

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

USINABILIDADE DE LIGAS DE ALUMÍNIO
TRATÁVEIS TERMICAMENTE

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

ALOISIO JOSÉ SCHUITEK

DEFESA: 21 DE OUTUBRO DE 1997

FLORIANÓPOLIS

**USINABILIDADE DE LIGAS DE ALUMÍNIO
TRATÁVEIS TERMICAMENTE**

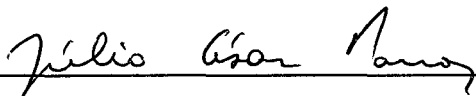
ALOISIO JOSÉ SCHUITEK

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
MESTRE EM ENGENHARIA
ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO
FABRICAÇÃO, APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**



Prof. Walter Lindolfo Weingaertner, Dr. - Ing.

Orientador



Prof. Júlio César Passos, Dr.

Coordenador da Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Lourival Boehs, Dr. Eng. Mec.



Prof. Carlos Henrique Ahrens, Dr. Eng. Mec.



Prof. Rolf Bertrand Schroeter, Dr. Eng. Mec.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr.-Ing. Walter Lindolfo Weingaertner, pelo apoio e orientação deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pela concessão de bolsa de estudos.

À Alcan Alumínio do Brasil S.A., pela doação de matéria-prima para a execução dos ensaios de usinagem.

À Sandvik Coromant, pela doação de insertos de metal duro e porta-ferramenta.

Ao Laboratório de Análise de Superfícies Usinadas (LASUS) - UFSC, pelo empréstimo de equipamentos para a qualificação de ferramentas e superfícies usinadas.

Aos integrantes do Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP) - UFSC, pelo apoio e companherismo. Agradecimento especial a “Seu Hamilton”, pelo auxílio técnico e à secretária Rosimar Maria Franzoi, pela amizade e incentivo.

Aos então bolsistas de Iniciação Científica do CNPq no LMP, graduandos em Engenharia Mecânica Júlio Cesar Lins da Silva, Rubens Zunino Sgrott e Manfred Molz, pelo auxílio na execução dos experimentos.

Aos colegas de curso e professores do Departamento de Engenharia Mecânica - UFSC.

Aos colegas professores no Departamento Acadêmico de Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná (CEFET-PR).

Aos estagiários do Centro de Fabricação Mecânica do CEFET-PR, alunos Cristian Silvestre da Engenharia Mecânica e Rafael Fernando Zotto do Técnico em Mecânica, pelo auxílio na editoração final deste trabalho.

Aos colegas de trabalho da Robert Bosch Ltda., Guilherme Farina Hartung, Carlos Renato Kauer e Nelson Lima Bellos, pelo grande incentivo para a conclusão deste trabalho.

Em especial, a Rolf Bertrand Schroeter, Dr. Eng. Mec. e ao então graduando em Engenharia Mecânica Carlos Christian Gommersbach pela imprescindível colaboração na execução deste trabalho, seja na forma de auxílio nos ensaios, traduções e sugestões, como também pelo grande incentivo e amizade.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

*Agradar aos outros até não é tão difícil,
problema maior é tentar satisfazer a si próprio.*

ÍNDICE

Simbologia	xi
Lista de Figuras	xiv
Lista de Tabelas	xvii
Resumo	xix
Abstract	xx
1. INTRODUÇÃO	1
2. ESTADO DA ARTE	3
2.1. Ligas de Alumínio	3
2.2. Classificação e Composição Química de Ligas Trabalháveis	3
2.3. Ligas de Alumínio Tratáveis Termicamente	5
2.3.1. Tratamentos	5
2.3.2. Têmperas	6
2.3.3. Ligas de alumínio de corte livre	8
2.4. Propriedades e Aplicações de Ligas de Alumínio	8
2.5. Fundamentos de Usinagem com Ferramentas de Geometria Definida	11
2.6. Mecanismo de Formação de Cavacos	13
2.6.1. Processo de corte	13
2.6.2. Gumes postiços	15
2.6.3. Cavacos aparentes	16
2.7. Usinabilidade	17
2.8. Vida das Ferramentas	19
2.9. Forças na Usinagem	22
2.9.1. Conceitos básicos e definições	22

2.9.2. Medição de forças	25
2.9.3. Forças específicas tabeladas para diversos materiais	25
2.10. Qualidade Superficial	28
2.10.1. Definições	28
2.10.2. Rugosidade	28
2.11. Formas de Cavaco	31
2.11.1. Definições	31
2.11.2. Material da peça	33
2.11.3. Parâmetros de corte	35
2.11.4. Geometria da ferramenta	36
2.12. Índice de Usinabilidade para Ligas de Alumínio	36
2.13. Materiais para Ferramentas	38
2.13.1. Considerações	38
2.13.2. Aço-rápido	38
2.13.3. Aço-rápido sinterizado	40
2.13.4. Metal duro	40
2.13.5. Cerâmica	41
2.13.6. Diamante	42
2.13.7. Nítreto de boro cúbico (CBN)	43
2.14. Máquinas-Ferramentas	43
3. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	45
3.1. Considerações Iniciais	45
3.2. Planejamento dos Ensaios	46
3.2.1. Variáveis de entrada	46
3.2.2. Variáveis de saída	49
3.3. Material Ensaiado	51
3.3.1. Composição química	51

3.3.2.	Processo de fabricação	52
3.3.3.	Propriedades mecânicas	52
3.3.4.	Corpos de prova	53
3.4.	Materiais para Ferramentas	54
3.4.1.	Aço-rápido	54
3.4.2.	Metal duro	54
3.5.	Máquinas-Ferramentas	55
3.6.	Equipamentos para Confeção e Controle das Ferramentas	56
3.7.	Equipamentos para Verificação da Qualidade Superficial	56
3.8.	Equipamentos para Medição de Forças na Usinagem	56
3.9.	Calibrações.....	57
3.9.1.	Controle das velocidades de rotação e avanço	57
3.9.2.	Calibração do sistema de medição das forças na usinagem	58
3.10.	Considerações Finais	59
4.	ANÁLISE DOS RESULTADOS	60
4.1.	Crítério Qualidade Superficial	60
4.1.1.	Estabilização de ferramentas	60
4.1.2.	Comparação entre as ligas USINAL 101, 201 e 301	62
4.1.3.	Geometria da ferramenta	62
4.1.4.	Condições de corte	73
4.1.5.	Comparações entre ferramentas de aço-rápido e metal duro	81
4.1.6.	Comparações entre máquinas-ferramentas	83
4.1.7.	Influência do tempo de usinagem	84
4.2.	Crítério Formas de Cavacos	87
4.2.1.	Geometria da ferramenta	88
4.2.2.	Condições de corte.....	92
4.2.3.	Inserto de metal duro com quebra-cavacos	97

4.3. Critério Forças na Usinagem	100
4.3.1. Geometria da ferramenta	100
4.3.2. Condições de corte	104
4.3.3. Forças específicas de corte	107
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE	
DO TRABALHO	108
5.1. Conclusões	108
5.2. Sugestões para Continuidade do Trabalho	112
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	113
ANEXO I	118
1. Comprovação do Número de Medições de Rugosidade	119
2. Comparação Estatística de Rugosidade entre a Condição Padrão e uma Condição Crítica de Usinagem	128
ANEXO II	132
ANEXO III	134
ANEXO IV	141
ANEXO V	144

SIMBOLOGIA

Letras maiúsculas

A	-	Amplitude
A.A.	-	Aluminum Association - USA
C_v	-	Vida para $v_c = 1$ m/min - constante do material usinado
DM	-	Dispersão de medição
E	[N/mm ²]	Módulo de elasticidade
F	[N]	Força de usinagem
F_c	[N]	Força de corte
F_f	[N]	Força de avanço
F_n	-	Função de distribuição normal do universo de valores
$F_N(z_{1,0})$	-	Função de distribuição normal dos limites superiores de classe
F_p	[N]	Força passiva
H_0	-	Hipótese nula
H_1	-	Hipótese alternativa
HB	[HB]	Dureza Brinell
P	[W]	Potência
R_a	[μ m]	Desvio médio aritmético de rugosidade (rugosidade R_a)
$R_{máx.}$	[μ m]	Profundidade máxima individual de rugosidade (rugosidade $R_{máx.}$)
R_t	[μ m]	Profundidade máxima de rugosidade (rugosidade R_t)
R_z	[μ m]	Profundidade média da rugosidade (rugosidade R_z)
T	[min]	Vida da ferramenta
VB	[mm]	Largura da marca de desgaste

Letras minúsculas

a_p	[mm]	Penetração passiva (profundidade de corte no torneamento)
b	[mm]	Largura de usinagem
d	[mm]	Diâmetro externo do corpo de prova
f	[mm]	Avanço por rotação (torneamento)
$f_{i,e}$	-	Frequência de ocorrência de classe esperada
h	[mm]	Espessura de usinagem
$h_{i,e}$	-	Frequência absoluta de ocorrência de classe
k	-	Coefficiente angular da curva de vida
k	-	Número de classes
k_c	[N/mm ²]	Força específica de corte para uma seção qualquer
$k_{c1,1}$	[N/mm ²]	Força específica de corte para uma seção de 1 mm x 1 mm
n	[rpm]	Rotação
n	-	Número de amostras = tamanho da amostra-piloto
m	-	Número de parâmetros ponderados
r_s	[mm]	Raio de quina
s	-	Desvio padrão da amostra
s^2	-	Variância da amostra
t	-	Coefficiente de Student
v_c	[m/min]	Velocidade de corte
\bar{x}	-	Média da amostra = valor médio
$x_{i,0}$	-	Limites superiores de classe
$z_{i,0}$	-	Variável reduzida da distribuição normal da classe
$z_{i-1,0}$	-	Variável reduzida da distribuição normal da classe anterior
$(1-m_c)$	-	Coefficiente angular para a força de corte

Letras gregas

α	[°]	Ângulo de incidência = ângulo de folga
α'	[°]	Ângulo de incidência secundário = ângulo de folga lateral
β	[°]	Ângulo de cunha = ângulo de corte
γ	[°]	Ângulo de saída
ε	[°]	Ângulo de quina
λ	[°]	Ângulo de inclinação
μ	-	Média do universo de valores
ν	-	Grau de liberdade do teste Qui-quadrado
ρ	[μm]	Raio do gume da ferramenta
σ	-	Variância do universo de valores
χ	[°]	Ângulo de direção do gume = ângulo de posição
χ'	[°]	Ângulo de direção do gume secundário = ângulo de posição lateral
χ^2	-	Intervalo de confiança do teste Qui-quadrado
χ^2_c	-	Valor crítico do intervalo de confiança do teste Qui-quadrado
$\Delta\mu$	-	Tamanho do intervalo de confiança
Σ	-	Somatório de valores

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

2.1. Ferramenta de torneamento	11
2.2. Ângulos e planos de uma ferramenta de torneamento	12
2.3. Raiz do cavaco	13
2.4. Representação esquemática dos tipos de cavacos.....	14
2.5. Desgaste da ferramenta na usinagem de ligas de alumínio	21
2.6. Componentes das forças no torneamento	23
2.7. Seção de corte no torneamento	23
2.8. Forças específicas de corte para alguns materiais	27
2.9. Fatores influentes sobre a qualidade superficial	29
2.10. Representação esquemática da formação da rugosidade de processo	30
2.11. Classificação de cavacos para torneamento (Teste Stahl-Eisen)	32

CAPÍTULO 3

3.1. Principais variáveis de entrada para a usinabilidade de ligas de alumínio tratáveis termicamente - Processo de torneamento	47
3.2. Classificação de cavacos adotada nos ensaios.....	50
3.3. Corpo de prova	53
3.4. Representação esquemática do sistema para medição das forças na usinagem	57

CAPÍTULO 4

4.1. Influência da estabilização de ferramentas sobre a qualidade superficial	61
---	----

4.2. Influência de γ sobre a qualidade superficial.....	63
4.3. Influência de γ sobre a qualidade superficial em condições de desbaste.....	64
4.4. Influência de r_e sobre a qualidade superficial.....	65
4.5. Influência de γ e r_e sobre a qualidade superficial.....	66
4.6. Representação esquemática de um inserto para a usinagem de alumínio e suas ligas	67
4.7. Influência de α sobre a qualidade superficial	68
4.8. Influência de α' sobre a qualidade superficial	69
4.9. Influência de λ sobre a qualidade superficial	70
4.10. Influência de χ sobre a qualidade superficial	71
4.11. Influência de χ' sobre a qualidade superficial	72
4.12. Influência de v_c sobre a qualidade superficial	74
4.13. Influência de a_p sobre a qualidade superficial	76
4.14. Influência dos fluidos de corte sobre a qualidade superficial	77
4.15. Influência dos fluidos de corte sobre a qualidade superficial	78
4.16. Ferramenta com gume postiço - Vista superior	79
4.17. Ferramenta com gume postiço - Vista lateral	79
4.18. Influência da posição da ferramenta em relação ao centro da peça sobre a qualidade superficial	80
4.19. Comparações entre ferramentas de aço-rápido e metal duro	82
4.20. Influência do fluido de corte sobre a qualidade superficial - Ferramenta de metal duro	82
4.21. Influência das máquinas-ferramentas sobre a qualidade superficial	83
4.22. Influência do tempo de usinagem sobre a qualidade superficial	85
4.23. Medição qualitativa de ρ - ferramenta em início de corte	86
4.24. Medição qualitativa de ρ - após ensaio de usinagem de longa duração	86
4.25. Influência de γ sobre as formas de cavacos - USINAL 101	89
4.26. Influência de γ e r_e sobre as formas de cavacos - USINAL 101	90
4.27. Influência de γ sobre as formas de cavacos - USINAL 201	91

