

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**CARACTERÍSTICAS DA USINABILIDADE DE AÇOS INOXIDÁVEIS
AUSTENÍTICOS SAE 304 E SAE 316 COM A VARIAÇÃO
DOS PARÂMETROS METALÚRGICOS**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA
CATARINA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
ENGENHARIA MECÂNICA

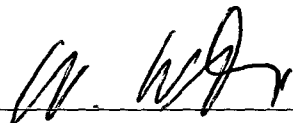
JEFFERSON DE OLIVEIRA GOMES

FLORIANÓPOLIS, MARÇO DE 1996

CARACTERÍSTICAS DA USINABILIDADE DE AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS
SAE 304 E SAE 316 COM A VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS METALÚRGICOS

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


ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO
FABRICAÇÃO, APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA.




Prof. Dr. - Ing. Walter Lindolfo Weingaertner

Orientador

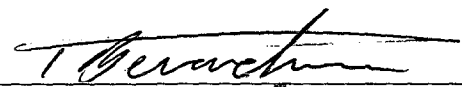
BANCA EXAMINADORA



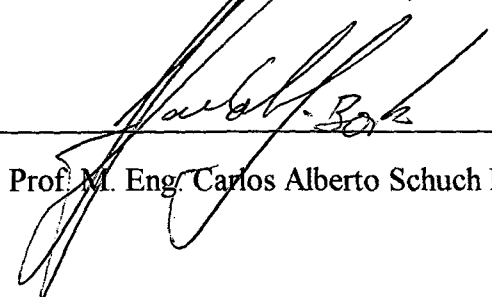
Prof. Eng. Abelardo A. Queiroz, Ph.D.



Prof. Anselmo Eduardo Diniz, Dr. - Eng.



Prof. Pedro A. Nannetti Bernardinni, Dr. - Eng.



Prof. M. Eng. Carlos Alberto Schuch Bork

Aos Meus Pais e Sempre Amigos

Valdo e Aracy

AGRADECIMENTOS

Aos meus amados Pais Valdo Manoel Gomes e Aracy Cardoso de Oliveira pela compreensão, formação e carinho em todos os momentos de minha vida e que, certamente sem eles, não concluiria mais esta etapa.

Aos meus queridos irmãos de sangue Ana Cristina e Victor de Oliveira Gomes pela tranquilidade familiar que sempre nos uniu e nos unirá.

A minha linda Claudia Soar pela demonstração de amor, ternura, afeto, amizade nos caminhos por nós percorridos.

Ao Prof. Dr. -Ing. Walter Lindolfo Weingaertner, por sua amizade, companheirismo, confiança, exemplo humanístico e orientação deste trabalho.

A SIDERÚRGICA RIOGRANDENSE S.A. pelo apoio financeiro no desenvolvimento deste trabalho.

A CNPQ - Programa RHAE - Mecânica de Precisão, pela concessão de bolsas de estudo e recurso que propiciaram o andamento deste trabalho.

A Coordenação de Pós-graduação em Engenharia Mecânica - UFSC - pelo fornecimento de recursos financeiros para a compra de material de estudo.

Aos queridos irmãos de Fé: Eng. Durval João De Barba e Eng. Eduardo Rosar pela longa amizade cultivada desde os primeiros dias de nossa carreira acadêmica; ao M. Eng. Ricardo Peres, Eng. Irapuan Santos, Eng. Helton Bertol e Eng. Rodrigo Zeilmann pelo inestimável apoio pessoal e profissional; ao M. Eng. Carlos Alberto Schuch Bork pela extrema afinidade, incentivos e segurança a mim dedicados.

Aos amigos e colegas M. Eng. Rodrigo L. Stoeterau, acadêmicos Isaias Masiero, Nélis Evangelista, Marco Koiti, Jorge Ferreira de Sá, Fabio Bearzi, Fabio Soares pelas colaborações diretas na conclusão do trabalho. Ao M. Eng. Rolf Schroeter pelo crédito de confiança.

A todos que de uma forma ou de outra me ajudaram, o meu sincero agradecimento.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	iv
ÍNDICE.....	v
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	xi
SIMBOLOGIA.....	xiv
RESUMO.....	xv
ABSTRACT.....	xvii
1. INTRODUÇÃO	1
2. ESTADO DA ARTE.....	2
2.1 HISTÓRICO DO AÇO INOXIDÁVEL.....	2
2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS INOXIDÁVEIS.....	5
2.3 TRATAMENTOS TÉRMICOS.....	8
2.4 PROPRIEDADES DO AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO E INFLUÊNCIA DOS ELEMENTOS DE LIGA, TAMANHOS DE GRÃOS E INCLUSÕES	9
2.5 CARACTERÍSTICAS DO SAE 304 E SAE 316.....	13
2.6 TERMOS GERAIS DE USINABILIDADE	15
2.6.1 Definições e Generalidades.....	17
2.6.2 Geometria da Ferramenta	41
2.7 USINABILIDADE DO AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO.....	45
3. EQUIPAMENTO UTILIZADO NOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS E AFERIÇÕES.....	48
3.1 MÁQUINA-FERRAMENTA.....	48

3.2 FERRAMENTA E PORTA-FERRAMENTA	49
3.3 EQUIPAMENTO PARA A MEDIÇÃO DAS COMPONENTES DA FORÇA DE USINAGEM.....	50
3.3.1 Dados Técnicos.....	51
3.4 SISTEMA PARA A MEDIÇÃO DOS DESGASTES DA FERRAMENTA.....	53
3.5 EQUIPAMENTO PARA A MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE SUPERFICIAL (RUGOSÍMETRO).....	54
3.6 METALOGRAFIA CONVENCIONAL E QUANTITATIVA, EQUIPAMENTO UTILIZADO	55
4. MATERIAL USADO E SUA CARACTERIZAÇÃO	56
4.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA.....	56
4.2 MICROESTRUTURA	59
4.2.1 AFP 725 (SAE 304).....	59
4.2.2 AFP 727 (SAE 316).....	59
4.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS E FÍSICAS.....	61
4.3.1 Micro-dureza.....	61
4.3.2 Resistência à Tração e Alongamento.....	64
5. ENSAIOS DE USINABILIDADE.....	67
5.1 INTRODUÇÃO	67
5.2 PROCEDIMENTOS DOS ENSAIOS E CARACTERIZAÇÃO DOS PARÂMETROS USADOS.....	68
5.2.1 Determinação da Ferramenta	68
5.2.2 Determinação de Parâmetros de Usinagem	68
5.2.3 Dimensões dos Corpos de Prova.....	69
5.2.4 Metodologia de Ensaio	70

6. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE USINABILIDADE	73
6.1 AFP 725 (SAE 304).....	73
6.1.1 Comparação da Vida da Ferramenta Para o Aço Inoxidável Austenítico AFP 725 (SAE304).....	73
6.1.2 Critério Força de Usinagem.....	77
6.1.3 Comparação em Relação a Forma de Cavacos.....	79
6.1.4 Acabamento Superficial.....	82
6.2 AFP 727 (SAE 316).....	86
6.2.1 Comparação da Vida da Ferramenta Para o Aço inoxidável Austenítico AFP 727(SAE 316).....	86
6.2.2 Critério Força de Usinagem.....	88
6.2.3 Análise da Forma de Cavaco.....	90
6.2.4 Acabamento Superficial.....	92
7. CONCLUSÕES	97
BIBLIOGRAFIA	101

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

2.1 Variação do limite de escoamento, limite de resistência, alongamento e estricção com o teor de ferrita δ	12
2.2 Superfícies, gumes, quinas e chanfros na ferramenta	16
2.3 Principais ângulos de uma ferramenta de corte.....	16
2.4 Representação esquemática do comportamento da vida da ferramenta de corte, em função da velocidade de corte	19
2.5 Lascamento	20
2.6 Trincas longitudinais	20
2.7 Trincas transversais ao gume.....	21
2.8 Desgaste por deformação plástica.....	21
2.9 Pastilha com marcas de desgaste.....	22
2.10 Adesão	23
2.11 Difusão	24
2.12 Abrasão mecânica	24
2.13 Oxidação	25
2.14 Fatores influentes sobre a qualidade superficial.....	26
2.15 Influência do raio de quina e avanço sobre a rugosidade cinemática.....	27
2.16 Formas de cavaco.	28
2.17 Componentes da força de usinagem no torneamento, nos planos de trabalho	

e efetivo de referência, segundo a norma DIN 6584.....	31
2.18 Variação da força específica de corte com a espessura de corte h para diferentes operações de usinagem	33
2.19 Variação da força específica de corte k_c em função da espessura de usinagem h	34
2.20 Força principal de corte F_c em função da largura de corte b para diferentes pares ferramenta-peça	35
2.21 Seções de corte com iguais espessuras de corte h	35
2.22 Determinação gráfica das constantes $k_{c1,1}$ e m_c do material 34CrMo4, segundo Kienzle.....	36
2.23 Influência do avanço e da profundidade sobre as componentes de força	37
2.24 Influência da velocidade de corte sobre as forças de corte, avanço e passiva	38
2.25a Influência do ângulo de inclinação sobre a força de usinagem no torneamento	39
2.25b Influência do ângulo de direção do gume sobre as componentes da força de usinagem no torneamento, segundo Schlesinger.	39
2.26 Relação entre o desgaste de flanco e a força de usinagem com o tempo	40

CAPÍTULO 3

3.1 Montagem do sistema de medição de forças de usinagem.....	50
3.2 Microscópio de ferramentaria usado para a medição do desgaste de flanco.....	54

CAPÍTULO 4

4.1 Microestrutura do aço SAE 304 (A35591), ataque com uma mistura de picral e HCl. Aumento 100x.....	59
4.2 Microestrutura do aço SAE 304 (B57577), ataque com uma mistura de picral e HCl. Aumento 100x	60
4.3 Microestrutura do aço SAE 316 (A35621), ataque com uma mistura de picral e HCl. Aumento 100x	60
4.4 Microestrutura do aço SAE 316 (BT59162), ataque com uma mistura de picral e HCl. Aumento 100x	63

CAPÍTULO 6

6.1 Curvas de vida para os distintos materiais SAE 304	77
6.2 Curvas de determinação da força específica de corte SAE 304	81
6.3 Curvas de vida para os distintos materiais SAE 316	90
6.4 Curvas de determinação da força específica de corte SAE 316	92

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

2.1 Tipos de aços inoxidáveis.....	5
2.2 Classificação dos aços inoxidáveis austeníticos.....	6

CAPÍTULO 4

4.1 Composição química (A35591 (CONVENCIONAL) e B57577 (MODIFICADO)).....	57
4.2 Composição química (A35621 (CONVENCIONAL) e BT59162 (MODIFICADO)).....	58
4.3 Medidas de microdureza (A35591)	62
4.4 Resultados das microdurezas (A35591).....	62
4.5 Medidas de microdureza (B57577)	62
4.6 Resultados das microdurezas ((B57577)	63
4.7 Medidas de microdureza (A35621)	63
4.8 Resultados das microdurezas (A35621).....	63
4.9 Medidas de microdureza (BT59162).....	64
4.10 Resultados das microdurezas (BT59162)	64
4.11 Sumário dos resultados de resistência à tração e alongamento	65
4.12 Análise de variância para o AFP 725 (SAE 304)	65
4.13 Análise de variância para o AFP 727 (SAE 316)	65

CAPÍTULO 6

6.1 Resultados dos testes de vida da ferramenta (B57577).....	76
6.2 Resultados dos testes de vida da ferramenta (A35591).....	76
6.3 Médias das forças e respectivos desvios padrões para cada combinação de parâmetros de corte.....	78
6.4 Mapa de cavacos, material: AFP 725 - A35591.....	81
6.5 Mapa de cavacos, material: AFP 725 - B57577.....	81
6.6 Avaliação da qualidade superficial, material: aço A35591.....	83
6.7 Avaliação da qualidade superficial, material: aço B57577.....	83
6.8 Resultados da análise de variância.....	84
6.9 Avaliação da qualidade superficial, com variação da velocidade de corte para o aço A35591.....	84
6.10 Avaliação da qualidade superficial, com variação da velocidade de corte para o aço B57577.....	85
6.11 Resultados da análise de variância.....	85
6.12 Ensaio de vida de ferramenta para o material AFP 727 (A35621).....	87
6.13 Ensaio de vida de ferramenta para o material AFP 727 (BT59162).....	87
6.14 Médias das forças e respectivas variâncias para cada combinação de parâmetros de corte.....	89
6.15 Mapa de cavacos, material: A35621.....	91
6.16 Mapa de cavacos, material: BT59162.....	92
6.17 Avaliação da qualidade superficial, material: aço A35621.....	93
6.18 Avaliação da qualidade superficial, material: aço BT59162.....	94
6.19 Resultados da análise de variância.....	94
6.20 Avaliação da qualidade superficial, com variação da velocidade de corte para o aço A35621.....	95

6.21 Avaliação da qualidade superficial, com variação da velocidade de corte para o aço BT59162.....	95
6.22 Resultados da análise de variância.....	95

SIMBOLOGIA

a_p	[mm]	profundidade de usinagem
b	[mm]	largura de usinagem
C_v		vida da ferramenta para $v_c = 1$ m/min [constante]
E	[N/mm ²]	módulo de elasticidade
f	[mm/rot]	avanço
F		fator de Tuckey
F	[N]	força de usinagem
F_c	[N]	força de corte
F_f	[N]	força de avanço
F_p	[N]	força passiva
h		espessura de usinagem (antes do corte)
h_{ch}		espessura do cavaco depois do corte
k		coeficiente angular da curva de vida
$k_{c1.1}$		força específica de corte para seção de 1 mm ²
r_ϵ	[mm]	raio de quina = raio de ponta
R_a	[μ m]	desvio médio aritmético = rugosidade R_a
R_t	[μ m]	altura máxima das irregularidades = rugosidade R_t
R_z	[μ m]	média aritmética das profundidades isoladas de rugosidade Z_i dos cinco trechos contíguos de medição.
t		fator de Student
T	[min]	vida da ferramenta
v_c	[m/min]	velocidade de corte
$X_{médio}$		média dos valores
$1-mc$		coeficiente angular
α_o	[°]	ângulo de incidência = ângulo de folga

α°	[°]	ângulo de incidência do gume secundário = ângulo de folga da aresta lateral
β_0	[°]	ângulo de cunha = ângulo de corte
γ_0	[°]	ângulo de saída
χ_r	[°]	ângulo de direção = ângulo de posição

RESUMO

Dentre aços inoxidáveis, os austeníticos são os que oferecem maiores dificuldades durante a usinagem, não somente por sua estrutura austenítica, que não admite têmpera e pode provocar o empastamento do elemento cortante, mas também porque esta estrutura pode transformar-se parcialmente durante a usinagem e ser causa do desgaste da ferramenta [1].

Os aços inoxidáveis são tenazes, elásticos e apresentam a tendência, na usinagem a aderir e atritar com a ferramenta [2], formando gume postiço. Devido a isto, verifica-se uma redução da vida da ferramenta e a degradação da superfície usinada. Essas características gerais são devidas às seguintes propriedades do material usinado:

- alta resistência à tração;
- grande diferença entre o limite de escoamento e o limite de ruptura;
- alta taxa de encruamento;
- baixa condutividade térmica [3].

Os ensaios de usinabilidade deste aço desenvolvidos ao longo deste trabalho referem-se ao torneamento externo longitudinal com uma determinada ferramenta de metal duro revestida. O objetivo deste trabalho é estabelecer uma comparação entre a usinabilidade de aços inoxidáveis austeníticos AFP 725 (SAE 304), com duas corridas distintas, uma convencional e outra modificada e AFP 727 (SAE 316), também com duas corridas distintas, uma convencional e outra modificada.

Os resultados são mostrados na forma de gráficos, onde são fornecidas as curvas de desgaste e de vida de ferramentas para determinadas velocidades de corte com a determinação dos coeficientes da equação de Taylor. Também são mostrados gráficos de forças de corte e determinada a força específica de corte ($k_{c1.1}$) para cada material e obtidos os coeficientes angulares de Kienzle ($1 - mc$). São verificadas ainda, as alterações na formação de cavacos com as variações dos parâmetros de usinagem (avanço e profundidade de usinagem), bem como, as variações dos acabamentos superficiais para as condições de corte dos ensaios.

Estabelece-se uma relação inicial entre a usinabilidade, a estrutura metalográfica e a composição do aço. Para os aços inoxidáveis austeníticos, esta relação ainda não é bem conhecida no meio científico. Embora os aços estudados apresentem durezas semelhantes, suas usinabilidades são diferentes.

Os aços que apresentam melhor usinabilidade, são aqueles que, em sua estrutura austenítica, apresentam um tamanho de grão mais fino. Isto contraria a afirmação de vários autores que o aço de grão grosso, cuja tenacidade é baixa, deva possuir a melhor usinabilidade. A variação do tamanho de grão, numa estrutura austenítica deve ser tratada em estudos posteriores.

O aço AFP 725 (SAE 304), não apresenta uma variação significativa da tensão de ruptura nas duas corridas. O mesmo não ocorre para o alongamento.

O aço AFP 727 (SAE 316), apresenta uma variação significativa da tensão de ruptura nas duas corridas. No entanto, para o alongamento não é percebida uma variação significativa.

Para os experimentos com aços inoxidáveis austeníticos (SAE 304 e SAE 316), a combinação mecânica na microestrutura, de tamanhos de grãos mais finos, com a presença de descontinuidades geradas na forma de ferrita δ , proporcionam uma melhora na usinabilidade dos materiais.

Com base nos resultados da comparação da usinabilidade entre os aços inoxidáveis austeníticos AFP 725 (SAE 304), corridas A35591 e B57577, obtêm-se uma melhoria de usinabilidade para o aço de corrida modificada (B57577), proporcionando menor desgaste à ferramenta, para as mesmas condições anteriores.

Com base nos resultados da comparação da usinabilidade entre os aços inoxidáveis austeníticos AFP 727 (SAE 316), corridas A35621 e BT59162, obtêm-se uma melhoria de usinabilidade para o aço de corrida modificada (BT59162), proporcionando menores forças de usinagem e menores desgaste à ferramenta de corte para as mesmas condições anteriores.

ABSTRACT

It is generally agreed by the manufacturing sector that stainless steels are amongst the most difficult materials to machine, since they severely limit tool life. Two variations (conventional and modified) of steelmaking applied to a SAE 304 and a SAE 316 stainless steels are studied here.

The objective of this work is to determine a comparison of the machinability between variations of steelmaking. To achieve the main objective of this work, is studied the effect of the variation of many elements like:

- investigations of tool wear mechanism and analytical prediction of carbide tools wear in continuously turning;
- determination of the components of power using piezoelectric dynamometers.
- Analysis of the chips forms and superficial texture.

The result was a increase of the machinability to modified steels. This is due, principally a large increase in the tool life, remaining practically all other parameters constants to the SAE 304 steel and due a large increase in the tool life and a severe reduction in the specific cutting pressure, remaining practically chips forms and superficial texture constants to the SAE 316 steel.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Tão importante quanto as propriedades de desempenho (resistência mecânica, à corrosão, etc.), as propriedades de fabricação como a soldabilidade e a usinabilidade devem ser sempre consideradas na seleção dos materiais. Estima-se que anualmente, cerca de um milhão de toneladas de aço inoxidável sofram algum tipo de usinagem.

A indústria manufatureira, responsável pela transformação do material bruto em peças acabadas, está interessada em informações que levam a uma usinagem mais econômica. Esta exigência é válida, pois com o conhecimento das condições econômicas de corte, a operação pode ser realizada, baseada em menor tempo e/ou custo de fabricação [4].

São numerosos os fatores que tem influência sobre a usinabilidade de um material. Por exemplo: as condições de corte, a geometria da ferramenta, as propriedades mecânicas, a microestrutura e as propriedades físico-químicas da peça e da ferramenta.

O presente trabalho surgiu no escopo de um convênio firmado entre o Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP-UFSC) e a Siderúrgica Riograndense S.A.. Este convênio consistiu em realizar testes de usinabilidade em aços inoxidáveis austeníticos SAE 304 e SAE 316. Cada material teve em sua linha de pesquisa duas corridas distintas, uma caracterizada como convencional e uma outra modificada, com perspectiva de lançamento no mercado em substituição a convencional.

Busca-se com os resultados dos testes estabelecer uma relação dos efeitos de usinabilidade com possíveis alterações metalúrgicas nas ligas denominadas modificadas, seja por uma análise nas alterações químicas das ligas, por uma variação das propriedades mecânicas, como dureza, alongamento e tensão de ruptura, ou ainda, por alterações na microestrutura do material.

CAPÍTULO 2

ESTADO DA ARTE

2.1 HISTÓRICO DO AÇO INOXIDÁVEL

As necessidades materiais básicas do ser humano são alimentos, energia e materiais. Para ilustrar a importância dos materiais, basta lembrar-se que as diversas eras, pelas quais o homem passou, são caracterizadas pelo grau de desenvolvimento e utilização dos materiais: idade da pedra, idade do cobre, idade do bronze e idade do ferro.

O cientista de materiais Erhard Hornbogen [6] classifica os materiais em quatro níveis, conforme o grau de conhecimento científico utilizado no seu desenvolvimento:

1. Materiais naturais;
2. Materiais desenvolvidos por meio de sistemática experimentação empírica;
3. Materiais desenvolvidos com auxílio de conhecimentos científicos, isto é, considerações científicas orientaram seus descobrimentos e suas propriedades foram qualitativamente interpretadas e
4. Materiais projetados (novos ou aperfeiçoados) quase que exclusivamente a partir de conhecimentos científicos e suas propriedades podem ser quantitativamente previstas.

O descobrimento dos aços inoxidáveis é enquadrado no nível 3, o que de certa forma oferece a possibilidade de modificações e projetos de novas ligas, baseados em conhecimentos científicos e exigências atuais.

A extração e a transformação do ferro e do aço, nos seus quase 5000 anos de história, sofreram um enorme e contínuo desenvolvimento. No início do século passado, a experiência das gerações anteriores passou a ser reavaliada de uma maneira sistemática e científica. Apesar deste esforço dos metalurgistas, um problema permaneceu sem solução até o início do século XX: os objetos de ferro e de aço não eram suficientemente resistentes à corrosão.

No início deste século este problema começava a ser solucionado em vários países simultaneamente. Na Inglaterra, Harry Brearley, em dois trabalhos não publicados datados de fevereiro e de outubro de 1912, descrevia suas experiências em ligas resistentes a corrosão, contendo 12,8% de Cr e 0,24% de C. Estavam descobertos os aços inoxidáveis martensíticos.

Nos Estados Unidos da América, em setembro de 1911, Christiam Dantsizen iniciava suas experiências com ligas contendo 14 a 16% de Cr e com baixo teor de C (de 0,007 a 0,015%), preparadas utilizando-se cromo e ferrocromo obtidos por aluminotermia. Estavam descobertos os aços inoxidáveis ferríticos. Já em 1915, ele sugeriu a utilização destas ligas na construção de turbinas; um procedimento utilizado até hoje pelos engenheiros projetistas.

Em 1896, o setor de física do laboratório de físico-química da firma Krupp, em Essen, na Alemanha, passou a ser chefiado pelo Dr. Breno Strauß. Em 1906 o primeiro metalurgista do laboratório, Dr. Eduard Maurer, começou a trabalhar neste setor. Maurer havia desenvolvido um trabalho experimental em Paris, sob a supervisão de H. Le Chatelier, na área de tratamentos térmicos de aços e defendido-o como tese de doutorado em 1908 em Aachen. Entre 1908 e 1910, Strauß e Maurer trabalharam com aços ao Cr e ao Cr-Ni e, já em 1910, introduziram os aços contendo 35% de Ni e 13 a 14% de Cr (Nichrotherm 4). Em 17 de outubro de 1912, a firma Fried. Krupp deu entrada no setor de patentes do império alemão ("Reichspatentamt"), em Berlim, ao pedido de patente DRP 304126: "Herstellung von Gegenständen, die hohe Widerstandskraft gegen korosion erfordern..." (Fabricação de objetos que exigem alta resistência à corrosão...). Está patente foi pouco depois, em 20 de dezembro de 1912, complementada por outra: DRP 304159. Nasceram os aços inoxidáveis austeníticos V2A (V de Versuch, que significa experiência, e A de Austenit) contendo 20% de Cr, 7% de Ni e 0,25% de C.

A firma Krupp foi a primeira a comercializar aços inoxidáveis. Até o fim do primeiro semestre de 1914, ela já havia fornecido à fábrica de anilina e soda do estado de

Baden (Badisch Anilin-und Sodafabrik - BASF), em Ludwigshafen, 18 toneladas de V2A.

A indústria química e as aplicações em altas temperaturas tinham então a sua disposição uma nova classe de materiais mais adequada para suas instalações em meios agressivos. Os números de produção deixam muito claro o impacto que estes materiais representaram. Em 1934, produziu-se 56 mil toneladas e em 1953 a produção mundial ultrapassou 1 milhão de toneladas. Atualmente, a produção mundial está por volta de 10 milhões de toneladas. Cerca de 2/3 dessa produção são de aços inoxidáveis austeníticos. Representantes de empresas significativas do setor prevêem uma taxa anual média de crescimento da produção de 4 a 6% até o ano 2000.

O descobrimento dos aços inoxidáveis significou um grande avanço no desenvolvimento de materiais resistentes à corrosão e à oxidação. Os aços inoxidáveis eram, todavia, suscetíveis à chamada corrosão intergranular, causada pelo empobrecimento de Cr das regiões adjacentes aos contornos de grãos devido à precipitação nestes locais de carboneto $M_{23}C_6$, na época conhecido como Cr_4C (em 1933, Westgren mostrou que a fórmula correta era $Cr_{23}C_6$ e não Cr_4C). Duas abordagens foram tentadas por Strauß, Schottky e Hinnüber e outros pesquisadores, por volta de 1930, para solucionar-se este problema; redução do teor de carbono (patente DRP 561160 de 09/02/1928) e adição de elementos com maior afinidade pelo carbono que o cromo, principalmente Nb, Ta, Ti e V (patente DRP 614646 de 27/06/1929 e patente DRP 643444 de 22/07/1930).

