr\%Cu) + (2,435.\%Ni.\%Cu) \quad (7.5)$$

Sabendo-se que a resposta para a vida da ferramenta T é do tipo “quanto maior melhor” pode-se aperfeiçoar a equação 7.5. Respeitando o princípio da hierarquia e atribuindo os níveis (+1)%Cr, (-1)%Ni e (-1)%Cu, monta-se a equação 7.6.

$$T=14,149+(0,857(+1))+(-1,088(-1))+(0,389(-1))+(0,174(+1)(-1))+(-2,045(+1)(-1))+ \\ +(2,435(-1)(-1)) \quad (7.6)$$

Resolvendo a equação 7.6 encontra-se uma da vida $T= 20,011$ min.

Para a $V_c= 140$ m/min os níveis da composição química dos elementos residuais nas faixas: (+1) %Cr: 0,15-0,20; (-1) %Ni: 0,08-0,13; (-1) %Cu: 0,10-0,15, da corrida (E) foram que apresentaram melhor usinabilidade

Tabela 7.12 – Análise fatorial com center point – V_c 140 m/min.

TERMO	EFEITO	COEF	SE COEF	T	P
Constante		14,149	0,6598	21,450	0,000
% Cr	1,715	0,857	0,6598	1,300	0,226
% Ni	-2,175	-1,088	0,6598	-1,650	0,134
% Cu	0,778	0,389	0,6598	0,590	0,570
%Cr * % Ni	0,348	0,174	0,6598	0,260	0,798
%Cr * % Cu	-4,090	-2,045	0,6598	-3,100	0,013
%Ni * % Cu	4,870	2,435	0,6598	3,690	0,005
%Cr*%Ni*%Cu	-1,893	-0,946	0,6598	-1,430	0,185
Center Points		-1,539	1,979	-0,780	0,457

Complementando a análise fatorial, a Tabela 7.13 apresenta a Análise de Variância para o experimento. Nota-se que as interações 2ª ordem foram significativas, uma vez que os valores de P são inferiores ao nível de significância de 5%. A Figura 7.10 confirma apenas que as interações de 2ª Ordem entre os elementos %Cr%Cu e o %Ni%Cu foram significativas para a usinabilidade do aço ABNT 12L14.

Tabela 7.13 – Análise de Variância (Fatorial completo) – V_c 140 m/min.

FONTE	DF	SEQ SS	ADJ SS	MS	F	P
Efeitos Principais	3	33,1050	33,1050	11,0350	1,580	0,260
Interações 2ª.Ordem	3	162,2630	162,2630	54,0880	7,770	0,007
Interações 3ª.Ordem	1	14,3260	14,3260	14,3260	2,060	0,185
Curvatura	1	4,2090	4,2090	4,2090	0,600	0,457
Erro Residual	9	62,6820	62,6820	6,9650		
Erro Puro	9	62,6820	62,6820	6,9650		
Total	17	276,5860				

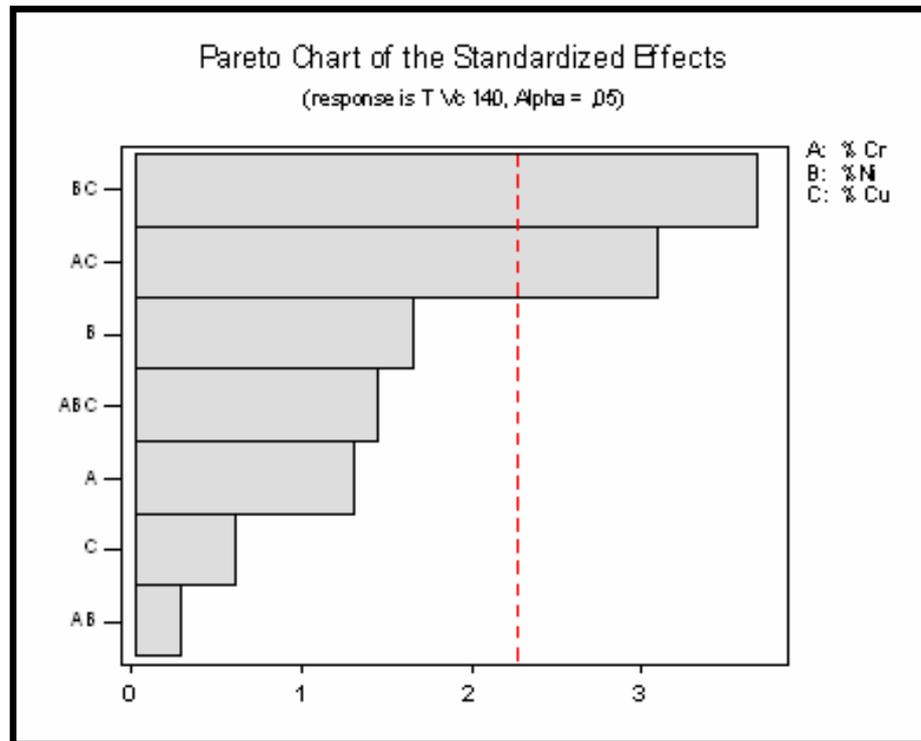


Figura 7.6 – Diagrama de Pareto:efeitos dos elementos e suas interações – Vc 140 m/min.

A Figura 7.11 mostra o efeito dos níveis dos fatores dos elementos residuais na usinabilidade do aço ABNT 12L14. Pela Figura 7.11 os níveis definidos para os elementos são: (+1) %Cr, (-1) %Ni e (+1) %Cu.

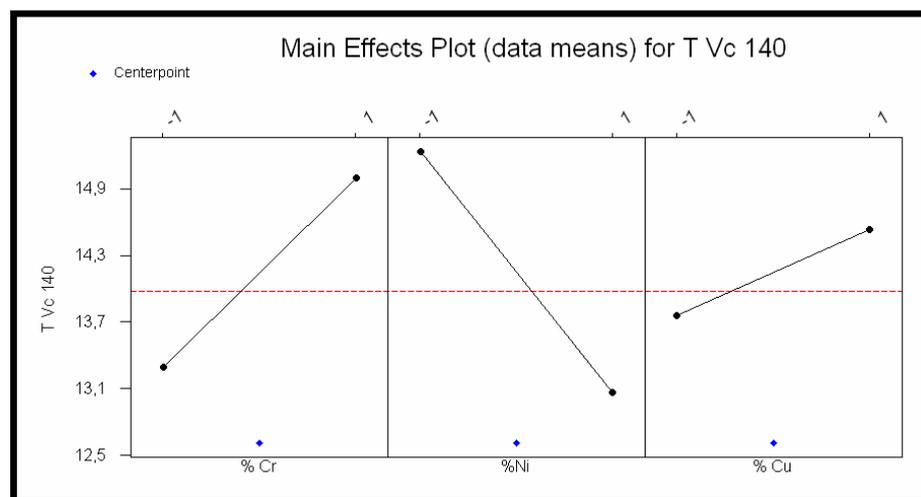


Figura 7.7 - Factorial Plot para os efeitos principais - Vc 140 m/min.

Com a análise da Figura 7.11 pode-se dizer que composição química dos elementos residuais nas faixas (+1) %Cr, (-1) %Ni e (+1) %Cu da corrida (A) é a que tem melhor usinabilidade na $V_c = 140$ m/min.

7.1.5 – Análise Estatística para V_c 125 m/min

Os resultados das vidas das ferramentas de aço-rápido obtidos nos 18 experimentos aleatorizados utilizando-se o software estatístico Minitab® estão apresentados na Tabela 7.14. Para a análise dos dados adotou-se um nível de significância $\alpha = 0,05$.

Tabela 7.14 – Resultados da vida da ferramenta para o Fatorial Completo (V_c 125 m/min)

Ordem	Corrida	% Cr	%Ni	% Cu	T [min]
1	G	1	1	-1	11,74
2	B	-1	1	-1	14,35
3	D	-1	-1	-1	23,49
4	F	-1	-1	1	17,91
5	G	1	1	-1	21,40
6	F	-1	-1	1	16,22
7	D	-1	-1	-1	25,45
8	E	1	-1	-1	22,32
9	B	-1	1	-1	14,35
10	H	0	0	0	25,45
11	C	-1	1	1	16,17
12	I	1	1	1	21,09
13	C	-1	1	1	20,87
14	A	1	-1	1	18,89
15	A	1	-1	1	23,49
16	H	0	0	0	21,72
17	I	1	1	1	17,43
18	E	1	-1	-1	28,98

Observando-se os valores de P na Tabela 7.15 pode-se concluir que o elemento %Ni e a interação de 2ª ordem entre os elementos %Ni%Cu foram significativos para a usinabilidade do aço ABNT 12L14, uma vez que $P < 0,05$. Dessa maneira pode-se montar a equação 7.7 para a resposta, ou seja, para a vida da ferramenta (T):

$$T = 19,447 + (1,221\%Cr) + (-2,647\%Ni) + (-0,813\%Cu) + (-0,106\%Cr\%Ni) + (0,371\%Cr\%Cu) + (2,153\%Ni.\%Cu) \quad (7.7)$$

Sabendo-se que a resposta para a vida da ferramenta T é do tipo “quanto maior melhor” pode-se aperfeiçoar a equação 7.7. Respeitando o princípio da hierarquia e atribuindo os níveis (+1)%Cr, (-1)%Ni e (-1)%Cu, monta-se a equação 7.8:

$$T=19,447+(1,221(+1))+(-2,647(-1))+(-0,813(-1))+(-0,106(+1)(-1))+(0,371(+1)(-1))+ \\ +(2,153(-1)(-1)) \quad (7.8)$$

Resolvendo a equação 7.8 encontra-se uma da vida T = 26,016 min

Para a Vc = 125 m/min os níveis da composição química dos elementos residuais na faixa: (+1) % Cr: 0,15 - 0,20; (-1) % Ni: 0,08- 0,13; (-1) %Cu: 0,10- 0,15 da corrida (E) foram que apresentaram melhor usinabilidade.

Tabela 7.15 – Análise fatorial com center point – Vc 125 m/min.

TERMO	EFEITO	COEF	SE COEF	T	P
Constante		19,447	0,9357	20,780	0,000
% Cr	2,441	1,221	0,9357	1,300	0,224
% Ni	-5,294	-2,647	0,9357	-2,830	0,020
% Cu	-1,626	-0,813	0,9357	-0,870	0,407
%Cr * % Ni	-0,211	-0,106	0,9357	-0,110	0,913
%Cr * % Cu	0,741	0,371	0,9357	0,400	0,701
%Ni * % Cu	4,306	2,153	0,9357	2,300	0,047
%Cr*%Ni*%Cu	-0,731	-0,366	0,9357	-0,390	0,705
Center Points		4,138	2,807	1,470	0,175

Complementando a análise fatorial, a Tabela 7.16 apresenta a Análise de Variância para o experimento. Nota-se que nenhuma interação foi significativa

Tabela 7.16 – ANOVA (Fatorial completo) – Vc 125 m/min.

FONTE	DF	SEQ SS	ADJ SS	MS	F	P
Efeitos Principais	3	146,5130	146,5130	48,8380	3,490	0,063
Interações 2ª.Ordem	3	76,5510	76,5510	25,5170	1,820	0,213
Interações 3ª.Ordem	1	2,1390	2,1390	2,1390	0,150	0,705
Curvatura	1	30,4430	30,4430	30,4430	2,170	0,175
Erro Residual	9	126,0640	126,0640	14,0070		
Erro Puro	9	126,0640	126,0640	14,0070		
Total	17	381,7100				

A Figura 7.12 mostra que o elemento %Ni e a interação de 2ª Ordem entre os elementos %Ni%Cu são significativas para a usinabilidade do aço ABNT 12L14, conforme encontrado da Tabela 7.15.