4.28. Influência de γ sobre as formas de cavacos - USINAL 301	91
4.29. Influência de v_c sobre as formas de cavacos - USINAL 101	92
4.30. Influência de v_c sobre as formas de cavacos - USINAL 201	93
4.31. Influência de v_c sobre as formas de cavacos - USINAL 301	93
4.32. Influência de a_p sobre as formas de cavacos - USINAL 101	94
4.33. Influência de a_p sobre as formas de cavacos - USINAL 201	95
4.34. Influência de a_p sobre as formas de cavacos - USINAL 301	95
4.35. Influência de fluidos de corte sobre as formas de cavacos - USINAL 101	97
4.36. Influência de ferramentas com quebra-cavacos na usinagem de USINAL 201 e 301	98
4.37. Ferramenta com cavaco aparente encontrado na usinagem do USINAL 301	99
4.38. Influência de γ sobre a força de corte	101
4.39. Influência de γ sobre a força de avanço e força passiva	102
4.40. Influência de χ sobre a força de corte - USINAL 101	103
4.41. Influência de χ sobre a força de avanço e força passiva - USINAL 101	103
4.42. Influência da velocidade de corte sobre as forças de corte	104
4.43. Influência da profundidade de corte e do avanço sobre a força de corte - USINAL 101	106
4.44. Influência do fluido de corte sobre a força de corte - USINAL 101	106

ANEXO IV

A1. Calibração das rotações do torno Kart KM-200	142
A2. Calibração dos avanços do torno Kart KM-200	142
A3. Calibração de F_c , F_f e F_p	143

ANEXO V

A4. Folha de ensaios de usinagem para avaliação da qualidade superficial e cavacos	145
--	-----

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

Tabela 1 - Designação de ligas de alumínio trabalháveis	4
Tabela 2 - Composição química de algumas ligas de alumínio trabalháveis	5
Tabela 3 - Propriedades mecânicas típicas de algumas ligas de alumínio tratáveis termicamente	10
Tabela 4 - Forças específicas para algumas ligas de alumínio trabalháveis	26
Tabela 5 - Forças específicas para aços	26
Tabela 6 - Índice de usinabilidade para algumas ligas de alumínio (conforme A.A.)	37

CAPÍTULO 3

Tabela 7 - Composição química das ligas ensaiadas	51
Tabela 8 - Propriedades mecânicas das ligas de alumínio ensaiadas	53

CAPÍTULO 4

Tabela 9 - Influências da variação dos ângulos de saída e de inclinação sobre as componentes da força de usinagem	101
Tabela 10 - Forças específicas de corte para as ligas de alumínio USINAL 101, 201 e 301	107

ANEXO I

Tabela 11 - Valores de rugosidade R_a e R_z da amostra-piloto	121
---	-----

Tabela 12 - Distribuição dos valores de R_a em classes de frequência	122
Tabela 13 - Valores da função normal para as classes de Rugosidade R_a	123
Tabela 14 - Cálculo da frequência absoluta de ocorrência das classes para a rugosidade R_a	124
Tabela 15 - Frequência absoluta de ocorrência das classes corrigida para a rugosidade R_a	124
Tabela 16 - Intervalo de confiança em função do tamanho da amostra para R_a	126
Tabela 17 - Intervalo de confiança em função do tamanho da amostra para R_z	127
Tabela 18 - Avaliação estatística de R_a e R_z para a condição padrão dos ensaios	129
Tabela 19 - Avaliação estatística de R_a e R_z para a condição crítica dos ensaios	130

ANEXO II

Tabela 20 - Geometria das ferramentas de aço-rápido utilizadas nos ensaios	133
--	-----

RESUMO

O presente trabalho abrange os resultados de pesquisa da usinabilidade das ligas de alumínio tratáveis termicamente específicas para usinagem 2011-T3, 6061-T8 e 6262-T8. O processo de usinagem utilizado foi o de torneamento longitudinal externo com ensaios de curta duração. Nos ensaios foram utilizadas principalmente ferramentas de aço-rápido, onde estudou-se a influência de uma ampla faixa de variações na geometria das ferramentas e condições de corte. Os critérios de usinabilidade empregados para análise foram a qualidade superficial, formas de cavaco e forças de usinagem.

Os resultados dos ensaios quanto à qualidade superficial apresentaram, entre outros, a influência marcante da microgeometria do gume, a necessidade de uma estabilização de ferramentas recém-afiadas e a interdependência entre o raio de quina e o ângulo de saída. Ensaios de usinagem comparativos mostraram ainda que praticamente não existem diferenças de acabamento superficial entre as três ligas ensaiadas.

Quanto ao critério de formas de cavacos, a usinabilidade da liga 2011-T3 pode ser considerada como excelente, enquanto que as demais apresentam sérios problemas e necessitam de recursos adicionais para facilitar a quebra de cavacos. Para as forças de usinagem, foram determinadas as influências das principais condições de corte e os valores da força específica de corte para cada uma das ligas de alumínio ensaiadas.

ABSTRACT

This work presents the results of a research on machinability of the solution heat-treated and aged aluminum alloys 2011-T3, 6061-T8 and 6262-T8, where short-term longitudinal turning was applied as the machining process.

During the tests, high-speed steel tools were chiefly used, and the influence of a wide range of different tools and cutting conditions was studied. The machinability criteria adopted for analysis were superficial quality, chip shape and machining force.

Regarding superficial quality, it was observed the strong influence of the microgeometry of the cutting edge, as well as the need for stabilization of sharpened tools and the interdependency between the nose radius and rake angle. It was shown by testing that there were nearly no differences in surface finish of the alloys tested when comparing the results.

When analyzing the shape of the chips, the machinability of the 2011-T3 alloy can be considered as excellent, whereas the others present severe problems and need for additional resources to turn chip breakage easier.

For the analysis of the machining forces, it was determined the influence of the main cutting conditions and values of specific cutting force for each of the alloys above mentioned.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Os processos de usinagem, em um sentido amplo, compreendem qualquer processo mecânico que tenha como objetivo dar a uma peça a forma, as dimensões e a qualidade superficial especificadas, mediante o arranque de cavacos por uma ferramenta apropriada [1].

Nos últimos anos, o desenvolvimento tecnológico alcançou a área de usinagem, impulsionado pela necessidade de aumentos em produtividade, ou seja, produzir mais rápido, com melhor qualidade e mais barato. Para isso vem sendo desenvolvidas máquinas-ferramentas cada vez mais rápidas, precisas, automatizadas e de comando numérico. O campo de materiais para ferramenta também apresenta avanços sensíveis e está longe de estar completamente explorado. Paralelamente a isso, tem-se o desenvolvimento de novas matérias-primas, com propriedades e comportamentos específicos, seja para suprir as necessidades de aplicação ou mesmo para poderem ser mais facilmente manipuladas na fabricação de peças. Por todos esses desenvolvimentos é muito difícil para o profissional da área de usinagem manter-se atualizado ou mesmo ter condições de testar as inúmeras variáveis que surgem no processo de usinagem.

Muitos pesquisadores têm trabalhado na busca de melhores condições para a usinagem dos principais materiais utilizados em engenharia. Nestes trabalhos há grande preocupação quanto às variações nos parâmetros de corte e quanto à geometria das ferramentas. Com isso, buscam-se principalmente maneiras de baixar os custos de fabricação, obter melhorias na qualidade superficial e aumentos da vida de ferramentas, bem como facilidades de usinagem em termos gerais. Neste sentido, a proposta do presente trabalho é obter dados sobre a usinabilidade de alguns destes materiais importantes industrialmente, no caso, ligas de alumínio tratáveis termicamente.

Nos últimos anos houve um grande aumento na produção e uso do alumínio e suas ligas, tanto que, atualmente, depois do ferro, é o metal mais utilizado na fabricação de peças. Este alto consumo deve-se ao grande campo de aplicação proporcionado pela variedade de propriedades possíveis nas ligas e as inerentes do material de base. Exemplos clássicos dessas características são a baixa densidade e a possibilidade de uma elevada relação resistência/peso [2,3].

De uma maneira geral, as ligas de alumínio são consideradas de boa usinabilidade pelo critério de vida da ferramenta, e podem ser normalmente usinadas a velocidades de corte bem maiores que metais mais pesados. Além das velocidades de corte possíveis, a usinagem destas ligas oferece outras vantagens, como baixas forças de corte, excelente acabamento e bom controle dimensional.

A escolha dos parâmetros corretos para a usinagem das ligas de alumínio apresenta algumas dificuldades. Os valores de corte empregados na indústria, principalmente a velocidade de corte, variam grandemente de usuário para usuário, bem mais do que, por exemplo, os valores empregados na usinagem de aços e ferros fundidos [4]. A dificuldade para determinação dos valores ótimos de usinagem têm diversas causas. Dentre elas, podem-se citar as variações nas características de usinagem entre as ligas, o surgimento de cavacos aparentes, a ocorrência de gumes postiços, as limitações das máquinas-ferramentas usuais, as exigências de qualidade superficial e a necessidade de formas adequadas de cavacos. Uma dificuldade adicional na escolha dos parâmetros de usinagem das ligas de alumínio é a pequena quantidade de informações detalhadas disponíveis sobre a usinagem de ligas específicas.

Este trabalho tem como objetivo obter dados sobre a usinabilidade de ligas de alumínio tratáveis termicamente, mais especificamente as ligas 2011-T3, 6262-T8 e 6061-T8, produzidas pela Alcan Alumínio do Brasil S.A. e com designação comercial USINAL 101, 201 e 301, respectivamente. Para tanto, através de ensaios de torneamento longitudinal externo de curta duração são estudadas as influências de várias geometrias de ferramenta e parâmetros de corte, utilizando-se principalmente o aço-rápido como material de ferramenta. Em ensaios específicos verifica-se a influência da máquina-ferramenta e de ferramentas de metal duro sobre o processo de usinagem. Os critérios de usinabilidade para análise são a qualidade superficial, formas de cavaco e forças de usinagem. Com os resultados desses ensaios objetiva-se determinar as melhores condições de trabalho para cada liga de alumínio estudada.

Com este trabalho objetiva-se também mostrar a necessidade e a utilidade de ensaios de usinabilidade nos materiais mais empregados na indústria, sob condições controladas, que sejam reproduzíveis, comparáveis e úteis como informação para o usuário.

CAPÍTULO 2

ESTADO DA ARTE

2.1. Ligas de Alumínio

As ligas de alumínio, assim como o aço, são classificadas em um grande número de ligas, cada uma das quais com diferentes combinações de elementos de liga e tratamentos para satisfazer às classes específicas de aplicações [2].

As ligas de alumínio são obtidas a partir da refusão de alumínio primário, elementos de liga, refinadores de grão e sucata de alumínio selecionada [4]. A reciclagem de sucata para a obtenção de alumínio secundário é uma das vantagens importantes da utilização deste metal e tornou-se praticamente indispensável, já que o processo para obtenção do alumínio secundário exige apenas 5 % da energia gasta na produção do primário [5].

A partir do envazamento das ligas de alumínio já é possível fazer uma primeira classificação entre ligas de alumínio. Ligas fundidas, obtidas diretamente após a solidificação do metal líquido em moldes com a forma da peça, e as ligas trabalháveis ou conformáveis, nas quais os produtos são obtidos pela transformação mecânica de um semi-acabado (placa, tarugo, vergalhão ou barra). Os processos de conformação mais utilizados em ligas trabalháveis são a laminação, extrusão, forjamento e trefilação [4].

2.2. Classificação e Composição Química de Ligas Trabalháveis

As principais características das ligas de alumínio são determinadas pela ação de elementos de liga. Os mais utilizados são o cobre, silício, magnésio, zinco e manganês. Adições de cromo, níquel, vanádio, chumbo, bismuto, prata, zircônio e lítio conferem propriedades especiais às ligas básicas, como maior resistência à corrosão sob tensão, controle de recristalização ou usinabilidade.