O desenvolvimento dos aços inoxidáveis não parou aí. Hoje, as normas de cada país apresentam dezenas de composições diferentes desenvolvidas para aplicações e exigências específicas [5].

Tais aços constituem um grupo muito importante do ponto de vista tecnológico, já que tem aplicações na indústria química (tanques de líquido corrosivo), alimentos (para manutenção de higiene do processamento dos alimentos) e em situações que envolvem elevada temperatura (válvulas e trocadores de calor) [6].

2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS INOXIDÁVEIS

Os aços inoxidáveis são divididos em cinco famílias: quatro são baseadas em características microestruturais das ligas (ferrítica, martensítica, austenítica, austenítica mais ferrítica) e uma baseada no tipo de tratamento usado (ligas endurecíveis por precipitação) [11].

Uma outra classificação, mais simples e mais usada dos aços inoxidáveis, é baseada na microestrutura que apresentam à temperatura ambiente. Nestas condições, são considerados três grupos:

I. Aços inoxidáveis Martensíticos

II. Aços inoxidáveis Ferríticos

III. Aços inoxidáveis Austeníticos

Os grupos I e II são essencialmente ligas de ferro e cromo, o grupo III compreende as ligas de ferro, cromo e níquel.

Neste trabalho serão tratados especificamente os aços inoxidáveis austeníticos.

Vários métodos são comumente usados para identificação dos aços inoxidáveis. A AISI classifica os diferentes tipos de aços inoxidáveis de acordo com um sistema numérico de três dígitos. O primeiro dígito indica o tipo de aço inoxidável que é indicado pela microestrutura do material. Os dois últimos dígitos indicam uma classe específica dentro do grupo. Letras após os últimos dois dígitos indicam mudanças em uma classe específica. A tabela 2.1 mostra as designações dos três dígitos para os aços inoxidáveis austeníticos, ferríticos e martensíticos [3].

Tabela 2.1. Tipos de aços inoxidáveis

Designação	Tipo e característica gerais
2xx	Aços cromo- níquel- manganês: não endurecíveis, austeníticos, e não magnéticos
3xx	Aços cromo- níquel: não endurecíveis, austeníticos, e não magnéticos
4xx	Aços cromo: não endurecíveis, ferríticos, e magnéticos
4xx	Aços cromo: endurecíveis, martensíticos, e magnéticos
5xx	Aços cromo: baixo cromo e resistentes ao calor

A tabela 2.2 mostra os principais tipos de aços inoxidáveis austeníticos, classificados pela AISI, com suas composições químicas:

Tabela 2.2. Classificação dos aços inoxidáveis austeníticos.

Tipo AISI	C máx.	Mn máx.	P máx.	S máx.	Si máx.	Cr	Ni	Mo	Outros elementos
201	0.15	5.5/7.5	0.060	0.030	1.00	16.00/18.00	3.50/5.50		N=0.25 máx
202	0.15	7.50/10.00	0.060	0.030	1.00	17.00/19.00	4.00/6.00		N=0.25 máx
205	0.12/0.2	14.00/15.0	0.030	0.030	0.050	16.50/18.00	1.00/1.75		N=0.32/0.4
301	0.15	2.00	0.045	0.030	1.00	16.00/18.00	6.00/8.00		
302	0.15	2.00	0.045	0.030	1.00	17.00/19.00	8.00/10.00		
302B	0.15	2.00	0.045	0.030	2.00/3.00	17.00/19.00	8.00/10.00		
303	0.15	2.00	0.20	0.15	1.00	17.00/19.00	8.00/10.00	0.60	
				min				máx	
303Se	0.15	2.00	0.20	0.060	1.00	17.00/19.00	8.00/10.00		
304	0.08	2.00	0.045	0.030	1.00	18.00/20.00	8.00/10.50		
304L	0.03	2.00	0.045	0.030	1.00	18.00/20.00	8.00/12.00		
304H	0.04/0.1	2.00	0.040	0.030	0.75	18.00/20.00	8.00/12.00		
304N	0.08	2.00	0.045	0.030	1.00	18.00/20.00	8.00/10.50		N=0.10/0.16
305	0.12	2.00	0.045	0.030	1.00	17.00/19.00	10.50/13.00		
308	0.08	2.00	0.045	0.030	1.00	19.00/21.00	10.00/12.00		
309	0.20	2.00	0.045	0.030	1.00	22.00/24.00	12.00/15.00		
309S	0.08	2.00	0.045	0.030	1.00	22.00/24.00	12.00/15.00		
310	0.25	2.00	0.045	0.030	1.50	24.00/26.00	19.00/22.00		
310S	0.08	2.00	0.045	0.030	1.50	24.00/26.00	19.00/22.00		
314	0.25	2.00	0.045	0.030	1.50/3.00	23.00/26.00	19.00/22.00		
316	0.06	2.00	0.045	0.030	1.00	16.00/18.50	11.00/14.00	2.50/ 3.0	

Tipo AISI	C máx.	Mn máx.	P máx.	S máx.	Si máx.	Cr	Ni	Mo	Outros elementos
316H	0.04/0.1	2.00	0.030	0.030	0.75	16.00/18.00	11.00/13.50	2.00/2.5	
316H	0.04/0.1	2.00	0.030	0.030	0.75	16.00/18.00	11.00/14.00	2.50/3.0	
316F	0.08	2.00	0.20	0.10	1.00	16.00/18.00	10.00/14.00	1.75/2.5	
				min					
316L	0.03	2.00	0.045	0.030	1.00	16.00/18.50	11.00/14.00	2.00/2.5	
316L	0.03	2.00	0.045	0.030	1.00	16.00/18.50	11.50/14.50	2.50/3.0	
316N	0.08	2.00	0.045	0.030	1.00	16.00/18.00	10.00/14.00	2.00/3.0	N=0.10/0.16
317	0.08	2.00	0.045	0.030	1.00	18.00/20.00	11.00/15.00	3.00/4.0	
317L	0.03	2.00	0.045	0.030	1.00	18.00/20.00	11.00/15.00	3.00/4.0	
321	0.08	2.00	0.045	0.030	1.00	17.00/19.00	9.00/12.00		Ti=5*Cmin; 0.8max
321H	0.04/0.1	2.00	0.030	0.030	0.75	17.00/19.00	9.00/13.00		Ti=4*Cmin; 0.6máx
329	0.10	2.00	0.040	0.030	1.00	25.00/30.00	3.00/6.00	1.00/2.0	
330	0.08	2.00	0.040	0.030	0.75/1.50	17.00/20.00	34.00/37.00		
347	0.08	2.00	0.045	0.030	1.00	17.00/19.00	9.00/12.00		Nb+Ta=10*C min;1.00máx
347H	0.04/0.1	2.00	0.030	0.030	1.00	17.00/19.00	9.00/13.00		Nb+Ta=10*C min;1.00máx
348	0.08	2.00	0.045	0.030	1.00	17.00/19.00	9.00/13.00		Nb+Ta=10*C min;Ta=0.10m áx;Co=0.2máx
348H	0.04/0.1	2.00	0.045	0.030	1.00	17.00/19.00	9.00/13.00		Nb+Ta=10*C min;Ta=0.10m áx;Co=0.1máx
384	0.08	2.00	0.045	0.030	1.00	15.00/17.00	17.00/19.00		

Os aços inoxidáveis austeníticos têm uma estrutura cúbica de face centrada e são não-magnéticos quando tratados termicamente. Estas ligas são divididas em duas categorias: as ligas-padrão contendo níquel para manter a estrutura austenítica à temperatura ambiente (S20100, S20910, S21904) e as ligas contendo uma quantidade substancial de manganês,

usualmente com altos níveis de nitrogênio e, em alguns casos, níquel, para aumentar a sua resistência à tração (S30452) [7].

Os aços inoxidáveis austeníticos possuem boa ductilidade e tenacidade mesmo em temperaturas criogênicas, e podem ser endurecidos substancialmente por trabalho a frio. O grau de endurecimento depende da composição da liga.

A resistência à corrosão das ligas austeníticas varia de boa a excelente, mas depende também da composição da liga.

O aço inoxidável austenítico mais comum é o S30400, que contém aproximadamente 18% de cromo e 8% de níquel, e para prevenir a corrosão intergranular a altas temperaturas adiciona-se titânio ou nióbio, para estabilizar o carbono (S32100 e S34700) [3].

2.3 TRATAMENTOS TÉRMICOS

Os aços inoxidáveis austeníticos não podem ser endurecidos por têmpera por não possuírem temperaturas de transformação típicas. O aumento da resistência mecânica pode ser obtido através do encruamento. Porém, podem ser submetidos a alguns tratamentos térmicos tais como :

- Solubilização→ Permite garantir a estrutura austenítica à temperatura ambiente.
- Alívio de tensões→ Elimina total ou parcialmente as tensões internas originadas em deformações plásticas ou em soldagem. Também melhora as propriedades elásticas do material fortemente encruado.
- Estabilização→ Aplicado em aços estabilizados do tipo AISI 321, com o objetivo de garantir máxima resistência à corrosão.
- Tratamentos termo-químicos→ O mais indicado é a nitretação que aumenta a dureza [3].

2.4 PROPRIEDADES DO AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO E INFLUÊNCIA DOS ELEMENTOS DE LIGA, TAMANHOS DE GRÃOS E INCLUSÕES

A ampla utilização dos aços inoxidáveis austeníticos deve-se a uma combinação favorável de propriedades, tais como: resistência à corrosão e a oxidação, resistência mecânica a quente, trabalhabilidade e soldabilidade. Não é somente a matriz austenítica que determina as propriedades destes materiais. Numerosas fases, tais como ferrita δ , carbonetos, fases intermetálicas, nitretos, sulfetos, boretos e martensita induzida por deformação, podem estar presentes na microestrutura dos aços inoxidáveis austeníticos. A quantidade, o tamanho, a distribuição e a forma destas fases têm influência marcante nas propriedades do material [6].

Os principais elementos que fazem parte da composição química dos aços inoxidáveis austeníticos são o cromo, variando de 16% a 20% e o níquel, variando de 6% a 22%.

Adições de cromo aumentam significativamente a resistência à corrosão e à oxidação dos aços. O mecanismo pelo qual o cromo, quando solubilizado em teores acima de 12% no ferro, torna o aço inoxidável, deve-se à formação de uma película de óxido de cromo que inibe a corrosão. Esta película tem as propriedades de ser impermeável ao oxigênio (dificultando a difusão do mesmo para o interior do material), ser aderente a superfície do metal, de ter alta velocidade de formação, o óxido forma-se rapidamente quando em contato com o oxigênio e ser estável em relação ao meio ambiente. Tal fenômeno de inibição da corrosão recebe o nome de passivação [6]. Em contrapartida, à medida que o teor de cromo aumenta, a faixa austenítica diminui, até praticamente desaparecer para cerca de 20% de cromo. O cromo estabiliza a fase alfa (α) ou ferrita.

A introdução do níquel melhora consideravelmente a resistência à corrosão do aço e também a resistência à oxidação à altas temperaturas. Verifica-se que à medida que aumenta o teor de níquel, a fase gama (γ) torna-se cada vez mais estável a ponto de, com 8% de Níquel, para baixos teores de carbono, as ligas ficam inteiramente austeníticas, mesmo com recozimento.

Qualquer um dos elementos, adicionados em quantidades apreciáveis, elimina a alotropia do ferro, mas o níquel estabiliza a austenita ao passo que o cromo estabiliza a ferrita. Assim, quando ambos os elementos estão presentes, resulta uma situação de compromisso e ambas as formas alotrópicas podem se desenvolver nas suas temperaturas apropriadas. Aparentemente o níquel exerce uma influência mais decisiva do que o cromo, no que diz respeito às formas alotrópicas do ferro [8].

Por ser forte estabilizador da austenita, o carbono também age em sentido oposto ao Cr. O teor de carbono influencia as características dos aços inoxidáveis em diferentes sentidos. A partir de um certo teor, o carbono torna temperáveis determinados aços que por este motivo são classificados como martensíticos; com teores mais baixos de carbono, o mesmo aço não é temperável, enquadrando-se portanto entre os aços ferríticos. Esse é o caso típico dos aços-cromo com 13 a 18% de Cr [9].

Quanto às características de corrosão, o carbono tem uma influência desfavorável nos aços austeníticos: os aços de teores mais elevados são normalmente mais propensos a sofrerem corrosão intercrystalina do que os de teores mais baixos [9].

Além do cromo, carbono e do níquel, outros elementos de liga podem ser adicionados ou terem seus teores ajustados com a finalidade de mudar ou ressaltar certas propriedades ou características [8]. O nitrogênio em solução sólida aumenta a estabilidade da austenita e melhora as resistências mecânicas e à corrosão [5]. Carbono e nitrogênio afetam o encruamento aumentando a resistência e dureza do aços inoxidáveis austeníticos. Elevados níveis de cada ou dos dois elementos diminuirá a usinabilidade.

Elementos formadores de carbonetos e nitretos, como titânio e nióbio, são utilizados para prevenir a corrosão intergranular [10]. Diminuem o ataque intergranular devido à precipitação de carboneto de Cr [11]. Contudo, as inclusões de carbonetos e nitretos são abrasivas para a ferramenta de corte.

O silício favorece a formação de ferrita e diminui a capacidade de têmpera. Aumenta a resistência à oxidação à altas temperaturas e favorece a formação de estruturas bifásicas ($\alpha + \gamma$).

O manganês aumenta a dureza, inibe a fragilidade a quente, estabiliza a austenita. É utilizado em algumas ocasiões para substituir o níquel [8]. O cobre aumenta a resistência à corrosão para determinados reagentes. Adições de Mn e Cu podem

melhorar a usinabilidade e diminuir a tendência ao encruamento de baixas ligas de aços inoxidáveis [12]. Este é o caso encontrado em ligas austeníticas de usinagem livre, como SAE 304 e SAE 303, em que se adicionou manganês e/ou cobre.

A adição de elementos como o enxofre, selênio e fósforo diminuem a resistência à corrosão e a capacidade de solda. Durante a usinagem reduzem o atrito entre a peça de trabalho e a ferramenta. As inclusões de MnS fazem com que o cavacos tornem-se quebradiços e lubrifiquem a região de contato cavaco-ferramenta, aumentando a vida da ferramenta. Em meios agressivos ocorre um ataque seletivo ao MnS [12], favorecendo condições para corrosão alveolar, também conhecida como corrosão localizada (“pitting” em inglês).

O molibdênio aumenta a passividade, a resistência à corrosão alveolar [8] e a resistência ao calor dos aços inoxidáveis. É geralmente adicionado em teores da ordem de 2 a 4%.

O boro em pequenas adições (10 a 80 ppm) melhora a resistência à fluência e, em, muitos casos, também a ductilidade em fluência[5].

A relação que existe entre a usinabilidade, a estrutura metalográfica e a composição do aço é um problema que teoricamente ainda não está bem estudado [13].

A dificuldade de poder resolver o problema de facilitar o trabalho com a ferramenta de corte reside, antes de tudo, na indeterminação do conceito de usinabilidade. Além disso, a usinabilidade de um mesmo material pode ser distinta para diversas operações (torneamento, furação, fresamento, etc.), ou para operações de desbaste e acabamento [13].

Não se conseguiu ainda obter uma correlação satisfatória entre as propriedades mecânicas e a usinabilidade, mas quase sempre pode considerar-se que a elevação da dureza ou da resistência, faz com que se diminua a usinabilidade do material (determinada principalmente pelo desgaste da ferramenta de corte).

As diferenças de estrutura e de composição podem provocar uma variação da usinabilidade do material [13]. A respeito disso, possui grande importância a condutividade térmica do aço. Os aços de estrutura austenítica conduzem pouco calor. A peça absorve pouco o calor do corte e este se concentra, basicamente, na região do

gume da ferramenta. Assim, apesar de sua baixa dureza, os aços inoxidáveis são de baixa usinabilidade.

O tamanho de grão do aço exerce grande influência em sua usinabilidade. O aço de grão grosso, cuja tenacidade é baixa, possui melhor corte. A diminuição da tenacidade cria a chamada “fragilidade de corte” e facilita a quebra do cavaco [13].

A resistência mecânica de uma liga metálica pode ser aumentada com o auxílio de vários mecanismos, denominados mecanismos de endurecimento. Os principais mecanismos de endurecimento são: endurecimento por solução sólida, endurecimento por deformação (encruamento), endurecimento por precipitação de partículas coerentes, endurecimento por dispersão de partículas incoerentes e endurecimento por refino de grão[5].

O endurecimento causado pela presença de ferrita δ não pode ser considerado do tipo dispersão, pois a ferrita também se deforma plasticamente. O efeito desta fase é bastante acentuado, conforme ilustra figura 2.1 [5].

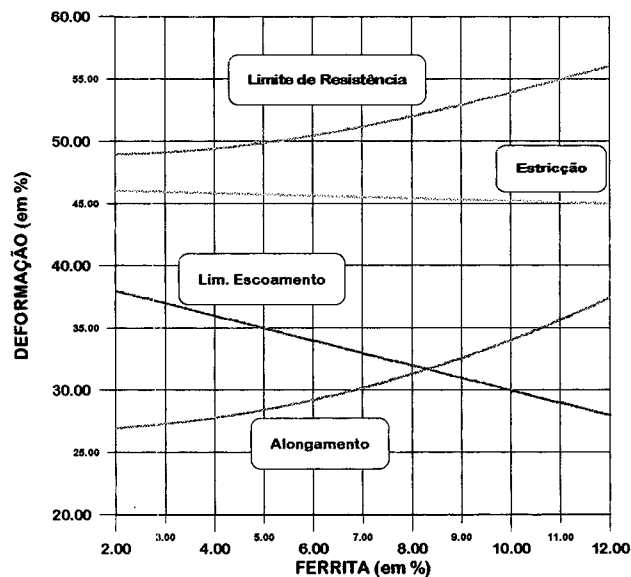


Figura 2.1 Variação do limite de escoamento , limite de resistência , alongamento e estricção com o teor de ferrita.

2.5 CARACTERÍSTICAS DOS AÇOS SAE 304 E SAE 316

- SAE 304

⇒ Composição química principal (%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
0.08	1.00	2.00	0.045	0.030	18.00	8.00
max.	max.	max.	max.	max.	20.00	10.50

⇒ Similares:

ABNT NBR 5601 Tipo 304 ≈ SAE 304 ≈ ASTM A 276-81a Tipo 304 ≈ AISI 304 ≈ DIN X5CrNi 18 9 ≈ Wnr 1.4301 UNS S30400 ≈ BS 970:1970 Tipo 304S15 ≈ JIS G 4303-81 Tipo SUS 304.

⇒ Características Gerais:

Aço cromo-níquel inoxidável austenítico do tipo 18-8 é amagnético, não temperável. Possui eventualmente pequenos teores de ferrita, apresentando então um leve magnetismo. Quando deformado a frio, torna-se parcialmente martensítico e ligeiramente magnético. Possui boa resistência à corrosão.

Tem a propriedade de manter boas características de tenacidade até temperaturas extremamente baixas, o que o torna um material adequado para aplicações criogênicas sujeitas a choques e a impactos. Como todos os aços inoxidáveis austeníticos, caracteriza-se por um coeficiente de dilatação térmica linear cerca de 50 % superior ao dos aços para construção mecânica [8].

⇒ Aplicações Típicas:

Equipamentos das indústrias química, farmacêutica, têxtil, do petróleo, do papel e celulose, equipamento hospitalar, permutadores de calor, válvulas e peças de tubulações, indústria do frio e instalações criogênicas em geral [8].

⇒ Estado de Fornecimento

Solubilizado (recozido), com dureza de 160 HB aproximadamente [8].

- SAE 316

⇒ Composição química principal (%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
0.08	1.00	2.00	0.045	0.030	16.00	10.00	2.00
max.	max.	max.	max.	max.	18.00	14.00	3.00

⇒ Similares:

ABNT NBR 5601 Tipo 316 ≈ SAE 316 ≈ ASTM A 276-81 Tipo 316 AISI 316 ≈ DIN X5 CrNiMo 18 10 ≈ Wnr 1.4401 UNS S31600 ≈ BS 970:1970 Tipo 316S16 ≈ JIS G 4303-81 Tipo SUS 316.

⇒ Características Gerais:

Aço cromo-níquel inoxidável austenítico do tipo 18-8 é amagnético, não temperável. Possui eventualmente pequenos teores de ferrita, apresentando então um leve magnetismo.

Quando deformado a frio, torna-se parcialmente martensítico e ligeiramente magnético. Possui boa resistência à corrosão.

Tem a propriedade de manter boas características de tenacidade até temperaturas extremamente baixas, o que o torna um material adequado para aplicações criogênicas sujeitas a choques e a impactos. Como todos os aços inoxidáveis austeníticos, caracteriza-se por um coeficiente de dilatação térmica linear cerca de 50 % superior aos aços para construção mecânica [8].

⇒ Aplicações Típicas:

Equipamentos das indústrias química, farmacêutica, têxtil, do petróleo, do papel e celulose, equipamento hospitalar, permutadores de calor, válvulas e peças de tubulações, indústria do frio e instalações criogênicas em geral [8].

Como as aplicações entre os dois aços são muito similares, recomenda-se a utilização do SAE 316 em condições de maior exigência da peça a resistência à corrosão alveolar e a resistência ao calor.

⇒ Estado de Fornecimento:

Solubilizado (recozido), com dureza de 160 HB aproximadamente [8].

2.6 TERMOS GERAIS DE USINABILIDADE

Na usinagem de um material, no início do corte, a cunha (ferramenta) penetra no material da peça, e este se deforma elástica e plasticamente. Após ultrapassar a tensão máxima de cisalhamento do material, este começa a escoar. Em dependência da geometria da cunha de corte, o material deformado passa a formar um cavaco que desliza sobre a face da cunha de corte [14].

Em todos os processos de usinagem, as características do processo, como formação e saída de cavaco, força de corte, desgaste e resultado de trabalho, são influenciadas consideravelmente pela geometria da ferramenta. Em decorrência disso, a geometria da ferramenta deve ser adaptada ao material da peça, ao material da ferramenta e às condições específicas da máquina-ferramenta [15].

A figura 2.2 mostra uma ferramenta de torneamento ou plainamento e define as superfícies, chanfros e quinas. Define-se como cunha de corte o corpo limitado pela superfície indicada na figura [16].

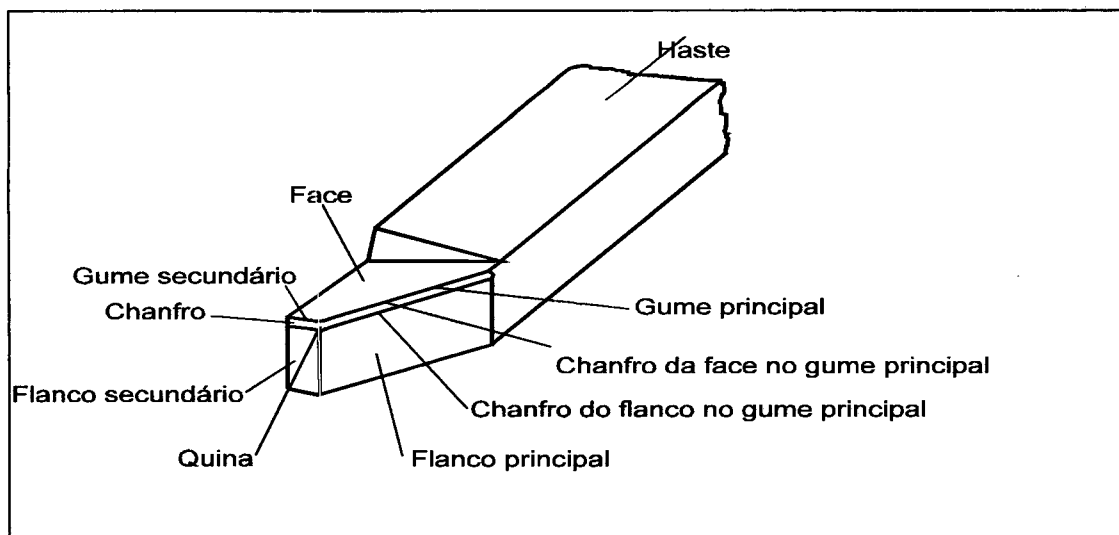


Figura 2.2. Superfícies, gumes, quinas e chanfros na ferramenta.

Os principais ângulos de uma ferramenta de corte estão definidos na figura 2.3.

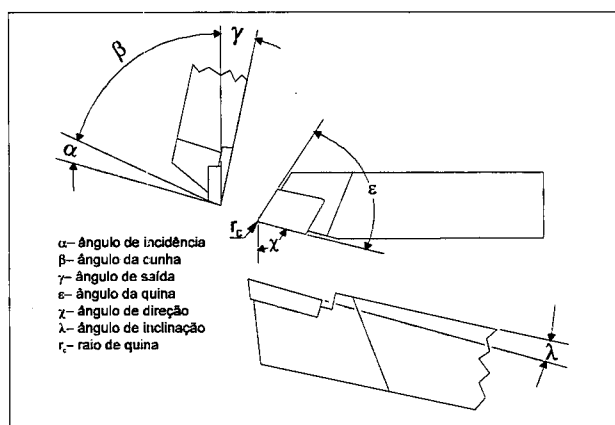


Figura 2.3. Principais ângulos de uma ferramenta de corte.

2.6.1 Definições e Generalidades

As pesquisas de usinabilidade tiveram início no começo deste século, quando F. W. Taylor usinou toneladas de materiais, tendo como objetivo quantificar a sua usinabilidade [15]. O progresso alcançado durante todas estas décadas, não foi suficiente para definir com clareza, um índice.