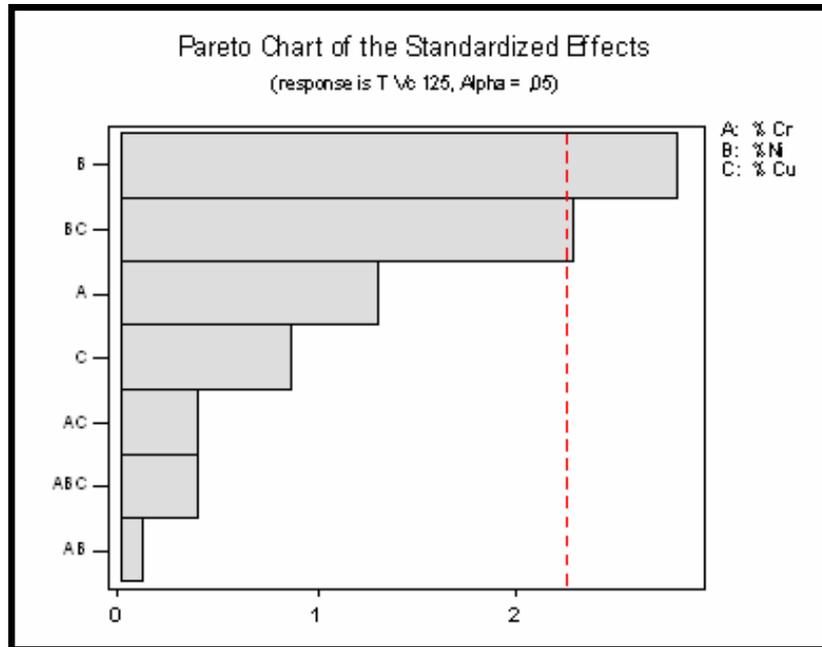


Figura 7.8 – Diagrama de Pareto: efeitos dos elementos e suas interações – Vc 125 m/min.

A Figura 7.13 mostra o efeito dos níveis dos fatores dos elementos residuais na usinabilidade do aço ABNT 12L14. Pela Figura 7.13 os níveis definidos para os elementos são: (+1) %Cr, (-1) %Ni e (-1)%Cu. Portanto, pode-se dizer que composição química dos elementos residuais da corrida (E) é a que apresentou melhor usinabilidade na Vc =125 m/min.

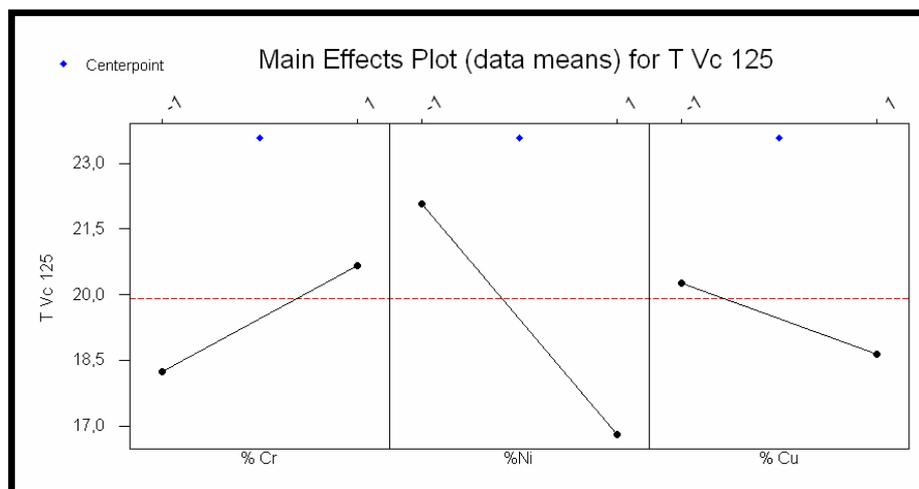


Figura 7.9 - Factorial Plot para os efeitos principais – Vc 125 m/min.

7.2 – Ensaio de Usinabilidade com Ferramenta de Aço-rápido com Fluido de Corte

Após a realização dos experimentos com a ferramenta de aço-rápido, com corte a seco foi identificado que a condição mais crítica para a vida da ferramenta de aço-rápido ocorreu na velocidade $V_c = 175$ m/min. Nesta velocidade não se pode verificar as influências dos elementos residuais na usinabilidade do aço ABNT 12L14. Assim, para fazer uma análise dos elementos residuais para essa condição, realizou-se um ensaio com a utilização do fluido de corte, obtendo-se os resultados apresentados na Tabela 7.17.

Para verificar se o uso do fluido de corte realmente foi significativo para o aumento da vida da ferramenta fez-se um teste de hipótese, através da ferramenta *Paired t* disponível no software Minitab®, que compara se os resultados das respostas são estatisticamente iguais ou diferentes. A hipótese nula (H_0) diz que o fluido não é significativo para o aumento da vida da ferramenta. O software Minitab® gerou os dados da Tabela 7.18.

Tabela 7.17 – Vidas para as condições de corte: $a_p = 1$ mm, $f = 0,1$ mm, usinagem a seco e com fluido.

Exp	Corrida	T [min] c/ Fluido	T [min] a seco
1	G	8,06	2,56
2	B	2,15	0,34
3	D	6,18	3,59
4	F	8,38	0,48
5	G	8,06	4,11
6	F	8,55	0,30
7	D	8,06	3,33
8	E	7,38	4,66
9	B	1,98	0,47
10	H	9,76	5,57
11	C	9,64	5,27
12	I	6,88	0,40
13	C	8,06	5,40
14	A	5,72	2,60
15	A	6,18	2,34
16	H	6,80	0,39
17	I	6,18	0,35
18	E	9,85	1,94

Observando o valor de P na Tabela 7.18 e, atentando-se para os critérios dispostos no Capítulo 5, pode-se dizer que o fluido de corte realmente contribuiu para o aumento da vida da ferramenta de aço-rápido, pois o valor de $P < 0,05$. O aumento da vida da ferramenta na usinagem com o fluido deve-se ao fato de ter ocorrido uma refrigeração na aresta de corte do aço-rápido. Com essa refrigeração ocorreu uma diminuição da temperatura de corte e uma redução do desgaste e por isso prolongou o tempo de vida da ferramenta de aço-rápido.

Tabela 7.18 – Teste *Paired-t* para usinagem com e sem fluido – Vc 175 m/min

	N	MÉDIA	ST	SE MÉDIA
T para usi com fluido	18	7,104	2,221	0,524
T para usi a seco	18	2,450	1,972	0,465
Diferença	18	4,654	2,119	0,500
IC de 95% para a diferença da média = (3,600; 5,708)				
T-value	9,320			
P	0,000			

7.2.1 – Análise Estatística para Vc 175 m/min com Fluido

Os resultados das vidas das ferramentas de aço-rápido obtidos nos 18 experimentos aleatorizados utilizando-se o software estatístico Minitab® estão apresentados na Tabela 7.17. Para a análise dos dados adotou-se um nível de significância $\alpha = 0,05$.

Observando-se os valores de P na Tabela 7.19 pode-se concluir que as interações de 2ª ordem entre os elementos %Cr%Cu e %Ni%Cu foram significativas, uma vez que $P < 0,05$. Dessa maneira pode-se montar a equação 7.9 para a resposta T:

$$T = 6,957 + (0,332\%Cr) + (-0,581\%Ni) + (0,492\%Cu) + (0,587\%Cr\%Ni) + (-1,541\%Cr\%Cu) + (0,822\%Ni\%Cu) \quad (7.9)$$

Sabendo-se que a resposta para a vida da ferramenta T é do tipo “quanto maior melhor” pode-se aperfeiçoar a equação 7.9. Respeitando o princípio da hierarquia e atribuindo os níveis (+1)%Cr, (-1)%Ni e (-1)%Cu, monta-se a equação 7.10.

$$T=6,957+(0,332(+1))+(-0,581(-1))+(0,492(-1))+(0,587(+1)(-1))+(-1,541.(+1)(-1))+ \\ +(0,822.(-1)(-1)) \quad (7.10)$$

Resolvendo a equação 7.10 encontra-se uma da vida $T = 9,154$ min.

Para a $V_c = 175$ m/min com fluido de corte os níveis da composição química dos elementos residuais nas faixas (+1) %Cr: 0,15-0,20; (-1) %Ni: 0,08-0,13; (-1) %Cu: 0,10-0,15, da corrida (E) foi que apresentou melhor usinabilidade.

Tabela 7.19 – Análise Fatorial com center point – V_c 175 m/min com fluido de corte

TERMO	EFEITO	COEF	SE COEF	T	P
Constante		6,957	0,2742	25,37	0,000
% Cr	0,664	0,332	0,2742	1,21	0,257
% Ni	-1,161	-0,581	0,2742	-2,12	0,063
% Cu	0,984	0,492	0,2742	1,79	0,106
%Cr * % Ni	1,174	0,587	0,2742	2,14	0,061
%Cr * % Cu	-3,081	-1,541	0,2742	-5,62	0,000
%Ni * % Cu	1,644	0,822	0,2742	3,00	0,015
%Cr*%Ni*%Cu	-1,076	-0,538	0,2742	-1,96	0,081
Center Points		1,323	0,8226	1,61	0,142

Complementando a análise fatorial, a Tabela 7.20 apresenta a Análise de Variância para o experimento. Nota-se que apenas as interações de 2ª ordem foram significativas, uma vez que os valores de P são inferiores ao nível de significância de 5%. A Figura 7.13 confirma que as interações de 2ª Ordem entre os elementos %Cr%Cu e o %Ni%Cu foram significativas para a usinabilidade do aço ABNT 12L14.

Tabela 7.20 – ANOVA (Fatorial completo) – V_c 175 m/min com fluido de corte

FONTE	DF	SEQ SS	ADJ SS	MS	F	P
Efeitos Principais	3	11,0273	11,0273	3,676	3,06	0,084
Interações 2ª.Ordem	3	54,2948	54,2948	18,098	15,05	0,001
Interações 3ª.Ordem	1	4,6333	4,6333	4,633	3,85	0,081
Curvatura	1	3,1123	3,1123	3,112	2,59	0,142
Erro Residual	9	10,8264	10,8264	1,203		
Erro Puro	9	10,8264	10,8264	1,203		
Total	17	83,8940				

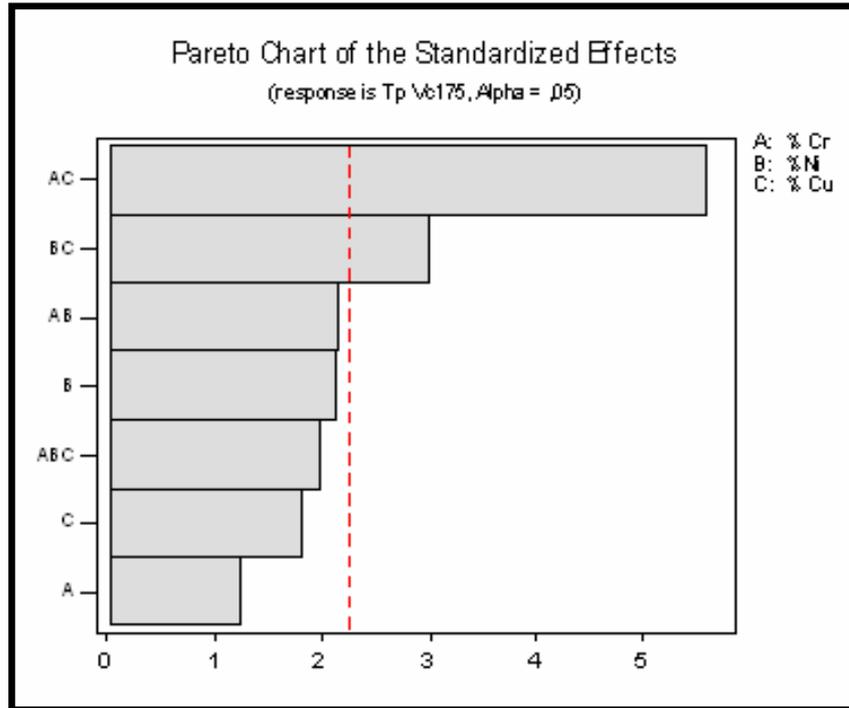


Figura 7.10 – Diagrama de Pareto: efeitos dos elementos e suas interações – Vc 175 m/min com fluido de corte.