Outros elementos, como ferro, titânio, sódio, estrôncio e antimônio são considerados como impurezas [4].

A Aluminum Association - USA (A.A.) estabeleceu um sistema para designar as ligas de alumínio, que é adotado praticamente em todo o mundo [4]. O sistema de designação de ligas de alumínio trabalháveis consiste em um número com 4 dígitos e para as ligas fundidas são 3 dígitos seguidos por um ponto e um quarto dígito. Em ambos os casos, o primeiro dígito identifica o principal elemento de liga (Tabela 1), enquanto os dígitos posteriores determinam cada liga em particular [2,4].

Designação	Componente Majoritário da Liga
1XXX	Nenhum
2XXX	Cobre
3XXX	Manganês
4XXX	Silício
5XXX	Magnésio
6XXX	Magnésio e Silício
7XXX	Magnésio e Zinco
8XXX	Outros

Tabela 1 - Designação de ligas de alumínio trabalháveis [4]

Na Tabela 2 são dados os limites de composição química de algumas ligas de alumínio trabalháveis. Algumas ligas normalizadas pela A.A. têm limites de composição química que são similares, mas não idênticos aos adotados em alguns países. Nestas adiciona-se uma letra após a identificação numérica, indicando uma variante. Ligas com composição química experimental têm uma letra "X" precedendo a sua identificação [4].

As normas alemãs (DIN) especificam as ligas de alumínio trabalháveis através de uma sequência direta dos símbolos químicos mais influentes. Assim, por exemplo, as ligas 2011 e 6061 pela A.A. correspondem respectivamente às ligas AlCuPbBi e AlMgSi na Norma DIN.

Composição Química

Liga	Al	Cu	Mn	Si	Mg	Zn	Cr	Bi	Pb	Fe	Ti	outros	
												cada	total
1200 máx. mín.	99,00	0,05	0,05			0,10		0,009	0,009		0,05	0,05	0,10
2011 máx. mín.		6,0 5,0		0,4		0,30		0,60 0,20	0,60 0,20	0,7		0,05	0,15
2014 máx. mín.		5,0 3,9	1,2 0,4	1,2 0,5	0,8 0,2	0,25	0,10			0,7	0,15	0,05	0,15
2017 máx. mín.		4,5 3,5	1,0 0,4	0,8 0,2	0,8 0,4	0,10	0,10			0,7	0,15	0,05	0,15
2024 máx. mín.		4,9 3,8	0,9 0,3	0,5	1,8 1,2	0,25	0,10			0,5	0,15	0,05	0,15
3003 máx. mín.		0,20 0,05	1,5 1,0	0,6		0,10				0,7		0,05	0,15
4047 máx. mín.		0,15	0,15	13,0 11,0	0,1	0,20				0,8		0,05	0,15
5356 máx. mín.		0,10	0,20 0,05	0,25	5,5 4,5	0,10	0,20 0,05			0,4	0,20 0,06	0,05	0,15
6061 máx. mín.		0,40 0,15	0,15	0,8 0,4	1,2 0,8	0,25	0,35 0,04			0,7	0,15	0,05	0,15
6262 máx. mín.		0,40 0,15	0,15	0,8 0,4	1,2 0,8	0,25	0,14 0,04	0,70 0,40	0,70 0,40	0,7	0,15	0,05	0,15
X6262 máx. mín.		0,40 0,15	0,45 0,25	0,8 0,4	1,2 0,8	0,10		0,70 0,40	0,70 0,40	0,4		0,05	0,15
7075 máx. mín.		2,00 1,20	0,30	0,4	2,9 2,1	6,1 5,1	0,28 0,18			0,5	0,20	0,05	0,15

Tabela 2 - Composição química de algumas ligas de alumínio trabalháveis [4]

2.3. Ligas de Alumínio Tratáveis Termicamente

2.3.1. Tratamentos

Uma das vantagens de se trabalhar com materiais metálicos é a possibilidade de alterar as propriedades mecânicas, principalmente aumento de dureza e resistência, tornando-as mais adequadas a um determinado processo ou uso final, sem modificação da composição química [4,5].

As ligas de alumínio trabalháveis são geralmente divididas em dois grupos: ligas tratáveis e não tratáveis termicamente. Nas ligas não tratáveis, o endurecimento é obtido pela conformação mecânica a frio (laminação ou trefilação). O grupo de ligas não tratáveis termicamente compreende as séries 1XXX, 3XXX, 4XXX e 5XXX [2,4].

As ligas tratadas termicamente têm em sua composição elementos cuja solubilidade no alumínio aumenta com a temperatura e é muito baixa em temperaturas próximas à ambiente. Nesse caso, com a ação de elementos como o cobre, magnésio-silício e magnésio-zinco é possível melhorar as propriedades mecânicas das ligas através de um ciclo de tratamento térmico de solubilização e envelhecimento [4].

Ao aquecer o material a temperaturas da ordem de 500 °C, os elementos de liga entram em solução sólida, que pode ser retida ao se resfriar bruscamente o material em água, por exemplo. O tratamento de solubilização pode ser realizado em forno (solubilização formal) ou, para o caso de algumas ligas de extrusão, é possível realizar a solubilização em prensa, em decorrência do aquecimento do tarugo e pela deformação que o metal sofre ao passar pela matriz [4,6].

Após a solubilização, o metal está em uma situação instável, em que os elementos de liga tendem a sair da solução, formando precipitados. Estes, sendo finos e bem distribuídos, bloqueiam o movimento das discordâncias e endurecem o material. Essa precipitação (envelhecimento) pode ocorrer a temperatura ambiente, acarretando em tempos mais longos (dias ou meses), ou ser acelerada pelo aquecimento durante algumas horas na faixa de 150 a 200 °C (envelhecimento artificial) [4,6].

O grupo das ligas de alumínio tratáveis termicamente compreende as séries 2XXX (Al-Cu), 6XXX (Al-Mg-Si), 7XXX (Al-Mg-Zn) e algumas ligas do grupo 8XXX [2,4].

2.3.2. Têmperas

O termo têmpera, correspondente ao inglês “temper”, é uma condição ou estado produzido no metal ou liga por tratamento térmico ou mecânico e que produz estrutura e propriedades mecânicas características. O uso dessa expressão já está bastante generalizado, mas deve-se cuidar para evitar confusão com a expressão “têmpera dos aços” (quenching, em inglês), completamente diferente [4].

O sistema de nomenclatura de têmperas se baseia em letras e as subdivisões destas são indicadas por um ou mais números, que especificam as operações básicas que o material deve sofrer.

As designações básicas de têmperas de ligas de alumínio são [2,4]:

- “F” - Fabricadas: pouco controle sobre as condições de processo e pequena garantia das propriedades obtidas;
- “O” - Recozidas: para se obter o máximo amolecimento e a máxima conformabilidade do material;
- “W” - Solubilizadas;
- “H” - Encruadas: aplicado às ligas não tratáveis termicamente;
- “T” - Tratadas termicamente: aplicado às ligas de alumínio tratáveis termicamente, podendo ou não ter encruamento adicional;

As têmperas mais utilizadas em ligas de alumínio trabalháveis são as “H” e “T” e essas também apresentam algumas subdivisões. Para as ligas tratáveis termicamente, por exemplo, as especificações de têmperas “T” são sempre seguidas de um ou mais dígitos, que determinam as diferenças entre os tratamentos [2,4]:

- T1: conformado a quente, resfriado e envelhecido naturalmente;
- T2: conformado a quente, resfriado, encruado e envelhecido naturalmente;
- T3: solubilizado, encruado e envelhecido naturalmente;
- T4: solubilizado e envelhecido naturalmente;
- T5: conformado a quente, resfriado e envelhecido artificialmente;
- T6: solubilizado e envelhecido artificialmente;
- T7: solubilizado e estabilizado (superenvelhecido);
- T8: solubilizado, encruado e envelhecido artificialmente;
- T9: solubilizado, envelhecido artificialmente e encruado;
- T10: conformado a quente, resfriado, envelhecido artificialmente e encruado.

Algumas ligas com têmperas “T” também podem apresentar dígitos posteriores às designações básicas, que indicam etapas adicionais do processo original (por exemplo T_51: estiramento por alívio de tensões) [2,4].

2.3.3. Ligas de alumínio de corte livre

Nas ligas de alumínio tratadas termicamente costuma-se classificar ainda uma série de ligas em particular, chamadas de ligas de alumínio de corte livre. Essas ligas são caracterizadas pela presença de elementos químicos de baixo ponto de fusão que têm a função de provocar a quebra de cavacos na usinagem.

Elementos químicos como o chumbo e bismuto, os mais utilizados em ligas de alumínio de corte livre, têm uma solubilidade restrita no alumínio sólido e formam uma fase macia e de baixo ponto de fusão, que promove a quebra do cavaco e ajuda na lubrificação do processo de corte [7,8].

As ligas de alumínio de corte livre mais importantes, principalmente para utilização em autômatos de usinagem, são: AlCuBiPb (2011), AlMgSiPb (6262) e AlCuMgPb [3].

2.4. Propriedades e Aplicações de Ligas de Alumínio

As ligas de alumínio vêm sistematicamente ampliando a sua participação entre os materiais metálicos oferecidos no mercado. Atualmente ocupam o segundo lugar em consumo, ficando atrás apenas do aço. As razões para o emprego generalizado destas ligas são as propriedades inerentes do material de base aliado a uma ampla variedade de propriedades conseguidas nas diversas ligas e tratamentos [2,5].

Dentre as propriedades importantes do alumínio e suas ligas pode-se citar [2,4,9]:

- Densidade: as ligas de alumínio possuem uma densidade de aproximadamente 1/3 do aço e do latão. Assim, por exemplo, para cada quilograma de material usinado, a utilização de alumínio permite que sejam produzidas três vezes mais peças.

- Resistência mecânica: algumas ligas de alumínio possuem resistência mecânica equivalente ou superior a determinados aços. A combinação da alta resistência e baixa densidade dessas ligas resulta em uma das melhores relações resistência-peso dentre os metais estruturais.

- Condutibilidade térmica: inferior somente à da prata, do cobre e do ouro, torna as ligas de alumínio adequadas para aplicações em equipamentos destinados a permutar calor;

- Condutibilidade elétrica: as ligas de alumínio apresentam alta condutibilidade elétrica e que, aliada à neutralidade magnética, torna-as adequadas para utilização em cabos condutores;
- Resistência química e contra corrosão: imediatamente após a exposição ao ar, o alumínio puro desenvolve uma camada transparente, resistente e impermeável de óxido de alumínio que o protege das mais variadas formas de ataque químico. Nas ligas de alumínio (principalmente as com cobre), essa proteção não apresenta a mesma resistência à corrosão, sendo necessária em algumas situações a aplicação de revestimentos;
- Tratamentos superficiais: as ligas de alumínio permitem uma grande variedade de processos específicos de tratamento superficial, com objetivos decorativos, para maior resistência mecânica, dureza superficial, resistência ao desgaste e outros;
- Inofensivo à saúde: como o alumínio e a maior parte de suas ligas não são tóxicos, sendo ainda de fácil limpeza e esterilizáveis, encontram amplo emprego nas indústrias farmacêuticas e de alimentos;
- Ponto de fusão: o baixo ponto de fusão (659°C), elevado ponto de ebulição (aproximadamente 2.000°C) e estabilidade a qualquer temperatura tornam a fusão e moldagem do alumínio muito fáceis;
- Usinabilidade: a elevada velocidade de corte possível nas ligas de alumínio permite tempos de usinagem bastante curtos, com resultados excelentes, principalmente para ligas de corte livre;
- Conformabilidade: devido à alta ductilidade, são facilmente conformáveis, possibilitando a fabricação de perfis e tubos com formas e diâmetros quase irrestritos;
- Soldabilidade: todos os métodos usuais de soldagem são aplicáveis às ligas de alumínio.

Na usinagem de ligas de alumínio é importante o conhecimento das suas principais propriedades. Algumas das mencionadas são muito favoráveis para a usinagem, como a baixa densidade e a alta condutibilidade térmica. A primeira por proporcionar menores esforços inerciais, determinando menores desgastes nos equipamentos e possibilitando mudanças de velocidade e manobras rápidas com menor vibração do conjunto. Já a condutibilidade térmica elevada favorece a rápida dissipação de calor gerado, possibilitando o trabalho em avanços e velocidades de corte

elevados [4].

Algumas propriedades das ligas de alumínio, se comparadas aos demais metais, não são muito favoráveis na usinagem. O módulo de elasticidade do alumínio é de aproximadamente 1/3 do aço, o que exige que sejam tomados certos cuidados para evitar deformações, amassamentos e erros dimensionais nas peças. Além disso, por ter alto coeficiente de dilatação térmica, maiores problemas são esperados nos sistemas de fixação e medição das dimensões [4].