A usinabilidade de um metal pode ser definida como uma grandeza tecnológica, que expressa por meio de um valor numérico comparativo um conjunto de propriedades de usinagem do metal, em relação a outro tomado como padrão. Entende-se como propriedades de usinagem de um metal aquelas que expressam seu efeito sobre grandezas mensuráveis inerentes ao processo de usinagem dos metais, tais como vida da ferramenta, força de usinagem, acabamento superficial da peça, temperatura de corte, produtividade e característica do cavaco. A usinabilidade não é, portanto, uma grandeza específica de um dado material, tal como a resistência à tração, alongamento, módulo de elasticidade, etc. [15].

O maior número de informações disponíveis atualmente [17] são para o torneamento, devido principalmente à larga utilização deste processo e o menor custo na obtenção de dados experimentais generalizados.

Desde que Taylor publicou em 1906 o resultado da primeira grande pesquisa sobre usinabilidade, muitos métodos foram propostos, testados e usados. A maioria deles tinha como finalidade, simplificar e reduzir o custo de ensaios, evitando com isto, que se usinassem grandes quantidades de materiais, como fizera Taylor [18].

Os fatores que influem na determinação do índice de usinabilidade dos metais são:

- material da peça (composição química, micro-estrutura, dureza, propriedades mecânicas, rigidez da peça).
- processos mecânicos e condições de usinagem (material e geometria da ferramenta, condições de trabalho, fluido de corte, rigidez da máquina-ferramenta e do sistema de fixação, tipo de operação a ser realizada) [15].

Para avaliação da usinabilidade são geralmente usados quatro critérios, utilizados isoladamente ou em conjunto:

- vida da ferramenta;
- qualidade superficial da peça;
- formação de cavacos (forma e tamanho dos cavacos);
- força de usinagem [15].

a) Critério vida da ferramenta

Como critério de fim de vida da ferramenta, pode ser usado: o tempo de corte, o volume do material cortado ou número de peças fabricadas. Entretanto, quando se deseja determinar as curvas de vida de uma ferramenta, para um determinado material, com um precisão razoável, deve-se recorrer aos ensaios de usinagem de longa duração [15]. Nestes ensaios o gume da ferramenta trabalha em condições normais de corte e é usado até que seu desgaste, previamente fixado, seja tal que exija a sua substituição. O tempo de ensaio é longo e o consumo de material elevado.

Em uma operação de usinagem, o desgaste da ferramenta de corte é influenciado por uma série de fatores como: material da peça, material da ferramenta, velocidade de corte, avanço e profundidade de usinagem. Há uma interdependência destes fatores, que precisa ser determinada.

A vida da ferramenta é normalmente o critério de maior importância na caracterização da usinabilidade de um material. A vida “T” é o tempo mínimo que uma ferramenta resiste do início do corte até sua utilização total, e é definida através da equação de Taylor [19].

$$T = v_c^k \cdot C_v \quad (1)$$

Onde:

- T= vida da ferramenta (min);
- v_c = velocidade de corte(m/min);

- C_v = vida para $v_c = 1\text{m/min}$ (constante);
- k = coeficiente angular da curva de vida.

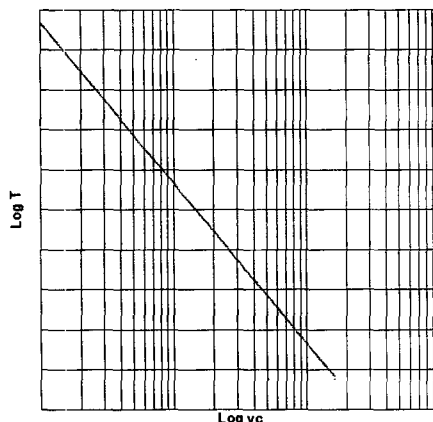


Figura 2.4 Representação esquemática do comportamento da vida da ferramenta de corte, em função da velocidade de corte ($\log T \times \log v_c$).

A dependência entre a vida T e a velocidade de corte v_c é exponencial e, em sistema bi-logarítmico, representada por uma reta, conforme figura 2.4. Os fatores que influenciam o aparecimento de desgaste na ferramenta são as partículas duras e abrasivas da peça, bem como a resistência da matriz, e o material da ferramenta empregado [19].

Antes de qualquer consideração relacionada com a equação da vida da ferramenta, é essencial que o fim de vida seja especificado. Em geral o fim de vida pode ser atribuído as seguintes causas [20]

- Avarias;
- Desgastes.

Avarias geralmente levam ao colapso total da ferramenta e por esta razão, normalmente o desgaste de flanco e cratera são usados como critério de fim de vida. Para evitar que a ferramenta atinja o colapso total, é fundamental que sejam estipulados limites para as avarias e os desgastes de flanco e cratera.

A seguir são apresentados os tipos de avarias e desgaste provocados durante a usinagem.

- tipos de avarias

⇒ Lascamento: são falhas que acontecem devido aos elevados esforços ou uso incorreto das ferramentas (figura 2.5). Suas causas são [21]:

- Classe inadequada do material;
- Geometria inadequada;
- Solicitações mecânicas demasiadas;
- Corte interrompido;
- Vibrações;
- Solicitações térmicas alternantes.

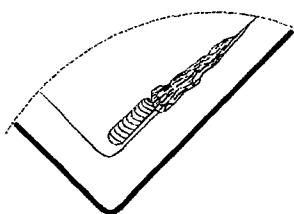


Figura 2.5 Lascamento.

⇒ Trincas longitudinais ao gume: devem-se principalmente a solicitações mecânicas alternantes de compressão, como é o caso do corte interrompido (figura 2.6).

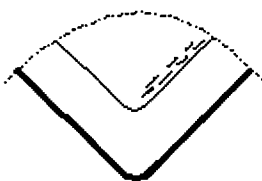


Figura 2.6 Trincas longitudinais.

⇒ Trincas transversais ao gume: Devem-se as variações térmicas que ocorrem na ferramenta, durante o corte. Podem ser solucionadas amenizando-se as condições de corte (figura 2.7).

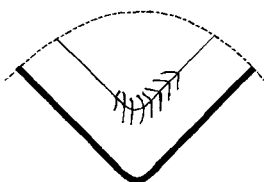


Figura 2.7 Trincas transversais ao gume.

obs: Nos materiais de ferramentas usados atualmente, raras vezes se observam tanto as trincas longitudinais como as transversais.

⇒ Deformação plástica do gume: Sob condições de elevada temperatura e pressão, o gume da ferramenta, para alguns materiais de ferramentas, pode se deformar provocando mal acabamento superficial e dificultam o controle do cavaco (figura 2.8).

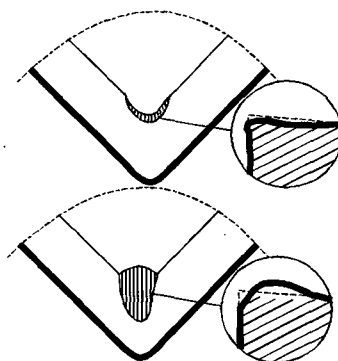


Figura 2.8 Desgaste por deformação plástica.

- tipos de desgastes

Os desgastes podem ser divididos em: de flanco (V_B) (desgaste de flanco) e desgaste de cratera (K_T) (desgaste da face). O desgaste de flanco é causado principalmente por abrasão e não pode ser evitado. Uma correta escolha das condições de corte pode minimizar o seu valor. O desgaste de cratera é uma concavidade que se forma na face da ferramenta. Pode ser evitado pela especificação correta da ferramenta e condições de corte. Um valor elevado de K_T causa a quebra da ferramenta [22].

A figura 2.9 mostra a caracterização das marcas de desgaste de cratera e flanco provocadas em uma ferramenta de torneamento.

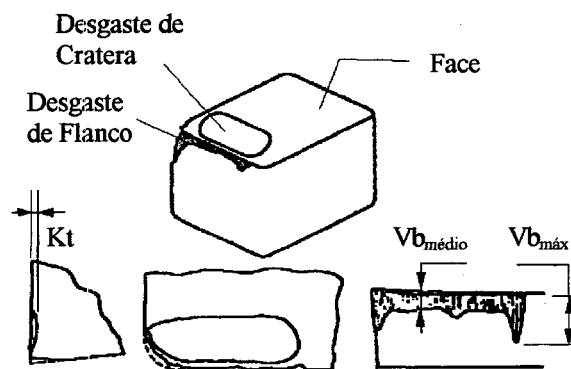


Figura 2.9 Pastilha com marcas de desgaste.

⇒ Mecanismos de desgaste

A usinagem é um processo de conformação que se desenvolve em condições muito severas de deformação plástica e atrito, sendo por este motivo, fonte de intenso calor [18].

Os diversos mecanismos de desgaste, em geral, agem simultaneamente de forma que, sua causa é dificilmente identificada após a ocorrência do desgaste [15].

O desgaste da ferramenta geralmente é atribuído à mecanismos de adesão, abrasão, oxidação e difusão [23].

Adesão: É caracterizada em todas as velocidades de corte. As análises realizadas nas ferramentas desgastadas e nos cavacos levaram a concluir que nas baixas e médias velocidades o desgaste é maior no flanco, tendo como causa o cisalhamento do gume postiço (figura 2.10) [22].

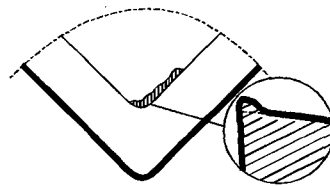


Figura 2.10 Adesão.

⇒ Difusão: Quando se trabalha com velocidades de corte maiores a temperatura aumenta e como consequência também a mobilidade dos átomos constituintes do material da ferramenta e da peça. Quando existe afinidade entre os materiais ocorre a difusão de átomos da peça (cavaco) para a ferramenta (face) e vice-versa. A entrada dos átomos de ferro na ferramenta, principalmente se está for de metal duro, muda as condições de equilíbrio entre os elementos constituintes da mesma, levando a uma nova combinação dos elementos constituintes. Estas combinações novas, no caso do metal duro, provocam a formação de carbonetos complexos (FeWC_{26}), que são menos resistentes e são rapidamente removidas por abrasão. Disto decorre que o desgaste induzido pela difusão apresenta a forma quase que idêntica das isotermas na face da ferramenta. Também se verifica uma migração de átomos da ferramenta para o cavaco que porém, pouco afeta o resultado do trabalho (figura 2.11) [1].

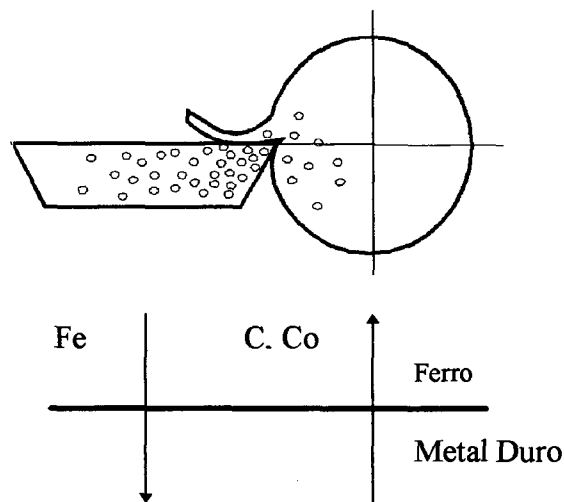


Figura 2.11 Difusão.

⇒ **Abrasão mecânica:** Arrancamento de partículas da ferramenta devido à abrasão de partículas duras do material da peça na ferramenta. Ocorre para todas as ferramentas na usinagem de todos os materiais. A abrasão mecânica é mais acentuada no flanco da ferramenta, conforme ilustra a figura 2.12.

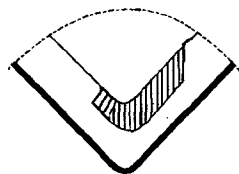


Figura 2.12 Abrasão mecânica.

Oxidação: A oxidação é detectável apenas em ferramentas oxidáveis (principalmente as de metal duro não revestidas do grupo K) em todo o contorno de contato entre ferramenta-peça-cavaco, como função da temperatura e da quantidade de oxigênio presente na região. Assim na interface peça/flanco e na interface cavaco/face, onde as temperaturas são maiores, mas o oxigênio tem pouco acesso, a oxidação não é acentuada. A maior parcela de oxidação na ferramenta de corte se verifica nas regiões limitrofes entre a superfície usinada-flanco

secundário, superfície de corte-flanco principal e na face apenas a região lateral ao cavaco. É incentivada pela presença do fluido de corte (principalmente óleo solúvel) (figura 2.13).

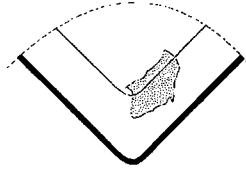


Figura 2.13. Oxidação.

b) Critério qualidade superficial da peça

A qualidade superficial de uma peça usinada é determinada em função da precisão dimensional e da rugosidade da superfície. Ambas são baseadas na tolerância pré-fixada da peça. Um material de maior resistência mecânica associado a uma maior velocidade de corte, permite a obtenção de peças com melhor acabamento superficial. Se o material é de pequena resistência ou a velocidade de corte muito baixa, o material será arrancado durante a operação de usinagem e a peça apresentará em sua superfície uma série de microtrincas [25].

A qualidade das superfícies obtidas na usinagem pode ser um critério para determinação dos parâmetros de entrada. Os fatores influentes sobre a qualidade superficial estão relacionados na figura 2.14 [19].

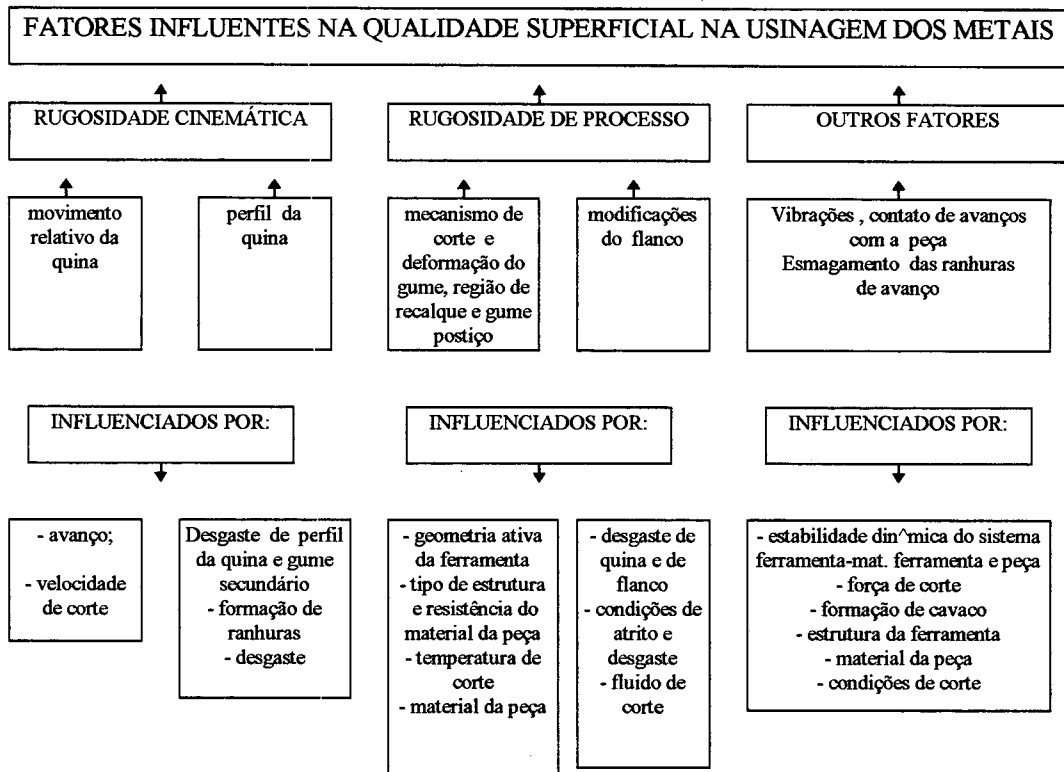
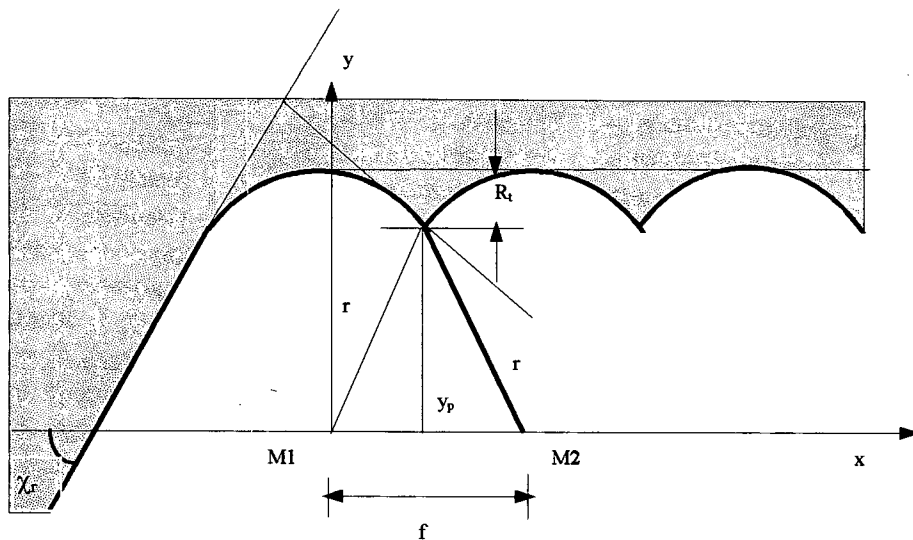


Figura 2.14 Fatores influentes sobre a qualidade superficial [19].

A rugosidade cinemática (teórica) é decorrente da forma da quina da ferramenta e do movimento relativo entre peça e ferramenta.

No torneamento, ela é influenciada principalmente pela forma do raio de quina da ferramenta e pelo avanço (figura 2.15).



$$R_t = r - (r^2 - f^2/4)^{1/2}$$

ou

$$R_t = f^2/8r$$

Condições de validade:

$$2 \cdot r \cdot \cos \chi_r \geq f$$

Figura 2.15 Influência do raio de quina e avanço sobre a rugosidade cinemática

Pela figura 2.15 é possível verificar que a rugosidade cinemática aumenta com o aumento do avanço e com a diminuição do raio de quina. Com relação à velocidade de corte, a rugosidade inicialmente tende a aumentar com o aumento da velocidade de corte, diminuindo após uma certa velocidade. Isso se deve à formação de gume postiço, que pode ocorrer apenas em uma faixa de velocidades de corte, fator que desaparece com o emprego de velocidades de corte mais altas (normalmente velocidades de corte acima de 60 m/min) [19].

A profundidade de usinagem praticamente não tem influência sobre a qualidade superficial, quando a profundidade for superior a um valor mínimo. Contudo, se a profundidade de usinagem for menor que o raio de quina da ferramenta existirá uma influência na formação da rugosidade.

Dos ângulos da ferramenta, o ângulo de saída e o ângulo de posição têm maior influência sobre a qualidade superficial. Com o aumento do ângulo de saída a rugosidade diminui. A diminuição do ângulo de posição leva a um aumento da força passiva, e em decorrência aumenta

a possibilidade de vibrações regenerativas, que levam a uma piora de qualidade superficial. Também o desgaste da ferramenta tem influência sobre a qualidade superficial da peça [19].

c) Critério formação de cavaco

Na usinagem, uma camada de material é removida das peças e transformada em cavaco pela ação mecânica da ferramenta. A forma e o tamanho do cavaco são muito importantes, principalmente para os processos de usinagem, onde há pouco espaço para os cavacos (furação, fresamento, etc.) ou em máquinas-ferramentas com pouco espaço de trabalho, como tornos automáticos e de comando numérico [26].

Quatro tipos básicos de cavaco existem:

Cavaco Contínuo: aquele no qual a continuidade do material é mantida e constantemente mostrada uma pseudo-deformação plástica na zona de corte, ou seja, o material diante da ferramenta é recalcado até que escorregue ao longo do plano de cisalhamento e passa, sem romper, a formar parte do cavaco que desliza suave e uniforme sobre a face da ferramenta [26].

Cavaco Fragmentado (Arrancado): composto de um variado número de elementos conectados, frequentemente resultantes de uma variação periódica da altura da camada retirada, que induz zonas alternadas com pouca e muita deformação cisalhante no cavaco [26]. Característico de materiais com pouca ou nenhuma deformabilidade plástica.

Cavaco lamelar: formado em decorrência do aumento do fator de recalque que forma regiões de cisalhamento preferencial, sem no entanto, haver uma separação nítida entre as lamelas.

Cavaco cisalhado: formado em materiais que apresentam um elevado encruamento por deformação verificando regiões de cisalhamento preferencial bem caracterizado, havendo separação entre as lamelas.

Além dos quatro tipos mencionados, pode-se diferenciá-lo quanto a sua forma em [27]: cavaco em fita, helicoidal, espiral e em lascas ou pedaços. Certas formas dificultam a operação de usinagem, prejudicam o acabamento superficial da peça e influem no desgaste da ferramenta [15].

A ISO 3685-1977 fornece a classificação de cavaco baseada nos tamanhos e formas de cavaco obtidos na usinagem de metais. Consiste na descrição em forma de grupos, com subgrupos definindo o tamanho (normal, largo, curto, etc.) e condições físicas (emaranhado, conectado, livre, etc.). Este sistema de classificação também inclui um terceiro dígito de identificação numérica para certas formas de cavaco, para descrever a sua forma de fluxo e seu modo de quebra.

A figura 2.16 mostra vários tipos de cavacos e suas respectivas denominações. As quatro formas superiores apresentam um transporte de cavaco difícil. Cavacos helicoidais planos preferencialmente apresentam a sua saída tangenciando o flanco da ferramenta, e em decorrência disto danificam o suporte e a quina da ferramenta. Cavacos em fita, cavacos emaranhados e cavacos fragmentados apresentam um perigo para o operador da máquina-ferramenta e para a peça.

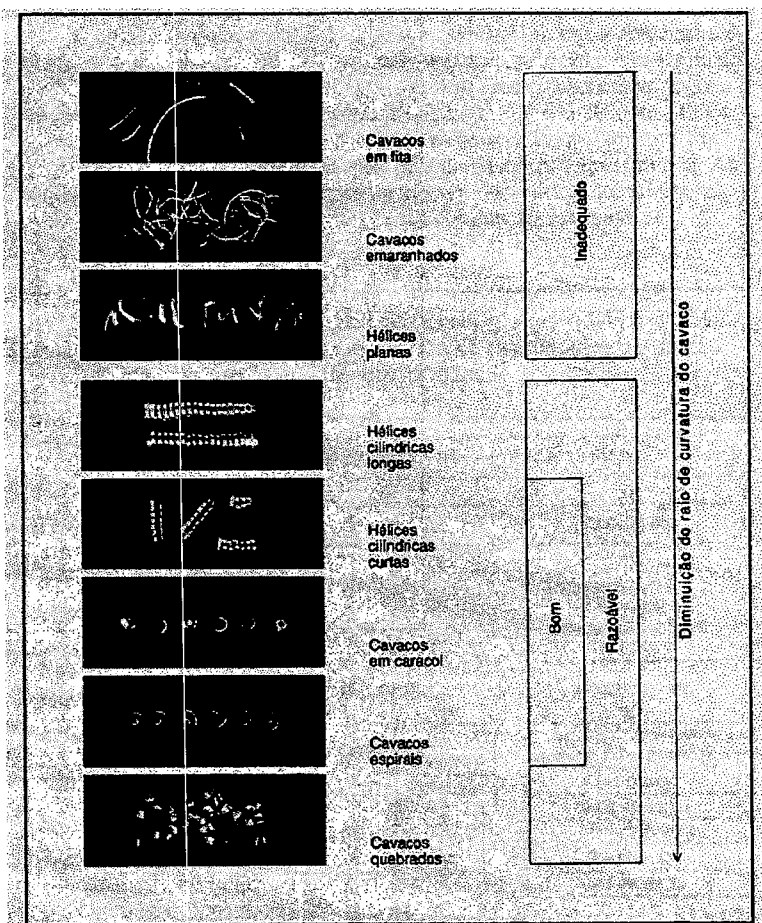


Figura 2.16 Formas de cavaco [19].

(*)

As principais influências sobre a formação dos cavacos são as condições de corte, a geometria da ferramenta e, por parte do material da peça, a ductilidade, a tenacidade e a resistência ou estado metalúrgico do material [16].

Através da diminuição da velocidade de corte ou do ângulo de saída, a fragilidade dos cavacos de materiais não muito elásticos aumenta, devido à maior deformação do cavaco. De maior importância é a influência do avanço e do ângulo de posição. Um aumento do avanço leva a cavacos mais espessos e com maiores gradientes de tensão na região de cisalhamento. Em decorrência, os cavacos quebram com maior facilidade. Com um aumento da profundidade de usinagem devem-se escolher valores maiores de avanço para uma quebra mais favorável do cavaco. Utiliza-se normalmente a relação “profundidade x avanço” como critério de formação de cavaco [16].

A formação de cavacos é bastante influenciada pela resistência e conformabilidade do material. Uma resistência crescente favorece a quebra dos cavacos. Impurezas como inclusões na matriz do metal provocam uma forma de cavaco irregular, de quebra facilitada. Os elementos de liga exercem grande influência sobre a formação dos cavacos.

d) Critério força de corte

⇒ Conceitos Básicos e Definições

A força que atua sobre uma cunha de corte durante a usinagem é denominada força de usinagem (F). A força de usinagem pode ser decomposta em componentes segundo sistemas de referência cartesianos ou polares. O sistema de referência mais comum é o cartesiano, coincidindo geralmente com o sistema cartesiano da máquina-ferramenta. As componentes que assumem importância prática são as contidas no plano de trabalho e no plano efetivo de referência. Elas são mostradas na figura 2.17 e se dividem em [15]:

- no plano de trabalho:

1) Força ativa (F_a) - é a projeção da força de usinagem (F) sobre o plano de trabalho.