A Figura 7.14 mostra o efeito dos níveis dos fatores dos elementos residuais na usinabilidade do aço ABNT 12L14. Pela Figura 7.14 os níveis definidos para os elementos são: (+1) %Cr, (-1) %Ni e (+1) %Cu. Portanto, pode-se dizer que composição química dos elementos residuais da corrida (A) foi que apresentou melhor usinabilidade na Vc= 175 m/min com fluido de corte.

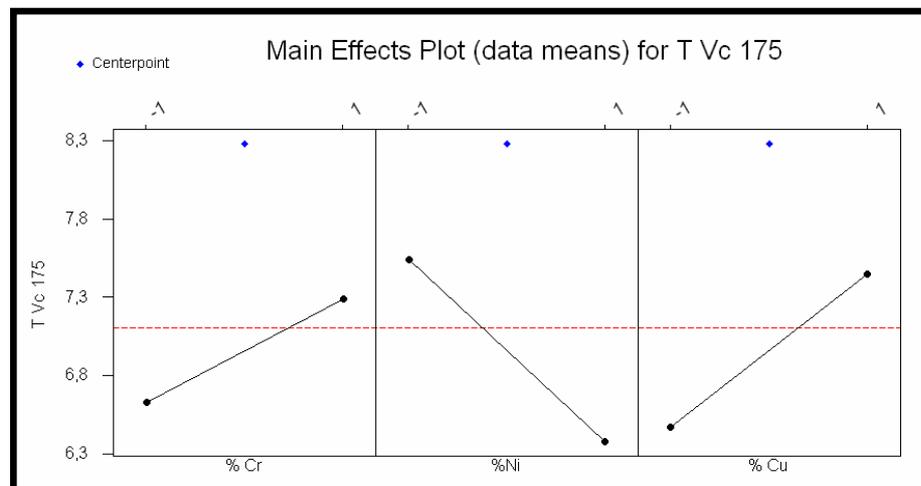


Figura 7.11 - Factorial Plot para os efeitos principais – Vc 175 m/min com fluido de corte.

7.3 – Resultados com o Aço-rápido

Em função das análises estatísticas realizadas para as ferramentas de corte de aço-rápido, a Tabela 7.21 apresenta os níveis das faixas dos elementos residuais que influenciaram de forma positiva na usinabilidade do aço ABNT 12L14.

Tabela 7.21 – Níveis dos elementos com contribuição positiva na usinabilidade – Aço-rápido.

Velocidade de corte m/min	Nível %Cr	Nível %Ni	Nível %Cu	Corrida
125	+1	-1	-1	E
140	+1	-1	-1	E
150	+1	-1	-1	E
160	+1	-1	-1	E
175 a seco	Indefinido	Indefinido	Indefinido	Indefinida
175 com fluido	+1	-1	-1	E

Observa-se na Tabela 7.21 que os níveis dos elementos %Cr, %Ni e %Cu não se alteraram, mantendo uma regularidade em todas as velocidades de corte, mesmo com a utilização do fluido de corte na condição mais crítica. Devido a essa regularidade pode-se dizer que a corrida (E) possui os elementos residuais nas faixas que melhor contribuíram para a usinabilidade do aço ABNT 12L14. A Tabela 7.22 mostra a faixa dos elementos residuais da corrida (E) que apresentou melhor usinabilidade.

Tabela 7.22 – Nível e faixa da Corrida (E) de melhor usinabilidade – Aço-rápido.

Elemento	Nível	Faixa
%Cr	+1	0,15 - 0,20
%Ni	-1	0,08 - 0,13
%Cu	-1	0,10 - 0,15

É interessante também identificar qual faixa dos elementos residuais que menos contribuíram para a usinabilidade do aço ABNT 12L14. Assim fazendo uma análise inversa do tipo “quanto menor pior”, conseguiu-se identificar quais faixas dos elementos residuais tiveram um efeito negativo na vida da ferramenta e consequentemente na usinabilidade do aço ABNT 12L14. A Tabela 7.23 mostra que os níveis dos elementos também mantiveram uma regularidade e que a corrida (B) teve pior usinabilidade. A Tabela 7.24 mostra a faixa dos elementos residuais da corrida (B) que apresentou pior usinabilidade.

Tabela 7.23 – Níveis dos elementos com contribuição negativa na usinabilidade – Aço-rápido

Velocidade de corte m/min	Nível %Cr	Nível %Ni	Nível %Cu	Corrida
125	-1	+1	-1	B
140	-1	+1	-1	B
150	-1	+1	-1	B
160	-1	+1	-1	B
175 a seco	Indefinido	Indefinido	Indefinido	Indefinida
175 com fluido	-1	+1	-1	B

Tabela 7.24 – Nível e faixa da Corrida (B) de pior usinabilidade – Aço-rápido.

Elemento	Nível	Faixa
%Cr	-1	0,08 - 0,13
%Ni	+1	0,17 - 0,22
%Cu	-1	0,10 - 0,15

Os elementos residuais metálicos (Cr, Ni, e Cu) aumentam a dureza do material por solução sólida. O aumento da dureza proporciona maior desgaste da ferramenta de corte, ou seja, prejudica a usinabilidade do material (Murphy, 1971). Assim os elementos residuais no nível (-1) apresentaram melhor usinabilidade, com exceção do %Cr. Uma possível justificativa para o nível do elemento %Cr ser (+1) é que outros elementos da composição química, como por exemplo o teor de carbono e fósforo, pode terem inibido seu efeito. Segundo Garvey et al (1965) o teor de carbono de 0,08% é o que proporciona o maior índice de usinabilidade no caso dos aços resulfurados baixo-carbono, e a corrida (E) possui um teor de 0,077% de carbono. O fósforo é um elemento que melhora a usinabilidade em maiores porcentagens, pois possibilita a formação de cavacos frágeis (Garvey, 1965; Bass, 2000). A corrida (E) possui um teor de fósforo de 0,050% (12% maior do que o teor de fósforo da corrida (B) de pior usinabilidade) e isso contribuiu para caracterizar a melhor usinabilidade dessa corrida.

A justificativa da corrida (B) ter apresentado pior usinabilidade é baseada nas considerações anteriores. A corrida (B) possui um teor de carbono mais elevado, (0,140% de carbono, 45% maior) em relação às demais corridas como pode ser observado na Tabela 6.2 e o fósforo apresenta um percentual menor. Comparando os níveis da corrida que apresentou melhor usinabilidade (Tabela 7.22) com a que apresentou pior usinabilidade (Tabela 7.24) observa-se que eles são opostos, com exceção do nível do %Cu mas, como o %Cu não foi significativo nessas velocidades de cortes desconsidera-se seu efeito. Essa comparação mostra

que a mudança causada na resposta do experimento (melhor/pior usinabilidade) é proveniente da alteração dos níveis dos elementos residuais.

7.4 – Ensaio de Usinabilidade com Ferramenta de Metal Duro

7.4.1 – Análise Estatística para Vc 500 m/min

Os resultados das vidas das ferramentas de metal duro, obtidos nos 18 experimentos aleatorizados utilizando-se o software estatístico Minitab® estão apresentados na Tabela 7.25 e para análise dos dados adotou-se um nível de significância $\alpha=0,05$.

Tabela 7.25 – Resultados da vida da ferramenta para o Fatorial Completo (Vc= 500 m/min)

Ordem	Corrida	% Cr	%Ni	% Cu	T [min]
1	G	1	1	-1	10,35
2	B	-1	1	-1	12,51
3	D	-1	-1	-1	9,06
4	F	-1	-1	1	13,80
5	G	1	1	-1	11,82
6	F	-1	-1	1	14,55
7	D	-1	-1	-1	8,37
8	E	1	-1	-1	13,80
9	B	-1	1	-1	11,10
10	H	0	0	0	12,51
11	C	-1	1	1	11,82
12	I	1	1	1	11,82
13	C	-1	1	1	13,05
14	A	1	-1	1	13,80
15	A	1	-1	1	13,17
16	H	0	0	0	14,55
17	I	1	1	1	10,35
18	E	1	-1	-1	11,82

Observando-se os valores de P na Tabela 7.26 pode-se dizer que o elemento %Cu e as interações de 2ª ordem entre os elementos %Cr%Ni, %Cr%Cu e %Ni%Cu foram significativos para a usinabilidade do aço ABNT 12L14, uma vez que $P < 0,05$. Dessa maneira pode-se montar a equação 7.11 para a vida da ferramenta (T):

$$T=11,9494+(0,1669\%Cr)+(-0,3469\%Ni)+(0,8456\%Cu)+(-0,6844\%Cr\%Ni)+(-0,6769\%Cr\%Cu)+(-0,6881.\%Ni.\%Cu) \quad (7.11)$$

Sabendo-se que a resposta para a vida da ferramenta T é do tipo “quanto maior melhor” pode-se aperfeiçoar a equação 7.11. Respeitando o princípio da hierarquia e atribuindo os níveis (+1)%Cr, (-1)%Ni e (+1)%Cu, monta-se a equação 7.12.

$$T=11,9494+(0,1669(+1))+(-0,3469(-1))+(0,8456(+1))+(-0,6844(+1)(-1))+(-0,6769(+1)(+1))+(-0,6881(-1)(+1)) \quad (7.12)$$

Resolvendo a equação 7.12 encontra-se uma da vida T = 14,004 min

Para a Vc = 500 m/min os níveis da composição química dos elementos residuais nas faixas: (+1) %Cr: 0,15-0,20; (-1) %Ni: 0,08-0,13; (+1) %Cu: 0,25-0,30 da corrida (A) apresentou melhor usinabilidade.

Tabela 7.26 – Análise do fatorial com center point – Vc 500 m/min.

TERMO	EFEITO	COEF	SE COEF	T	P
Constante		11,9494	0,2454	48,70	0,000
% Cr	0,3337	0,1669	0,2454	0,68	0,514
% Ni	-0,6938	-0,3469	0,2454	-1,41	0,191
% Cu	1,6913	0,8456	0,2454	3,45	0,007
%Cr * % Ni	-1,3688	-0,6844	0,2454	-2,79	0,021
%Cr * % Cu	-1,3538	-0,6769	0,2454	-2,76	0,022
%Ni * % Cu	-1,3763	-0,6881	0,2454	-2,80	0,021
%Cr*%Ni*%Cu	1,0388	0,5194	0,2454	2,12	0,063
Center Points		1,5806	0,7361	2,15	0,060

Complementando a análise fatorial, a Tabela 7.27 apresenta a Análise de Variância para o experimento. Nota-se que as interações de 2ª ordem foram significativas, uma vez que os valores de P são inferiores ao nível de significância de 5%. A Figura 7.15 confirma que o elemento %Cu e as interações de 2ª Ordem entre os elementos %Cr%Ni, %Cr%Cu e o %Ni%Cu foram significativas para a usinabilidade do aço ABNT 12L14.

Tabela 7.27 – ANOVA (Fatorial completo) – Vc 500 m/min.