Na tabela 3 estão relacionadas algumas das propriedades mecânicas típicas de ligas de alumínio tratáveis termicamente.

PROPRIEDADES MECÂNICAS						
Liga	Têmpera	Resistência à Tração [MPa]	Limite de Escoamento [MPa]	Alongamento em 50 mm [%]	Dureza [HB]	Resistência ao Cisalhamento [MPa]
2011	T3	380	295	15	95	220
2014	T8	405	310	12	100	240
	O	185	95	18	45	125
	T4,T451	425	290	20	105	260
	T6,T651	495	415	13	135	290
2024	O	185	75	20	47	125
	T3	485	345	18	120	280
	T361	495	395	13	130	290
	T4,T351	470	325	20	120	285
	T81,T851	485	450	6	128	295
	T87	515	490	6	135	310
2036	T4	340	195	24
4032	T6	380	315	9	120	260
6061	O	125	55	25	30	80
	T4,T451	240	145	22	65	165
	T6,T651	310	275	12	95	205
	T91	405	395	12	...	230
	T913	460	455	10	...	240
6262	T9	400	380	10	120	240
7050	T74,T7452	510	450	13	142
7075	O	230	105	17	60	150
	T6,T651	570	505	11	150	330
	T73,T735X	505	435	13	...	

Tabela 3 - Propriedades mecânicas típicas de algumas ligas de alumínio tratáveis termicamente [4]

2.5. Fundamentos de Usinagem com Ferramentas de Geometria Definida

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 [4,10].

Em todos os processos de usinagem, as características do processo, como formação e saída de cavaco, forças na usinagem, desgaste e resultado de trabalho, são influenciados 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 [10].

A terminologia para a geometria das ferramentas de corte está normalizada pelas normas DIN 6581 e ISO 3002/1 e atualmente é aceita internacionalmente. Nestas normas, os conceitos e definições para a geometria de ferramenta foram especificados de maneira a serem aplicáveis a todos os processos de usinagem [11]. Algumas recomendações destas normas serão introduzidas neste item para facilitar o entendimento dos itens seguintes. Assim, por exemplo, na figura 2.1 é mostrada uma ferramenta de torneamento ou plainamento e se definem as superfícies, gumes e quinas por esta terminologia.

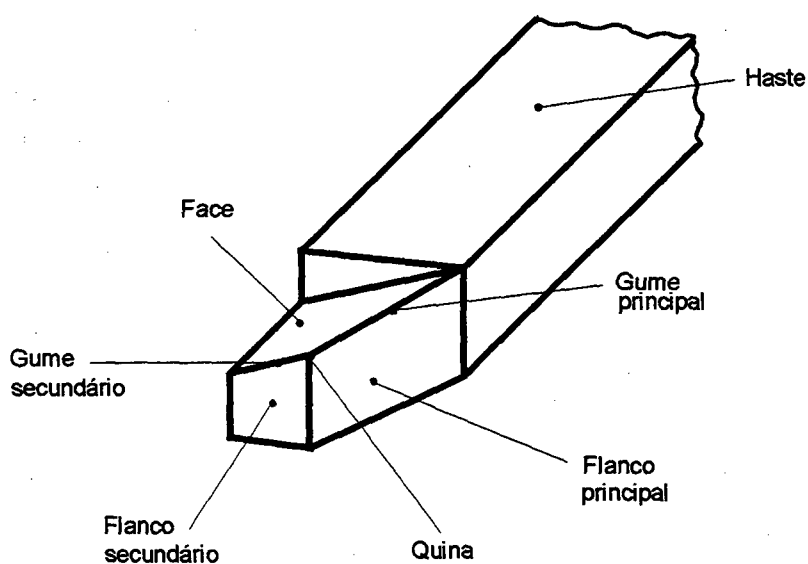


Figura 2.1 - Ferramenta de torneamento [11]

Para definir e especificar os ângulos de uma ferramenta de corte foram estabelecidos sistemas de planos de referência. Um destes sistemas, chamado de Ferramenta na Mão, é necessário para definir a geometria da ferramenta para a sua fabricação e medição. Um segundo sistema, chamado de Sistema da Ferramenta em Trabalho, é necessário para especificar a geometria da ferramenta quando está realizando uma operação de corte [11]. A figura 2.2 mostra os principais elementos geométricos de uma ferramenta de torneamento em relação a um ponto selecionado no gume principal e os planos necessários para a sua caracterização, utilizando o sistema de Ferramenta na Mão.

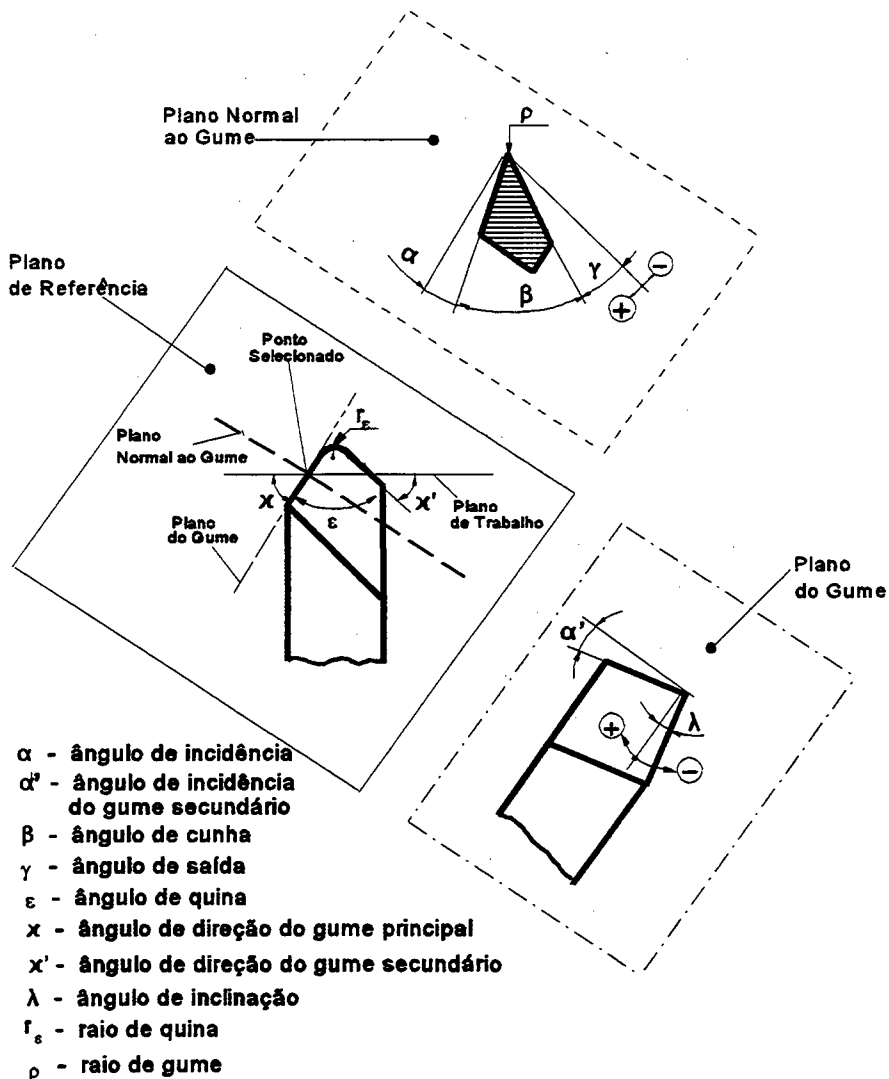


Figura 2.2 - Ângulos e planos de uma ferramenta de torneamento [10,11]

2.6. Mecanismo de Formação do Cavaco

2.6.1. Processo de corte

Os fenômenos que ocorrem durante a formação de cavacos foram motivo de muitos estudos e formulação de modelos [12,13,14]. Na figura 2.3 é mostrado esquematicamente o deslocamento do material na usinagem. Característico aqui é a nítida deformação plástica na região de cisalhamento, na qual a configuração estrutural da peça passa para o cavaco. Na usinagem de materiais frágeis, a separação do material já se pode realizar no plano de cisalhamento. Contudo, se o material tem uma capacidade de deformação maior, como no caso do alumínio, a separação acontece imediatamente à frente do gume da ferramenta. Outras características do processo de usinagem representadas na figura são a ocorrência de deformações no cavaco próximas à interface com a ferramenta e as deformações resultantes na peça recém-usinada [10,15].

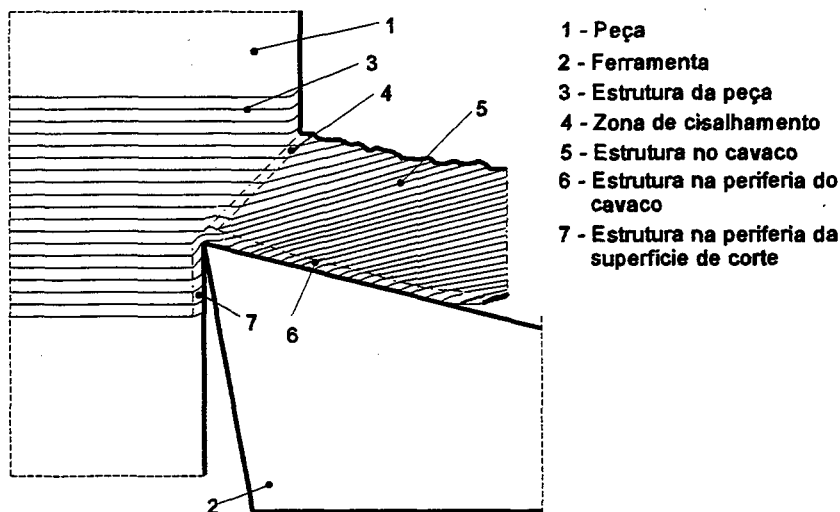


Figura 2.3 - Raiz do cavaco [15]

Na usinagem é possível a ocorrência de vários tipos de cavacos, que representam características diferentes de corte. Pela tecnologia de usinagem tradicional, Vieregge [16] classificou os cavacos em quatro tipos básicos: contínuos, lamelares, cisalhados e arrancados (figura 2.4). O tipo resultante de cavaco depende principalmente do grau de ductilidade do material a ser usinado.

Cavacos contínuos são gerados basicamente em materiais dúteis. Com o aumento da fragilidade do material a ser usinado, pode-se esperar o aparecimento de cavacos lamelares, cisalhados ou arrancados. Para as ligas de alumínio, quando não se utilizam meios para alteração do tipo de cavacos, são esperados cavacos contínuos ou lamelares [12].

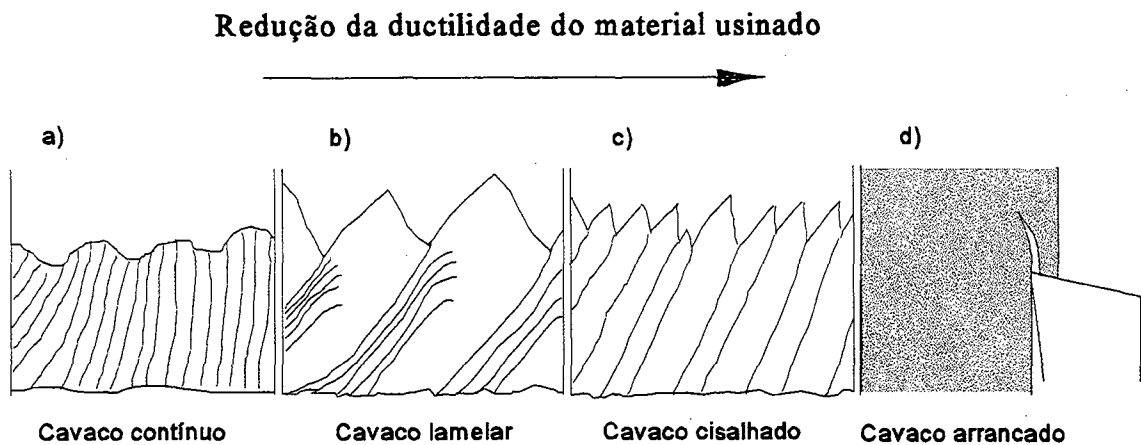


Figura 2.4 - Representação esquemática dos tipos de cavacos [15]

A energia mecânica utilizada para a usinagem é transformada quase que integralmente em energia térmica. Para as ligas de alumínio vale, em geral, que a sua alta condutibilidade térmica facilita uma rápida transmissão de calor do local de formação de cavacos e diminui assim a solitação térmica do gume da ferramenta [17]. Deste modo explica-se o porquê das temperaturas médias encontradas na interface cavaco-ferramenta na usinagem de ligas de alumínio geralmente não ultrapassarem os 500 °C [18,19].