2) Força de corte (F_c)- é a projeção da força ativa (F_a) sobre a direção de corte (dada pelo vetor velocidade de corte). Também é denominada de força principal de corte.

3) Força de avanço (F_f)- é a projeção da força ativa sobre a direção de avanço.

No plano efetivo de referência:

4) Força passiva (F_p)- é a projeção da força de usinagem (F) sobre uma direção perpendicular ao plano de trabalho. é também conhecida como força de recuo ou força de profundidade.

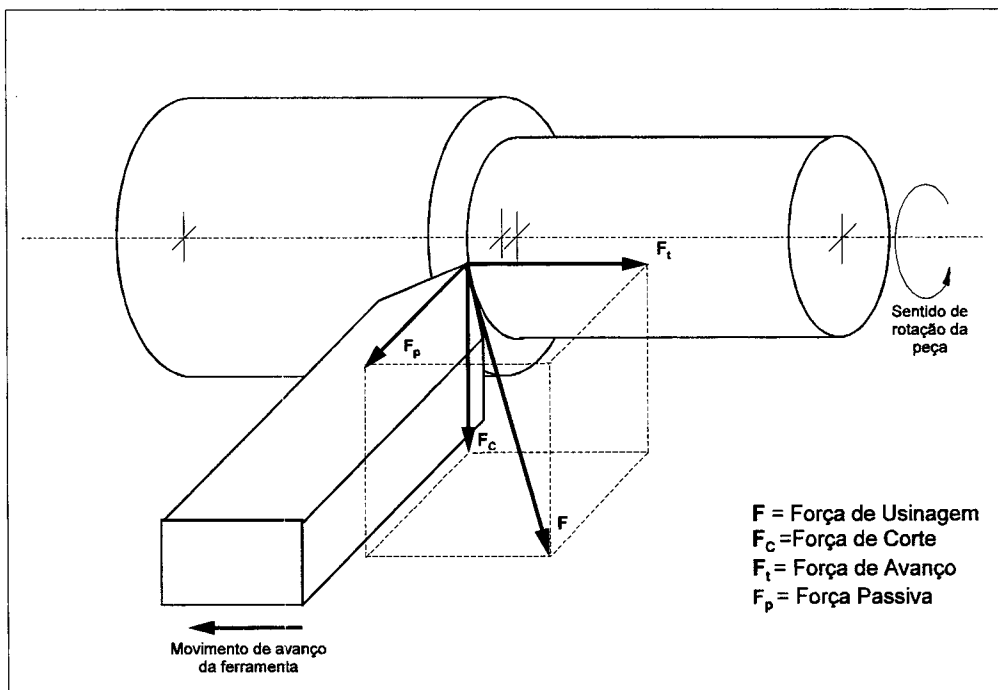


Figura 2.17 Componentes da força de usinagem no torneamento, nos planos de trabalho e efetivo de referência, segundo a norma DIN 6584 [15].

Da figura 2.17 podem ser obtidas as seguintes relações:

$$F_a^2 = F_c^2 + F_f^2 \quad (2)$$

$$F^2 = F_a^2 + F_p^2 \quad (3)$$

$$F^2 = F_c^2 + F_f^2 + F_p^2 \quad (4)$$

As forças referentes a uma seção de corte $b \times h = 1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ são denominadas de força específica de corte e força específica de avanço, e simbolizadas respectivamente por $k_{c.1.1}$ e $k_{f.1.1}$.

Os valores de $k_{c.1.1}$ e $k_{f.1.1}$ são determinados através das equações de Kienzle.

$$F_c = k_{c.1.1} \cdot b \cdot h^{(1-mc)} \quad (5)$$

$$F_f = k_{f.1.1} \cdot b \cdot h^{(1-mf)} \quad (6)$$

A potência efetiva de corte (P_{ef}) é a potência que necessariamente deve estar disponível na quina da ferramenta para ser consumida na operação de remoção de cavacos. É dada pela soma das potências de corte e de avanço.

A potência de corte (P_c) é resultante da soma das parcelas referentes à potência de cisalhamento (requerida para deformar plasticamente o cavaco na zona de deslizamento e cisalhamento) e à potência de atrito (necessária para vencer as resistências de atrito entre cavaco e ferramenta e entre a ferramenta e a peça). É dada pelo produto da força de corte (F_c) pela velocidade de corte (v_c), segundo a equação:

$$P_c = \frac{(F_c \cdot v_c)}{1000 \cdot 60} \text{ [kW]} \quad (7)$$

A potência de avanço (P_f) é dada pelo produto da força de avanço (F_f) com a velocidade de avanço, segundo a equação:

$$P_f = \frac{F_f \cdot v_f}{1000 \cdot 60} \text{ [kW]} \quad (8)$$

Portanto temos:

$$P_{ef} = P_c + P_f \text{ [kW]} \quad (9)$$

A potência de acionamento (P_a) é a potência fornecida pelo(s) motor(es) da máquina-ferramenta. Difere da potência efetiva (P_{ef}) devido às perdas que ocorrem por atrito, engrenamentos, sistemas de lubrificação, etc. [15].

$$P_a = \frac{P_{ef} \cdot 100}{\eta} \text{ [kW]} \quad (8)$$

Uma aproximação bastante boa para o rendimento da máquina ferramenta (η) é o cálculo utilizando a potência em vazio (P_o) da máquina. Está é definida como a potência consumida pela máquina-ferramenta ligada, com o mecanismo de avanço funcionando, porém sem ocorrer retirada de cavaco [15]. Desta forma podemos obter:

$$\eta = \frac{P_a - P_o}{P_a} \quad (10)$$

⇒ Cálculo de Forças Específicas

Kienzle apresentou em 1951 uma equação bastante simples e suficientemente precisa para cálculos práticos da força de usinagem. Na sua equação k_c figura como função da espessura de corte h e não como função do avanço f . Esta propriedade permite aplicar facilmente a equação de Kienzle a todas as operações de usinagem. O aumento de k_c com a diminuição de h é uma propriedade geral que vale para todas as operações de usinagem, conforme ilustrado na figura 2.18 [15].

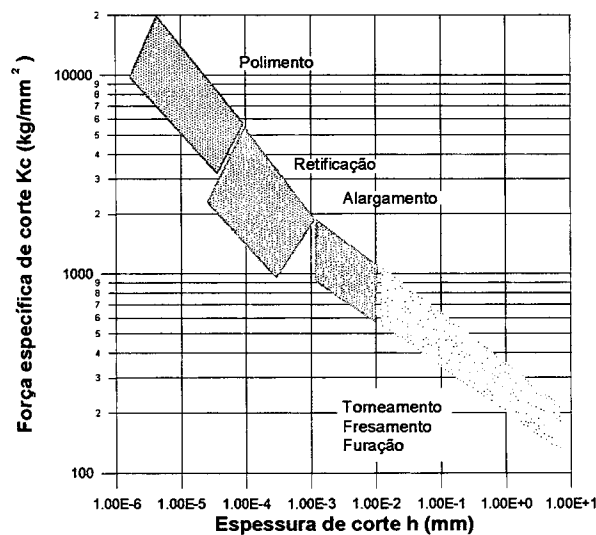


Figura 2.18 Exemplo da variação da força específica de corte com a espessura de corte h para diferentes operações de usinagem de aço-carbono [15].

A figura 2.19 mostra a representação gráfica do valor de k_c em função de h para um determinado par ferramenta-peça. Passando-se à representação num sistema de coordenadas dilogarítmicas, verifica-se que os pontos se alinham numa reta, a qual permite estabelecer a equação [15]:

$$y = A*x + b \quad (11)$$

ou seja:

$$\log K_c = \log K_{c1,1} + (1 - m_c) * \log h \quad (12)$$

ou ainda :

$$k_c = \frac{K_{c1,1}}{h^{(1-m_c)}} \quad (13)$$

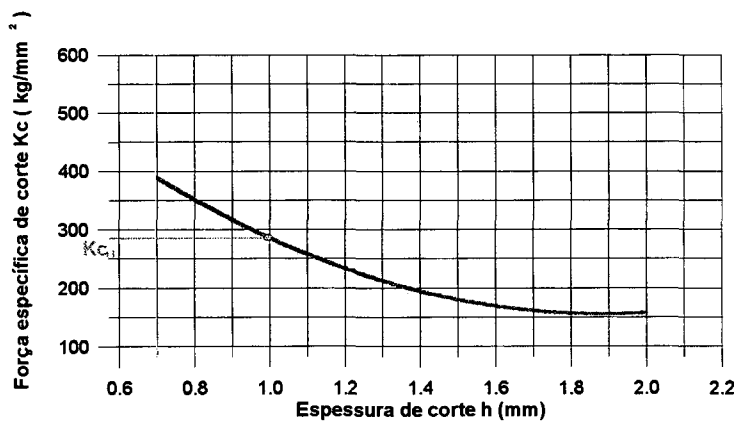


Figura 2.19 Variação da força específica de corte k_c em função da espessura de usinagem h [15].

Para a força principal de corte resulta a expressão:

$$F_c = k_c * b * h = k_{c1,1} * h^{(1-m_c)} * b \quad (14)$$

Esta equação confirma os ensaios nos quais se verificou que, para uma espessura de corte h constante, e para uma relação $ap/f > 4$, tem-se F_c diretamente proporcional com b (figura 2.20).

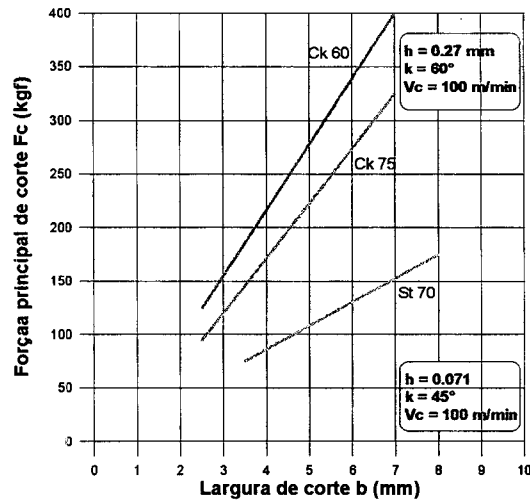


Figura 2.20 Força principal de corte F_c em função da largura de corte b para diferentes pares ferramenta-peça [15].

Nas equações anteriormente apresentadas, a força específica de corte “ k_c ” dependia do ângulo de direção do gume da ferramenta, isto é, k_c era válido para um determinado valor de χ . Na expressão de Kienzle, verifica-se através dos ensaios que para χ compreendido entre 30 e 75 graus, e para uma relação $f/ap > 4$, a força específica de corte k_c permanece praticamente constante, independente do ângulo de direção do gume. Para $\chi > 75$ graus, tem-se a influência do gume secundário da ferramenta sobre o valor de F_c . O valor de k_c das seções de corte de igual espessura h , representadas na figura 2.21, é praticamente o mesmo.

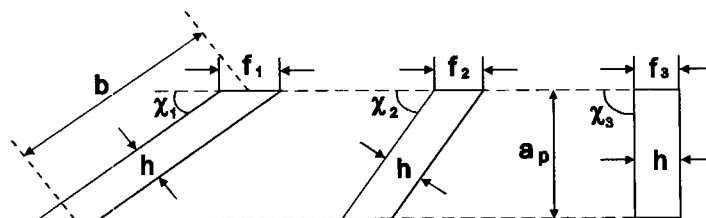


Figura 2.21 Seções de corte com iguais espessuras de corte h .

Ao invés de papel dilogarítmico para a representação dessas funções exponenciais é mais cômoda a utilização de papel milimetrado. Para tanto, empregam-se nos eixos das abscissas e

ordenadas, escalas em progressões geométricas normalizadas, de maneira a permanecerem constantes no gráfico as distâncias entre os números das progressões. A figura 2.22 mostra uma representação dessa natureza, a qual serviu para a determinação das constantes $k_{c,1.1}$ e $(1 - mc)$ do material 34CrMo4. Em virtude das diferenças do material (provenientes da entrega de fornecedores ou de corridas diferentes), dos desgastes das ferramentas, como também de erros e outras influências durante os ensaios, os pontos obtidos estão representados com uma certa faixa de dispersão. Kienzle, ao invés de traçar uma reta média, seguindo o método estatístico do desvio mínimo, preferiu traçar uma faixa contendo 90% dos pontos obtidos no ensaio (permanecendo 5% dos pontos acima da faixa e 5% abaixo). A reta para exprimir a função $\frac{F_c}{b} = k_{c,1.1} * h^{(1-mc)}$ é tomada como aquela que limite superiormente está faixa, permitindo assim uma segurança de 95% no valor da constante $k_{c,1.1}$ em relação ao valor real. Um valor da força 5% maior ao calculado poderia ser suprimido pelo fator de serviço do motor. Na figura 2.22 foi traçada uma reta correspondente a um coeficiente angular $\text{tg } 45^\circ = 1$. Desta forma, os termos mc e $1-mc$ da equação de Kienzle correspondem ao valor de F_c/b para $h = 1$ [15].

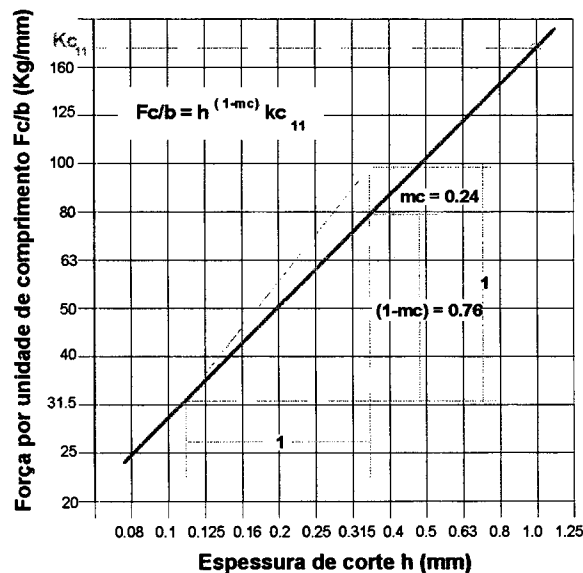


Figura 2.22 Determinação gráfica das constantes $k_{c,1.1}$ e mc do material 34CrMo4, segundo Kienzle [15].

c) Fatores influentes nas componentes da força de usinagem

A força específica de usinagem depende de uma série de fatores, alguns comuns e outros específicos para os diversos processos de usinagem. Aqui serão abordados os fatores influentes em relação ao processo de torneamento. Estes estão divididos em:

- Material da peça: influência na força de corte pelas diversas características mecânicas, como dureza, carga de ruptura e tenacidade, entre outras [28]. As forças específicas de usinagem sofrem influência da composição química, do tratamento térmico e da estrutura da matéria prima bruta a ser usinada [29]. Como uma primeira aproximação, pode-se dizer que a força necessária para a usinagem de um material aumenta com a dureza do mesmo [15].

Para os aços, o aumento da porcentagem de carbono aumenta o valor da força específica de corte, enquanto o aumento na porcentagem de fósforo, bem como de enxofre, acarretam uma diminuição de $k_{c1.1}$ [29].

- Condições de corte (f , a_p , v_c): o avanço f e profundidade de usinagem a_p são variáveis da equação de Kienzle, através da espessura de corte h e da largura de corte b , de modo que através delas pode-se observar suas influências sobre a força específica de corte e de avanço [29]. Aumentando a profundidade de usinagem aumentam as componentes da força de usinagem (só vale se a_p for maior que r_e) (figura 2.23).

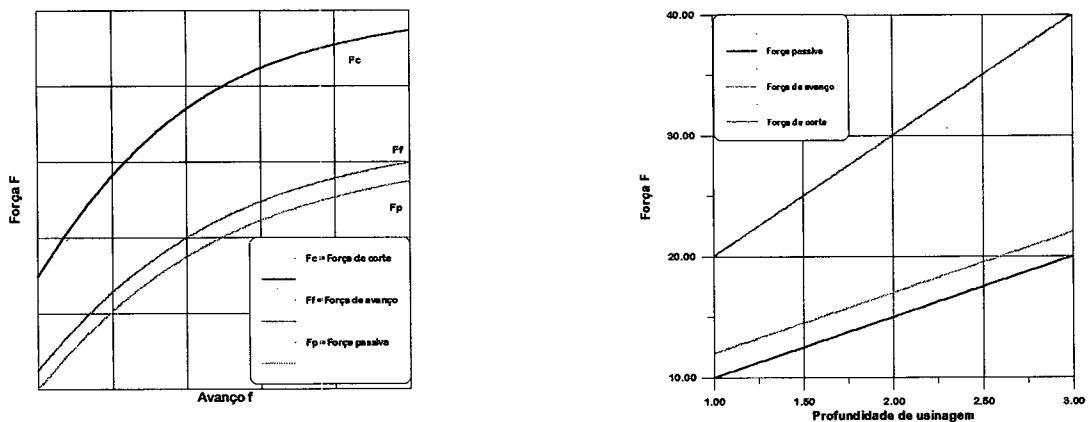


Figura 2.23 Influência do avanço e da profundidade sobre as componentes de força [15].

Para velocidade de corte (v_c), verifica-se que na faixa de velocidade de trabalho de vários metais com ferramentas de metal-duro, a força específica de corte diminui com o aumento da velocidade. Força de avanço e força passiva são mais influenciadas pela velocidade de corte do que força de corte (figura 2.24) [30].

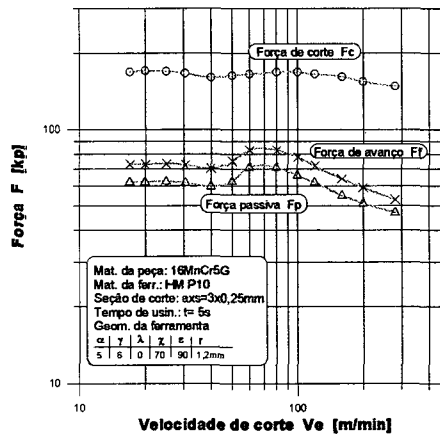


Figura 2.24 Influência da velocidade de corte sobre as forças de corte, avanço e passiva [15].

- Ferramenta (geometria, desgaste, material, rigidez): quanto maior o valor do ângulo de saída (γ_o), menor o valor da força específica de corte. Deve-se notar que o aumento de γ_o diminui a resistência da ferramenta e aumenta a sensibilidade aos choques. Segundo Kronenberg, a força de corte aumenta quase 50% quando o ângulo γ_o varia de 3° até um ângulo negativo de -15° [28]. Kienzle sugere um aumento de 1 a 2% de k_c para cada diminuição de 1° do ângulo γ_o , respectivamente, isto para materiais dúteis.

O ângulo de incidência (α) quando muito pequeno, tende a aumentar a força específica de corte, pois há um aumento de atrito entre a peça e a superfície de incidência da ferramenta. Se α for grande há um enfraquecimento desnecessário da cunha. A força de corte diminui com o aumento do ângulo de posição do gume (χ_r), até 90° . A influência do ângulo de inclinação λ é verificada somente para valores negativos elevados. Neste caso, a força passiva aumenta consideravelmente, podendo fletir a peça ou deslocar transversalmente a ferramenta (figura 2.25).

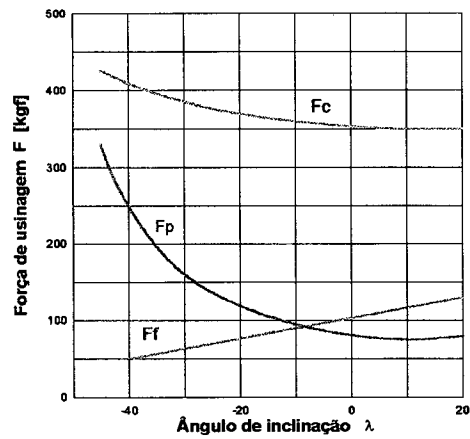


Figura 2.25a. Influência do ângulo de inclinação sobre a força de usinagem no torneamento.

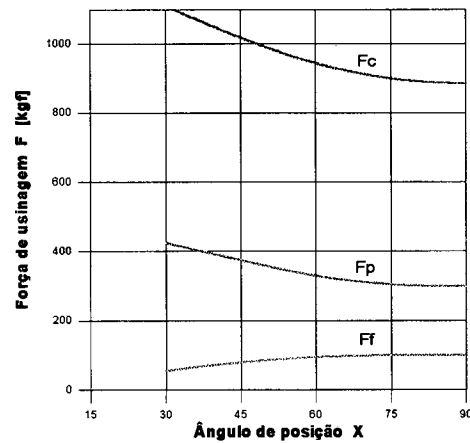


Figura 2.25b. Influência do ângulo de direção do gume sobre as componentes da força de usinagem no torneamento, segundo Schlesinger.

Deve-se observar que os dados experimentais se referem quase sempre a ferramentas afiadas. Com o desgaste da ferramenta deve-se contar com valores 50 a 100% maiores para a força de corte (figura 2.26) [28].

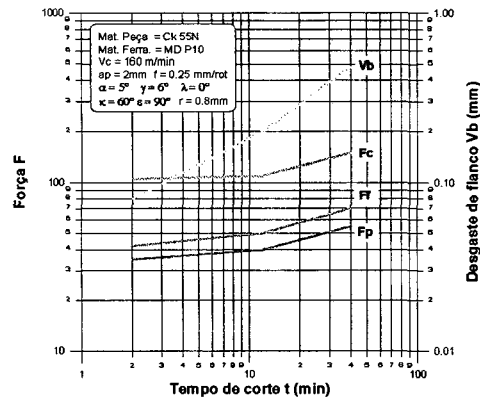


Figura 2.26 Relação entre o desgaste de flanco e a força de usinagem com o tempo.

O material da ferramenta atua principalmente no coeficiente de atrito entre cavaco e ferramenta e, em decorrência disso, principalmente sobre a força de avanço e força passiva. Salvo raras exceções, a força de corte e a potência consumida são independentes do material da ferramenta. Isto é válido tanto para ferramentas de aço-carbono como para aço-rápido, ligas fundidas e metal-duro. Para ferramentas de diamante, entretanto, tem-se encontrado valores às vezes excepcionalmente menores [15].

Segundo ensaios de Berthold e Dresden, a rigidez da ferramenta, quando pequena, acarreta um aumento da força de usinagem [15].

- Dimensões de corte: a força específica de corte diminui com o aumento da área da seção de corte. Está diminuição é mais marcante devido ao aumento do avanço do que ao aumento da profundidade de usinagem. O aumento do avanço diminui o grau de recalque [28].

- Fluido de corte: somente em velocidades de corte baixas os fluidos de corte contribuem para a diminuição da força de usinagem. Está diminuição é tanto maior quanto mais eficiente for a penetração do fluido na zona de contato cavaco-ferramenta, reduzindo o atrito nesta região. Também dependerá da qualidade do fluido de corte [28].

2.6.2. Geometria da ferramenta

A escolha correta da geometria da ferramenta depende de fatores que nem sempre são compatíveis: deseja-se minimizar o desgaste da mesma, reduzir os esforços de usinagem, obter peças de bom acabamento, e, simplificar ao máximo a geometria das mesmas. Sem se falar no compromisso em se manter altas taxas de produtividade [16].

Três fatores devem ser levados em consideração quando se faz a seleção da geometria da ferramenta:

- parâmetros de usinagem e material da peça;
- material da ferramenta;
- material da peça.

a) Parâmetros de usinagem

Os parâmetros de usinagem aqui descritos são velocidade de corte, avanço e profundidade de usinagem. É de grande importância que se escolha estes parâmetros dentro dos limites de potência da máquina ferramenta, características da peça a ser usinada e da ferramenta, para que se obtenha os resultados esperados [16].

- Velocidade de corte (v_c)

A velocidade de corte (v_c) é a velocidade instantânea no ponto de referência da peça, segundo a direção e o sentido de corte.

$$V_c = \frac{\pi * D * n}{1000} \quad (15)$$

onde:

- $D \rightarrow$ diâmetro (mm)
- $n \rightarrow$ rotação (RPM)

A velocidade de corte está relacionada com o diâmetro e a rotação da peça. Mantém uma dependência com a vida da ferramenta, tempo de fabricação, acabamento superficial e potência consumida [16].

Em baixas velocidades de corte ocorre a formação de gume postiço. Altas velocidades de corte fazem com que a temperatura do gume ultrapasse a temperatura limite para o material da ferramenta reduzindo a vida da ferramenta.

A velocidade de corte deve ser otimizada, para diminuir custos ou o tempo de usinagem. Com o aumento da velocidade de corte, têm-se como desvantagens o aumento na potência de corte e a diminuição da vida da ferramenta [16].

A velocidade de corte para aços inoxidáveis austeníticos, empregando ferramentas de metal duro, deve manter-se em torno de 100 m/min [11].

- Avanço (f)

O avanço (f) é definido como sendo a penetração da ferramenta no material da peça, no sentido do avanço da ferramenta. Pode ser ainda definido por avanço por rotação (torneamento e furação), por ciclo, por dente (fresamento, brochamento, etc.). Com a elevação do avanço são obtidos cavacos de maior espessura. Contudo, o avanço é limitado pela resistência estrutural da ferramenta. É necessário, portanto, que se faça um estudo prévio do avanço a ser utilizado, pois com avanços muito elevados temos uma provável ruptura do gume da ferramenta. Para avanços demasiadamente pequenos a ferramenta "patina" e vibra, aumentando a geração de calor [16].

Para o torneamento de aços inoxidáveis austeníticos deve-se observar que para velocidades de corte maiores o avanço seja pequeno, enquanto para baixas velocidades de corte, um avanço maior é necessário [31]. O avanço não deve ser menor do que 0,1 mm/rot., a fim de se evitar o corte de regiões encruadas pelo passe anterior [32].

- Profundidade de usinagem (ap)

A profundidade de usinagem é a profundidade de penetração do gume principal de corte, medida numa direção perpendicular ao avanço [16].

Nos aços inoxidáveis austeníticos, a profundidade de usinagem e o avanço devem ser escolhidos para que a ferramenta trabalhe abaixo da superfície endurecida pelo encruamento do passe anterior. A profundidade de usinagem, com regra geral, deve ser de no mínimo 1 mm. A profundidade de corte, para vários passos seguidos, deve variar, assim se evita um desgaste excessivo na quina da ferramenta [32].