FONTE	DF	SEQ SS	ADJ SS	MS	F	P
Efeitos Principais	3	13,812	13,812	4,6040	4,78	0,029
Interações 2^a.Ordem	3	22,401	22,401	7,4669	7,75	0,007
Interações 3^a.Ordem	1	4,316	4,316	4,3160	4,48	0,063
Curvatura	1	4,442	4,442	4,4416	4,61	0,060
Erro Residual	9	8,670	8,670	0,9634		
Erro Puro	9	8,670	8,670	0,9634		
Total	17	53,640				

A Figura 7.16 mostra o efeito dos níveis dos fatores dos elementos residuais na usinabilidade do aço ABNT 12L14. Pela Figura 7.16 os níveis definidos para os elementos são: (+1) %Cr, (-1) %Ni e (+1) %Cu. Portanto, pode-se dizer que composição química dos elementos residuais da corrida (A) apresentou melhor usinabilidade na Vc = 500 m/min.

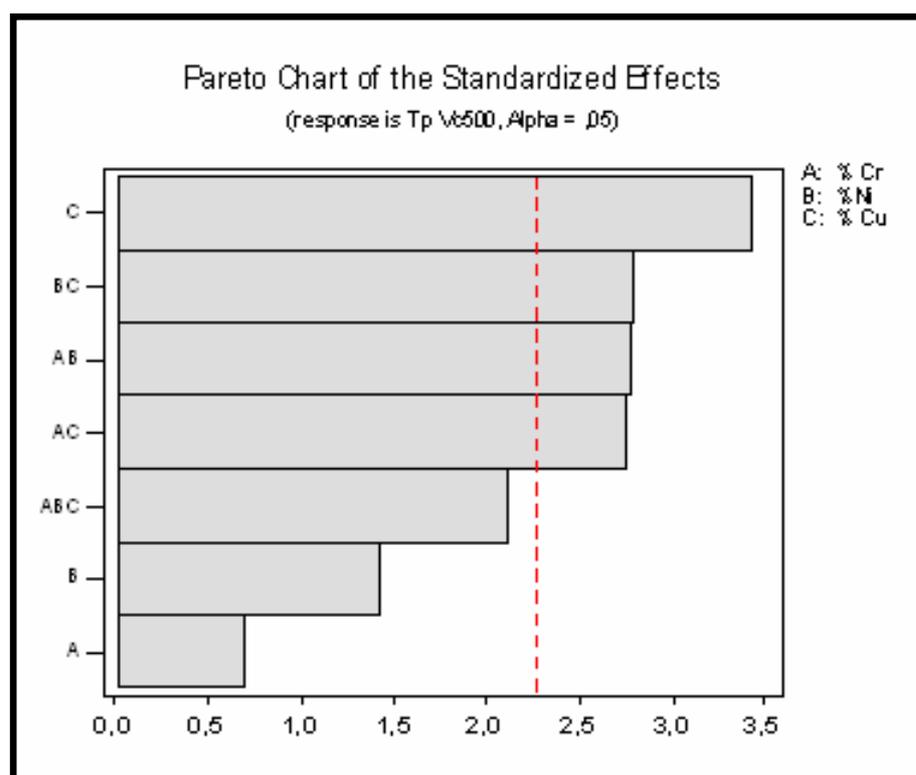


Figura 7.12 – Diagrama de Pareto: efeitos dos elementos e suas interações – Vc 500 m/min.

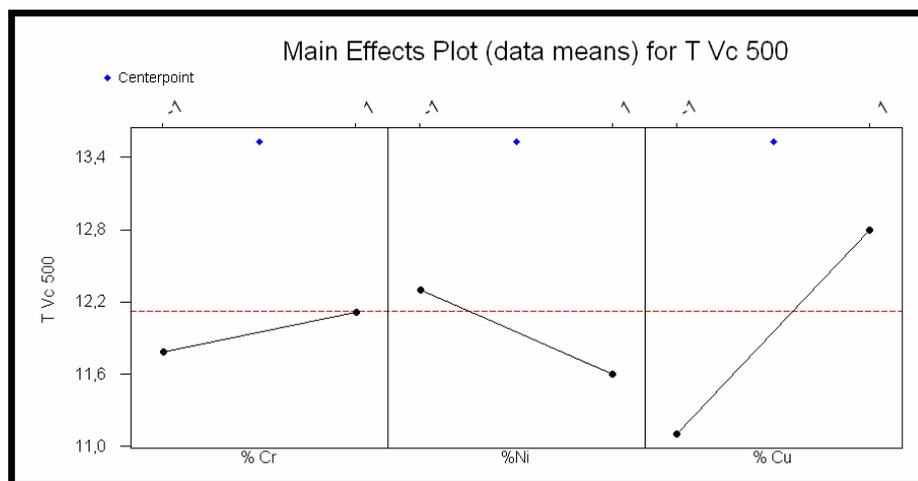


Figura 7.13 - *Factorial Plot* para os efeitos principais – Vc 500 m/min.

7.4.2 – Análise Estatística para Vc 450 m/min

Os resultados das vidas das ferramentas de metal duro, obtidos nos 18 experimentos aleatorizados utilizando-se o software estatístico Minitab® estão apresentados na Tabela 7.28 e para análise dos dados adotou-se um nível de significância $\alpha = 0,05$.

Observando-se os valores de P na Tabela 7.29 pode-se dizer que o elemento %Cu, as interações de 2ª ordem entre os elementos %Cr%Ni, %Ni%Cu e o *center point* foram significativos para a usinabilidade do aço ABNT 12L14, uma vez que $P < 0,05$. Dessa maneira pode-se montar a equação 7.13 para a resposta T:

$$T = 18,054 + (0,306\%Cr) + (0,846\%Ni) + (0,959\%Cu) + (-1,238\%Cr.\%Ni) + (-0,797\%Cr\%Cu) + (-1,507\%Ni.\%Cu) \quad (7.13)$$

Sabendo-se que a resposta para a vida da ferramenta T é do tipo “quanto maior melhor” pode-se aperfeiçoar a equação 7.13 atribuindo os níveis (+1)%Cr, (-1)%Ni e (+1)%Cu, montando a equação 7.14:

$$T = 18,054 + (0,306(+1)) + (0,846(-1)) + (0,959(+1)) + (-1,238(+1)(-1)) + (-0,797(+1)(+1)) + (-1,507(-1)(+1)) \quad (7.14)$$

Resolvendo a equação 7.14 encontra-se uma da vida $T = 20,421$ min

Para a $V_c = 450$ m/min os níveis da composição química dos elementos residuais nas faixas: (+1)%Cr: 0,15-0,20; (-1)%Ni: 0,08-0,13; (-1)%Cu: 0,25-0,30 da corrida (A) apresentou melhor usinabilidade do aço ABNT 12L14.

Tabela 7.28 - Resultados da vida da ferramenta para o Fatorial Completo - V_c 450 m/min

Ordem	Corrida	% Cr	%Ni	% Cu	T [min]
1	G	1	1	-1	18,68
2	B	-1	1	-1	17,67
3	D	-1	-1	-1	11,99
4	F	-1	-1	1	17,84
5	G	1	1	-1	19,89
6	F	-1	-1	1	20,07
7	D	-1	-1	-1	12,76
8	E	1	-1	-1	18,68
9	B	-1	1	-1	21,55
10	H	0	0	0	14,89
11	C	-1	1	1	19,39
12	I	1	1	1	17,76
13	C	-1	1	1	20,72
14	A	1	-1	1	20,07
15	A	1	-1	1	20,72
16	H	0	0	0	13,50
17	I	1	1	1	15,54
18	E	1	-1	-1	15,54

Tabela 7.29 – Análise fatorial com center point – V_c 450 m/min.

TERMO	EFEITO	COEF	SE COEF	T	P
Constante		18,054	0,3773	47,85	0,000
% Cr	0,611	0,306	0,3773	0,81	0,439
% Ni	1,691	0,846	0,3773	2,24	0,052
% Cu	1,919	0,959	0,3773	2,54	0,032
%Cr * % Ni	-2,476	-1,238	0,3773	-3,28	0,010
%Cr * % Cu	-1,594	-0,797	0,3773	-2,11	0,064
%Ni * % Cu	-3,014	-1,507	0,3773	-3,99	0,003
%Cr*%Ni*%Cu	0,054	0,027	0,3773	0,07	0,945
Center Points		-3,859	1,1319	-3,41	0,008

Complementando a análise fatorial, a Tabela 7.30 apresenta a Análise de Variância para o experimento. Nota-se que as interações de 2ª ordem e a curvatura foram significativas, uma vez que os valores de P são inferiores ao nível de significância de 5%. Neste caso é

interessante ressaltar a significância da curvatura. Isto indica segundo disposto no capítulo 5, que os níveis dos fatores (Cr, Ni e Cu) utilizados estão numa região otimizada.

Tabela 7.30 – ANOVA (Fatorial completo) – Vc 450 m/min.

FONTE	DF	SEQ SS	ADJ SS	MS	F	P
Efeitos Principais	3	27,662	27,6622	9,2207	4,05	0,045
Interações 2ª.Ordem	3	71,018	71,0182	23,6727	10,39	0,003
Interações 3ª.Ordem	1	0,012	0,0116	0,0116	0,01	0,945
Curvatura	1	26,480	26,4796	26,4796	11,63	0,008
Erro Residual	9	20,498	20,4979	2,2775		
Erro Puro	9	20,498	20,4979	2,2775		
Total	17	154,669				

A Figura 7.17 confirma que o elemento %Cu, as interações de 2ª Ordem entre os elementos %Cr%Ni e o %Ni%Cu foram significativas para a usinabilidade do aço ABNT 12L14.

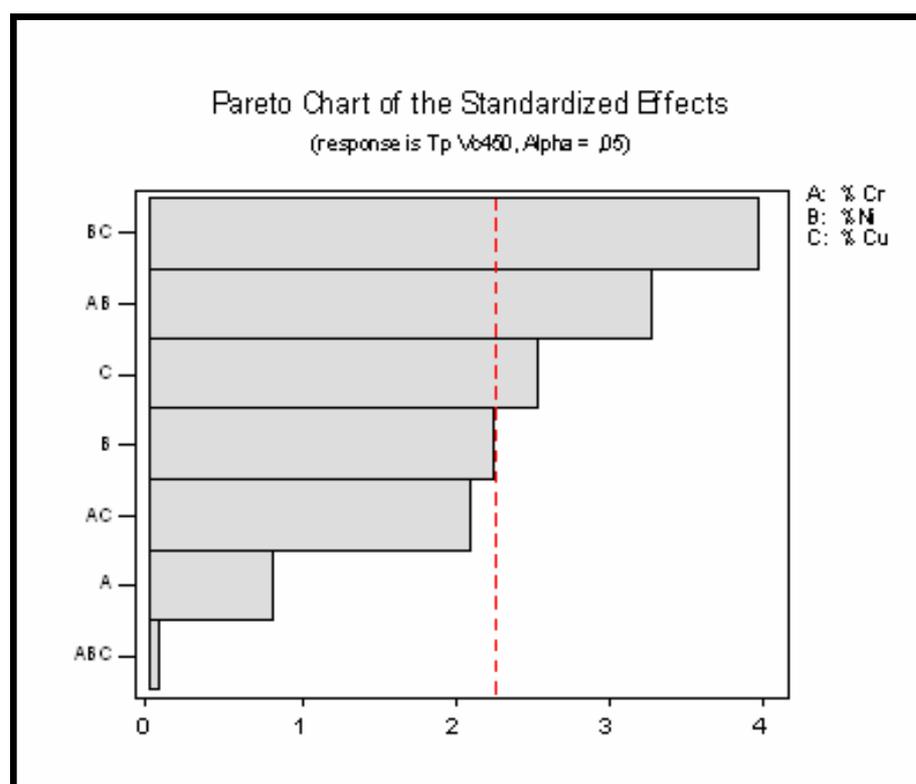


Figura 7.14 – Diagrama de Pareto: efeitos dos elementos e suas interações – Vc 450 m/min.