As ligas de alumínio apresentam ainda uma resistência mecânica relativamente baixa e um pequeno módulo de elasticidade. Essas características fazem com que a resistência à penetração do material seja pequena, sendo a necessidade de energia bastante menor do que na usinagem de materiais ferrosos. Por todos esses motivos, a usinagem de ligas de alumínio distingue-se, em relação à do aço, pelas forças de usinagem significativamente menores e velocidades de corte bem maiores, com tempos de vida da ferramenta elevados [7,17].

2.6.2. Gumes postiços

O campo de velocidade de corte rentável para a usinagem de ligas de alumínio é limitado na parte inferior pela ocorrência de gumes postiços e na parte superior pelas condições da ferramenta ou pelo surgimento de cavacos aparentes [7].

Os gumes postiços são formados por partículas de material da peça que aderem à superfície do gume da ferramenta. Estas partículas, à medida que se acumulam, são fortemente compactadas pela pressão de corte, adquirindo uma elevada dureza. Com isso, a cunha formada pelo material aderido passa a exercer as funções do gume da ferramenta. Dependendo das condições de corte, os gumes postiços desprendem-se periodicamente da ferramenta, de modo instável, passando para o cavaco e para a superfície usinada. Nesta saída, podem comprometer a vida da ferramenta, devido ao arrancamento de pequenas porções do gume [10,12,15,17].

Os gumes postiços modificam a geometria atuante da ferramenta e provocam aumentos do atrito e da temperatura de usinagem. Como não existe uma geometria definida, esta formação contínua leva a erros de dimensão, de forma e diminui consideravelmente a qualidade superficial [17].

A formação de gume postiço ocorre principalmente devido à existência de certas propriedades do material usinado (por exemplo, o encruamento do material durante o processo de corte) e quando do uso de velocidades de corte muito baixas [10,15].

Para solucionar o problema de gume postiço, usa-se preferencialmente o aumento da velocidade de corte, já que com esta medida obtém-se simultaneamente aumento em produtividade [15,17]. O aumento da velocidade tende a reduzir a ocorrência de gume postiço, pois diminui o tempo de contato entre cavaco e ferramenta que seria necessário para a sua formação. A influência da velocidade de corte é reforçada pela observação de que o tamanho dos gumes postiços diminui com o aumento da temperatura. Na usinagem de ligas de alumínio, quando são obtidas temperaturas em torno de 350 °C, os gumes postiços não são mais encontrados [15].

Em situações onde o aumento de velocidade não é possível, devido às restrições tecnológicas (em processos como furação, rosqueamento, brochamento, torneamento de forma), as recomendações para a redução de gumes postiços são [15,18,19]:

- aumento do ângulo de saída γ , por facilitar o fluxo de cavacos;
- uso de fluido de corte, já que um menor atrito na superfície de saída melhora o fluxo de cavacos e uma película de fluido de corte dificulta a aderência de material;
- uso de pequenos raios de quina r_e , visto que grandes raios de quina produzem cavacos mais delgados que facilitam a ocorrência de adesão;
- polimento da face das ferramentas, por reduzir o atrito e facilitar o escoamento dos cavacos;
- uso de ferramentas de diamante, por não ocorrer adesão, já que são quimicamente estáveis nas temperaturas encontradas na usinagem de alumínio.

Além das condições de usinagem, o material da peça é de influência significativa sobre a formação de gumes postiços. A microdureza e as propriedades de endurecimento do material a ser usinado possuem especial importância. Em ligas de alumínio, o aumento da microdureza obtido por elementos de liga e uma alta capacidade de endurecimento reduzem drasticamente a tendência a formação de gume postiço [15].

2.6.3. Cavacos aparentes

Em algumas situações, quando são usadas velocidades de corte muito altas, a temperatura se eleva até um ponto onde o material da peça passa para um estado pastoso, podendo ser empurrado para fora da zona de contato. Imediatamente após a sua saída, o material se solidifica formando lentamente uma forma semelhante a um cavaco, que fica fortemente aderido à ferramenta. Este assim chamado cavaco aparente forma-se principalmente no flanco secundário da ferramenta. Como o cavaco aparente e a peça ficam em contato, ocorre um aquecimento exagerado e a qualidade superficial é consideravelmente piorada. Com o surgimento do cavaco aparente não é mais possível uma usinagem adequada da peça [12,15].

As velocidades que levam à formação do cavaco aparente dependem principalmente das

propriedades do material e do desgaste existente na ferramenta. Como o aparecimento de cavaco aparente é um processo instável, não é facilmente reproduzível experimentalmente. Contudo, qualitativamente foi provado que mudanças nas condições de corte que provocam aumento na temperatura de corte podem deslocar para baixo a velocidade crítica de formação de cavacos aparentes. Deste modo, avanços e profundidades de corte exageradas, além de desgastes excessivos da ferramenta, podem facilitar a ocorrência de cavacos aparentes [12,15].

Por outro lado, medidas que diminuam a temperatura na zona de contato levam a uma redução ou desaparecimento do cavaco aparente. Estas medidas são, entre outras, o emprego de fluido de corte adequado, geometrias positivas de ferramenta, parâmetros de corte mais suaves, diminuição do atrito pelo emprego de ferramentas com face polida e pelo uso de diamante como material de ferramenta [15].

2.7. Usinabilidade

A usinabilidade pode ser entendida como a totalidade das propriedades do material que possuem influência sobre o processo de usinagem. Com este termo são descritas, em geral, as características que compõem a resposta do material à sua usinagem [1,7,10,20]. Pela quantidade de fatores influentes na usinagem, a usinabilidade é um campo complexo e também de difícil quantificação, já que não é uma grandeza que se possa medir diretamente, como a resistência à tração ou a dureza [1,12,15,21].

A usinabilidade de um material sempre está relacionada com o processo de usinagem utilizado, com o material de corte empregado e com as condições de corte escolhidas, e pode ser muito diferente de caso a caso [7,10,22].

O estudo da usinabilidade requer uma pesquisa científica cuidadosa, já que pequenas variações em características intrínsecas do material (como dureza, microestrutura, composição química, etc.) ou no sistema máquina-peça-ferramenta podem levar a alterações significativas nos resultados de trabalho [8,21].

Em vários países costuma-se caracterizar a usinabilidade de um determinado material apenas através de um valor numérico comparativo, chamado índice de usinabilidade. Este índice expressa o desempenho do metal na usinagem, através de ensaios sob condições pré-estabelecidas, em relação a outro tomado como padrão (por exemplo, o aço B1112 - AISI para ligas ferrosas ou o latão de corte livre para as ligas de cobre) [1,23]. Mas devido à impossibilidade de se integrar todos os aspectos da usinabilidade em um único valor, estes índices, na maioria das vezes, são utilizados apenas como uma referência inicial [1,21].

Para um estudo mais abrangente da usinabilidade de um material são empregados vários critérios de avaliação, que não são necessariamente dependentes entre si, sendo cada um deles determinante por si só. Em geral são empregados quatro critérios, utilizados isoladamente ou em conjunto [3,4,7,10]:

- vida da ferramenta;
- forças na usinagem;
- qualidade superficial;
- formas de cavacos.

Entre as ligas de alumínio, a usinabilidade, assim como outras propriedades físicas e tecnológicas, varia muito com a composição química e com o tratamento térmico. A noção errônea de que o alumínio não é adequado à usinagem vem da falta de familiaridade com os parâmetros corretos de trabalho. Em geral existe a tendência de aplicar as mesmas condições de usinagem de outros materiais ao alumínio, com resultados desfavoráveis [4,7].

Quando se avalia a usinabilidade das ligas de alumínio, uma distinção deve ser feita entre as ligas trabalháveis e ligas fundidas. Estas últimas, com teores de silício que podem atingir cerca de 12 % ou mais, têm caráter abrasivo e impõem um desgaste acentuado às ferramentas de corte, que aumenta com o teor de silício. Para esse grupo são recomendadas ferramentas de metal-duro da classe K, resistentes à abrasão [4].

Ligas fundidas com teores de silício maiores que 12 % só podem ser usinadas satisfatoriamente com ferramentas de metal-duro ou diamante. A velocidade deverá ser reduzida com

o aumento do teor de silício na liga. Além disso, nenhuma liga com mais de 5% de silício permite a obtenção de superfícies brilhantes [4].

As ligas não tratáveis termicamente e as tratáveis no estado recozido tendem a formar cavacos contínuos em forma de fita na usinagem, apresentar acabamento superficial ruim e uma grande tendência ao empastamento da ferramenta, mesmo utilizando altas velocidades de corte. Tais ligas não são recomendadas para componentes usinados. Se a sua utilização for imprescindível, devem ser usadas ferramentas com grande ângulo de saída e fluido de corte especial. A característica de usinagem pode ser melhorada endurecendo-se o material, por laminação a frio ou trefilação [4].

As ligas tratáveis termicamente no estado endurecido, também chamadas de ligas de alumínio para usinagem, em geral têm uma resistência relativamente alta, poucos problemas quanto à vida da ferramenta e à qualidade superficial. A forma do cavaco muitas vezes pode ser melhorada com a adição de elementos de liga com baixo ponto de fusão (ligas de corte livre). As especificações para as condições de corte, geometria de ferramentas e mesmo a diferenciação da usinagem entre as ligas, são muitas vezes conflitantes na literatura [4]. Estas ligas são o objeto deste estudo e serão analisadas mais profundamente a seguir para os quatro critérios de usinabilidade.

2.8. Vida das Ferramentas

Denomina-se como vida de uma ferramenta o tempo em que a mesma trabalha efetivamente, até perder a sua capacidade de corte, em relação a um parâmetro limite previamente estabelecido [23]. A vida da ferramenta é normalmente o critério mais importante na caracterização da usinabilidade de um material [4,10].

A vida da ferramenta é expressa, em geral, através da fórmula empírica de Taylor (equação 1). Esta fórmula relaciona a vida da ferramenta à velocidade de corte, em decorrência de sua influência marcante [4,10]:

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

(1)

onde: T = vida da ferramenta [min]
 v_c = velocidade de corte [m/min]
 C_v = vida para $v_c = 1$ m/min [constante]
 k = coeficiente angular da curva de vida.

A dependência entre T e v_c é exponencial e, em sistema bilogarítmico, representada por uma reta. Os parâmetros k e C_v variam com o material da peça, material da ferramenta, área e forma da seção de corte, ângulos da ferramenta e fluido de corte [10,23].

A perda da capacidade de corte é avaliada normalmente através de um determinado grau de desgaste [23]. Os desgastes das ferramentas ocorrem devido a processos de atrito, adesão e difusão no gume, enquanto a ferramenta sofre simultaneamente solicitações térmica e mecânica [15,24].

Na usinagem de metais, os desgastes de flanco e cratera são na prática os mais empregados como parâmetros para determinação do fim de vida, pois são estes que geralmente levam a ferramenta ao colapso total. Para evitar que a ferramenta atinja esta condição é fundamental que sejam estipulados valores limites para o desgaste de flanco e de cratera [4,22].

A determinação da vida de uma ferramenta com uma precisão razoável requer ensaios de longa duração, que exigem elevados tempos de ensaio e consumo de material [10,22]. Por isso, a bibliografia especializada recomenda uma série de tipos de ensaios de vida de ferramentas de curta duração que tentam aproximar-se das condições reais [10,21,23].

Em relação às ligas de alumínio tratáveis termicamente, a consideração sobre a vida da ferramenta não é um grande problema, já que a maioria destas apresenta o desgaste da ferramenta tão pequeno que este critério perde em importância e deixa de ser o mais adequado para a determinação da usinabilidade [4,18,19]. A vida da ferramenta só se torna um obstáculo na usinagem de ligas de alumínio quando se trabalha com ligas fundidas com alto teor de silício, conforme mencionado no item anterior.

Característico na usinagem de ligas de alumínio é a adesão de material sobre a face da ferramenta. Esta adesão sob condições otimizadas não causa grandes problemas, mas em situações de alta pressão pode-se transformar-se em gume postiço [15].

O desgaste da ferramenta na usinagem de ligas de alumínio se dá geralmente através de um arredondamento do gume, com deslocamento simultâneo do mesmo (figura 2.5). O cegamento contínuo do gume leva a uma maior deformação plástica e, conseqüentemente, a um aumento da rugosidade, aumento nas forças de usinagem e a temperaturas mais elevadas na zona de formação de cavacos [7]. Em condições de desgaste extremas a deformação do material provoca o aumento da temperatura a tal ponto que pode ocorrer a formação de cavaco aparente atrás da zona de contato da ferramenta [15,24].