- Fluidos de corte

São características dos aços inoxidáveis a baixa usinabilidade comparada com aços-carbono e aços-ligados e a baixa condutividade térmica que leva a um rápido superaquecimento na interface ferramenta/peça [11].

Os fluidos de corte entram nesse contexto com a tarefa de reduzir os custos de usinagem desse material pela redução do desgaste da ferramenta e melhoria da superfície do componente fabricado [11]. São objetivos conseguidos por suas funções básicas:

- refrigeração e lubrificação da ferramenta de corte e da peça, na zona adjacente a região de corte;
- variar a curvatura do cavaco;
- transporte do cavaco para fora da região de trabalho.

Em processos de usinagens, onde são usadas baixas velocidades de corte, recomenda-se o uso de fluidos que possuam boas características de lubrificação. Ao contrário, em processos de usinagens, onde são usadas altas velocidades de corte o fluido deve ter, principalmente, boas características refrigerantes [33].

Como regra geral pode-se estabelecer o seguinte:

- Para processos de usinagens com baixas velocidades de corte usam-se óleos com ou sem aditivos EP (extrema pressão).

- Para processos de usinagens com altas velocidade de corte usam-se emulsões aquosas.

Óleos sulfoclorados contendo 8 a 10% de óleos graxos são usados nas condições de mais baixa usinabilidade, podendo-se ainda misturá-los à parafina na proporção de 1:1 em casos de elevado desgaste [16].

Têm influência ponderável no desempenho e rendimento dos fluidos de corte o modo como estes são usados, isto é, volume, pressão, ângulo de impacto, bem como a forma e o número de bocais. É importante que o meio lubri-refrigerante seja aplicado antes e não depois do início do processo de usinagem, não podendo também acontecer interrupção na alimentação do fluido [33].

É tendência mundial a reciclagem parcial ou total (se possível) dos fluidos lubri-refrigerantes visando a despoluição do meio ambiente, bem como a economia desse processo em relação à simples compra do produto [33].

Os dois parâmetros mais importantes para a seleção do processo de reciclagem adequado são o tipo de fluido a depurar (miscível em água ou não, com aditivo ou não) e o tipo de contaminação que sofreu (tipo de cavaco, com ou sem óleo da máquina, etc.) [33].

b) Máquinas-ferramentas

A característica mais importante em uma máquina-ferramenta para a usinagem de aço inoxidável austenítico é sua rigidez em operação, como solução para erradicar eventuais vibrações. Por isso o projeto de uma máquina-ferramenta deve possuir:

- Estrutura com grande momento de inércia em relação à peça a trabalhar;
- Boa fixação à base, se possível com pinos e juntas de materiais absorventes de vibrações.
- O melhor ajuste possível dos componentes dinâmicos da máquina, como correto balanceamento de engrenagens e polias, engrenamento correto, ausência de folgas nos mancais, rigidez da árvore principal.

As máquinas-ferramentas para a usinagem de aço inoxidável austenítico devem possuir alta potência, devido não às velocidades de corte que estão na faixa de 100 a 140 m/min, mas sim ao alto torque necessário para vencer as forças de corte que são das mais altas entre os materiais ferrosos [16].

2.7. USINABILIDADE DO AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO

Entre os aços inoxidáveis, os aços inoxidáveis austeníticos são os que oferecem maiores dificuldades durante a usinagem, não somente por sua estrutura austenítica que não admite têmpera e pode provocar o empastamento do elemento cortante, mas também porque esta estrutura pode transformar-se parcialmente durante a usinagem e ser causa do desgaste da ferramenta [11].

Em geral, são requeridas maiores potências de usinagem para aços inoxidáveis do que aços ao carbono. As velocidades de corte e avanços são menores e os sistemas de fixação da ferramenta devem ser extremamente rígidos, necessitando-se utilizar quebra cavacos.

Os aços inoxidáveis são tenazes, elásticos e adquirem tendência, quando usinados, a aderir e atritar com a ferramenta [7], produzindo gume postiço. Desta maneira, há a redução da vida da ferramenta e degradação da superfície usinada. Essas características gerais são devidas às seguintes propriedades do material usinado:

- alta resistência à tração;
- grande diferença entre o limite de escoamento e o limite de ruptura;
- alta taxa de encruamento;
- baixa condutividade térmica [3].

A série 400 é considerada de melhor usinabilidade, no entanto, produzem um cavaco fino e comprido que retarda o ritmo da produção. As séries 200 e 300 são caracterizadas por serem de difícil usinabilidade, primeiro devido à sua alta ductilidade, depois, devido à sua forte tendência a encruamento quando solicitadas em condições de usinagem severas.

Determinados elementos de liga, como enxofre, selênio, chumbo, cobre, alumínio ou fósforo, são adicionados ao aço inox com a finalidade de alterar as características de usinabilidade. Possuem como função principal a capacidade de redução do atrito entre peça e ferramenta. No entanto, o uso de elementos de liga para aumentar a usinabilidade afeta contrariamente a resistência à corrosão, ductilidade transversal, soldabilidade e outras propriedades [7]. Em aços inoxidáveis austeníticos que não contenham elementos favorecedores de usinabilidade recomenda-se realizar uma pequena deformação a frio para elevar a dureza a valores compreendidos entre 180 e 240 Brinell, e assim conseguir um certo encruamento que favorecerá a sua usinagem.

Para se conseguir usinar aços austeníticos sem problemas, um grande número de regras devem ser observadas:

- É importante ter uma máquina robusta, com alta potência e elevada rigidez para que as vibrações decorrentes da força passiva sejam minimizadas.
- O porta ferramenta deve ter a maior seção transversal possível e o balanço deve ser mínimo.
- Para evitar que o gume da ferramenta se fragilize é recomendado aumentar a sua resistência, estabelecendo um ângulo de incidência secundário (α_1) inferior a 10° .
- Para se diminuir ao máximo o calor gerado no atrito entre cavaco/ferramenta durante o processo é necessária uma máxima amplitude possível do ângulo de saída (γ) (conforme norma de 7 a 12°). É recomendado ainda um raio de quina de 0.8 mm para profundidades de corte inferiores a 3 mm e $1,2$ mm para profundidades de corte até 10 mm.
- Um fator decisivo é a qualidade da ferramenta. Recomenda-se um ângulo de posição menor que 90° . O gume deve ser resistente ao desgaste à abrasão e também bem afiado. O raio de quina deve ser o maior possível. Não é recomendável a utilização de pequenas profundidades de corte (no mínimo 1 mm, a fim de se evitar o corte somente de regiões encruadas).
- As pastilhas não devem ser muito gastas ($VB_{\text{máx}} 0.3$), senão os trabalhos posteriores serão prejudicados através do encruamento, principalmente na usinagem fina, de roscas ou brochamento.
- Também por motivo de encruamento o avanço não deve ser menor que $0,1$ mm/rot. [7].

- A profundidade de usinagem deve variar para passes seguidos, assim evita-se o desgaste excessivo da quina [32].
- Devido á sua menor condutividade térmica, os aços inoxidáveis austeníticos necessitam de uma ferramenta maior para facilitar a dissipação de calor [31].
- O fluido de corte deve ser adequado e a vazão e pressão devem ser otimizadas para melhor resfriamento da ferramenta e eliminação dos cavacos menores [32]. Como fluido de corte é recomendado utilizar óleo solúvel na proporção de 5 a 10%, para se obter uma boa refrigeração.

CAPÍTULO 3

EQUIPAMENTO UTILIZADO NOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS E AFERIÇÕES

A parte experimental deste trabalho foi realizada nos laboratórios do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina. Os corpos de Prova para a determinação da usinabilidade dos aços inoxidáveis austeníticos SAE 304 e SAE 316, bem como, as ferramentas (insertos reversíveis) e respectivo porta-ferramenta da SANDVICK, foram cedidas no escopo do convênio firmado entre a SIDERÚRGICA RIOGRANDENSE S.A. e a UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA.

3.1 A MÁQUINA-FERRAMENTA

Utilizou-se como máquina-ferramenta para os ensaios de usinabilidade, dois tornos de fabricação nacional com variação contínua de velocidade, dentro de um intervalo. A seguir são fornecidas as especificações de cada equipamento:

- Máquina: Torno Universal, marca Imor.
 - Modelo: P-400;
 - fabricante: Indústrias ROMI S.A.;
 - distância entre pontas: 1000 mm;
 - diâmetro admissível sobre o barramento: 430 mm;
 - potência instalada: 22 kW;
 - rotação máxima: 1500 rpm.

- Equipamentos de medição:
 - Taco gerador (medição de rotação do torno):
 - Fabricante: WEG Máquinas S.A.
 - Modelo: 1.R/60;
 - Constante de proporcionalidade: 0.06 V/rpm.

- Máquina: Torno universal, marca ROMI
 - Modelo: I-45;
 - fabricante: Indústrias ROMI S.A.;
 - distância entre pontas: 3000 mm;
 - diâmetro admissível sobre o barramento: 620 mm;
 - potência instalada: 20 cv;
 - torque admissível: 12750 N.m;
 - gama de velocidades: 20 a 1500 rpm;
 - avanços longitudinais: 0,050 a 18 mm/rot;
 - avanços transversais: 0,017 a 6 mm/rot.

3.2 FERRAMENTA E PORTA-FERRAMENTA

A ferramenta utilizada na usinagem foi uma pastilha de metal-duro revestida com nitreto de titânio com as seguintes especificações:

- fabricante: SANDVIK Coromant
- geometria: SNMG 12 04 08 - QM
- classe: GC 435 (P45, M35)

A fixação da ferramenta foi por suporte porta -ferramenta com as seguintes especificações:

- fabricante: SANDVIK Coromant

– classificação: PSBNR 25 25M 12

- obs. Os ítems "ferramenta de corte" e "fixação da ferramenta" foram determinados conforme indicação do fabricante, sendo a ferramenta, a mais indicada para a usinagem do aço inoxidável SAE 304.
- Utilizando um microscópio óptico verificaram-se as condições iniciais em que se encontravam as ferramentas de corte, bem como o valor dos ângulos que compõe a sua geometria. Qualquer defeito observado na geometria ou material, a ferramenta era desconsiderada para o ensaio.

3.3 EQUIPAMENTO PARA A MEDIÇÃO DAS COMPONENTES DA FORÇA DE USINAGEM

Foram medidas numa plataforma piezelétrica as forças de corte (F_c) e de avanço (F_f). A força de corte foi medida e analisada a sua evolução com a variação dos parâmetros de corte. A força de avanço foi utilizada a título observação. A força passiva (F_p) foi desconsiderada, em virtude de seu menor valor, em relação as duas outras forças e ter-se a disposição apenas dois cabos em condições de uso.

Na plataforma piezelétrica o sinal da força produzida é captado. Um amplificador de sinais amplifica o sinal gerado pela plataforma e remete a um analisador de sinais (Data Acquisition), que transforma o sinal emitido em gráfico, mostrando em tempo real de usinagem o comportamento da força de corte. Um software (SADA), para microcomputador PC, trata os dados do analisador de sinais. A montagem do sistema de medição de força esta mostrada abaixo.

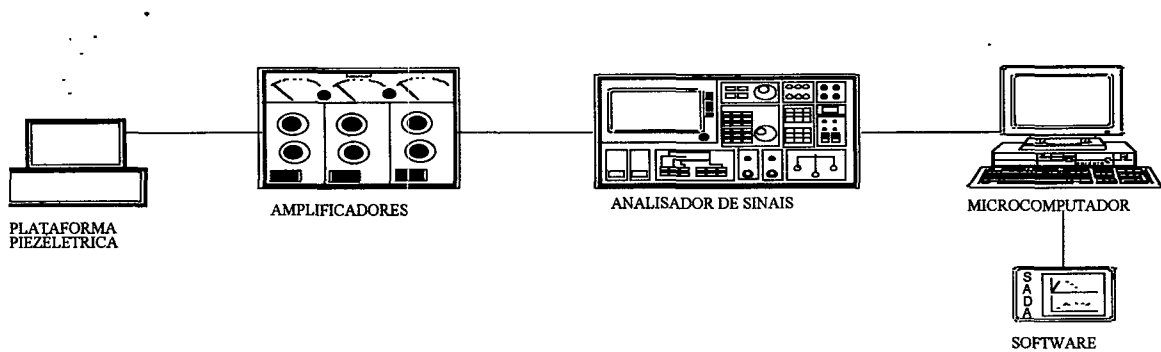


Figura 3.1 Montagem do sistema de medição de forças de usinagem

3.3.1 Dados Técnicos

- Plataforma Piezométrica

A plataforma piezométrica utilizada dispõe de três canais de saída capazes de mostrar a força de avanço (F_f), força de corte (F_c) e a força passiva (F_f).

Dados técnicos:

- Fabricante: KISTLER INSTRUMENTE AG.
- Modelo: 9263
- Faixas de medição (N):
 - 0...15000 para F_x (F_f) e F_y (F_p)
 - 0...30000 para F_z (F_c)
- Sensibilidade (pC/N):
 - 3.94 para F_x (F_f)
 - 3.96 para F_y (F_p)
 - 3.72 para F_z (F_c)

- Linearidade:
 - 0.3% para Fx (Ff) e Fy (Fp)
 - 0.5% para Fz (Fc)
- Faixa de temperatura: 0 a 70 °C

- Amplificador de sinais:

Tem a finalidade de converter sinais de carga elétrica em tensões proporcionais aos carregamentos mecânicos.

Dados técnicos:

- Fabricante Kistler Instrumentos A.G.
- Modelo 5006
- Faixa de medição $\pm 10 \dots 500.000$ pC
- Sensibilidade mecânica 0,1.....11.000 pC/unidade
- Sinal parasita do cabo $3 \cdot 10^{-5}$ pCrms/pF
- Impedância de entrada 100 T
- Faixa de frequência 0...180kHz
- Linearidade $\pm 0,05\%$
- Incerteza de medição $\pm 1\%$
- Temperatura de utilização 0...50 °C
- Precisão: < 3% para as faixas de medição mais sensíveis.

- Analisador de sinais (DATA ACQUISITION)

Responsável pela conversão do sinal analógico em digital.

- Dados técnicos:
- Fabricante Hewlett-Packard

- Modelo 3497 A
- Impedância de entrada $> 10^{10}$ (escala de 1 a 10 V)
- Mohms $\pm 0,5\%$
- (escala 100 V)
- Resolução 10 mV (para 3 dígitos,
- (escala 10V)
- Número de aquisições/seg. 12

- Microcomputador

- Dados técnicos
- Fabricante Samsung
- Modelo 486 DX - 66 MHz
- RAM memory 8 Mbytes

- Softwares:

AQUISI (aquisição dos dados); SADA (análise dos dados).

3.4 SISTEMA PARA A MEDIÇÃO DOS DESGASTES DA FERRAMENTA

Neste trabalho, o critério de fim de vida estabelecido foi o desgaste de flanco (V_B). Entretanto, o desenvolvimento de cratera sempre foi observado. Para a medição do desgaste de flanco e largura de cratera, foi utilizado um microscópio de ferramentaria (figura 3.2).

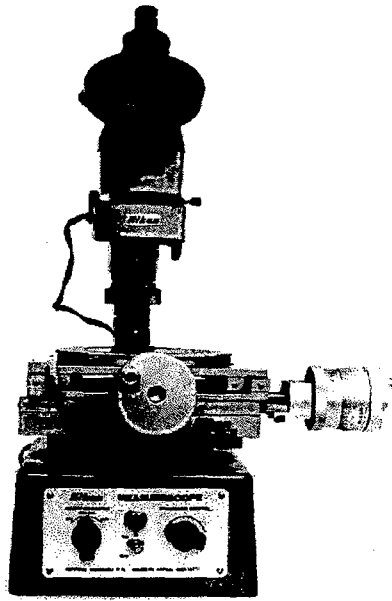


Figura 3.2 Microscópio de ferramentaria usado para a medição do desgaste de flanco

Dados técnicos:

Fabricante: Nikon - Japão

Modelo: Mesuriscopo

Mesa micrométrica com campo de medição de 50 x 100 mm.

Resolução da mesa micrométrica: 0.001 mm.

3.5 EQUIPAMENTO PARA A MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE SUPERFICIAL (RUGOSÍMETRO)

Dados técnicos:

Fabricante: Feinpruef GmbH

Modelo: Perthometer M3A

Trajectoria de deslocamento: 1.5 - 60 mm

Precisão de deslocamento: ± 0.2 - 60 mm

Velocidade de apalramento: 0.5 - 0.1 mm/s $\pm 5\%$

Velocidade de retorno: 1.5 mm/s

Posicionamento vertical:

grossoiro: 135 mm, -20 para a superfície estabelecida.

fino: 20 mm, através do parafuso de posicionamento.

Posicionamento horizontal:

grossoiro: através do botão correspondente.

fino: botão para posicionamento fino

Ajuste de inclinação:

$\pm 1^\circ$, através do parafuso de posicionamento fino.

3.6 METALOGRAFIA CONVENCIONAL E QUANTITATIVA E EQUIPAMENTO UTILIZADO

Para se efetuar a análise de microestrutura dos respectivos aços em estudo, as amostras foram progressivamente lixadas (120, 220, 320, 400, 600 mesh), posteriormente polidas com alumina (1 μm) e atacadas com uma mistura de picral e HCl. As fotos foram tiradas num microscópio da marca NEOPHOTO-30, com aumento de 100x.

Microscópio: NEOPHOT-30

Fabricante: Carl Zeiss-Jena

Magnificação: 100x

3.6. MÁQUINAS UTILIZADAS NOS ENSAIOS MECÂNICOS

Para os ensaios de resistência a tração, foi usada uma máquina universal de ensaios.

Na determinação da microdureza do material foi utilizada uma SHIMADZU HMV-2000, sendo a impressão efetuada com um prisma de diamante e medida a dureza Vickers.

CAPÍTULO 4

MATERIAL USADO E SUA CARACTERIZAÇÃO

Tendo por finalidade a verificação de possíveis alterações na usinabilidade dos materiais, correlacionadas com a variação da composição química, tipo de microestrutura, variação das propriedades mecânicas e físicas, os aços SAE 304 (corridas A35591 (CONVENCIONAL) e B57577 (MODIFICADO)) e SAE 316 (corridas A35621 (CONVENCIONAL) e BT59162 (MODIFICADO)), foram rastreados.

4.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

A análise química dos materiais foi fornecida pelo fabricante (Siderúrgica Riograndense). É importante acrescentar que, apesar da variação química apresentada, esta não se apresentou de forma significativa, pois todos os elementos químicos estavam dentro de uma faixa permissível e estas variações apresentadas não são controladas no processo de fabricação. As variações de todos os elementos de liga nas duas corridas diferenciadas, respectivamente de SAE 304 e SAE 316, segundo tabela 2.2, estão dentro das faixas permissíveis de tolerância de fabricação. A composição química de cada material é mostrada nas tabelas a seguir.

É importante verificar que o enxofre está presente nos aços inoxidáveis como impureza, em teores até 0.03 %, uma vez que, quando adicionado intencionalmente para melhorar a usinabilidade, como é o caso dos aços SAE 303 e SAE 316F, seus valores situam-se por volta de 0.1 a 0.15 %. Portanto não pode ser creditada à simples variação do teor de enxofre nas ligas, uma eventual melhoria nas características de usinabilidade.

- AFP 725 (SAE 304), correspondente a corrida A35591 (CONVENCIONAL) e B57577 (MODIFICADO).

Tabela 4.1 Composição química (A35591 (CONVENCIONAL) e B57577 (MODIFICADO))

Elementos de Liga	A35591 (%)	B57577 (%)
C	<i>0.0700</i>	<i>0.0500</i>
Ca	<i>0.0009</i>	<i>0.0010</i>
Co	<i>0.1400</i>	<i>0.1600</i>
Cr	<i>18.8200</i>	<i>19.7900</i>
Cu	<i>0.2500</i>	<i>0.2500</i>
B	<i>0.0015</i>	<i>0.0026</i>
Al	<i>0.0100</i>	<i>0.0080</i>
Mg	<i>0.0060</i>	<i>0.0080</i>
Mn	<i>1.7500</i>	<i>1.8400</i>
Mo	<i>0.4000</i>	<i>0.2400</i>
N	<i>0.0261</i>	<i>0.0026</i>
Nb	<i>0.0060</i>	<i>0.0010</i>
Ni	<i>8.9300</i>	<i>10.0000</i>
P	<i>0.0420</i>	<i>0.0420</i>
Pb	<i>0.0040</i>	<i>0.0030</i>
S	<i>0.0210</i>	<i>0.0300</i>
Si	<i>0.5000</i>	<i>0.5500</i>
Sn	<i>0.0130</i>	<i>0.0150</i>
Ti	<i>0.0050</i>	<i>0.0050</i>
V	<i>0.0500</i>	<i>0.0500</i>
W	<i>0.1700</i>	<i>0.0900</i>

- AFP-727 (SAE 316), correspondente a corrida A35621 (CONVENCIONAL) e BT59162 (MODIFICADO)

Tabela 4.2. Composição química (A35621 (CONVENCIONAL) e BT59162 (MODIFICADO))

Elementos de Liga	A35621 (%)	BT59162 (%)
C	<i>0.0600</i>	<i>0.0300</i>
Ca	<i>0.0010</i>	<i>0.0010</i>
Co	<i>0.1700</i>	<i>0.1900</i>
Cr	<i>16.800</i>	<i>16.6000</i>
Cu	<i>0.5600</i>	<i>0.1600</i>
B	<i>0.0020</i>	<i>0.0032</i>
Al	<i>0.0080</i>	<i>0.0050</i>
Mg	<i>0.0080</i>	<i>0.0080</i>
Mn	<i>1.7200</i>	<i>1.7900</i>
Mo	<i>2.1800</i>	<i>2.1000</i>
N	<i>0.0021</i>	<i>0.0035</i>
Nb	<i>0.0010</i>	<i>0.0040</i>
Ni	<i>11.1600</i>	<i>12.1600</i>
P	<i>0.0370</i>	<i>0.0320</i>
Pb	<i>0.0030</i>	<i>0.0030</i>
S	<i>0.0230</i>	<i>0.0300</i>
Si	<i>0.5800</i>	<i>0.4600</i>
Sn	<i>0.0130</i>	<i>0.0150</i>
Ti	<i>0.0100</i>	<i>0.0050</i>
V	<i>0.0600</i>	<i>0.0500</i>
W	<i>0.0800</i>	<i>0.0900</i>

4.2 MICROESTRUTURA

O tamanho dos grãos dos componentes microestruturais dos materiais foi determinado conforme prescreve a norma ABNT-NBR 6000/80. Os aços inoxidáveis austeníticos apresentaram as seguintes análises estruturais:

4.2.1 AFP 725 (SAE 304)

O aço AFP 725 (SAE 304), correspondente à corrida A35591 (CONVENCIONAL), apresentou grãos irregulares de austenita e pontos dispersos de partículas de carbonetos. O aço AFP 725 (SAE 304), correspondente a corrida B57577 (MODIFICADO), apresentou grãos de tamanho significativamente menor que o anterior. Foi evidenciada em sua estrutura a presença de ferrita- δ , caracterizada pelo surgimento de listras escuras na matriz austenítica. As figuras 4.1 e 4.2 apresentam respectivamente a microestrutura dos materiais descritos.

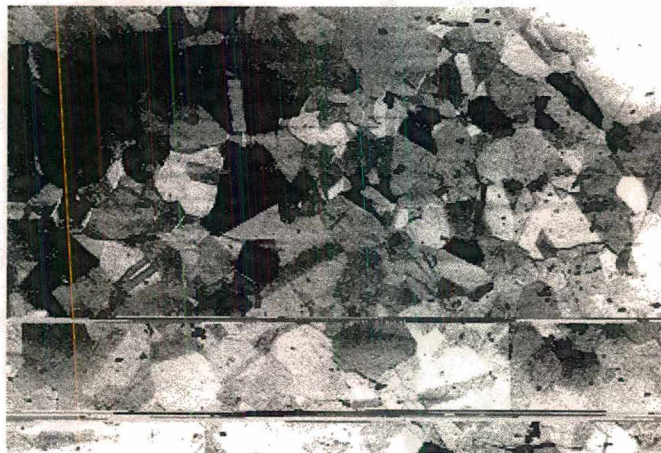


Figura 4.1 Microestrutura do aço SAE 304 (A35591 (CONVENCIONAL)), ataque com uma mistura de picral e HCl. Aumento 100x.



Figura 4.2 Microestrutura do aço SAE 304 (B57577 (MODIFICADO)), ataque com uma mistura de picral e HCl. Aumento 100x.

4.2.2 AFP 727 (SAE 316)

O aço AFP-727 (SAE 316), correspondente a corrida A35621 (CONVENCIONAL), é representado tendo os contornos de grãos bem definidos na estrutura austenítica. O aço AFP-727 (SAE 316), correspondente a corrida BT59162 (MODIFICADO), apresentou grãos de tamanho significativamente menor que o anterior. Foi evidenciada em sua estrutura a presença de ferrita- δ , caracterizada pelo surgimento de listras escuras na matriz austenítica. As figuras 4.3 e 4.4 apresentam, respectivamente, a microestrutura dos materiais descritos.



Figura 4.3 Microestrutura do aço SAE 316 (A35621 (CONVENCIONAL)), ataque com uma mistura de picral e HCl. Aumento 100x.