A Figura 7.18 mostra o efeito dos níveis dos fatores dos elementos residuais na usinabilidade do aço ABNT 12L14. Os níveis definidos para os elementos são: (+1) %Cr,(+1)

%Ni e (+1) %Cu. Por esta análise pode-se dizer que composição química dos elementos residuais da corrida (I) apresentou melhor usinabilidade na $V_c = 450$ m/min. Porém como o elemento %Ni não foi significativo isoladamente pode-se adotar o (-1) %Ni e dizer que a corrida (A) foi a que apresentou melhor usinabilidade do aço ABNT 12L14.

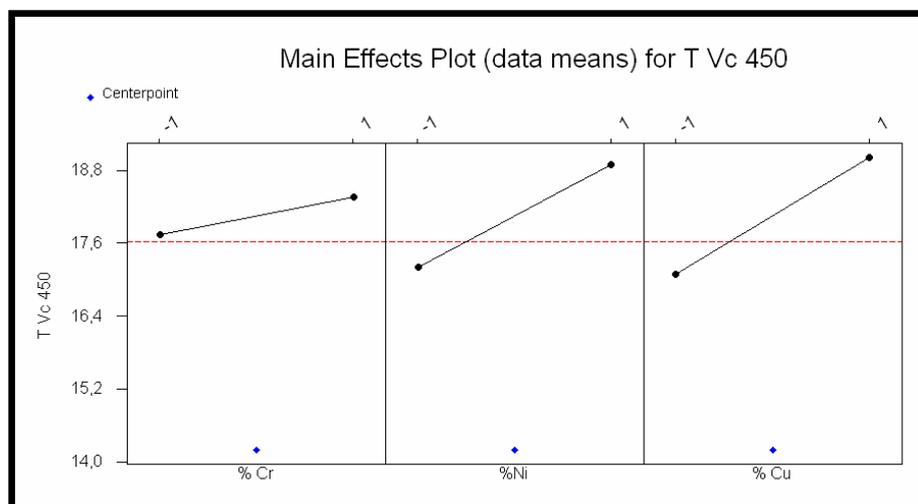


Figura 7.15 - Factorial Plot para os efeitos principais – V_c 450 m/min.

7.4.3 – Análise Estatística para V_c 400 m/min

Os resultados das vidas das ferramentas de metal duro, obtidos nos 18 experimentos aleatorizados utilizando-se o software estatístico Minitab® estão apresentados na Tabela 7.31 e para análise dos dados adotou-se um nível de significância $\alpha = 0,05$.

Observando-se os valores de P na Tabela 7.32 pode-se dizer que o elemento %Cu, as interações de 2ª ordem entre os elementos %Cr%Ni, %Ni%Cu e o *center point* foram significativos para a usinabilidade do aço ABNT 12L14, uma vez que $P < 0,05$. Dessa maneira pode-se montar a equação 7.15 para a resposta (T):

$$T = 25,473 + (1,322\%Cr) + (-0,497\%Ni) + (3,187\%Cu) + (-2,548.\%Cr\%Ni) + (0,413\%Cr\%Cu) + (-2,478.\%Ni.\%Cu) \quad (7.15)$$

Sabendo-se que a resposta para a vida da ferramenta T é do tipo “quanto maior melhor” pode-se aperfeiçoar a equação 7.15. Respeitando o princípio da hierarquia e atribuindo os níveis (+1)%Cr, (-1)%Ni e (+1)%Cu, monta-se a equação 7.16:

$$T = 25,473 + (1,322(+1)) + (-0,497(-1)) + (3,187(+1)) + (-2,548(+1)(-1)) + (0,413(+1)(+1)) + (-2,478(-1)(+1)) \quad (7.16)$$

Resolvendo a equação 7.16 encontra-se uma da vida T = 35,918 min.

Na Vc= 400 m/min os níveis da composição química dos elementos residuais nas faixas: (+1) %Cr: 0,15-0,20; (-1) %Ni: 0,08-0,13; (-1) %Cu: 0,25-0,30 da corrida (A) apresentou melhor usinabilidade do aço ABNT 12L14.

Tabela 7.31 - Resultados das vidas da ferramenta para o Fatorial Completo (Vc 400 m/min)

Ordem	Corrida	% Cr	%Ni	% Cu	T [min]
1	G	1	1	-1	21,04
2	B	-1	1	-1	21,60
3	D	-1	-1	-1	17,24
4	F	-1	-1	1	25,36
5	G	1	1	-1	26,10
6	F	-1	-1	1	27,46
7	D	-1	-1	-1	18,34
8	E	1	-1	-1	24,58
9	B	-1	1	-1	28,33
10	H	0	0	0	18,34
11	C	-1	1	1	28,08
12	I	1	1	1	21,06
13	C	-1	1	1	26,80
14	A	1	-1	1	38,62
15	A	1	-1	1	35,10
16	H	0	0	0	17,56
17	I	1	1	1	26,80
18	E	1	-1	-1	21,06

Complementando a análise fatorial, a Tabela 7.33 apresenta a Análise de Variância para o experimento. Nota-se que as interações de 2ª ordem e a curvatura foram significativas, uma vez que os valores de P são inferiores ao nível de significância de 5%. Neste caso é interessante ressaltar a significância da curvatura novamente. Isto indica o nível dos fatores (Cr, Ni e Cu) utilizado está numa região otimizada.

Tabela 7.32 – Análise fatorial com center point – Vc 400 m/min.

TERMO	EFEITO	COEF	SE COEF	T	P
Constante		25,473	0,6884	37,00	0,000
% Cr	2,644	1,322	0,6884	1,92	0,087
% Ni	-0,994	-0,497	0,6884	-0,72	0,489
% Cu	6,374	3,187	0,6884	4,63	0,001
%Cr * % Ni	-5,096	-2,548	0,6884	-3,70	0,005
%Cr * % Cu	0,826	0,413	0,6884	0,60	0,563
%Ni * % Cu	-4,956	-2,478	0,6884	-3,60	0,006
%Cr*%Ni*%Cu	-1,884	-0,942	0,6884	-1,37	0,204
Center Points		-7,523	2,0653	-3,64	0,005

Tabela 7.33 – ANOVA (Fatorial completo) – Vc 400 m/min.

FONTE	DF	SEQ SS	ADJ SS	MS	F	P
Efeitos Principais	3	194,41	194,410	64,802	8,55	0,005
Interações 2ª.Ordem	3	201,88	204,880	68,292	9,01	0,004
Interações 3ª.Ordem	1	14,19	14,190	14,194	1,87	0,204
Curvatura	1	100,62	100,620	100,618	13,27	0,005
Erro Residual	9	68,25	68,250	7,583		
Erro Puro	9	68,25	68,250	7,583		
Total	17	582,34				

A Figura 7.19 confirma que o elemento %Cu e as interações de 2ª Ordem entre os elementos %Cr%Ni e o %Ni%Cu foram significativas para a usinabilidade do aço ABNT 12L14.

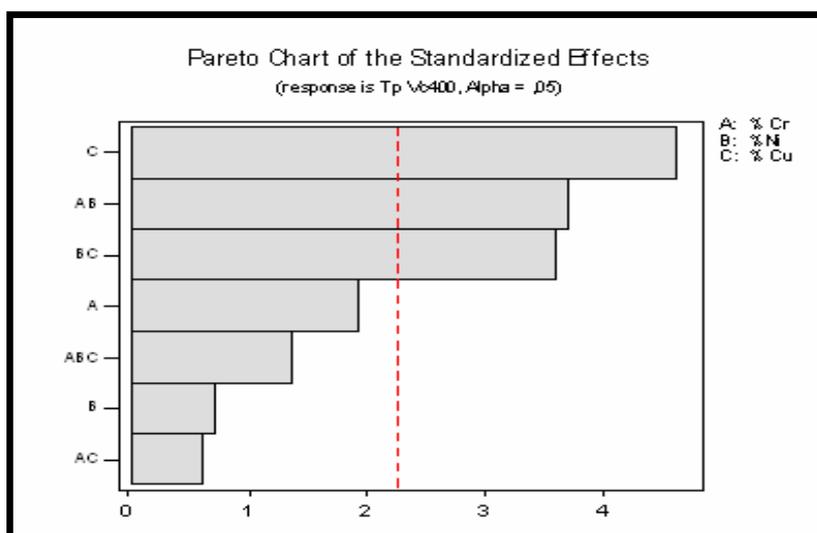


Figura 7.16 – Diagrama de Pareto: efeitos dos elementos e suas interações – Vc 400 m/min.

A Figura 7.20 mostra o efeito dos níveis dos fatores dos elementos residuais na usinabilidade do aço ABNT 12L14. Os níveis definidos para os elementos são: (+1) %Cr, (-1) %Ni e (+1) %Cu. Por essa análise pode-se dizer que composição química dos elementos residuais da corrida (A) apresentou melhor usinabilidade na $V_c = 400$ m/min.

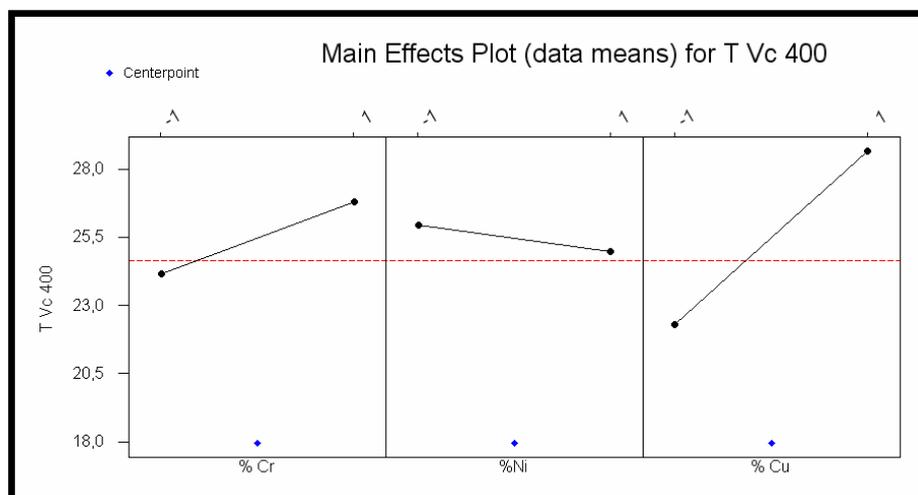


Figura 7.17 - *Factorial Plot* para os efeitos principais – V_c 400 m/min.

7.5 – Resultados com o Metal Duro

Através das análises estatísticas realizadas anteriormente para as ferramentas de metal duro, a Tabela 7.34 apresenta os níveis das faixas dos elementos residuais que influenciaram de forma positiva na usinabilidade do aço ABNT 12L14. Os níveis dos elementos %Cr, %Ni e %Cu não se alteraram, mantendo uma regularidade. Devido a essa regularidade pode-se dizer que a corrida (A) possui os elementos residuais nas faixas que melhor contribuíram para a usinabilidade deste aço.

Tabela 7.34 – Níveis dos elementos com contribuição positiva na usinabilidade – Metal duro.

Velocidade de corte m/min	Nível %Cr	Nível %Ni	Nível %Cu	Corrida
400	+1	-1	+1	A
450	+1	-1	+1	A
500	+1	-1	+1	A

A Tabela 7.35 mostra a faixa percentual de cada elemento residual da corrida (A) que agiu positivamente na usinabilidade do aço ABNT 12L14.

Tabela 7.35 – Nível e faixa da Corrida (A) de melhor usinabilidade – Metal duro.

Elemento	Nível	Faixa
%Cr	+1	0,15 - 0,20
%Ni	-1	0,08 - 0,13
%Cu	+1	0,25 - 0,30

Para identificar qual faixa dos elementos residuais que apresentaram pior usinabilidade com a ferramenta de metal duro, fez-se uma análise do tipo “quanto menor pior”. A Tabela 7.36 mostra que os níveis dos elementos %Cr, %Ni e %Cu não se alteraram, mantendo uma regularidade. Devido a essa regularidade pode-se dizer que a corrida (D) possui os elementos residuais nas faixas que menos contribuíram para a usinabilidade deste aço.