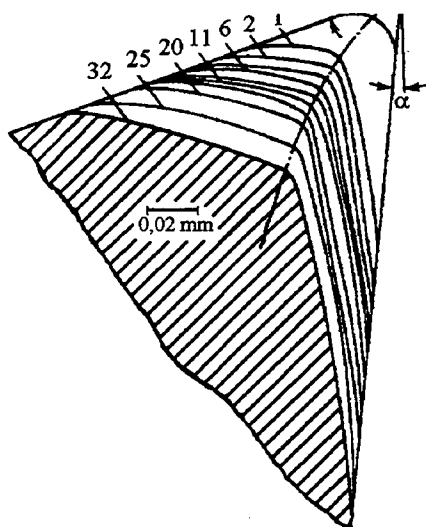


Figura 2.5 - Desgaste da ferramenta na usinagem de ligas de alumínio [15]

Danos no gume (como quebra parcial, lascamento e microarranques) surgem esporadicamente em cortes com altas solicitações térmicas e mecânicas do gume, como na usinagem com corte interrompido. Formas de desgaste como crateras, deformação plástica do gume, fissuras, desgaste por difusão ou oxidação quase não ocorrem na usinagem de ligas de alumínio. Pela redução da temperatura de corte, a aplicação de fluidos de corte tende a elevar ainda mais a vida da ferramenta [17].

Como o desgaste da ferramenta é pequeno, a sua medição é difícil mesmo após um elevado tempo de usinagem com altas velocidades de corte [7]. A bibliografia em geral cita a marca de

desgaste de flanco $VB = 0,3$ mm como limite de vida da ferramenta. Mas para ferramentas de metal duro pode-se utilizar a marca VB de 0,3 a 0,5 mm e, em casos extremos, até 0,7 mm [15,24].

Em operações de acabamento a vida da ferramenta é fixada através da qualidade superficial. O final da vida é assumido normalmente quando a rugosidade atinge valores tão altos que impossibilitam a aceitação da peça [25,26].

2.9. Forças na Usinagem

2.9.1. Conceitos básicos e definições

A força de usinagem representa a resistência oferecida pelo material da peça à penetração do gume da ferramenta e constitui-se em um critério de usinabilidade, pois geralmente materiais de difícil usinabilidade também apresentam forças de usinagem maiores [4,27,28].

O conhecimento da grandeza e da orientação das componentes da força de usinagem é indispensável para o cálculo da potência de usinagem e, conseqüentemente, para a determinação do rendimento das máquinas-ferramentas para as diferentes cargas de trabalho [28].

A força de usinagem tem importância também na avaliação da precisão de uma máquina-ferramenta em condições de trabalho (deformação da ferramenta, da máquina e da peça), determinação de fenômenos que ocorrem na região de formação de cavacos, explicação de mecanismos de desgaste e otimização das condições de corte [10,28].

A maior parte das pesquisas correlacionadas com ensaios de forças na usinagem são executados através do processo de torneamento [24]. Neste processo, a força de usinagem pode ser decomposta em força de corte, força de avanço e força passiva (figura 2.6) e é influenciada por diversos fatores, tais como material da peça, material da ferramenta, condições de corte, geometria da ferramenta e o próprio processo de usinagem [4,1].

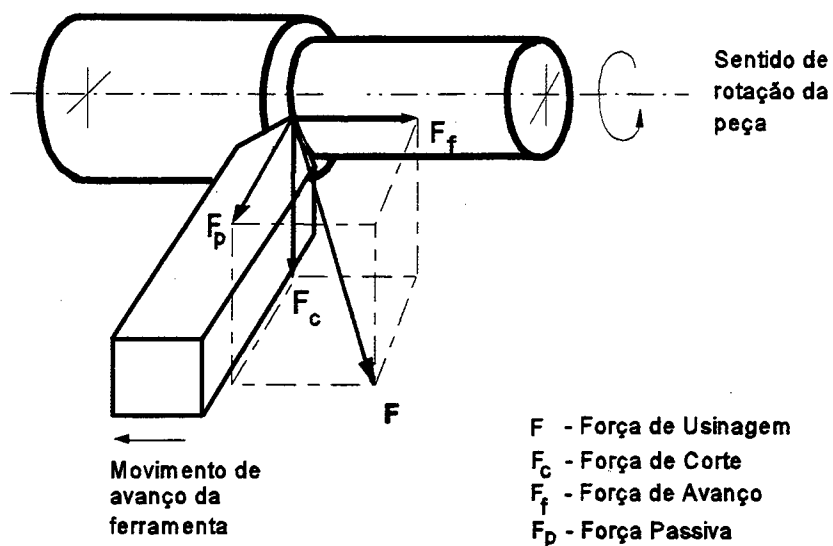


Figura 2.6 - Componentes das forças no torneamento [10]

Para o estudo das forças na usinagem normalmente estas são relacionadas a uma seção de corte definida, conforme pode ser visto na figura 2.7.

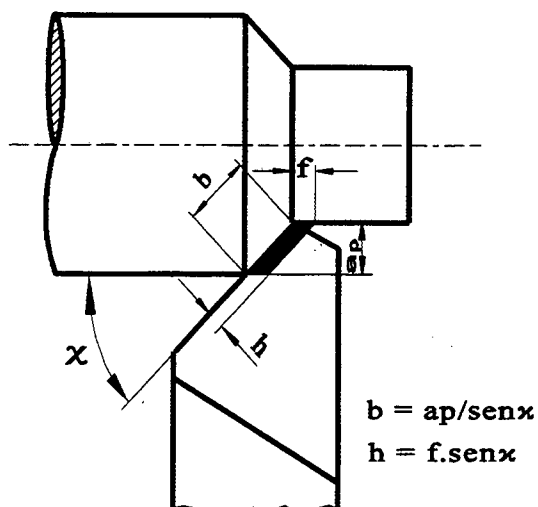


Figura 2.7 - Seção de corte no torneamento [10]

As componentes da força de usinagem obedecem satisfatoriamente à equação de Kienzle (empírica), que relaciona as características do material, a seção de corte e a componente de força

correspondente. Para a força de corte F_c vale:

$$\frac{F_c}{b} = k_{c1.1} \cdot h^{(1-m_c)} \quad (2)$$

onde: F_c = força de corte [N]

b = largura de corte [mm]

h = espessura de corte [mm]

$(1-m_c)$ = coeficiente angular

$k_{c1.1}$ = força específica de corte para a seção de 1 mm².

A força específica de corte $k_{c1.1}$ indica a força de corte necessária para usinar um cavaco com largura de usinagem $b = 1$ mm e a espessura de usinagem $h = 1$ mm. O expoente $(1 - m_c)$ indica a inclinação da reta $F_c/b = f(h)$ em um sistema bilogarítmico. Os valores característicos de $k_{c1.1}$ e $(1 - m_c)$ determinam a influência do material da peça na força de corte [28].

A equação de Kienzle, apesar de ser bastante simples, é suficientemente precisa para cálculos práticos da força de corte. Na fórmula, k_c figura como função da espessura de corte h e não como função do avanço. Esta propriedade permite aplicar facilmente a equação de Kienzle a todas as operações de usinagem [28].

Na bibliografia especializada [10,23,28] existem os procedimentos e os ensaios necessários para a determinação dos termos $k_{c1.1}$ e $(1 - m_c)$ da fórmula de Kienzle para a obtenção da força de corte, já que esta é a mais importante das componentes da força de usinagem. A literatura também apresenta os valores característicos de Kienzle para os mais variados tipos de metais, que fornecem uma boa idéia das forças de corte envolvidas. Contudo, não é possível estabelecer uma relação precisa entre material da peça e força específica de corte, assim como o coeficiente angular, devido a diversos fatores de influência que surgem. Normalmente a força de corte cai com o aumento da temperatura na zona de corte. Em consequência disso, altas velocidades de corte levam a menores forças de corte. Ao mesmo tempo, todas as medidas que facilitam o fluxo de cavaco (fluido de corte, grande ângulo de saída) levam a uma diminuição das forças [4]. Dados mais confiáveis dos

coeficientes de Kienzle devem, portanto, fornecer também as condições de corte, material e geometria da ferramenta utilizados.

2.9.2. Medição de forças

As forças não podem ser medidas diretamente, somente sua ação é observada e conseqüentemente medida. Atualmente, os sistemas de medição mais utilizados para a medição de forças na usinagem são aqueles que usam transdutores de força com elementos sensíveis, aproveitando o princípio piezelétrico [28]. Este princípio se diferencia essencialmente dos outros sistemas por ser um sistema ativo. Quando uma força atua sobre um elemento piezelétrico, ocorre na superfície deste uma carga elétrica proporcional à força. Portanto, não há necessidade de medir a deformação em si [29].

Os dinamômetros piezelétricos possuem a vantagem de serem sistemas muito rígidos. Isto significa que sua frequência natural é alta, de modo que é possível medir processos dinâmicos. Outras vantagens são as pequenas deformações do sistema quando da aplicação de uma força (no máximo alguns micrometros), larga faixa de medição (acima de 1:1.000.000), linearidade alta, baixa histerese e simplicidade de uso [29].

Para medição de forças com um dinamômetro piezelétrico, em virtude das pequenas cargas elétricas surgidas nos cristais piezelétricos pela aplicação de forças, é necessário conectá-lo a um amplificador de carga e este a um registrador de valores, que pode ser um "plotter", um voltímetro, um osciloscópio ou uma unidade de aquisição de dados [29].

2.9.3. Forças específicas tabeladas para diversos materiais

Dados concretos sobre a medição das forças de corte em ligas de alumínio só são encontrados isoladamente na literatura [24]. A tabela 4 fornece valores de força específica de corte para algumas ligas de alumínio. Para efeito de comparação, na tabela 5 estão listados os valores encontrados na usinagem de aços e na figura 6 encontram-se as diferenças entre as forças específicas de corte para

o latão, bronze e alumínio.

Material (USA / AA)	Dureza (HB)	Força específica de corte k_c (N/mm ²) para espessura de usinagem h (mm) de						
		0,01	0,05	0,16	0,25	0,4	0,6	1,0 ¹⁾
1100 - H14	18	890	550	390	340	290	260	230
2011 - T3	97	1350	840	590	520	450	400	340
2014 - T6	139	3450	2130	1502	1314	1141	1011	870
2017 - T4	115	3190	1970	1390	1210	1050	932	800
2024 - T4	122	3020	1860	1320	1150	1000	890	760
4032 - T4	115	3020	1860	1320	1150	1000	890	760
6061 - T6	94	2350	1450	1020	890	780	690	590
7075 - T6	153	4000	2470	1740	1520	1320	1170	1004

1) Valores que correspondem a $k_{c1,1}$

Tabela 4 - Forças específicas para algumas ligas de alumínio trabalháveis [28]

Material (DIN)	ABNT Equivalente	σ_r (N/mm ²)	$K_{c1,1}$ (N/mm ²)	(1 - m_ξ)
St 50	1030/1035	520	1990	0.74
St 60	1040/1045	620	2110	0.83
C 22	1020	500	1800	0.83
Ck 45	1045	670	2220	0.86
Ck 60	1060	770	2130	0.82
65 SI 7	9260	960	1270	0.73
100 Cr 6	52100	640	1600	0.71
100 Cr 6 (recoz.)	52100	710	2400	0.79

Tabela 5 - Forças específicas para aços [28]

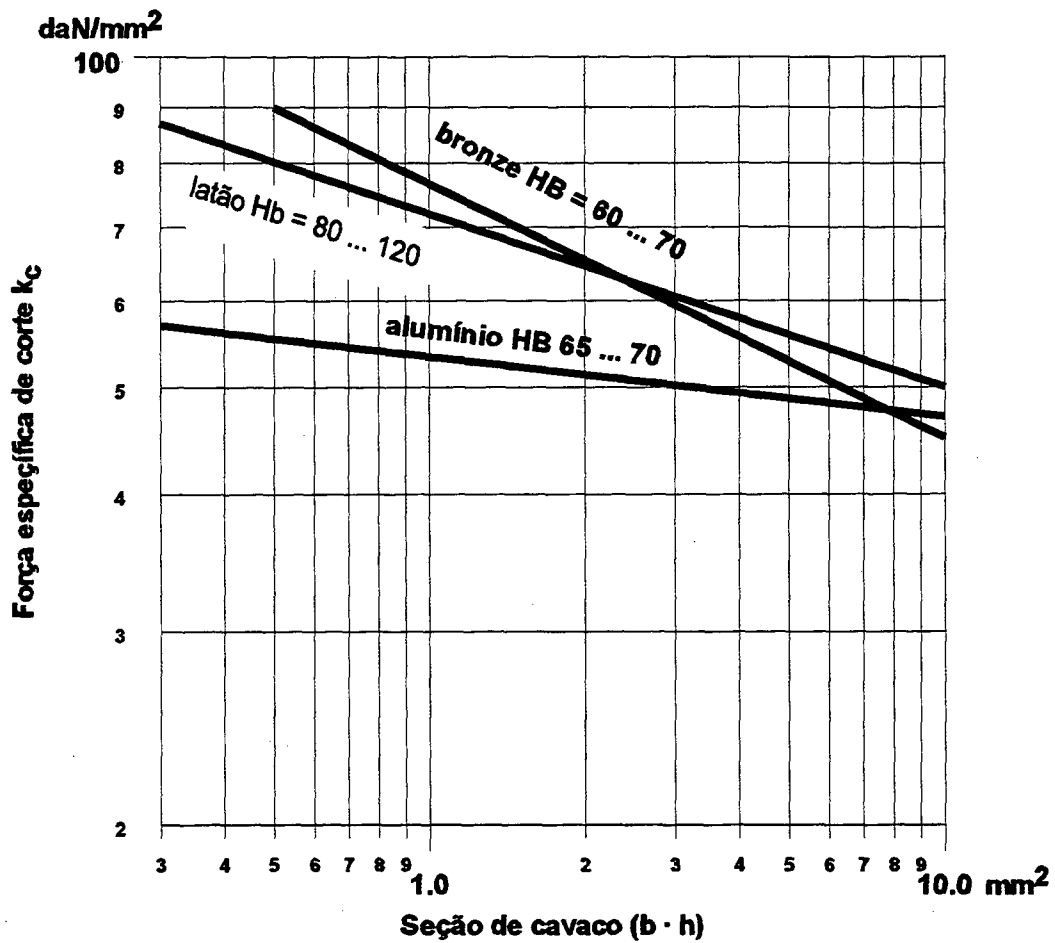


Figura 2.8 - Forças específicas de corte para alguns materiais [28]