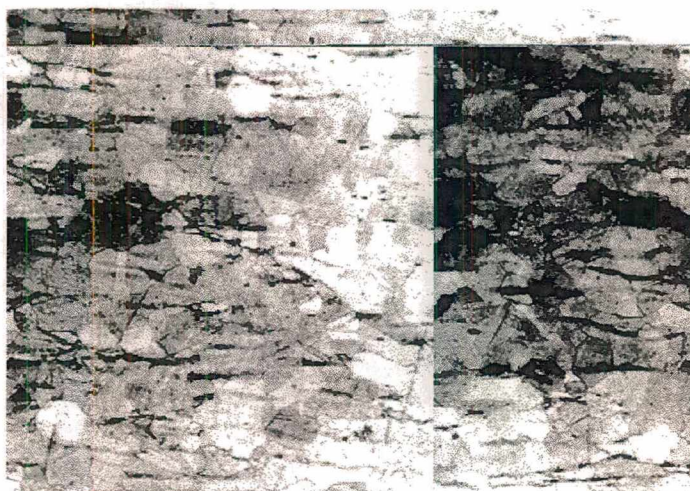


Figura 4.4 Microestrutura do aço SAE 316 (BT59162 (MODIFICADO)), ataque com uma mistura de picral e HCl. Aumento 100x.

4.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS E FÍSICAS

4.3.1 Micro-dureza

Foram consideradas as normas ABNT-NBR 6394/80, NBR 6671/81 e NBR 6672/81 referentes à realização de ensaios de dureza.

Os corpos de prova foram obtidos de uma seção transversal, central, dos corpos de prova usados para os ensaios de usinagem. Neste caso, tomou-se aleatoriamente uma amostra de cada série. Verificou-se a variação de micro-dureza ao longo das amostras e comparou-se por intermédio de um teste t os dois tipos de cada material. As tabelas a seguir mostram as medidas de micro-durezas encontradas durante o ensaio.

- AFP 725 (SAE 304), correspondente a corrida A35591 (CONVENCIONAL)

Tabela 4.3 Medidas de microdureza (A35591 (CONVENCIONAL))

Teste	D1	D2	HV
1	24.5	24.9	151
2	21.5	23.9	179
3	24.0	25.1	153
4	20.9	21.5	206
5	21.4	21.5	201

Tabela 4.4 Resultados das microdurezas (A35591 (CONVENCIONAL))

Material	X	S	HV _{min}	HV _{máx}
AFP 725 (SAE 304), A35591	178	25.57	151	206

- AFP 725 (SAE 304), correspondente a corrida B57577 (MODIFICADO)

Tabela 4.5 Medidas de microdureza (B57577 (MODIFICADO))

Teste	D1	D2	HV
1	21.9	20.9	202
2	19.3	20.4	235
3	22.2	23.3	179
4	21.2	21.3	205
5	22.8	20.3	199

Tabela 4.6 Resultados das microdurezas ((B57577 (MODIFICADO))

Material	X	S	HV _{min}	HV _{max}
AFP 725 (SAE 304), B57577	204	20.12	179	235

Obs: Fazendo-se uma análise estatística comparativa entre os dois valores, foi encontrado um valor de t correspondente a 1.77, com nível de significância igual a 0.11356, o que leva a concluir que os dois materiais possuem durezas semelhantes.

- AFP-727 (SAE 316), correspondente a corrida A35621 (CONVENCIONAL)

Tabela 4.7 Medidas de microdureza (A35621 (CONVENCIONAL))

Teste	D1	D2	HV
1	23.2	22.5	177
2	22.0	22.0	191
3	23.6	22.7	173
4	23.2	23.7	168
5	22.8	22.9	177

Tabela 4.8 Resultados das microdurezas (A35621 (CONVENCIONAL))

Material	X	S	HV _{min}	HV _{max}
AFP 727 (SAE 316), A35621	177	8.616	168	191

- AFP-727 (SAE 316), correspondente a corrida BT59162 (MODIFICADO)

Tabela 4.9 Medidas de microdureza (BT59162 (MODIFICADO))

Teste	D1	D2	HV
1	24.5	24.8	152
2	24.8	24.4	153
3	22.5	23.2	177
4	23.7	23.5	166
5	23.0	22,5	179

Tabela 4.10 Resultados das microdurezas (BT59162 (MODIFICADO))

Material	X	S	HV _{min}	HV _{max}
AFP 727 (SAE 316), BT50162	165	12.74	152	179

Obs: Fazendo-se uma análise estatística comparativa entre os dois valores, foi encontrado um valor de t correspondente a 1.71 , com nível de significância igual a 0.12, o que leva a concluir que os dois materiais possuem durezas semelhantes.

4.3.2 Resistência à Tração e Alongamento

Os ensaios foram executados conforme norma ABNT-NBR 6152/80. As barras foram extraídas dos corpos de prova utilizados nos ensaios de usinabilidade.

A tabela abaixo apresenta os resultados experimentais dos ensaios de resistência à tração e alongamento.

Tabela 4.11 Sumário dos resultados de resistência à tração e alongamento

Material	Tensão de ruptura σ_r (N/mm ²)	s	Alongamento (%)	s
AFP 725 (SAE 304), A35591	599.95	9.55	64.5	0.79
AFP 725 (SAE 304), B57577	578.05	6.05	57.8	0.71
AFP 727 (SAE 316), A35621	579.6	5.10	63.3	1.85
AFP 727 (SAE 316), BT50162	540.2	2.6	56.9	0.25

Fazendo-se uma análise de grupo com níveis aleatórios, verificou-se as possíveis variabilidades naturais existentes entre cada amostra.

Tabela 4.12 Análise de variância para o AFP 725 (SAE 304)

Variabilidade	F
Tensão de ruptura entre A35591 e B57577	3.54
alongamento entre A35591 e B57577	105.04

Tabela 4.13 Análise de variância para o AFP 727 (SAE 316)

Variabilidade	F
Tensão de ruptura A35621 e BT50162	47.37
alongamento entre A35621 e BT50162	11.75

Para as condições do experimento obteve-se um valor de $F_{0.05}(1, 2)$, tabelado, igual a 18.51. Pode-se afirmar, para o AFP 725 (SAE 304), que não existiu uma variabilidade significativa na tensão de ruptura entre os dois materiais. O mesmo não ocorreu para a variação do alongamento.

Com relação ao AFP 727 (SAE 316) ocorreu uma variabilidade significativa na tensão de ruptura entre os dois materiais. No entanto, para o alongamento não foi percebida uma variação significativa.

CAPÍTULO 5

ENSAIOS DE USINABILIDADE

5.1 INTRODUÇÃO

A usinabilidade dos aços inoxidáveis austeníticos AFP 725 (SAE 304) e AFP 727 (SAE 316) foi determinada através de ensaios de longa duração de torneamento externo longitudinal empregando-se ferramentas de metal duro revestidas (GC 435). Para tanto, são fornecidas informações a respeito de vida de ferramenta, forças de usinagem e regiões de formação de cavaco, e realizadas comparações estatísticas.

Os resultados são mostrados na forma de gráficos, onde são fornecidas as curvas de desgaste e de vida de ferramentas para determinadas velocidades de corte com a determinação dos coeficientes da equação de Taylor. Também são mostrados gráficos de forças de corte e determinada a força específica de corte ($k_{c1.1}$) para cada material, com a obtenção do coeficiente angular de Kienzle ($1 - mc$). São verificadas ainda, as alterações na formação de cavacos com as variações dos parâmetros de usinagem (avanço e profundidade de corte).

A fim de se ter uma posição correta em respeito da relação de usinabilidade dos materiais AFP 725 (SAE 304) e AFP 727 (SAE 316), com duas corridas diferentes para cada um respectivamente, de maneira a comprovar a vantagem ou não de um material em relação ao outro, são utilizadas ferramentas estatísticas para análise do processo.

5.2 PROCEDIMENTOS DOS ENSAIOS E CARACTERIZAÇÃO DOS PARÂMETROS USADOS

5.2.1 Especificação da Ferramenta

A ferramenta utilizada para usinagem foi uma pastilha de metal duro revestida com nitreto de titânio com as seguintes especificações:

- fabricante: SANDVIK Coromant
- geometria: SNMG 12 04 08 - QM
- classe: GC 435 (ISO P35)

A escolha da ferramenta foi estabelecida baseada em recomendações da literatura e da disponibilidade de ferramentas.

Utilizando um microscópio óptico e de ferramentaria verificaram-se as condições iniciais em que se encontravam as ferramentas de corte, bem como os valores dos ângulos que compunham a sua geometria. Qualquer defeito que fosse observado no gume, flanco ou face de uma pastilha, esta era desconsiderada para o ensaio. Para a maior confiabilidade nos resultados foram utilizadas três (3) ferramentas de corte para cada condição de corte.

5.2.2 Determinação de Parâmetros de Usinagem

Parâmetros de usinagem são dados de entrada, que são função do processo de usinagem, máquina operatriz, do tipo de material a ser usinado e da ferramenta de corte utilizada. Os parâmetros de corte relacionados com o processo de usinagem e a máquina operatriz são a velocidade de corte (m/mín), avanço (mm/rot), profundidade de corte (mm) e fluido de corte. Para a ferramenta de corte os parâmetros são material, forma e geometria da ferramenta e para o material a ser usinado a composição química, dureza e tipo de tratamento superficial [34]. Com a união entre os parâmetros (processo de usinagem/máquina operatriz/ferramenta de corte/material) avalia-se em tempo real, como

comporta-se a operação de usinagem, colhendo dados que direcionam a possível melhora na tecnologia da operação [35].

Para o ensaio no aços AFP 725 (SAE 304) e AFP 727 (SAE 316), utilizaram-se parâmetros de corte iguais para se obter um padrão comparativo de usinabilidade. Os valores dos parâmetros de corte da máquina operatriz foram baseados na literatura, sendo adotado um valor médio dos dados coletados.

As condições de corte foram adotadas para a condição de desbaste leve, a fim de obter um acelerado desgaste da ferramenta, sem comprometimento dos resultados. Sendo assim, para os dois materiais, a profundidade de corte utilizada foi de 2.5 mm, o recomendado, segundo fabricante, é de 2.0 a 4.0 mm, em função do raio de quina da ferramenta (0.8 mm). O avanço utilizado para o ensaio de desgaste da ferramenta foi de 0.3 mm/rot, região central da faixa de avanços, recomendado pelo fabricante (0.2 a 0.5 mm/rot). Este valor foi escolhido após um pré-ensaio de usinagem.

Para a determinação da força específica de corte e de avanço foram escolhidos valores de avanço escalonados, de acordo com as possibilidades da máquina-ferramenta utilizada.

A velocidade de corte básica foi a recomendada pela literatura e as suas respectivas variações foram seguidas de uma série geométrica (R20), para números preferidos de velocidade de corte, fornecida pela ISO 3685-1977 (E).

Optou-se pelo corte a seco em todos os ensaios.

5.2.3 Dimensões dos Corpos de Prova

A relação comprimento/diâmetro do corpo de prova foi tal que não ocorressem vibrações durante a usinagem. No final do ensaio, esta relação não deveria ser superior a 10. Para ter um bom aproveitamento do material durante os ensaios, determinou-se as dimensões de 600 mm para o comprimento e de 100 mm e 60 mm para o diâmetro do corpo de prova, novo e usado respectivamente. Nestas dimensões os corpos de prova novos, ainda podem ser movimentados manualmente sem que haja a necessidade explícita de equipamentos auxiliares para a carga da peça na máquina.

A usinagem foi realizada apenas na região do corpo de prova em que a dureza e microestrutura estivesse dentro de limites normalizados. Os corpos foram pré-usinados para a remoção das superfícies brutas de laminação, oxidadas ou encruadas irregularmente.

Conforme experiência prévia, para cada velocidade de corte foram estabelecidos um total de 4 corpos de prova. Sendo 3 variações e 3 repetições para cada velocidade de corte, foram necessários um total de 36 corpos de prova para cada material usinado.

5.2.4 Metodologia de Ensaio

Antecipadamente ao ensaio, foram preparadas folhas de registro de dados em uma sequência pré-definida. Cada folha de registro de dados foi exclusiva para um gume da pastilha, uma combinação de condições de usinagem e um critério de fim de vida.

Os avanços foram previamente aferidos e constatou-se um erro desprezível em relação ao valor selecionado. A profundidade de corte era verificada a cada ensaio, medindo-se o diâmetro dos corpos de prova antes e depois da usinagem.

O porta-ferramentas foi mantido sempre na mesma posição, somente a pastilha reversível era removida para que se fizesse a medição do desgaste. Antes da sua recolocação, garantia-se a limpeza do assento com um jato de ar comprimido, assegurando desta forma um posicionamento adequado da pastilha.

A velocidade de corte foi rigorosamente controlada por intermédio do taco gerador ligado a um multivoltímetro. Conhecida a relação volts/rpm do taco gerador e o diâmetro do corpo de prova, aumentava-se a rotação do torno até que a tensão (volts) indicada pelo multivoltímetro, correspondesse a uma velocidade de corte previamente selecionada. No início do corte se fazia necessária uma correção da rotação do torno, para garantir a constância da velocidade de corte durante o ensaio.

a) desgaste de ferramenta

Para a obtenção da equação de Taylor foram utilizados diferentes valores de velocidade de corte, uma vez que, o coeficiente k da equação é um indicativo do quanto que o tempo de vida da ferramenta é afetado por uma variação da velocidade de corte. Os parâmetros avanço e profundidade de corte foram mantidos constantes.

Adotou-se para os ensaios, como critério de final de ensaio do gume, um desgaste de flanco médio (V_B), equivalente a 0.3 mm. O desgaste de cratera, foi apenas observado, uma vez que, era pouco significativa a sua progressão em relação ao desgaste de flanco da ferramenta.

As medições de desgaste foram realizadas de acordo com intervalos de tempos regulares, sendo realizadas medições de um (1) em um (1) minuto, para cada variação de patamar de desgaste e de três (3) em três (3) minutos, nos pontos de estabilização do gume no corte. O objetivo de tantas medições, uma vez que se poderia optar pela utilização de uma série de números normalizados já existente, foi o de verificar a variação dos patamares de estabilização do gume, bem como, verificar o comportamento de corte, pelas derivadas das curvas de desgaste dos gumes das ferramentas, para se avaliar a repetibilidade dos ensaios.

b) força de usinagem

Na determinação do critério força de usinagem para os ensaios de usinabilidade dos materiais, foram plotadas curvas e obtidas as respectivas forças específicas de corte e coeficientes da equação de Kienzle, utilizando-se como parâmetros de usinagem uma variação com um total de seis (6) avanços, mantendo-se a velocidade de corte e profundidade de corte constantes.

O procedimento de medição das forças de usinagem, seguiu uma metodologia sistemática com três repetições para cada condição de corte. Cada condição teve o valor médio das forças de usinagem obtido pelo software SADA. A partir de então, obteve-se as forças representativas de cada condição pela média das respectivas repetições.

c) formação de cavaco

Na determinação do critério forma de cavaco, mantendo-se a velocidade de corte constante, foram estabelecidas combinações variando-se avanço, num total de seis (6) e profundidade de corte, num total de cinco (5).

O objetivo desta metodologia foi estabelecer um mapa de formação de cavaco, a fim de se comparar as possíveis variações de corte para cada material.

d) acabamento superficial

Na determinação do critério acabamento superficial, a velocidade de corte e profundidade de corte foram mantidas constantes, nas condições do ensaio de desgaste da ferramenta, variando-se o avanço num total de três (3) vezes, com o objetivo de medir os valores de Ra, Rz e Rt.

Foi também avaliada a influência da velocidade de corte sobre o acabamento superficial das peças. Para isso foram realizadas baterias de ensaios variando-se a velocidade de corte na faixa de 20 a 200 m/mín, utilizando um total de quatro valores de uma série geométrica (R05), mantendo-se os demais parâmetros constantes.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS DOS ENSAIOS DE USINABILIDADE

A seguir serão mostrados os respectivos teste comparativos de usinabilidade dos aços inoxidáveis austeníticos AFP 725 (SAE 304), entre as corridas A35591 (CONVENCIONAL) e B57577 (MODIFICADO) e AFP 727 (SAE 316), entre as corridas A35621 (CONVENCIONAL) e BT59162 (MODIFICADO).

6.1 AFP 725 (SAE 304)

6.1.1 Comparação da Vida da Ferramenta Para o Aço Inoxidável Austenítico

AFP 725 (SAE304)

A vida da ferramenta é normalmente o critério de maior importância na caracterização da usinabilidade de um material. A vida “T” é o tempo mínimo que uma ferramenta resiste do início do corte até sua utilização total, e é definida através da equação de Taylor.

$$T = v_c^k \cdot C_v$$

Onde: T = vida da ferramenta [mín]

v_c = velocidade de corte [m/mín]

C_v = vida para $v_c = 1$ m/mín [constante]

k = coeficiente angular da curva de vida.

Pode-se dizer que o parâmetro k é um indicativo do quanto que o tempo de vida da ferramenta é afetado por uma variação da velocidade de corte. De uma maneira geral, quanto

maior o valor de k , maior a redução da vida da ferramenta para um mesmo aumento da velocidade de corte.

A variação de C_v depende de muitos fatores, os mais relevantes são a microestrutura e a composição química do material a usinar. Existiu uma grande diferença no coeficiente C_v entre os dois materiais.

O desgaste da ferramenta, decorrente da ação abrasiva do material da peça se pode atribuir pelo menos a três causas:

- inclusões e pontos duros presentes na microestrutura do metal em usinagem;
- o aumento da dureza do cavaco e da peça em virtude do encruamento decorrente do próprio processo de usinagem;
- diminuição da resistência da ferramenta com o aumento da temperatura.

Nos ensaios realizados com os distintos AFP 725, teve-se o sentimento de melhor corte para a corrida do tipo B (modificado), em relação à vida da ferramenta. Contudo, para serem analisados de maneira plausível e confiável os dados obtidos nos ensaios de vida de ferramenta, ou seja, verificar a influência da mudança de material, tornou-se necessário recorrer ao uso de ferramentas estatísticas para análise dos ensaios.

A Análise de Variância é um método suficientemente poderoso para poder identificar diferenças entre as médias populacionais devida às várias causas atuando simultaneamente sobre os elementos da população.

Deve-se notar que o método da Análise de Variância aceita ou rejeita a(s) hipótese(s) H_0 de igualdade das médias populacionais. Se H_0 for rejeitada, admite-se que pelo menos uma das médias é diferente das demais [36].

Mediante um teste F , é feita a relação entre a estimativa de σ com base nas diferenças entre as médias amostrais e a estimativa de σ obtida por média ponderada das variâncias amostrais, conforme ilustra equação:

$$F = S_E^2 / S_R^2$$

Este teste F é conduzido com $k-1$ graus de liberdade no numerador e $k(n-1)$ no denominador, ou seja, H_0 será rejeitada se $F > F_{k-1, k(n-1), \alpha}$ onde α é o nível de significância escolhido para o teste. O procedimento de teste é unilateral, pois, sendo H_0 falsa, F tenderá sempre a crescer [36].

Com a análise estatística obteve-se um valor de F referente a 135.5, com probabilidade superior a 99.9%, o que leva a afirmação, com absoluta convicção, que o material AFP 725 - B57577 (MODIFICADO) apresenta uma real melhora, em relação ao material AFP 725 - A35591 (CONVENCIONAL), no fator de usinabilidade, desgaste de ferramenta.

Conforme sequência de ensaios sistemáticos de usinagem para processos de torneamento, com três velocidades de corte (100, 120 e 140 m/mín), e três repetições cada, mantendo-se os demais parâmetros fixos, foram obtidas as curvas de vida para as ferramentas. Tendo adotado como critério de fim de vida do gume, um desgaste de flanco médio fixado em 0,3 mm, verificaram-se os valores mostrados nas tabelas 6.1 e 6.2.

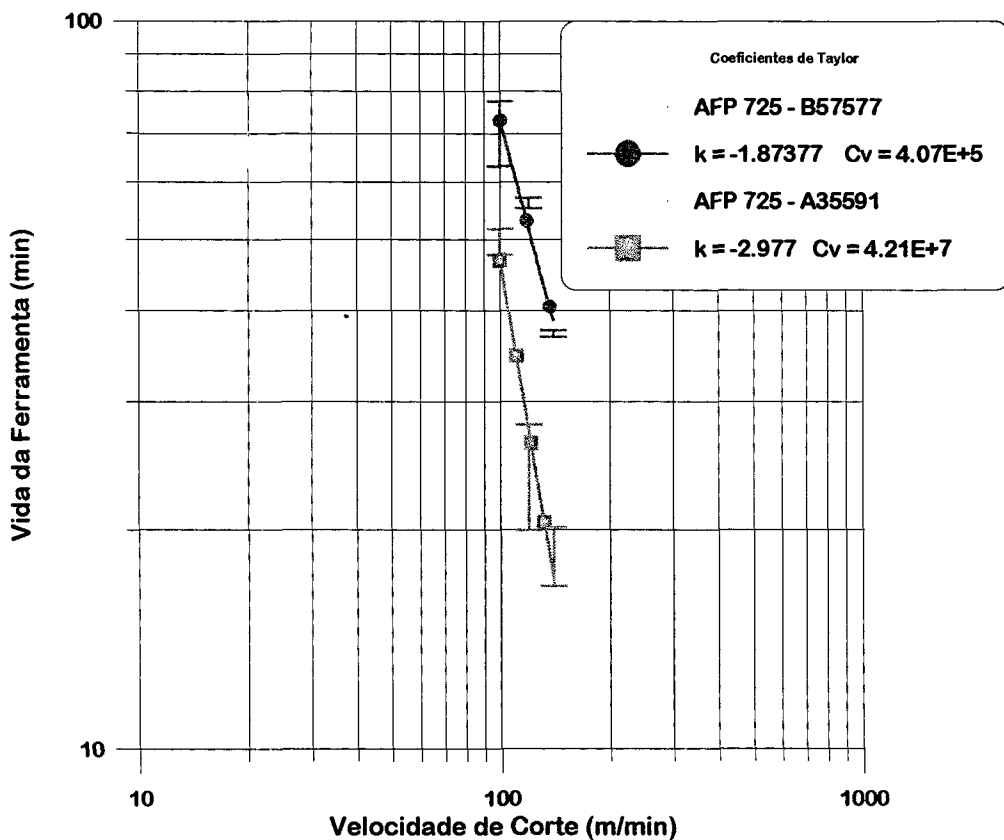


Figura 6.1 Curvas de vida para os distintos materiais

- AFP 725 - B57577 (MODIFICADO)

Tabela 6.1 Resultados dos testes de vida da ferramenta (B57577 (MODIFICADO))

Vc [m/mín]	Ensaio A [mín]	Ensaio B [mín]	Ensaio C [mín]	Média [mín]	s
100	80.00	63.00	67.67	70.22	7.17
120	55.59	57.47	55.27	56.11	0.97
140	37.25	36.63	37.50	37.13	0.36

- AFP 725 - A35591 (CONVENCIONAL)

Tabela 6.2 Resultados dos testes de vida da ferramenta A35591 (CONVENCIONAL).

Vc [m/mín]	Ensaio A [mín]	Ensaio B [mín]	Ensaio C [mín]	Média [mín]	s
100	52.00	47.00	50.00	49.67	2.05
120	26.91	18.33	26.50	23.91	3.95
140	20.87	17.50	17.00	18.44	1.72

obs: dos três valores obtidos para cada ensaio e correspondente velocidade de corte, é calculado um valor médio e assim, plotado no gráfico.

A figura 6.1 mostra as curvas de Taylor para os dois materiais. As faixas indicadas nas velocidades de corte ensaiadas representam a dispersão da vida para a marca de desgaste de flanco $V_B = 0.3$ mm. As curvas traçadas de acordo com o método estatístico empregado, mostram que mesmo para uma dispersão média maior para a corrida, esta apresenta uma vida maior que a corrida A35591 (CONVENCIONAL).

6.1.2 Critério Força de Usinagem

Na determinação do critério força de usinagem para os ensaios de usinabilidade das duas corridas AFP 725 (A35591 (CONVENCIONAL) e B57577 (MODIFICADO)), foram plotadas curvas de força de corte por largura de usinagem, para diferentes espessuras de usinagem e obtidas as respectivas forças específicas de corte e coeficientes da equação de Kienzle, utilizando-se como parâmetros de usinagem uma velocidade de corte de 120 m/mín, profundidade de corte de 2,5 mm e variação de seis (6) avanços.

A fim de determinar se existia ou não uma diferença significativa entre estas duas retas, ou seja, averiguar se os dados obtidos entre os dois materiais eram necessariamente distintos, optou-se por uma análise de regressão linear, comparando as duas linhas plotadas. Consideram-se os dois conjuntos de dados observados, que formam a base de uma análise de regressão. Obtem-se assim, as respectivas linhas de regressão para os dois materiais ensaiados.

$$Y^{(1)} = y_{\text{médio1}} + b_1 (x - x_{1\text{médio}})$$

$$Y^{(2)} = y_{\text{médio2}} + b_2 (x - x_{2\text{médio}})$$

De cada conjunto de observações tem-se três quantidades ($y_{\text{médio1}}, b_1, s_1^2$) e ($y_{\text{médio2}}, b_2, s_2^2$). A identidade das duas populações é testada comparando os dois conjuntos observados. Primeiro, as hipóteses σ_1 e σ_2 são testadas pela média da razão das variâncias $v^2 = s_1^2/s_2^2$. Se este teste não revelar uma diferença significativa entre as duas variâncias, a inclinação destas duas retas de regressão deve ser comparada pelas médias do teste- t [36].

Com um nível de significância de 0.005 e oito graus de liberdade para o experimento, obteve-se um valor de t correspondente a 1.448, quando o tabelado para esta condição é 3.169, o que leva a afirmação que não existiu uma diferença consistente entre estas duas retas.

Os dados obtidos nos ensaios, já com suas respectivas médias, são apresentados na tabela 6.3 e representados graficamente na figura 6.2:

Tabela 6.3 Médias das forças e respectivos desvios padrões para cada combinação de parâmetros de corte.