Tabela 7.36 – Níveis dos elementos com contribuição negativa na usinabilidade – Metal duro.

Velocidade de corte m/min	Nível %Cr	Nível %Ni	Nível %Cu	Corrida
400	-1	-1	-1	D
450	-1	-1	-1	D
500	-1	-1	-1	D

A Tabela 7.37 mostra a faixa percentual de cada elemento residual da corrida (D) que agiu negativamente na usinabilidade do aço ABNT 12L14.

Tabela 7.37 – Nível e faixa da Corrida (D) de pior usinabilidade – Metal duro.

Elemento	Nível	Faixa
%Cr	-1	0,08 - 0,13
%Ni	-1	0,08 - 0,13
%Cu	-1	0,10 - 0,15

Nesta situação, a corrida (A) foi a que apresentou a melhor usinabilidade, devido basicamente aos seguintes motivos: o elemento cobre (0,26%), que foi significativo para a resposta, está favorecendo fortemente a usinabilidade do material. Esta diferença de comportamento ocorre, pois a baixas velocidades de corte (ferramenta de aço-rápido), o cobre estaria atuando como um elemento endurecedor da ferrita, enquanto que para altas velocidades de corte (ferramenta de metal duro), o cobre estaria atuando como um elemento causador de fragilização a quente. Segundo Deeley (1981), 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. Considerando-se que, a altas velocidades de corte, são desenvolvidas altas temperaturas de corte na interface ferramenta-cavaco (acima da temperatura de fusão da fase rica em cobre), esta condição proporcionaria a formação de cavacos frágeis. Outro motivo foi que esta corrida apresentou o maior teor de chumbo (0,28%) e o chumbo melhora intensamente a usinabilidade devido ao seu efeito lubrificante e fragilizante (Warke, 1971; Winegard, 1964).

A corrida (D) apresentou pior usinabilidade pois possui uma percentual menor de que 0,20% de cobre (0,11% Cu). Devido a esse percentual não ocorreu a fragilização do cavaco mesmo em altas temperaturas e conseqüentemente a diminuição da usinabilidade. Comparando os níveis da corrida que apresentou melhor usinabilidade (Tabela 7.35) com a que apresentou pior usinabilidade (Tabela 7.37) observa-se que eles são opostos, com exceção do nível do %Ni mas, como o %Ni não foi significativo nessas velocidades de cortes desconsidera-se seu efeito. Essa comparação mostra novamente que a mudança causada na resposta do experimento (melhor/pior usinabilidade) é proveniente da alteração dos níveis dos elementos residuais, e neste principalmente pelo nível do %Cu.

7.6 – Critérios de Fim de Vida das Ferramentas

7.6.1 – Ferramenta de Aço-rápido

O principal tipo de desgaste verificado nas ferramentas de aço-rápido, para as condições de usinagem estabelecidas, foi o desgaste de flanco que ocorre na superfície de folga da ferramenta incentivado pelos mecanismos de abrasão, difusão e adesão (Figura 7.20). A presença predominante do desgaste de flanco valida o critério de fim de vida da ferramenta adotado neste trabalho.

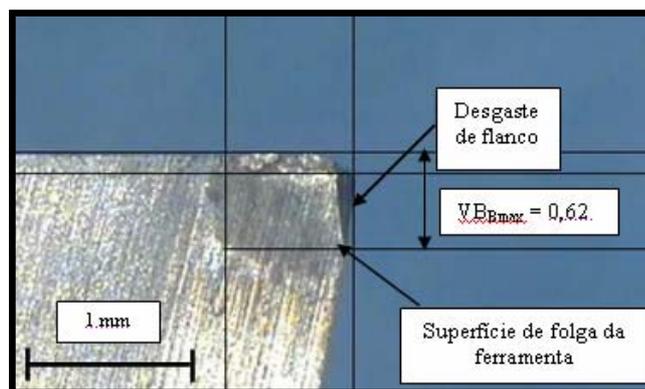


Figura 7.18 – Desgaste de flanco observado na ferramenta de aço-rápido. Aumento 25x, $V_c = 150$ m/min, $a_p = 1$ mm, $f = 0,1$ mm/v.

Outro tipo de desgaste encontrado na ferramenta de aço-rápido foi o desgaste de cratera que ocorreu na superfície de saída da ferramenta, causado pelo atrito entre o cavaco e a ferramenta de corte pelos mecanismos de difusão e abrasão. A figura 7.21 mostra o desgaste de cratera ocorrido na ferramenta de aço-rápido.

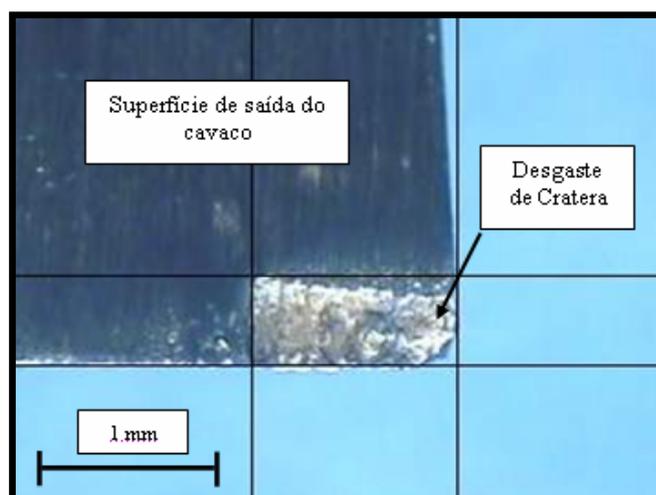


Figura 7.19 – Desgaste de cratera observado na ferramenta de aço-rápido. Aumento 25x, $V_c = 150$ m/min, $a_p = 1$ mm, $f = 0,1$ mm/v.

7.6.2 – Ferramenta de Metal Duro

Nas ferramentas de metal duro os desgastes preponderantes foram os desgastes de flanco e de cratera. O desgaste de flanco ocorreu na superfície de folga da ferramenta

conforme mostrado na Figura 7.22, e o desgaste de cratera ocorreu na superfície de saída da ferramenta (Figura 7.23).

Apesar do material da peça ser um aço de boa usinabilidade observou-se elevados valores de desgaste. Este fato é devido às elevadas velocidades de corte utilizadas nos ensaios para abreviar a vida da ferramenta.

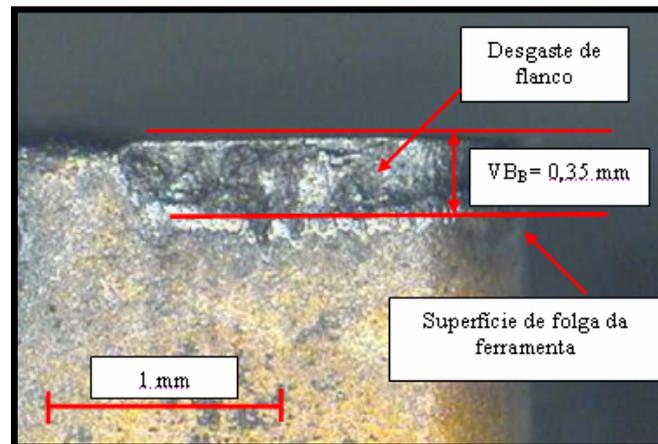


Figura 7.20 – Desgaste de flanco observado na ferramenta de metal duro. Aumento de 35x,;
 $V_c = 450 \text{ m/min}$, $a_p = 1 \text{ mm}$, $f = 0,1 \text{ mm/v}$.

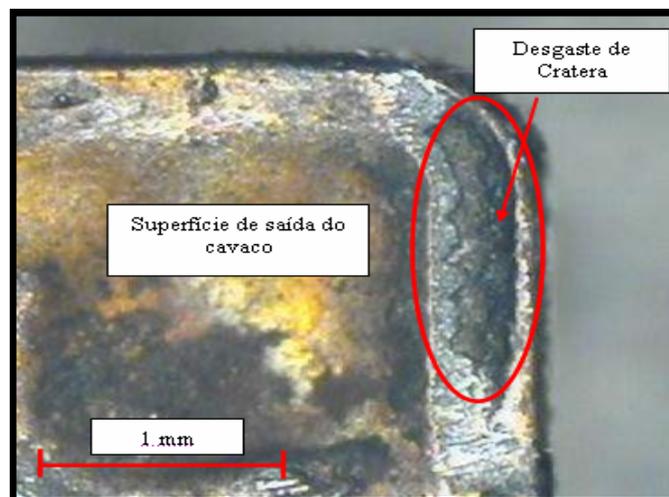


Figura 7.21 – Desgaste de cratera observado na ferramenta de metal duro. Aumento de 35x;
 $V_c = 450 \text{ m/min}$, $a_p = 1 \text{ mm}$, $f = 0,1 \text{ mm/v}$.

7.7 – Potência Elétrica Consumida

Durante a execução dos ensaios monitorou-se a potência elétrica necessária para usinar o aço-de-corte-fácil ABNT 12L14. A Tabela 7.34 mostra os valores médios da potência elétrica consumida durante a usinagem com ferramentas de aço-rápido e metal duro. Os valores da potência elétrica de usinagem obtidos nos ensaios foram relativamente baixos, em torno de $P_{el} = 0,5$ kW para a ferramenta de aço-rápido e de $P_{el} = 2,00$ kW para a ferramenta de metal duro.

Tabela 7.38 – Potência elétrica de usinagem consumida nos ensaios, $a_p = 1$ mm e $f = 0,1$ mm/v.

Corrida	Aço-rápido						Metal duro		
	Vc 125	Vc 140	Vc 150	Vc 160	Vc 175	Vc 175*	Vc 400	Vc 450	Vc 500
G	0,355	0,424	0,564	0,581	0,646	0,517	1,987	2,101	2,225
B	0,451	0,427	0,631	0,617	0,628	0,518	2,054	2,215	2,395
D	0,439	0,457	0,473	0,512	0,567	0,528	2,247	2,255	2,265
F	0,302	0,418	0,532	0,512	0,671	0,547	2,044	2,135	2,231
E	0,492	0,403	0,637	0,523	0,628	0,523	1,906	2,091	2,302
H	0,436	0,453	0,559	0,552	0,687	0,473	1,967	2,085	2,213
C	0,371	0,417	0,614	0,666	0,667	0,47	1,834	2,041	2,274
I	0,392	0,424	0,468	0,579	0,501	0,475	2,028	2,195	2,385
A	0,393	0,434	0,498	0,506	0,622	0,49	1,937	2,055	2,195

* com fluido de corte

Para saber se esta variação da potência de usinagem em relação às corridas e às velocidades de corte é significativa, fez-se um teste de Análise de Variância. A Tabela 7.35 apresenta os resultados da ANOVA.

Tabela 7.39 – Análise de Variância da potência elétrica consumida

ANOVA das corridas					
FONTE	DF	SS	MS	F	P
Corridas	8	0,049	0,006	0,01	1,000
Erro	72	48,320	0,671		
Total	80	48,369			
ANOVA das velocidades					
FONTE	DF	SS	MS	F	P
Velocidades	7	45,00561	6,42937	1324,24	0,000
Erro	64	0,31073	0,00486		
Total	71	45,31634			

Observando os resultados da ANOVA da Tabela 7.5 pode-se dizer que a composição química das nove corridas do aço ABNT 12L14 não influenciou na variação do valor da potência elétrica consumida, uma vez que o P é maior que o nível de significância ($P > 0,05$, portanto, aceita-se H_0). Em relação às velocidades de corte pode-se dizer que o aumento da velocidade de corte influenciou no aumento da potência elétrica consumida, uma vez que o P é menor que o nível de significância ($P < 0,05$, portanto, rejeita-se H_0). O aumento da potência elétrica consumida já era esperado com o aumento da velocidade de corte, isso devido a potência elétrica ser diretamente proporcional à velocidade de corte.