Um dos aspectos mais marcantes na comparação entre a usinagem das ligas de alumínio e outras ligas é a diferença entre as forças de corte. As ligas de alumínio situam-se entre os materiais metálicos de menores forças específicas. Na média, os valores chegam a ser de 1/3 a 1/5 do aço. Além disso, apresentam vantagens significativas em relação aos seus concorrentes mais diretos, o latão e o bronze. Por causa desse baixo nível de força, é possível a remoção de um maior volume de cavacos por unidade de energia, com conseqüente economia nos custos de usinagem. Também os esforços nas ferramentas são menores e a tendência de quebras e desgaste cai [2,24,27,28].

2.10. Qualidade Superficial

2.10.1. Definições

Qualidade superficial ou tecnologia de superfícies é a atividade que descreve, detalha e avalia a condição tanto da superfície como das camadas da superfície dos componentes fabricados. A tecnologia de superfícies normalmente é dividida em dois campos, a textura ou acabamento superficial e a integridade de superfícies [30,31].

No estudo do acabamento superficial se examinam as irregularidades microgeométricas, determinadas pelos sulcos, estrias ou escamas existentes e que são avaliadas através de parâmetros de rugosidade. Estas irregularidades se distinguem das macrogeométricas, relacionadas principalmente ao tipo de processo ou condição da máquina-ferramenta, que derivam de erros em relação à forma geométrica ideal, como ondulações, ovalizações e outros [21].

A integridade superficial é a descrição e o controle das muitas alterações possíveis de serem produzidas na camada superficial durante a fabricação, incluindo os seus efeitos nas propriedades dos materiais e o desempenho da superfície em funcionamento [30]. A integridade superficial é caracterizada principalmente pelas alterações metalúrgicas das camadas subsuperficiais encontradas em componentes fabricados [21].

O estudo da integridade de superfícies ainda é um campo relativamente recente em termos de usinabilidade de materiais. Esse critério para qualificação de superfícies é recomendável sobretudo em processos de fabricação cujas superfícies são altamente solicitadas e/ou criticamente carregadas [30]. Exemplos clássicos desse tipo de abordagem são verificados em processos de eletroerosão e retificação, usinagens de ligas de níquel e aços inoxidáveis, decorrentes dos altos esforços ou altas temperaturas na usinagem [31].

2.10.2. Rugosidade

Para a caracterização da qualidade superficial em ligas de alumínio após operações de

usinagem normalmente utiliza-se somente a rugosidade das superfícies obtidas [17]. Os fatores influentes sobre a rugosidade de superfícies usinadas estão resumidos na figura 2.9.

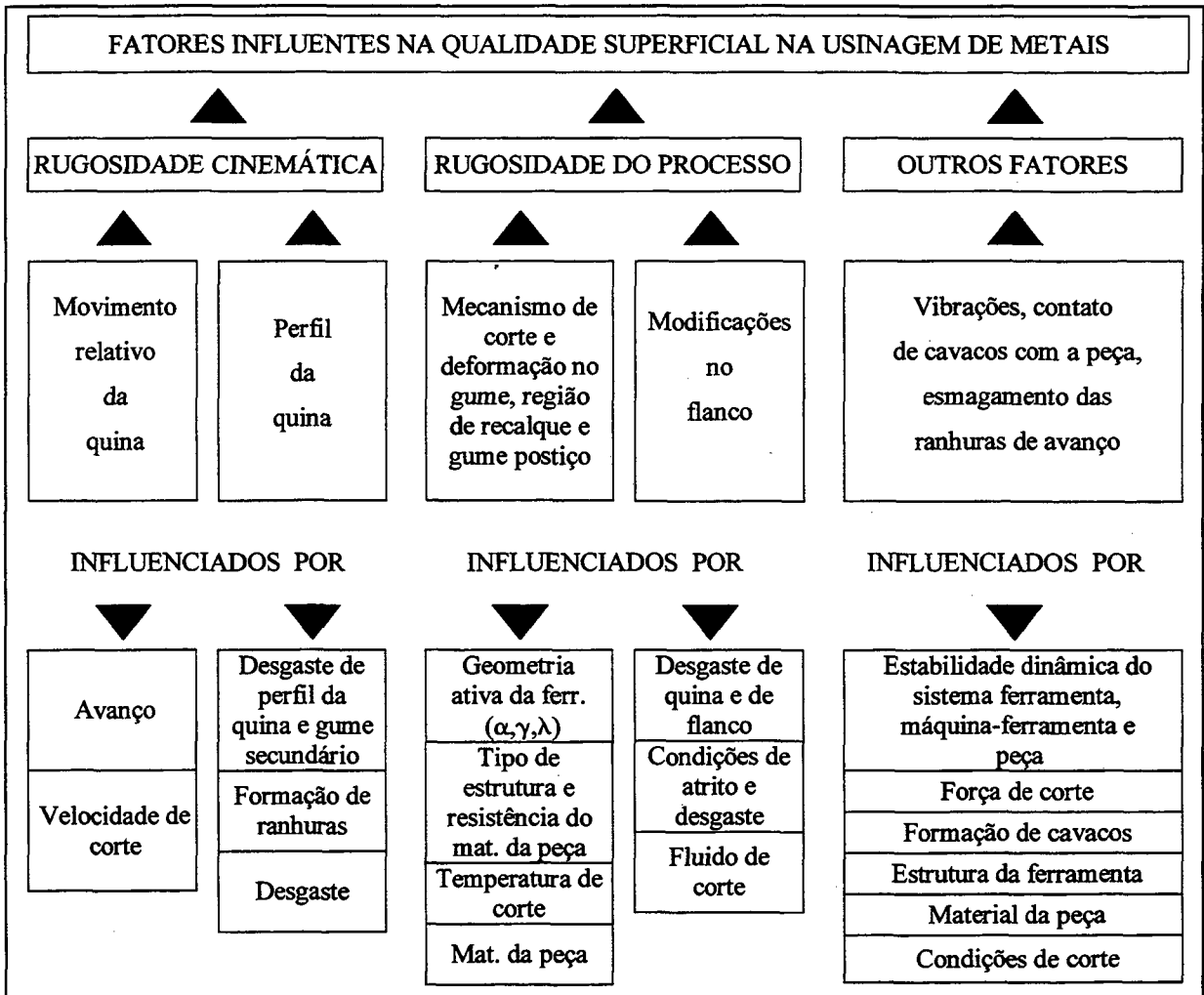


Figura 2.9 - Fatores influentes sobre a qualidade superficial [10]

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 e pode ser calculada através da equação (3) a seguir [10]:

$$R_t = \frac{f^2}{8 \cdot r_e}$$

(3)

A formação de uma rugosidade de processo é regida por fenômenos que ocorrem no gume da ferramenta e que, por sua vez, estão relacionados diretamente ao comportamento do material que está sendo usinado. Este tipo de rugosidade pode ser verificado no torneamento, por exemplo, medindo-se a rugosidade ao longo de uma ranhura [10]. Os acontecimentos complexos que ocorrem na formação da rugosidade de processo estão mostrados na figura 2.10.

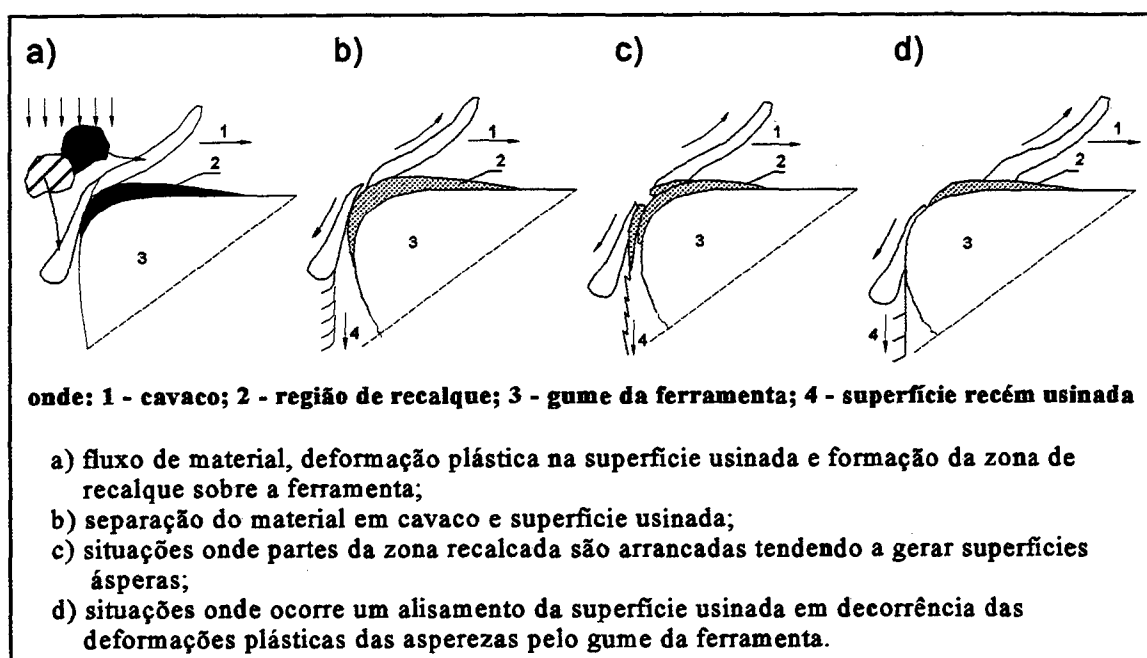


Figura 2.10 - Representação esquemática da formação da rugosidade de processo [10,15]

Outros fatores ainda influenciam na rugosidade de superfícies usinadas, como por exemplo a estabilidade do sistema, desgastes do gume ou cavacos desfavoráveis. Na prática, a rugosidade cinemática, a rugosidade de processo e as demais interferências ocorrem simultaneamente. Observa-se que a rugosidade cinemática é determinante para grandes avanços (desbaste). Em avanços menores, a rugosidade de processo e outros fatores são determinantes [15].

Os valores de rugosidade R_z obtidos sob condições convencionais em ligas de alumínio situam-se entre 3 a 15 μm no torneamento e de 5 a 20 μm no fresamento. A influência principal sobre a rugosidade nos valores mencionados é proveniente de variações no avanço. Contudo, aumentos no

avanço influenciam menos negativamente a rugosidade quanto mais frágil for o comportamento da liga de alumínio na usinagem [15,17].

Como principais fatores de influência para uma alta qualidade de usinagem no torneamento de ligas de alumínio, além do avanço, pode-se citar o uso de altas velocidades de corte, gumes bem afiados, grandes ângulos de saída e uma fixação rígida [17].

2.11. Formas de Cavacos

2.11.1. Definições

Um dos parâmetros que influenciam a produtividade de qualquer indústria, envolvida com processos de usinagem, é a forma dos cavacos [32]. Essa influência é intensificada na usinagem de ligas de alumínio, tornando-se um dos critérios de usinabilidade mais importantes, devido à possibilidade de grande remoção de material [4].

O tamanho e a forma dos cavacos têm também uma importância predominante em processos que apresentam um volume reduzido para armazenagem do cavaco (furação, brochamento e fresamento, por exemplo) e em autômatos de usinagem, em decorrência do pequeno espaço disponível para o trabalho e o grande volume de cavaco [10].

A figura 2.11 mostra uma classificação de cavacos encontrados no torneamento, onde estão representadas as principais formas de cavacos e a sua designação [10].