Espess. de corte h (mm)	Força por unidade de comprimento (N/mm)	
	A35621 (CONVENCIONAL)	B57577 (MODIFICADO)
0.101	265.7207 S= 10.51307	247.7198 S= 19.76272
0.161	359.1754 S= 11.37854	358.9513 S= 4.145729
0.291	605.7477 S= 8.770554	609.2366 S= 24.35664
0.321	665.0784 S= 2.951851	664.3394 S= 14.79789
0.337	714.0313 S= 8.418959	689.6901 S= 15.46245
0.356	762.8295 S= 3.403902	720.5377 S= 1.970477

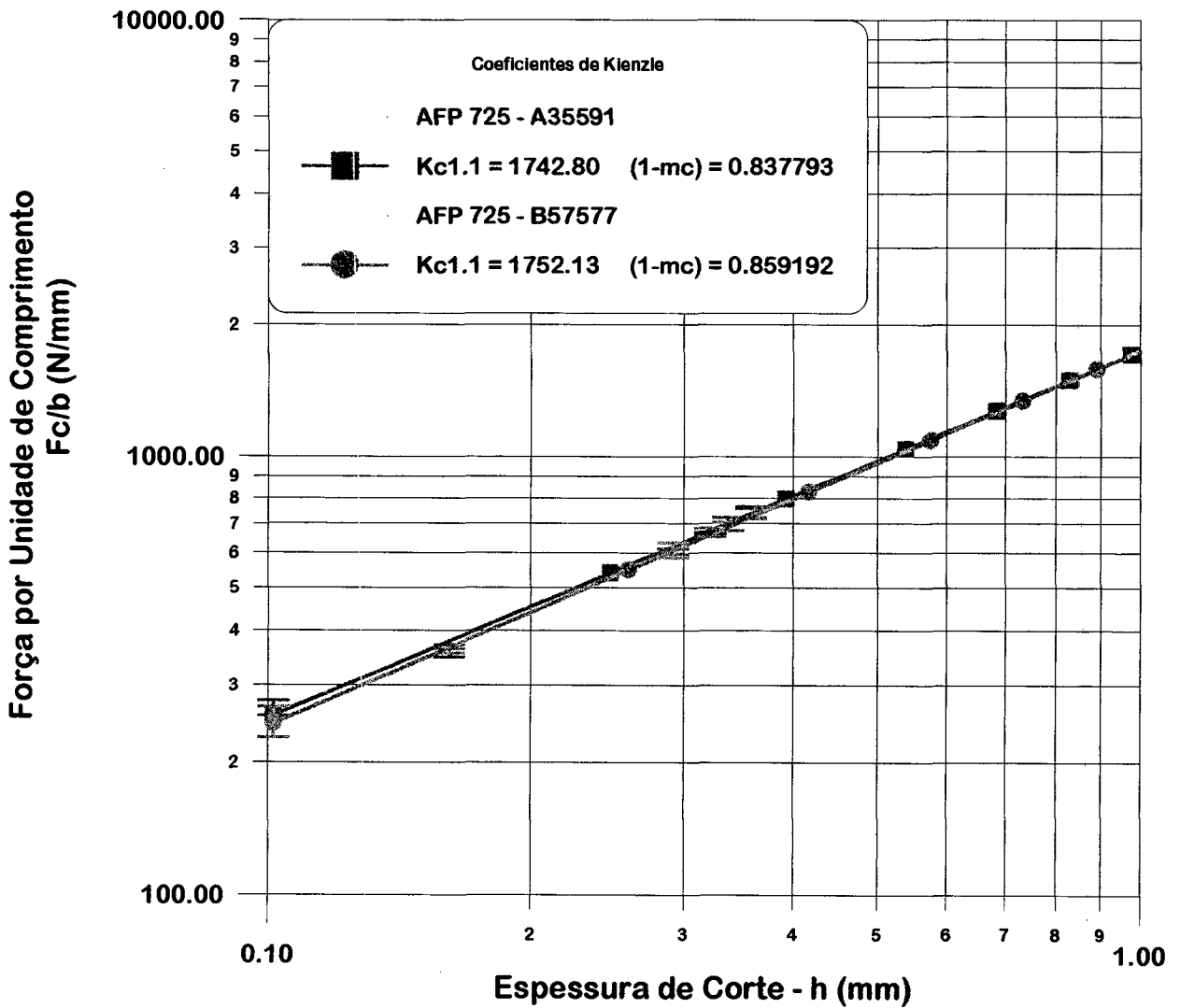


Figura 6.2 Curvas de determinação da força específica de corte

- material A35591 (CONVENCIONAL)

$$k_{c1.1} = 1742.80 \text{ N/mm}^2$$

$$(1-mc) = 0.837793$$

- material B57577 (MODIFICADO)

$$k_{c1.1} = 1752.13 \text{ N/mm}^2$$

$$(1-mc) = 0.859192$$

Verifica-se portanto, que a diferença de 10 N/mm^2 nas forças específicas de corte pode ser desprezada. Nenhuma afirmação de diferença de usinabilidade pode ser feita a respeito das duas corridas do aço AFP 725.

6.1.3. Comparação em Relação a Forma de Cavacos

Os cavacos obtidos neste ensaio foram classificados segundo ISO 3685-1977(E). Para efeitos de visualização, quanto mais forte a cor apresentada na tabela, pior a forma de cavaco obtida e, conseqüentemente, quanto mais branda a cor, melhor a forma de cavaco.

Conforme procedimento para estudo de cavaco, com as combinações de avanços e profundidades de corte foram obtidos os seguintes tipos de cavaco para os dois materiais, tabelas 6.4 e 6.5:

- 2.1. Cavaco helicoidal cilíndrico longo
- 2.2. Cavaco helicoidal cilíndrico curto
- 2.3. Cavaco helicoidal cilíndrico emaranhado
- 3.1. Cavaco espiral plano
- 3.2. Cavaco espiral cônico
- 5.1. Cavaco helicoidal cônico curto
- 5.2. Cavaco helicoidal cônico longo
- 6.1. Cavaco vírgula conectado
- 6.2. Cavaco em vírgula quebrado

Tabela 6.4. Mapa de cavacos, material: AFP 725 - A35591(CONVENCIONAL)

<i>f</i> (mm/rot) <i>ap</i> (mm)	0.105	0.167	0.223	0.302	0.344	0.416
1.5	2.3	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2
2.5	2.2	2.2	5.2	5.2	5.2	6.1
3.5	2.3	2.2	2.2	5.2	5.2	3.2
4	2.2	2.2	2.2	5.2	3.2	3.2
4.5	2.2	2.2	2.2	3.2	3.2	3.2

Tabela 6.5. Mapa de cavacos, material: AFP 725 - B57577 (MODIFICADO)

<i>f</i> (mm/rot) <i>ap</i> (mm)	0.105	0.167	0.223	0.302	0.344	0.416
1.5	2.3	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2
2.5	2.2	2.2	5.2	5.2	5.2	6.1
3.5	2.3	2.2	2.2	5.2	5.2	3.2
4	2.3	2.2	2.2	5.2	3.2	3.2
4.5	2.2	2.2	2.2	3.2	3.2	3.2

O critério da formação de cavacos, normalmente é correlacionado com o ensaio de vida da ferramenta pela observação dos cavacos produzidos.

A forma e o tamanho do cavaco são muito importantes, principalmente para os processos de usinagem, onde há pouco espaço para os cavacos (furação, fresamento, etc.) ou em máquinas-ferramentas com pouco espaço de trabalho.

Quanto à forma do cavaco, a análise comparativa entre os aços A35591 (CONVENCIONAL) e B57577 (MODIFICADO) não apresentou diferenças significativas. Das combinações de profundidade de corte e avanços utilizadas neste estudo, 60% proporcionaram uma forma de cavaco satisfatória. Consideram-se os cavacos helicoidais cilíndricos curtos, espirais e quebrados como formas satisfatórias de cavaco por possuírem baixo volume específico e facilidade de remoção além de não apresentarem perigo ao operador.

Os dois materiais apresentam um polígono de cavacos aceitáveis semelhantes. Para avanços crescentes, inicialmente a profundidade de corte também aumenta, sendo que para avanço de 0.302 mm/rot, atinge-se a máxima profundidade de corte viável. Para avanços maiores a profundidade máxima tende a diminuir.

6.1.4. Acabamento Superficial

Esta análise foi feita comparando-se as rugosidades obtidas em cada material mantendo-se constantes as variáveis de processo e condições de usinagem ($v_c = 120$ m/mín, $a_p = 2.5$ mm) para as ferramentas utilizadas. Os valores dos ensaios são mostrados nas tabelas 6.6 e 6.7.

A rugosidade cinemática teórica é decorrente da forma da quina da ferramenta e do movimento relativo entre a peça e a ferramenta. É possível verificar, nas tabelas 6.6 e 6.7 que a rugosidade cinemática aumenta com o aumento do avanço.

Novamente foi requerida o uso da análise de variância para a comparação dos grupos baseada na relação da variabilidade das médias entre os grupos com a variabilidade das observações dentro dos grupos.

Tabela 6.6 Avaliação da qualidade superficial material: aço A35591 (CONVENCIONAL)

f (mm/rot)	Ra (μm)	Rz (μm)	Rt (μm)	Rteórica
0.125	2.67	14.70	16.47	2.44
	<i>s= 0.08</i>	<i>s= 0.70</i>	<i>s= 0.63</i>	
0.200	3.40	17.00	19.57	6.25
	<i>s= 0.50</i>	<i>s= 0.31</i>	<i>s= 0.45</i>	
0.300	5.89	25.72	27.56	14.06
	<i>s= 0.15</i>	<i>s= 0.30</i>	<i>s= 0.22</i>	

Tabela 6.7 Avaliação da qualidade superficial material: aço B57577 (MODIFICADO)

f (mm/rot)	Ra (μm)	Rz (μm)	Rt (μm)	Rteórica
0.125	1.93	10.57	12.70	2.44
	<i>s= 0.09</i>	<i>s= 0.44</i>	<i>s= 1.21</i>	
0.200	3.04	13.84	15.18	6.25
	<i>s= 0.16</i>	<i>s= 0.55</i>	<i>s= 0.78</i>	
0.300	5.67	24.22	26.24	14.06
	<i>s= 0.12</i>	<i>s= 0.79</i>	<i>s= 1.40</i>	

Com essa finalidade foi montado, a nível de simplificação das medidas do experimento, um projeto fatorial, que envolveu dois fatores (avanço e material), cada um deles a dois níveis, ou seja, duas variações medidas de avanço (0.125 e 0.300 mm/rot) e os dois respectivos materiais.

Com relação a este experimento foram obtidos os seguintes valores de F , no enfoque variação de material, mostrados na tabela 6.8.

Tabela 6.8 Resultados da análise de variância

Acabamento superficial	Ra	Rz	Rt
efeito variação de material A/B	$F= 35.20$	$F= 47.54$	$F= 16.33$

Como $F_{.05}(1,8) = 5.32$, concluiu-se que para um nível de significância de 95% o efeito da variação de material foi significativo, nas condições estabelecidas de desbaste leve. Portanto, uma análise comparativa da qualidade superficial obtida no torneamento das duas ligas analisadas mostrou que o aço SAE 304 B57577 (MODIFICADO) apresentou o melhor acabamento superficial.

Foram ainda realizados ensaios variando-se a velocidade de corte em quatro níveis (um baixo, dois intermediários e um alto), obtidos de uma série geométrica (R05), mantendo-se os demais parâmetros constantes ($f = 0.3$ mm/rot; $a_p = 2.0$ mm), a fim de se verificar se em outras condições, de maior ou menor severidade de corte, os materiais teriam comportamentos diferentes na usinagem.

Uma análise de variância foi realizada para a comparação dos grupos baseada na relação da variabilidade das médias entre os grupos com a variabilidade das observações dentro dos grupos.

Tabela 6.9 Avaliação da qualidade superficial, com variação da velocidade de corte para o aço A35591 (CONVENCIONAL)

v_c (m/mín)	Ra (μm)	Rt (μm)	Rz (μm)
25	4.5	21.9	19.4
	$s = 0.1$	$s = 3.7$	$s = 1.0$
80	4.4	19.7	18.6
	$s = 0.1$	$s = 0.5$	$s = 0.2$
125	4.3	19.7	18.6
	$s = 0.1$	$s = 0.5$	$s = 0.5$
200	4.3	21.6	18.9
	$s = 0.1$	$s = 3.8$	$s = 1.1$

Tabela 6.10 Avaliação da qualidade superficial, com variação da velocidade de corte para o aço B57577 (MODIFICADO)

v_c (m/mín)	Ra (μm)	Rt (μm)	Rz (μm)
25	4.2	22.3	19.1
	$s = 0.1$	$s = 1.3$	$s = 0.8$
80	3.9	20.0	17.9
	$s = 0.1$	$s = 1.0$	$s = 0.6$
125	4.0	19.8	18.2
	$s = 0.1$	$s = 0.9$	$s = 0.4$
200	4.2	23.3	19.8
	0.1	$s = 2.5$	$s = 0.9$

Com relação a este experimento foram obtidos os seguintes valores de F , no enfoque variação de material e de velocidade de corte, mostrados na tabela 6.11.

Tabela 6.11 Resultados da análise de variância

Acabamento superficial	Ra	Rz	Rt
efeito variação de material A/B	$F = 3.2$	$F = 0.27$	$F = 0.24$
efeito da variação de v_c	$F = 0.8$	$F = 0.03$	$F = 0.01$

Como $F_{.05}(1,8) = 5.32$, para um nível de significância de 95%, o efeito da variação de velocidade de corte e variação de material, nas condições estabelecidas de desbaste leve, mostrou que para as faixas de velocidades de corte analisadas, mantendo-se os demais valores de avanço e profundidade de corte constantes, não existe uma variação significativa do acabamento superficial para nenhum dos dois aços ensaiados.

Foi constatado portanto, que não existe uma faixa de velocidades, dentro das ensaiadas, em que ocorre mudança do comportamento, em relação ao acabamento superficial, dos materiais em estudo.

6.2 AFP 727 (SAE 316)

6.2.1 Comparação da Vida da Ferramenta Para o Aço inoxidável Austenítico AFP 727 (SAE 316)

Conforme sequência de ensaios sistemáticos de usinagem para processos de torneamento, com três velocidades de corte (120, 140 e 160 m/mín), e três repetições cada, mantendo-se os demais parâmetros fixos, foram obtidas as curvas de vida para as ferramentas. Tendo adotado como critério de fim de vida do gume, um desgaste de flanco médio fixado em 0,3 mm, verificaram-se os valores mostrados nas tabelas 6.12 e 6.13.

Verificou-se uma grande diferença no coeficiente C_v entre os dois materiais, condicionada a uma sensível melhora na condição de corte do AFP 727 - BT59162 (MODIFICADO), com excelente repetibilidade dos valores, como é mostrado no gráfico da figura 6.5.

De posse destes dados, conforme procedimento estatístico citado anteriormente em 6.1.1., foi realizada um análise de variância para identificar diferenças entre as médias populacionais, devido às várias causas que atuam simultaneamente sobre os elementos da população.

Deve-se lembrar, que o método da análise de variância aceita ou rejeita a(s) hipótese(s) H_0 , de igualdade das médias populacionais. Se H_0 for rejeitada, é admitida que pelo menos uma das médias é diferente das demais.

Com a análise estatística foi obtido um valor de F referente a 461.298, com probabilidade superior a 99.9%, comprovando uma real melhora no fator de usinabilidade, desgaste de ferramenta, do material AFP 727 - BT59162 (MODIFICADO), em relação ao material AFP 727 A35621 (CONVENCIONAL).

Tabela 6.12 Ensaio de vida de ferramenta para o material AFP 727 (A35621 (CONVENCIONAL)).

Vc (m/min)	Ensaio A [min]	Ensaio B [min]	Ensaio C [min]	Média [min]	s
120	30.00	30.53	32.00	30.84	0.846
140	14.73	13.25	13	13.66	0.763
160	5.375	6.5	5.41	5.76	0.522

Tabela 6.13 Ensaio de vida de ferramenta para o material AFP 727 (BT59162 (MODIFICADO)).

Vc (m/min)	Ensaio A [min]	Ensaio B [min]	Ensaio C [min]	Média [min]	s
120	50.48	52.15	49.75	50.79	1.000
140	24.00	27.76	25.10	25.62	1.579
160	11.5	9.4	10.93	10.61	0.886

A figura 6.5 mostra as curvas de Taylor para os dois materiais. As faixas indicadas nas velocidades de corte ensaiadas representam a dispersão da vida para a marca de desgaste de flanco V_B igual a 0.3 mm. As curvas traçadas de acordo com o método estatístico empregado, mostra que mesmo para uma dispersão média maior das vidas obtidas para a corrida BT59162 (MODIFICADO), esta apresenta uma vida maior que a corrida A35621 (CONVENCIONAL).

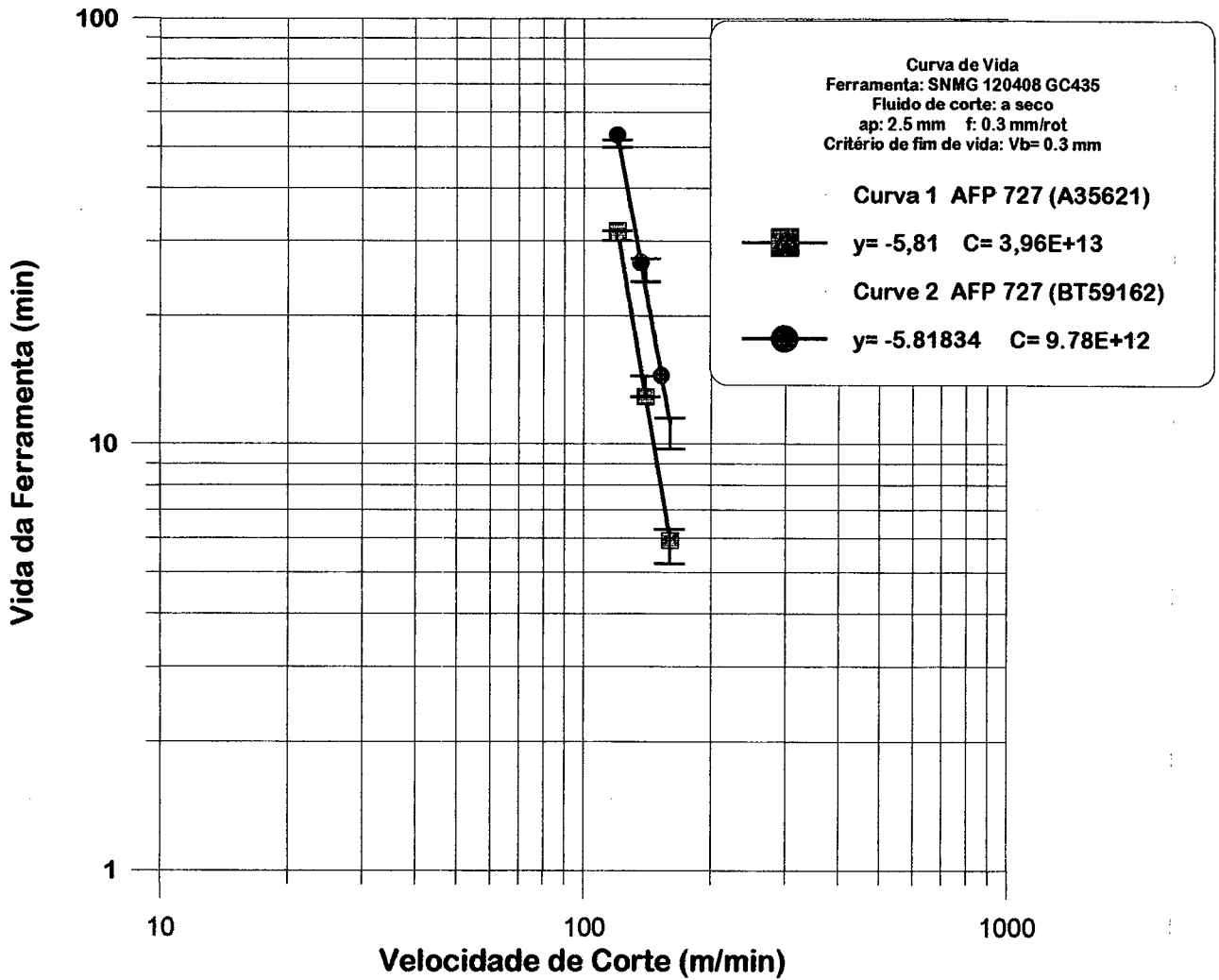


Figura 6.3. Curvas de vida para os distintos materiais.

6.2.2. Critério Força de Usinagem

Na determinação do critério força de usinagem para os ensaios de usinabilidade dos respectivos materiais AFP 727 (A35621(CONVENCIONAL) e BT59162 (MODIFICADO)), foram plotadas curvas e obtidas as respectivas forças específicas de corte e coeficientes da equação de Kienzle, utilizando-se como parâmetros de usinagem uma velocidade de corte de 120 m/min, profundidade de corte de 2,5 mm e variação com um total de seis (6) avanços.

A fim de determinar se existia ou não uma diferença significativa entre estas duas retas, ou seja, averiguar se os dados obtidos entre os dois materiais eram necessariamente distintos, optou-

se por uma análise de regressão linear, comparando as duas linhas plotadas, conforme procedimento em 6.1.2.

Com um nível de significância de 0.005 e oito graus de liberdade para o experimento, obteve-se um valor de t correspondente a 8.6, o que levou a afirmação que existe uma diferença consistente entre estas duas retas.

Os dados obtidos nos ensaios, já com suas respectivas médias, são apresentados na tabela 6.14 e representados graficamente na figura 6.6.

- material A35621 (CONVENCIONAL)

$$k_{C_{1,1}} = 1847.83 \text{ N/mm}^2$$

$$(1-mc) = 0.8222$$

- material BT59162 (MODIFICADO)

$$k_{C_{1,1}} = 1699 \text{ N/mm}^2$$

$$(1-mc) = 0.8475$$

Tabela 6.14 Médias das forças e respectivas variâncias para cada combinação de parâmetros de corte.

Espess. de corte h (mm)	F _c (N/mm)	F _c (N/mm)
	A35621 (conv.)	BT59162 (mod.)
0.101	286.9843	247.9532
	s= 8.376509	s= 8.80538
0.161	399.9899	353.2004
	s= 10.84542	s= 11.59111
0.291	672.0757	601.9109
	s= 18.81623	s= 7.016485
0.321	721.8788	643.693
	s= 18.19804	s= 48.23061
0.337	759.5654	687.3373
	s= 34.2556	s= 26.56296
0.356	804.0869	710.11
	s= 10.66382	s= 40.28297

A diferença de 148.83 N/mm^2 nas forças de corte específicas neste caso é significativa.

Pode-se afirmar portanto, a diferença de usinabilidade para as duas corridas do aço AFP 727.

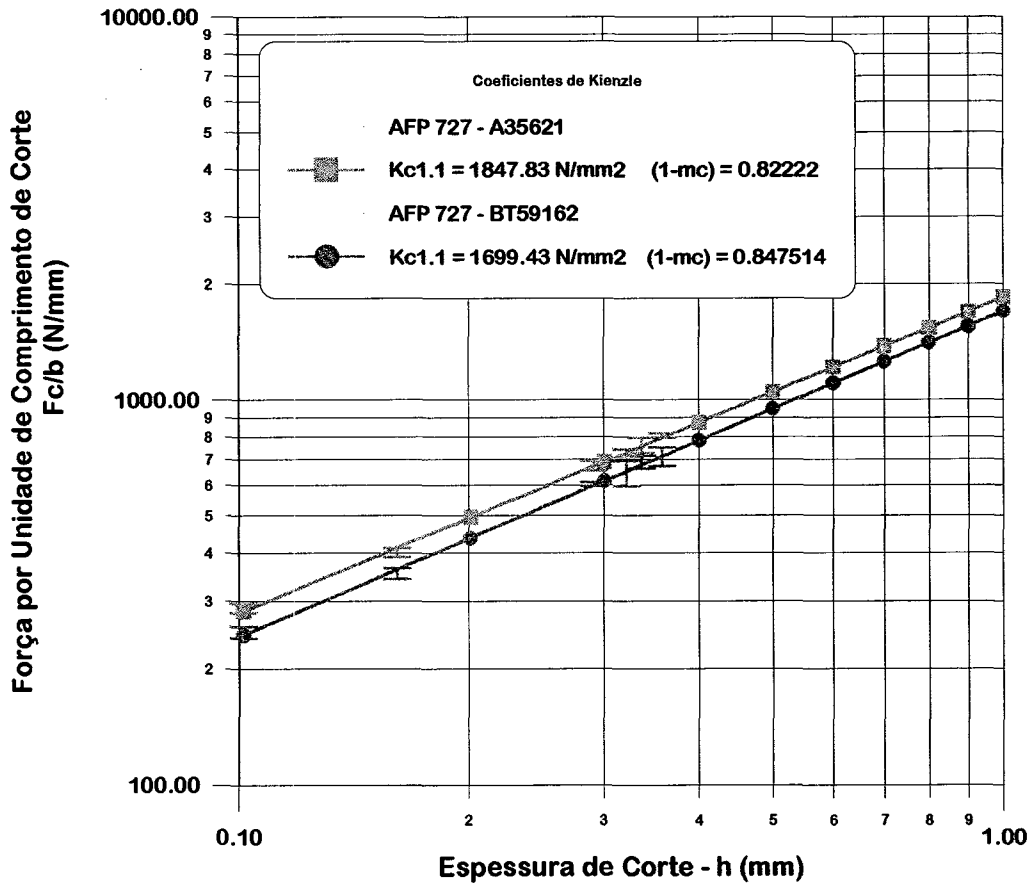


Figura 6.4 Curvas de determinação da força específica de corte.

6.2.3 Análise da Forma de Cavaco

Os cavacos obtidos neste ensaio, assim como os dos primeiros ensaios, foram classificados segundo ISO 3685-1977(E). Para efeitos de visualização, quanto mais forte a cor apresentada na tabela, pior a forma de cavaco obtida e, conseqüentemente, quanto mais branda a cor, melhor a forma de cavaco.