7.8 – Avaliação da Rugosidade

Durante os ensaios experimentais monitorou-se a rugosidade R_a . A Tabela 7.36 apresenta os valores médios da rugosidade medida durante a usinagem das nove corridas do aço ABNT 12L14. Nos ensaios com a ferramenta de aço-rápido a rugosidade média R_a encontrada foi de 4,25 μm e com a ferramenta de metal duro de 1,54 μm .

Tabela 7.40 – Rugosidade R_a medida durante os ensaios; $a_p = 1\text{ mm}$ e $f = 0,1\text{ mm/v}$.

Corrida	Aço-rápido						Metal duro		
	Vc 125	Vc 140	Vc 150	Vc 160	Vc 175	Vc 175*	Vc 400	Vc 450	Vc 500
G	4,34	4,45	4,50	3,80	3,80	3,62	1,54	1,47	1,22
B	4,03	4,27	4,37	4,54	3,85	3,25	1,87	1,59	1,35
D	4,37	4,39	5,27	4,65	4,02	3,60	1,97	1,62	1,52
F	3,73	3,93	5,31	4,44	3,67	3,17	1,37	1,30	1,12
E	4,18	3,81	5,37	5,46	4,30	4,35	1,85	1,58	1,25
H	4,85	5,19	4,41	4,60	4,43	4,10	1,55	1,22	1,04
C	4,24	4,15	4,43	4,49	3,97	4,07	2,13	1,86	1,65
I	3,60	3,37	4,92	4,43	3,82	3,61	2,01	1,75	1,03
A	4,26	4,47	4,40	4,48	4,02	4,50	1,77	1,64	1,29

* com fluido de corte

Para saber se a variação da rugosidade média R_a em relação às corridas e às velocidades de corte é significativa, fez-se um teste de Análise de Variância. A Tabela 7.37 apresenta os resultados da ANOVA. Observando os resultados pode-se dizer que a composição química das nove corridas do aço ABNT 12L14 não influenciou na variação da rugosidade média R_a , uma vez que o P é maior que o nível de significância ($P > 0,05$, portanto, aceita-se H_0). Em relação às velocidades de corte pode-se dizer que o aumento da

velocidade de corte influenciou na diminuição de Ra, uma vez que o P é menor que o nível de significância ($P < 0,05$, portanto, rejeita-se H_0).

A rugosidade média Ra inicialmente tende a aumentar com o aumento da velocidade de corte, diminuindo após certa velocidade. Isso se deve à formação de gume postiço, que pode ocorrer a pequenas velocidades de corte, fator que desaparece com o emprego de velocidades de corte mais altas. Assim, a diminuição da rugosidade média Ra com o aumento da velocidade de corte justifica-se devido a não formação da aresta postiço de corte.

Tabela 7.41 – Análise de Variância da rugosidade Ra

ANOVA das corridas					
FONTE	DF	SS	MS	F	P
Corridas	8	2,07	0,26	0,13	0,998
Erro	72	146,75	2,04		
Total	80	148,82			
ANOVA das velocidades					
FONTE	DF	SS	MS	F	P
Velocidades	7	137,16	19,594	161,32	0,000
Erro	64	7,774	0,121		
Total	71	144,933			

Capítulo 8

8.1 - Conclusões

Em função dos resultados obtidos na investigação da influência dos elementos residuais (Cr, Ni e Cu) na usinabilidade do aço-de-corte-fácil ABNT 12L14 pode-se concluir que:

- Os elementos residuais possuem uma influência significativa na usinabilidade do aço ABNT 12L14, isolados e/ou através de suas interações. Os elementos residuais nas faixas (%Cr: 0,15-0,20; %Ni: 0,08-0,13; %Cu: 0,10-0,15) da corrida (E) com ferramenta de aço-rápido e nas faixas (%Cr: 0,15-0,20; %Ni: 0,08-0,13; %Cu: 0,25-0,30) da corrida (A) com ferramenta de metal duro apresentaram melhor usinabilidade;
- Os elementos residuais nas faixas (%Cr: 0,08-0,13; %Ni: 0,17-0,22; %Cu: 0,10-0,15) da corrida (B) com ferramenta de aço-rápido e nas faixas (%Cr: 0,08-0,13; %Ni: 0,08-0,13; %Cu: 0,10-0,15) da corrida (D) com ferramenta de metal duro e nas faixas apresentaram pior usinabilidade;
- A composição química das corridas nas condições de corte ensaiadas não influenciou nos valores da potência elétrica de usinagem nem nos valores da rugosidade média Ra;
- Nas condições de corte ensaiadas a potência elétrica de usinagem observada apresentaram valores relativamente baixo.

- A utilização do fluido de corte nas condições de corte $V_c = 175$ m/min, $a_p = 1$ mm e $f = 0,1$ mm/v, promoveu uma maior vida para a ferramenta de aço-rápido.

8.2 – Sugestões para Trabalhos Futuros

Para a realização de trabalhos futuros sugere-se:

- Estudar os níveis ótimos dos elementos residuais (Cr, Ni e Cu) através da metodologia de superfície de resposta (MSR);
- Analisar o efeito metalúrgico dos elementos residuais na usinabilidade do aço-de-corte-fácil ABNT 12L14;
- Estudar a influência dos elementos residuais nas condições econômicas de usinagem;
- Realizar os ensaios de usinabilidade com as ferramentas de aço-rápido com fluido de corte;
- Realizar os ensaios de usinabilidade em processos de fresamento;
- Analisar o comportamento das propriedades mecânicas;
- Analisar a perda/ganho de resistência para os aços de melhor usinabilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACKROYD et al. (2001)** *Exploration of contact conditions in machining. Proceedings of Institution of Mechanical: part B – Engineers Journal of Engineers Manufacture*, v. 215, n. 4, p. 493-507.
- AMARO, J. P. M. et al.(1982)** *Desenvolvimento de aços de baixa-liga de construção mecânica com usinabilidade melhorada*. In: Congresso Anual da ABM, 37. Rio de Janeiro, p. 271-281, julho de 1982.
- ANDERSON, M. J., KRABER, S. L (1999)**. *Keys to successful designed Experiments*. Quality Digest Magazine, p. 25.
- ANDRADE, S. L.; BARROS, H. N. O.; MANGUALDE, A. H. S. (1982)**. *Desenvolvimento de aços resistentes à trinca lamelar na Usiminas*. In: Congresso Anual da ABM, 37. Rio de Janeiro, v. 2, p. 389-399, julho de 1982.
- ARFELD, E. D., HANUM, A. L (1997)**. *Aços-de-corte-fácil de baixo carbono*. Metalurgia – ABM, v. 33, n.241, p. 773-776, dezembro de 1997.
- AUTM Licensing Survey: FY (1999)**. *A Survey Summary of Technology Licensing (and Related) Performance for U.S. and Canadian Academic and Nonprofit Institutions, and Patent Management Firms*. Pp 12.
Disponível na home page:<http://www.autm.net/surveys/99/survey99A.pdf>
- AY, H.; YANG, W. J. (1988)** *Heat transfer and life of metals cutting in turning*. International Journal of Heat Mass Transfer, v. 41, n. 3, p. 613-623.

- BALESTRASSI, P.P.(2003).** *Estatística Aplicada* – Apostila do Curso PCM 01 – Departamento de Produção – UNIFEI, Itajubá - MG.
- BAPTÍSTA, A. L. B. et al.(1997).** *Melhoria das propriedades mecânicas e usinabilidade de ligas de alumínio centrifugadas*. Projeto EEIMVR/ETPC, Volta Redonda - RJ.
- BARRETOS, M., ENVANGELISTA, N., CAPPUCIO, G., BAS, J.(1999).** *Aços de Corte Livre com Inclusões Metálicas: Uma Tecnologia Corfac*. 54º Congresso da ABM – Julho de 1999.
- BARRETOS, M. S. (2000).** *Influência das inclusões metálicas de bismuto na tenacidade e fadiga de um aço SAE 1045 com usinabilidade melhorada*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Porto Alegre, 2000.
- BAS, J., (1995).** *A usinabilidade dos aços especiais*. Relatório Técnico Gerdau S. A. Charqueadas, RS.
- BAS, J., (2000).** *Aços especiais de usinabilidade melhorada*. In: USINAGEM 2000,FEIRA E CONGRESSO, 2000, São Paulo. Anais... São Paulo: Aranda Eventos,2000.
- BAYER, A. M.; WALTON, L. R, (1990).** *Wrought tool steels*. IN: ASM Handbook Metals Park :ASM,. v. 1: Properties and selection: irons, steels and high-performance alloys p. 757-79.
- BELLOT, J., (1978).** *Aciers pour construction mecanique – Problemes de mise em forme par usinage*. CESSID – Centre d’Etudes Supérieures de la Sidérurgie Française. Mai, 1978.
- BENBOW, W. E., (1951) – Steel in Modern Industry – Iliffe & Sons Ltd. - p. 76 .**
- BERTRAND, C., DEL SOLAR, M., (1998)** *Can we survive without Leaded Steels?*.pp 123-132. 4th International Conference on Behaviour of Materials in Machining:

Opportunities and Prospects for Improved Operations. IOM Communications Ltd. ISBN 1-86125-086-X. London.

BOOTHROYD, G., (1981) *Fundamentals of Metals Maching and Machine Tools*, International Student Edition, Mc Graw-Hill, 5 th Printing, ISBN 0-07085057-7.

BOULGER, F. W. E., (1990) – *Machinability of Steels* – Metal Handbook – vol. 1 – 10^a ed. – Properties and Selection: Irons, Steels and High Performance Alloys – ASM International - p. 559.

BOX, G. E. P., BEHNKEN, D. W., (1960) *Some New Three Level Designs for the Study of Quantitative Variables*. Technometrics, v.2, n. 4, p. 455-475.

BOX, G. E. P., HUNTER, W. G., HUNTER, J. S., (1978) *Statistics for Experimenters*. New York, John Wiley & Sons.

BRYMAN, A., (1989). *Research Methods and Organization Studies*. Unwin Hyman, London, pp. 2-50, 60-120.

CATANIOU, A. M.; GREEN, M.; WISE, M. L. H.; JONES, I. P., (2002). *Free cutting steels: an SEM and TEM study*, 5th International Conference on Behaviour of Materials in Machining, pp. 241-244.

CAVALLANTE, F. L. et al., (1982). *Uma nova tecnologia aplicada à fabricação de aços ferramenta para trabalho a quente*. In: Congresso Anual da ABM, 37. Rio de Janeiro: p.415.

CESCON, T., (1990). *Desenvolvimento e caracterização de aço-rápido contendo nióbio a partir da matriz do aço M2*. 237p. Tese (Doutorado em engenharia) - Departamento de Engenharia Metalúrgica, Universidade de São Paulo.

CHIAVERINI, V., (2005). *Aços e Ferros Fundidos*, 7. ed Associação Brasileira de Metais, São Paulo.

- CORRÊA, D.C., (2002).** *Usinabilidade de mancais bimetálicos: influência do avanço no desgaste e na formação de rebarbas*; Dissertação de mestrado, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, Abril de 2002.
- DAGNALL, H., (1986)** *Exploring Surface Texture*, 2th edition, Rank Taylor Hobson Limited, England.
- Danish Government Agency of Environmental Protection, (1997).** “Executive Order on the prohibition of the import, sale and production of lead and products containing lead” 7014-0036, 02-09-1997.
- DATSKO, J., (1967).** *Machinability index material properties and manufacturing processes*. In: - Material Properties and Manufacturing Processes. John Wiley & Sons. Inc. , p. 444-468.
- DEARDO, A. J.; GARCIA, C. I., (1999).** *TIN-Bearing Free-machining Steel*. United States Patent nº 5961747. Oct. 5, 1999.
- DEELEY, P. D.; KUNDING, K. J. A., SPENDELOW JR., H. R., (1981).** *Ferroalloys and alloying additives handbook*. New Jersey: Newfield, p. 42-43, 1981.
- DEVOR, R. E., CHANG, T., SUTHERLAND, J. W., (1992)** *Statistical Quality Design and Control – Contemporary concepts and methods*. New Jersey, Prentice Hall, Inc. Cap. 15-20, p.503-744.
- DINIZ, A.E. MARCONDES, F.C. e COPPINI. N.L., (2003)** *Tecnologia da Usinagem dos Materiais*, Artliber Editora Ltda, 4ª edição, São Paulo.
- DINIZ, A. E., CUPINI, N. L., (1986).** *Estudo do processo de furação de aços inoxidáveis austeníticos*. Metalurgia – ABM, v. 41, n. 349, p. 881-886, dezembro de 1986.
- DOYLE, E.D.; HORNE, J. G.; TABOR, D., (1979).** *Frictional interactions between chip and rake face in continuous chip formation*. Proceedings of Royal Society of London, v. A366, p. 173-183.

- DROZDA, T. J.; WICK, C., (1983).** *Tools and Manufacturing Engineers Handbook*, v.1, Machining, SME, pp. 21-40.
- EBBREL S.; WOOLLEY N.H.;TRIDIMARY D.;ALLANSON D.R.;ROWE W.B., (2000)** -*The effects of cutting fluid application methods on the grinding process.* International Journals of Manufacture, v.40 p.209-223.
- E.U., (1997).** “Proposal for a Council Directive on end life vehicles”, Official Journal of the European Communities. 07/11/1997, pp C337/3.
- FERRARESI, D. (1977),** *Fundamentos da Usinagem dos Materiais*, Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 751 pgs.
- FUKUZUMI , et al., (2004).** *Sulfur-containing free-cutting steel.* United States Patent 6,737,019 May 18, 2004.
- GARCIA, C. I.; HUA, M.; DEARDO, A.J.; (2002)** *Application of grain boundary engineering in the development of green steel*, 5th International Conference on Behaviour of Materials in Machining, pp. 215-226.
- GARVEY, T. M.; TATA, H. J., (1965).** *Factors affecting the machinability of low-carbon free-machining steels.* Mechanical Working of Steel, New York, v.2, n. 26, p. 99-132, 1965.
- GONZALES, G. S.; CUPINI, N.L., (1992).** *Aspectos metalúrgicos na avaliação da usinabilidade do aço ABNT 12L14 submetidos a crescentes graus de encruamento por Trefilação.* In: Congresso Anual da ABM, 47. Belo Horizonte, p. 171-188.
- GUNST, R. F., (2000).** *Randomization Is the Key to Experimental Design Structure.* Quality Progress, p.72-75, February 2000.
- HAYAISHI, et al., (2003)** Free-cutting steel. United States Patent nº 20030072673 April 17, 2003.
- HOYLE, G., (1988).** *High speed steels.* London : Butterworth & Co.

- JOSEPH, R. A., TIPNIS, V. A., (1975).** *The influence of non-metallic inclusions on the Machinability of free-cutting steels.* In: Influence of Metallurgy on Machinability. Proc. Symposium ASTM. p 55.
- JUNEJA, B. L.; EWKHON, G.S., (1987).** *Fundamentals of Metal Cutting and Machine Tools,* John Wiley & Sons, New Delhi, India, 462 pags., ISBN 0-470-20860-0.
- KLOCKE,F.;EISENBLATTER,G., (1997).** *-Dry cutting.* Anais of the CIRP,v.46,nº2,p.519-526.
- KLUJSZO, L. A. C; SOARES, R. B., (2003).** *Novos desenvolvimentos de aços de usinabilidade melhorada.* Artigo publicado na Revista máquinas e metais, abril 2003.
- KOMANDURI, R.; HOU, Z. B., (2001)** *A review of the experimental techniques for mensurement of heat and temperatures generated in some manufacturing processes and tribology.* Tribology International, v. 34, n. 10, p. 653-682.
- LESKOVAR, P.; GRUM, J., (1986)** *The metallurgical aspects of machining.* CIRP reports and news, pp. 537-550. Annals of the CIRP vol. 35/2/1986.
- LEWIS, R. J., (2000)** *Power Analysis and Sample Size Determination: Concepts and Software Tools.* Annual Meeting of the Society for Academic Emergency Medicine (SAEM). San Francisco, Califórnia.
- MACHADO, A.R. e SILVA, M.B., (2004).** *Usinagem dos Materiais,* Universidade Federal de Uberlândia, 8ª. edição, Abril 2004.
- MACHADO, A. R., (2004).** *Investigação com vistas ao desenvolvimento de aços de corte livre alternativaos sem adição de chumbo.* Rede de Pesquisa de Materiais Avançados de Usinabilidade Melhorada – Sub-Projeto Tema 1.
- MAGNABOSCO, R., (1996)** *Estudo do comportamento eletroquímico do aço AISI M2 em NaOH utilizando técnicas de polarização potenciodinâmica e potenciostática.* 133p.

Dissertação (Mestrado em engenharia) - Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade de São Paulo, 1996.

MERCHANT, M. E., (1945). *Mechanics of the metal cutting process – orthogonal cutting and a type 2 chip.* Journal of Applied Physics, v. 16, n. 5, p. 267-275.

METAL PROGRESS, (1975) – Leaded Grades: Answer to Free Machining Needs – July 1975.

MICHELETTI, G.F. (1970); *Tecnologia Mecânica: Il taglio del metalli*, 2ª ed. UTET, v. 1.

MONTGOMERY, D. C., RUNGER, G. C., (2003). *Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros.* 2ª. ed. Rio de Janeiro. LTC – Livros Técnicos e Científicos. Editora S.A.

MONTGOMERY, D. C., (1997). *Designs and Analysis of Experiments.* John Wiley & Sons, 1997.

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

NETO, P. L. O. C., (2002). *Estatística.* 2ª ed. Ed. Edgard Blucher Ltda. São Paulo.

NÓBREGRA, M. C. S.; FERRAN, G., (1981). *Nucleação e crescimento de trincas em chapas conformadas de aço.* Metalurgia – ABM, v. 37, nº 282, p. 269-274, maio de 1981.

NORMA ABNT-NBR 6006, (1980). Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1980.

NORMA DIN 6584 (ENTWRF), (1969). *Kräfte und Leistungen.* Berlin, Beuthvertrieb GmbH, Outubro, 1969.

NORMA DIN 1651, (1969). *Kräfte und Leistungen.* Berlin, Beuthvertrieb GmbH, Outubro, 1969.

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

NORMA SAE J403, (2003). Handbook, Vol. 1.

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

OWEN, J. V., (2001) *Extend the life of your tools.* Manufacturing Engineering, v. 126, n. 1, p. 86-90

PAIVA, A. P., (2004). *Estudo da Minimização de Erro nas Medições de Concentração de Emulsões por Titração Karl-Fischer utilizando-se Projeto de Experimentos.* Itajubá, 196p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá (2004).

PARENT, S., (1976). *Measure de l'usinabilité des melleables.* Fondeire. 31(356): 165-175, Mai, 1976.

PIMENTEL, M. F.; PRADO, E.L., (2004) *Usinabilidade de aços-de-corte-fácil baixo-carbono.* Artigo publicado na Revista Siderurgia Brasil, GriP Editora – Ano 5, Nº 20 – setembro/outubro de 2004.

PRADO, E. L, PIMENTEL, M.F., (2004). *Produção de Aços-de-corte-fácil na Aços Villares.* Workshop de Materiais Avançados com Usinabilidade Melhorada – Campinas, SP. Julho 2004.

PRVAN, T., STREET, D. J., (2002). *An annotated bibliography of application papers using certain classes of fractional factorial and related designs.* Journal of Statistical Planning and Inference, n.106, p.245-269.

- RATNAPULI, R. C.; ETRUSCO, G. S.; ESTEVÃO, (1982).** *A. Fabricação de aços de alta resistência na Usiminas, com controle de morfologia dos sulfetos.* In: Congresso Anual da ABM, 37. Rio de Janeiro, p. 401-414, julho de 1982.
- ROBERTS, G.A.; CARY, R. A., (1980).** *Tool steels.* Metals Park : ASM, 4. ed., 1980, p.627-772.
- ROSS, P. J., (1991).** *Aplicações das Técnicas Taguchi na Engenharia da Qualidade.* Makron Books. São Paulo, p.26-96, 1991.
- SANDVIK COROMANT, (2005).** *Ferramentas para Torneamento* AB Sandvik Coromant, Brasil, Catálogo 2005.
- SATA, T.,** “Surface Finish in Metal Cutting” *Annals of the CIRP*, vol. 12(4), 1963, pp.190-197.
- SHAW, W.C; (1984),** *Metal Cutting Principles*, Oxford University Press ISBN 0-19-859002-4
- SHIIKI, K.; YAMADA, N.; KANO, T.; TSUGUI, K., (2003)** *Development of shape-controlled-sulfide free machining steel for application in automobile parts.* SAE International.
- SHULZ, H.;-EMRICH,A.K.;FINZER,T.;DON, J.,(2000);-***Quais são e para que servem os revestimentos* .Revistas máquinas e Metais,nº416,p.38-45, setembro de 2000.
- SILVEIRA, J.,(1983).** *Influência de Fatores Metalúrgicos na Usinabilidade de Ferros Fundidos FE 6002, FE 4212 e PC 25* Dissertação de Mestrado, Unicamp, Campinas, SP, Brasil, 1983.
- SOMEKAWA, M., KAISO, M., MATSUSHIMA, Y.,(2001)** *Free Cutting Non-Lead Steels.* Kobelco Technology Review nº 24. p 9. Oct 2001.

- SUBRAMANIAN, S. V., RAMANUJACHAR, (1996).** *Strategies to replace lead in free-cutting steels.* 37th MWSP Conf. Proc., ISS, VOL. XXXIII, 1996, 341-353.
- TESSLER, M. B. BARBOSA, C. A., (1993).** *A usinabilidade dos aços inoxidáveis.* Metalurgia e Materiais – ABM, v. 49, n. 413, p. 32-41, janeiro de 1993.
- TRENT, E. M. and WRIGHT, P. K.; (2000),** *Metal Cutting* 4th Edition, Butterworth Heinemann , ISBN 0-7506-7069-X, 446 pags.
- TRIOLA, M. F., (1999).** *Introdução à Estatística.* 7.ed. Rio de Janeiro: LTC Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1999.
- WARKE, W. R.; BREYER, N. N., (1971).** *Effect of steel composition on lead embrittlement.* Journal of The Iron and Steel Institute, New York, v. 209, n. 10, p. 779-784, 1971.
- WEINGAERTNER, W. L., SCHROETER, R.B., (1991).** *Tecnologia de usinagem do alumínio e suas ligas.* Alcan Alumínio do Brasil S.A., 1991.
- WILSON, R., (1975)** *Metallurgy and heat treatment of tool steels.* London: McGraw-Hill, 1975, p.163-81.
- WINEGARD, W. C., (1964).** *An introduction to the Solidification of metals.* London: McGraw-Hill, 1964. 211p.
- WRIGHT. P. K., (1981)** *Frictional interactions in machining: comparisons between transparent sapphire and steel cutting tools.* Metals Technology, v. 8, n. 4, p. 150-160.
- YAGUCHI, H., (1990).** *Effect of soft additives (Bi, Pb) on formation of built-up-edge.* Bismuth Institute Bulletin, 1990.
- YOKOKAWA , et al., (1997)** *Free-cutting graphitic steel.* United States Patent 4,061,494. December 6, 1977.