Conforme procedimento para estudo de cavaco, com as combinações de avanços e profundidades de corte foram obtidos os seguintes tipos de cavaco para os respectivos materiais, mostrados nas tabelas 6.15 e 6.16.

2.1. Cavaco helicoidal cilíndrico longo

2.2. Cavaco helicoidal cilíndrico curto

2.3. Cavaco helicoidal cilíndrico emaranhado

3.1. Cavaco espiral plano

3.2. Cavaco espiral cônico

5.1. Cavaco helicoidal cônico curto

5.2. Cavaco helicoidal cônico longo

6.1. Cavaco vírgula conectado

6.2. Cavaco em vírgula quebrado

Tabela 6.15 Mapa de cavacos, material: A35621 (CONVENCIONAL).

f (mm/rot) ap (mm)	0.105	0.167	0.223	0.302	0.349	0.376
1.5	6.2	6.1	6.1	6.2	6.2	6.2
2.5	3.1	2.2	6.1	6.1	6.1	6.2
3.5	3.3	2.1	2.1	5.1	5.2	6.1
4.0	2.1	2.1	2.1	5.1	6.1	6.1
4.5	3.1	2.1	2.2	2.2	3.2	6.2

Tabela 6.16 Mapa de cavacos material: BT59162 (MODIFICADO).

f (mm/rot)	0.105	0.167	0.223	0.302	0.349	0.376
1.5	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2
2.5	2.2	2.1	6.1	6.1	6.1	6.2
3.5	2.2	2.1	2.1	5.2	6.1	6.2
4.0	3.1	2.1	2.2	3.2	3.2	6.2
4.5	3.1	2.1	2.2	3.2	3.2	6.2

Quanto à forma do cavaco, a análise comparativa entre os aços A35621 (CONVENCIONAL) e BT59162 (MODIFICADO) não apresentou diferenças significativas. Os dois materiais apresentam um polígono de cavacos aceitáveis semelhantes. Para avanços crescentes, a profundidade de corte aplicada pode também ser aumentada. Das combinações de profundidade de corte e avanços utilizadas neste estudo, 70% proporcionaram uma forma de cavaco satisfatória. Consideram-se os cavacos helicoidais cilíndricos curtos, espirais e em vírgula como formas satisfatórias de cavaco, por possuírem baixo volume específico e facilidade de remoção, além de não apresentarem perigo ao operador.

Para faixas de profundidade de corte e avanço usuais em operações de desbaste (ap entre 2 e 3.5 mm, f entre 0.25 e 0.35 mm/rot.) os dois materiais apresentaram uma forma de cavaco totalmente aceitável.

A ausência de cavacos em fita e de cavacos emaranhados verifica a boa usinabilidade desses materiais com relação ao critério de formação de cavacos nas condições de corte utilizadas.

6.2.4 Acabamento Superficial

Esta análise foi feita comparando-se as rugosidades obtidas em cada material mantendo-se constantes as variáveis de processo e condições de usinagem ($v_c = 120$ m/mín, $a_p = 2.5$ mm) para as ferramentas utilizadas. Os valores dos ensaios são mostrados nas tabelas 6.17 e 6.18.

A rugosidade cinemática teórica é decorrente da forma da quina da ferramenta e do movimento relativo entre a peça e a ferramenta. É possível verificar, nas tabelas 6.17 e 6.18 que a rugosidade cinemática aumenta com o aumento do avanço.

Tabela 6.17 Avaliação da qualidade superficial, material: aço A35621 (CONVENCIONAL).

f (mm/rot)	Ra (μm)	Rz (μm)	Rt (μm)	Rteórica
0.125	2.78	15.78	18.94	2.44
	<i>s= 0.09</i>	<i>s= 1.31</i>	<i>s= 3.20</i>	
0.200	3.53	15.17	18.00	6.25
	<i>s= 0.29</i>	<i>s= 0.72</i>	<i>s= 1.19</i>	
0.300	5.94	25.82	27.60	14.06
	<i>s=0.16</i>	<i>s= 0.56</i>	<i>s= 0.73</i>	

Tabela 6.18 Avaliação da qualidade superficial, material: aço BT59162 (MODIFICADO).

f (mm/rot)	Ra (μm)	Rz (μm)	Rt (μm)	Rteórica
0.125	2.37	13.52	16.58	2.44
	<i>s= 0.15</i>	<i>s= 0.66</i>	<i>s= 3.12</i>	
0.200	3.10	16.04	18.35	6.25
	<i>s= 0.10</i>	<i>s= 0.72</i>	<i>s= 1.62</i>	
0.300	5.71	24.61	26.29	14.06
	<i>s= 0.12</i>	<i>s= 0.29</i>	<i>s= 0.92</i>	

Conforme item 6.1.4. foi procedida uma análise de variância para a comparação dos grupos baseada na relação da variabilidade das médias entre os grupos com a variabilidade das observações dentro dos grupos.

Com relação a este experimento foram obtidos os seguintes valores de F , no enfoque variação de material, mostrados na tabela 6.19.

Tabela 6.19 Resultados da análise de variância.

Acabamento superficial	Ra	Rz	Rt
efeito variação de material A/B	$F= 16.66$	$F= 12.79$	$F= 1.26$

Como $F_{05}(1,8) = 5.32$, concluiu-se que para um nível de significância de 95% o efeito da variação de material foi significativo, com exceção para o critério de acabamento superficial Rt, nas condições estabelecidas de desgaste leve. Portanto, uma análise comparativa da qualidade superficial obtida no torneamento das duas ligas analisadas mostrou que, de uma maneira geral, existiu uma tendência do aço SAE 316 BT59162 (MODIFICADO) apresentar o melhor acabamento superficial.

Foram ainda realizados ensaios variando-se a velocidade de corte em quatro níveis (um baixo, dois intermediários e um alto), obtidos de uma série geométrica (R05), mantendo-se os demais parâmetros constantes ($f = 0.3$ mm/rot; $a_p = 2.0$ mm), a fim de se verificar se em outras condições, de maior ou menor severidade de corte, os materiais teriam comportamentos diferentes na usinagem.

Uma análise de variância foi realizada para a comparação dos grupos baseada na relação da variabilidade das médias entre os grupos com a variabilidade das observações dentro dos grupos.

Tabela 6.20 Avaliação da qualidade superficial, com variação da velocidade de corte para o aço A35621 (CONVENCIONAL).

v_c (m/mín)	Ra (μm)	Rt (μm)	Rz (μm)
25	5.3	25.9	22.6
	$s = 0.3$	$s = 2.1$	$s = 1.4$
80	5.6	27.7	24.1
	$s = 0.2$	$s = 1.9$	$s = 1.4$
125	6.3	34.0	28.0
	$s = 0.1$	$s = 1.0$	1.0
200	6.4	32.6	29.3
	$s = 0.1$	$s = 1.3$	1.8

Tabela 6.21 Avaliação da qualidade superficial, com variação da velocidade de corte para o aço BT59162 (MODIFICADO).

v_c (m/mín)	Ra (μm)	Rt (μm)	Rz (μm)
25	3.6	20.6	17.4
	$s = 0.1$	$s = 2.1$	$s = 1.0$
80	5.4	22.6	20.9
	$s = 0.1$	$s = 0.7$	$s = 0.8$
125	5.8	29.9	24.1
	$s = 0.2$	$s = 3.4$	$s = 1.7$
200	6.1	29.3	25.4
	$s = 0.2$	$s = 1.7$	$s = 0.8$

Com relação a este experimento foram obtidos os seguintes valores de F , no enfoque variação de material e de velocidade de corte, mostrados na tabela 6.22.

Tabela 6.22 Resultados da análise de variância

Acabamento superficial	Ra	Rz	Rt
efeito variação de material A/B	$F = 48$	$F = 27$	$F = 11$
efeito da variação de v_c	$F = 155$	$F = 70$	$F = 35$

Como $F_{.05}(1,8) = 5.32$, para um nível de significância de 95%, o efeito da variação de velocidade de corte e variação de material, nas condições estabelecidas de desbaste leve, mostrou que para as faixas de velocidades de corte analisadas, mantendo-se os demais valores de avanço e profundidade de corte constantes, existe uma variação significativa do acabamento superficial para os dois aços ensaiados.

Foi constatado que ocorre mudança do comportamento, em relação ao acabamento superficial, dos materiais em estudo, com a alteração da velocidade de corte, contudo, o material BT59162 (MODIFICADO), em nenhum momento apresenta um comportamento pior do que o aço A35621 (CONVENCIONAL).

Nota-se que a rugosidade inicialmente tende a aumentar, com o aumento da velocidade de corte, diminuindo após uma certa velocidade de corte, fator que desaparece com o emprego de velocidades mais altas.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES

A variação da usinabilidade dos materiais em estudo, não deve ser relacionada com a variação da composição química, uma vez que os níveis de alterações químicas dos elementos estão dentro de faixas permissíveis e estas variações não são controláveis em processo, para as respectivas classes de aços inoxidáveis austeníticos (SAE 304 e SAE 316).

A relação que existe entre a usinabilidade, a estrutura metalográfica e a composição química do aço ainda não está bem estudada.

Segundo Guliaev [13]: “Não se conseguiu ainda obter uma correlação satisfatória entre as propriedades mecânicas e a usinabilidade, mas aproximadamente pode considerar-se que a elevação da dureza ou da resistência, faz com que se diminua a usinabilidade do material (determinada pelo desgaste da ferramenta de corte). As diferenças de estrutura e de composição química podem provocar uma variação da usinabilidade do material”.

Fazendo-se uma análise estatística comparativa entre os dois valores, concluiu-se que as variações dos dois materiais possuíam durezas semelhantes. Portanto, torna-se arriscado afirmar, que materiais da mesma classe e com durezas semelhantes, apresentarão um comportamento idêntico a respeito da usinabilidade, isto para aços inoxidáveis austeníticos.

Ainda, segundo Guliaev: “O tamanho de grão do aço exerce grande influência em sua usinabilidade. O aço de grão grosso, cuja tenacidade é baixa, possui melhor corte. A diminuição da tenacidade cria a chamada “fragilidade de corte” e facilita o desprendimento do cavaco”.

Esta afirmação, regra de usinabilidade, é baseada na estrutura perlítica, mistura mecânica de 88,5% de ferrita e 11,5% de cementita. Contudo, os aços utilizados nos testes, os quais apresentaram melhor usinabilidade, foram aqueles que, em sua estrutura austenítica, apresentaram

um tamanho de grão mais fino. Isto pode ser devido ao comportamento plástico da austenita. Portanto, a variação do tamanho de grão, numa estrutura austenítica deve ser tratada em estudos posteriores.

Para o AFP 725 (SAE 304), não existiu uma variabilidade significativa na tensão de ruptura entre os dois materiais. O mesmo não ocorreu para a variação do alongamento.

Com relação ao AFP 727 (SAE 316), ocorreu uma variabilidade significativa na tensão de ruptura entre os dois materiais. No entanto, para o alongamento não foi percebida uma variação significativa.

Como o ensaio de tração é realizado com a aplicação de uma carga quase estática, estas condições não podem, no caso dos aços inoxidáveis austeníticos, serem correlacionadas com as condições de corte, onde a aplicação da carga é dinâmica.

Para os experimentos com aços inoxidáveis austeníticos (SAE 304 e SAE 316), a combinação mecânica na microestrutura, de tamanhos de grãos mais finos, com a presença de descontinuidades geradas na forma de ferrita δ , proporcionaram uma melhora na usinabilidade dos materiais.

Os ensaios de usinabilidade dos materiais geraram as seguintes conclusões:

- AFP 725 (SAE 304)

Com base nos resultados obtidos na comparação da usinabilidade entre os aços inoxidáveis austeníticos AFP 725 (SAE 304), corridas A35591 (CONVENCIONAL) e B57577 (MODIFICADO), obteve-se:

- O material B57577 (MODIFICADO), para as mesmas condições de usinagem apresentou uma significativa melhora, em relação ao material A35591 (CONVENCIONAL), no critério desgaste de ferramenta, afirmação comprovada após a utilização do teste para análise estatística *F*.
- Não existiu diferença significativa para os dois materiais, entre as formas de cavacos geradas nas condições de ensaio, com faixas de variações de profundidade de corte e avanço.

- Não existiu diferença significativa para os dois materiais no critério força de usinagem. O material B57577 (MODIFICADO) apresentou uma força específica de corte equivalente a $kc_{1.1} = 1752.13 \text{ N/mm}^2$ e coeficiente de Kienzle, $(1-mc) = 0.86$, enquanto o material A35591 (CONVENCIONAL) uma força específica de corte equivalente a 1742.80 N/mm^2 e coeficiente de Kienzle equivalente a 0.837793 . Esta afirmação foi comprovada após uma análise de regressão linear seguida de um teste t .
- Com relação ao critério acabamento superficial, o efeito da variação de material foi significativo, nas condições estabelecidas de desbaste leve. Portanto, uma análise comparativa da qualidade superficial obtida no torneamento das duas ligas analisadas mostrou que, de uma maneira geral, existiu uma tendência do aço SAE 304 B57577 (MODIFICADO) apresentar o melhor acabamento superficial.

É possível afirmar-se portanto, uma melhoria de usinabilidade para o aço AFP 725 (SAE 304), para corrida B57577 (MODIFICADO).

- AFP 727

Com base nos resultados obtidos na comparação da usinabilidade entre os aços inoxidáveis austeníticos AFP 727 (SAE 316), corridas A35621 (CONVENCIONAL) e BT59162 (MODIFICADO), obteve-se:

- O material BT59162 (MODIFICADO), para as mesmas condições de usinagem apresentou uma significativa melhora, em relação ao material A35621 (CONVENCIONAL), no critério desgaste de ferramenta, afirmação comprovada após a utilização do teste para análise estatística F .
- O material BT59162 (MODIFICADO), apresentou menores esforços de usinagem, com uma menor força específica de corte (1699 N/mm^2), em relação ao material A35621 (CONVENCIONAL) (1847 N/mm^2), para as condições dos testes, afirmação comprovada após uma análise de regressão linear seguida de um teste t .

- Não existiu diferença significativa para os dois materiais, entre as formas de cavacos geradas nas condições de ensaio, com faixas de variações de profundidade de corte e avanço.
- No critério acabamento superficial existiu uma tendência do aço SAE 316 BT59162 (MODIFICADO) apresentar o melhor acabamento superficial.

É possível afirmar-se portanto, uma melhoria de usinabilidade para o aço AFP 727 (SAE 316), na corrida BT59162 (MODIFICADO).

No âmbito geral, obteve-se a seguinte comparação do aço AFP 725 (SAE 304) em relação ao aço AFP 727 (SAE 316), para o torneamento externo longitudinal com ferramentas de metal duro.

- No critério de vida da ferramenta, o aço AFP 725 (SAE 304), apresenta um melhor desempenho em relação ao aço AFP 727 (SAE 316).
- No critério força de usinagem, os dois aços apresentam comportamentos semelhantes.
- No critério formação de cavaco, nas condições utilizadas o aço AFP 727 (SAE 316) apresenta polígonos de formações de cavacos mais favoráveis, apesar dos dois aços não apresentarem, em geral, formações consideradas ruins.
- No critério acabamento superficial, os dois aços apresentam comportamentos semelhantes.

Para novas pesquisas são sugeridas:

- Investigar detalhadamente a influência da ferrita δ na usinabilidade de aços inoxidáveis austeníticos.
- Investigar detalhadamente a influência do tamanho de grão, na estrutura austenítica, para os efeitos de usinabilidade.
- Investigar as correlações dos efeitos de microestrutura e inclusões na usinabilidade de aços inoxidáveis austeníticos.
- Para estes mesmos materiais, fazer uma análise comparativa de usinabilidade para outras operações como, fresamento e furação e para operações de acabamento.

BIBLIOGRAFIA

- [1] KOENIG, W. **Fertigungsverfahren: Drehen, Fraesen, Bohren**. Duesseldorf, VDI-Verlag, 1990, Band 1.
- [2] Machine and tool BLUE BOOK. **Machining Stainless Steels**. Março, 1986, p.72 - 78.
- [3] ASM INTERNATIONAL. **Metals Handbook: machining**. Ohio: Metals Park, 1989. v 19, 685p.
- [4] BOEHS, L. **Influência do Sulfeto de Manganês na Usinabilidade do Ferro Fundido Maleável Preto Ferrítico**. Florianópolis: UFSC, 1979. 105p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)-Universidade Federal de Santa Catarina, 1979.
- [5] BERNARDINI, P. **Fundamento de Materiais**. Florianópolis: UFSC-LABMAT, 1995. 125p.
- [6] PADILHA, A. F.; GUEDES, L. C. **Aços Inoxidáveis Austeníticos, Microestrutura e Propriedades**. 1ª edição, Hemus Editora Ltda., 1994, 170p.
- [7] MACHINABILITY DATA CENTER. **Machining Data Handbook**. 3.ed. Cincinnati: [s. n.], 1980. v. 1, paginação irregular.
- [8] CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 4ª edição, Associação Brasileira de Metais(ABM), 1977, 504p.
- [9] VILLARES. **Aços Inoxidáveis**. Aços Villares S.A. 1991. 50p.
- [10] DEARNLEY, P. A.; THOMPSON, V. **An Evaluation of The Mechanisms Of Ceramics and Coated Carbides Used For Machining Stainless Steels**. HM 49, pg 708-744.
- [11] ZABALA, A.I. **Aceros Inoxidables y Aceros Resistentes al Calor**. 1ª Edição, Editorial Limusa S.A., México, 1981, 410p.
- [12] GRAF, G. **Nichtrostende Austenitische Stähle Spanabhend Bearbeiten**. Oberfläche Surface, Nº 4, 1992, p.22-25.
- [13] GULIAEV, A. P. **Metalografia, Tomo 1**. Edit. Mir Moscú, 1ª edição, 1978, 361p.

- [14] MACHINABILITY DATA CENTER. **Machining data handbook**. 3.ed. Cincinnati: [s. n.], 1980. v. 2, paginação irregular.
- [15] FERRARESI, D. **Fundamentos de Usinagem dos Metais**. 5ª Edição, São Paulo, SP, Editora Blücher, 1977, 751p.
- [16] STEMMER, C.E. **Ferramentas de Corte**. 2ª Edição, Florianópolis, SC, 1989, 288p.
- [17] RAPATZ, F.; MOTOLIK, F. **Zerspanbaukeit der Werkstoffe, Werkstoff, Handbuch Stahl und Eisen, Verlag, Stahleisen M.B.H.** 4º Verlag, Düsseldorf, 1965.
- [18] QUEIROZ, A. A. **Usinabilidade do Ferro Fundido Cinzento e Avaliação da Temperatura de Corte como Sensor de Desgaste**. Florianópolis: UFSC, 1976. 120p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)-Universidade Federal de Santa Catarina, 1976.
- [19] WEINGAERTNER, W. L.; SCHROETER, R.B. **Tecnologia de Usinagem do Alumínio e suas Ligas**. Convênio UFSC - ALCAN, Florianópolis, 1991, 80p.
- [20] BARROW, G. **Tool-Life Equations and Machining Economics, Division of Machine Tool Engineering**. Department of Mechanical Engineering, UMIST.
- [21] EDDROSS do Brasil. **Curso de Fundamentos de Usinagem**. Florianópolis, Junho, 1995.
- [22] MARCONDES, C. F. **A História do Metal Duro**. SANDVICK do Brasil, 1ª edição, Unida Artes Gráficas e Editora Ltda., 1990, 234p.
- [23] PERROT, C. M.; ROBINSOM, P. M. **Mechanisms of Wear of Tungtein Carbide Cobalt Tools**. II Metal Cutting Applications, The Journal Of Australien Institute Of Metals, vol 19, nº 4, 1974.
- [24] OPTIZ, H.; KÖNIG, W. **On the Wear of Cutting Tools**. 7º I.M.T.D.R., 1966.
- [25] FIELD, M.; KAHLE, J. F. **Definition de L'usinabilité**. B.D.T. nº 30, Usinabilité des Fontes, 1963.
- [26] JAWAHIR, I.S., LUTTERVELT, C.A.V. **Recent Developments in Chip Control Research and Applications**. Annals of the CIRP, vol. 42/2/1993, p.659-693.
- [27] **Stahl**. Eisen Prüfblatt 1178-69.
- [28] **Tool and Manufacturing Engineers Handbook**, 4ª Edição, Vol.3(Materials, Finishing and Coating), Society of Manufacturing Engineers(SME), Dearborn, Michigan, 1986.

- [29] SOCIETY OF MANUFACTURING ENGINEERS. **Tool and manufacturing engineers handbook - machining**. 4.ed. Dearborn: One S.M.E. Drive, 1983. v.1.
- [30] GRAF, G. **Nichtrostende Austenitische Stähle Spanabwendig Bearbeiten**. Oberfläche Surface, Nº 4, 1992, p.22-25
- [31] JONSSON, H. **Rostfreien Stahl Drehen**. Werkstatt und Betrieb, Nº 127, 1994, p.69-70.
- [32] GANIER, M. **Reciclar, Eliminar e Valorizar Fluidos e Resíduos de Corte**. Máquinas e Metais, Dezembro, 1993, p.26-29.
- [33] WEINGAERTNER, W. L.; GOMES, J. O. **Tecnologia de Usinagem do Aço Inoxidável Austenítico (Torneamento Longitudinal Externo)**. Convênio UFSC - GERDAU, Florianópolis, 1995, 80p.
- [34] BOEHS, L. **Metodologia do Ensaio Sistemático de Usinagem para Operações de Torneamento**. Florianópolis: [s. n., 1991]. 82p.
- [35] HALD, A. **Statistical Theory With Engineering Applications**. 1ª ed. 780p, 1952.
- [36] NANNI, L. F.; RIBEIRO, J. L. **Planejamento e Avaliação de Experimentos**. 2ª edição, UFRGS, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 1992.
- [37] ASM INTERNATIONAL. **Metals Handbook: Atlas of Microstructures of Industrial Alloys**. Ohio: Metals Park, 1973. v 7, 685p.
- [38] ROCHA, A.S. **Determinação de um Modelo de Força de Usinagem para a Furação, a partir do Modelo de Força de Usinagem do Torneamento**. Florianópolis, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), fevereiro, 1985, 117f. (Dissertação de Mestrado)
- [39] MICHELETTI, G.F. **Mecanizado por Arranque de Viruta**. 1ª Edição, Espanha, Editora Blume, 1980, 425p.
- [40] SPESCHA, G. **Piezoelektrische Mehrcomponent-Kraft-Momentmessung**. Winterthur: Kistler instrumente AG, 1970, 15p.
- [41] STEHRENBURGER, E. **Drehen, Bohren, Fraesen: Arbeitsblaeter fuer Zerspanungsversuche**. Winterthur: Kistler Instrumente AG, 11p.

- [42] CUPINI, N.L. **Métodos Simples Facilitam a Seleção do Metal a Ser Usinado.** Dirigente Industrial, Vol. 17, Nº 7, Agosto, 1977.
- [43] GUNNARSSON, S. **Machinability of Stainless Steel.** Uddeholm Tooling AB, Hagfors, p.147-156.
- [44] NICODEMI, W. **Gli Acciai Inossidabili.** Ordinario di Siderurgia al Politecnico di Milano, p.2-7.
- [45] JONSSON, H.; RYDEBERG, D. **Turning Stainless Steel(Part Two).** Stainless Steel, Vol. 2, Nº 3, 1990, p.32-37.
- [46] VAGLE, M.; GATES, A. **Coating the Cutting Edge.** Machine and Tool BLUE BOOK, Outubro, 1988, p 56-59
- [47] HERITIER, B.; DUET, R.; HENRY, M.; MAITREPIERRE. **Comparaison Entre les Resultats d'Usinabilite des Aciers Inoxydables Obtenus par Divers Essais. Cas Particulier du Tournage Accelere.** Bulletin du Cercle d'Etudes des Metaux. nº 1, Março, 1983.
- [48] RAGON, R.; PEPIN, J. M.; DUET, R.; HERITIER, B.. **Evaluation de L'Usinabilite de Lots de Barrs d'Aciers Inoxydables par un Essai Rapid de Tournage Acelere.** Bulletin du Cercle d'Etudes des Metaux.
- [49] KITAGAWA, T.; MAEKAWA,K.. **Wear of Carbide Tools and It's Analytical Prediction in Turning High Manganese Steel (Part 1).** Societi of Precision Engineering, Vol 19, nº 3, Bull, Japan, Setembro, 1985, p. 199-204.
- [50] NIITSU, Y.; IKEGAMI, K.. **Effect of Temperature Variation on Plastic Behavior of SUS 304 Stainless Steel.** Bulletin of JSME, vol. 28, nº 246, Dezembro, 1985, p. 2853-2858.
- [51] AGAPIOU, J. S.; HALLDIN, G. W.; DEVRIES, M. F.. **On the Machinability of Powder Metallurgy Austenitic Stainless Steels.** Journal of Engineering for Industry., vol. 110, Novembro, 1988, p. 339-343.
- [52] GROßMANN, G.. **Drehen Austenitischer Stähle.** Special Werkzeuge. Agosto, 1994, p. 20-24.

- [53] WIESNER, C. **Residual Stresses after Orthogonal Machining of AISI 304: Numerical Calculation of the Thermal Component and Comparison with Experimental Results**, Metallurgical Transactions A, vol. 23A, Março, 1992, p. 989-995
- [54] TAKEMOTO, T.; MURATA, Y.; TANAKA, T. **Effects of Alloying Elements and Thermomechanical Treatments on Mechanical and Magnetic Properties of Cr-Ni Austenitic Stainless Steel**. ISIJ International, vol. 30, n° 8, 1980, p. 608-614
- [55] PIIPO, K.; WAGNER, R. **Fräsbearbeitung austenitischer Stähle**. WT-Werkstattstechnik, vol 81, 1991, p. 269-272.
- [56] ISO 3685. **Tool-life Testing With Single-Point Turning Tools**. 1th. edition- 1977-05-15.