A classificação pode ser entendida, quanto à qualificação dos cavacos, através dos seguintes tópicos [10,15]:

- as três primeiras formas de cavacos são inadequadas para a usinagem, já que podem provocar acidentes, ocupam muito espaço e são difíceis de transportar, além de poderem prejudicar a qualidade superficial;
- cavacos em hélice plana ainda apresentam o inconveniente de terem a saída tangenciando o flanco da ferramenta, podendo provocar danos no suporte e na quina da ferramenta;

- cavacos helicoidais longos apresentam vantagens em relação aos anteriores, mas ainda têm problemas de volume elevado e transporte;
- cavacos fragmentados e em vírgulas, apesar de fornecerem o menor volume dentre os cavacos desta classificação, são considerados também apenas como razoáveis, já que além de apresentarem perigo para o operador, podem penetrar entre as guias das máquinas-ferramentas;
- cavacos em forma helicoidal curta e espirais são considerados os melhores para a usinagem;




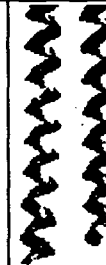


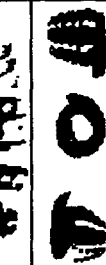

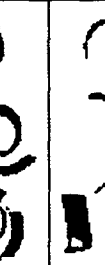
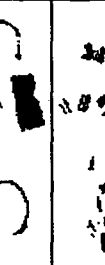
									
Cavacos em fita	Cavacos emaranhados	Cavacos hélices planas	Cavacos helicoidais oblíquos	Cavacos helicoidais cilíndricos longos	Cavacos helicoidais curtos	Cavacos espirais helicoidais	Cavacos espirais (caracóis)	Cavacos em vírgulas	Cavacos fragmentados
					Bons				
					Razoáveis				
Inadequados									

Figura 2.11 - Classificação de cavacos para torneamento (teste Stahl-Eisen) [10,15]

Os principais fatores de influência sobre as formas de cavacos obtidas em processos de usinagem são o material da peça, as condições de corte e a geometria da ferramenta.

2.11.2. Material da peça

A quebra de cavacos é basicamente influenciada pela deformabilidade, tenacidade e resistência ou estado metalúrgico da peça. Portanto, a forma do cavaco é em primeira linha uma grandeza característica do material. Um aumento da resistência ou uma diminuição da tenacidade geralmente levam a uma melhor quebra do cavaco. Considerando-se a deformabilidade do material da peça como a resistência ao cisalhamento em função do alongamento, pode-se verificar que cavacos em forma de fitas passam a vírgula quando o valor nominal de tensão cisalhante ultrapassa um valor crítico. Este valor depende da sollicitação normal à superfície de cisalhamento e é uma propriedade específica do material [7,10,15]. Para descrever a influência do material da peça sobre as formas de cavacos é necessário diferenciar entre as influências dos elementos de liga, do tratamento térmico e de inhomogeneidades do material.

a) Elementos de liga

Pode-se resumir a influência dos principais elementos químicos das ligas de alumínio sobre a forma de cavacos conforme vários autores [6,7,15,33,34] através das seguintes considerações:

- Alumínio é extremamente dúctil, de baixa resistência e de difícil usinagem (cavacos em fita).
- Magnésio: aumenta a resistência e a dureza de ligas de alumínio e neste sentido melhora a quebra do cavaco. Contudo, em ligas de corte livre o magnésio é indesejável, já que se combina com os elementos de baixo ponto de fusão, diminuindo as propriedades de quebra do cavaco.
- Cobre: até 5%, aumenta a resistência e a dureza das ligas. Em ligas com Si, Mg ou Zn este efeito é ainda intensificado. Com esse aumento da resistência tende-se a obter formas aceitáveis a boas de cavacos.
- Silício: a influência do silício é dependente principalmente da quantidade deste elemento na matriz. Se em uma liga o teor é maior que a sua solubilidade na estrutura, encontram-se cristais de Si que funcionam como elementos estranhos na matriz, facilitando a quebra (ligas de alto teor de Si). Nas ligas para usinagem, que são geralmente hipoeutéticas, o silício promove uma melhoria na quebra de cavacos, devido a aumentos de dureza e resistência do material. Contudo, as ligas eutéticas (em

torno de 12,7% de Si) são mais dúcteis e com menor dureza, apresentando cavacos longos.

- Zinco: não modifica a forma do cavaco em relação ao alumínio puro, mas em combinação com o magnésio melhora consideravelmente a quebra de cavacos.

- Manganês: aumenta a resistência, mas sem alcançar os valores do cobre e do magnésio e sem baixar a ductilidade. Ligas de AlMn não temperadas fornecem cavacos longos.

- Titânio e Ferro: não influenciam diretamente as formas de cavacos.

- Chumbo, Bismuto, Antimônio e Cádmiio: são adicionados ao alumínio para fabricação de ligas de corte livre (vide item 2.3.3). Além de formarem uma fase macia e de baixo ponto de fusão, outra razão provável para a quebra dos cavacos é a tensão gerada pelo grande aumento de volume destes elementos em relação à matriz com o aumento da temperatura. Testes comprovaram que a combinação de dois destes elementos químicos adicionados a liga de alumínio resultam em um ponto de fusão menor e, conseqüentemente, obtém-se melhores quebras de cavacos na usinagem. Uma relação Pb - Bi de 1:1 é usada em ligas de Al - Cu (2011) ou Al - MgSi (6262). O tamanho ótimo e a distribuição das adições na matriz são temas de muitas pesquisas atualmente [6,7,15,34,35].

b) Tratamento Térmico

O tratamento térmico influencia a estrutura, as propriedades mecânicas e o estado de tensões internas das peças. Para as formas de cavacos são importantes principalmente as propriedades mecânicas. Com tratamentos térmicos pode-se obter aumentos da resistência e reduções da ductilidade, levando a cavacos mais curtos.

O tratamento térmico é significante também para as ligas de corte livre. No estado fundido, as ligas de corte livre não são mais fáceis de usinar do que as respectivas ligas sem a adição de elementos de baixo ponto de fusão. Pesquisas demonstraram que parece ser necessária uma certa resistência da estrutura matriz para que esses elementos possam desenvolver a sua ação [15].

Um tratamento térmico de solubilização com posterior envelhecimento aumenta a resistência à tração, limite de escoamento e tende a gerar cavacos mais curtos [15].

Em geral, pode-se concluir sobre o tratamento térmico em relação a forma de cavaco das ligas de alumínio que [2,15]:

- ligas no estado "macio" são desfavoráveis em relação à quebra de cavacos;
- a influência do tratamento térmico, na maioria dos casos, é mais acentuada que a dos elementos de liga;
- as ligas tratadas termicamente (séries 2XXX, 6XXX e 7XXX) são classificadas como de maior usinabilidade do que as no estado "macio".

c) Inomogeneidades

Inomogeneidades nas ligas de alumínio são as porosidades e impurezas de todo tipo. Ambas ocorrem por falhas no processo de fundição. Inclusões não metálicas, principalmente partículas grandes e duras, agem como entalhes e originam um cavaco irregular e de quebra mais fácil. A porosidade possui uma ação similar e ocorre finamente espalhada em peças fundidas sob pressão [15].

2.11.3. Parâmetros de corte

a) Velocidade de Corte

A influência da velocidade de corte sobre a forma do cavaco não é clara. Com o aumento da velocidade a temperatura de corte pode variar de menos de 200 °C a mais de 400 °C. Nesses níveis de temperatura a ductilidade do material é aumentada e tem-se uma influência negativa sobre a quebra de cavaco. Por outro lado, a capacidade de deformação diminui com o aumento da velocidade de cisalhamento. Esta influência leva a cavacos mais curtos com o aumento da velocidade. A influência resultante no processo é dependente principalmente do material da peça. Em ligas de corte livre foram encontrados as melhores formas de cavacos em velocidades menores [15].

b) Avanço e profundidade de corte

São esperadas melhorias nas formas de cavacos com o aumento do avanço e da profundidade de corte. Ferraresi [23] explica este fato através do aumento da deformação do cavaco no plano de cisalhamento, devido a aumentos dessas variáveis.

c) Fluido de corte

Com o uso de fluidos de corte ocorre uma diminuição da temperatura do cavaco deformado e, em consequência, uma redução da sua deformabilidade, resultando em melhorias na quebra do cavaco [15].

2.11.4. Geometria da ferramenta

A possibilidade de obtenção de melhores formas de cavacos pela alteração na geometria da ferramenta pode ser obtida através do aumento do grau de deformação ou recalque do cavaco. Com este fim, pode-se reduzir o ângulo de saída ou empregar-se um quebra-cavaco [7]. Os quebra-cavacos funcionam como obstáculos para os cavacos, desviando-os fortemente e levando-os a quebra devido a uma maior sollicitação de flexão [15].

As ferramentas de corte também influenciam a forma dos cavacos através do seu desgaste. À medida que a ferramenta se desgasta demasiadamente, ocorre um aumento do atrito e da temperatura de corte, que tendem a gerar piores formas de cavaco [12].

2.12. Índice de Usinabilidade para Ligas de Alumínio

Pesquisadores americanos elaboraram uma classificação especial para diferenciar as ligas de alumínio através da forma dos cavacos e da qualidade superficial. Estes índices de usinabilidade, adotados pela Aluminum Association - USA (A.A.), são úteis na especificação da geometria das ferramentas e de parâmetros de trabalho [4]. Nesta classificação as ligas são divididas em cinco grupos de usinabilidade em ordem crescente de comprimento do cavaco e decrescente do acabamento superficial [2,4,15]:

- A** - cavacos muito curtos (corte livre) e excelente qualidade superficial;
- B** - cavacos helicoidais curtos e qualidade superficial boa a excelente;
- C** - cavacos helicoidais longos de grande diâmetro e boa qualidade superficial;

D - cavacos emaranhados e qualidade superficial suficiente;

E - cavacos em fita, que requerem otimização da ferramenta e da máquina para um controle satisfatório de cavaco e qualidade superficial.

A tabela 6 lista algumas ligas de alumínio relacionadas ao seu índice de usinabilidade por esta classificação [4].

Existe ainda uma outra forma alternativa para classificar a usinabilidade das ligas mais abrasivas - principalmente fundidas - as quais causam efeitos mais severos sobre a vida das ferramentas. Este sistema fornecido pela ASM (American Society for Metals) classifica as ligas em uma escala de 1 a 5 além das letras da classificação anterior e inclui considerações a respeito da facilidade de corte, características do cavaco, qualidade superficial e vida da ferramenta. Quanto maior o valor do índice, pior é a usinabilidade do material [2].

Índice de Usinabilidade	Liga	v_c (m/min)	f (mm)
A	2011 - T3	120	0,15
B	2024 - T4	30	0,15
C	6061 - T6	120	0,15
D	3004 - H32	120	0,15
E	1100 - H12	120	0,15

Tabela 6 - Índice de usinabilidade para algumas ligas de alumínio (conforme A.A.) [7]

Uma crítica a ambos os sistemas é que eles recaem, de uma certa forma, em julgamentos subjetivos. Mesmo que as medições de vida da ferramenta sejam objetivas, estas com frequência resultam em alterações quando diferentes materiais de ferramenta ou operações de usinagem são empregados [2]. Além disso, pela primeira classificação (AA) pode-se encontrar ligas com formas de cavaco desfavorável e qualidade superficial excelente ou vice-versa. Exemplo desse comportamento é a liga 6061-T6, que é classificada como "C" pela forma do cavaco, mas que apresenta um excelente acabamento superficial, segundo Weingaertner et al [7].

2.13. Materiais para Ferramentas

2.13.1. Considerações

A tecnologia de usinagem atualmente tende para a obtenção de resultados otimizados, os quais só podem ser atingidos através da adequação minuciosa do material da ferramenta, material da peça, processo e máquina [36].

Na seleção das ferramentas utilizadas na usinagem de ligas de alumínio, é importante considerar o comportamento do material utilizado na sua confecção, frente às diversas condições de usinagem como [4]:

- volume de produção;
- tipo de operação a ser executada;
- equipamento de usinagem;
- acabamento desejado;
- tolerâncias dimensionais exigidas;
- condições de trabalho.

As ferramentas usuais para a usinagem do alumínio e suas ligas são o aço-rápido, o metal duro e o diamante. Cada tipo de material possui vantagens, desvantagens e um campo de aplicação preferencial. Na verdade, cada combinação de material de ferramenta-material da peça obedece a leis próprias e é difícil reuni-las globalmente. Por isso, os valores de corte normalmente recomendados devem ser considerados apenas como referências [2,4,36,37].

2.13.2. Aço-rápido

Apesar dos constantes desenvolvimentos na área de materiais para ferramentas, o aço-rápido ainda encontra larga utilização. A possibilidade de transformação e usinabilidade faz com que o aço-rápido seja apropriado para a fabricação de ferramentas especiais e de perfil complexo, como brocas,

escareadores, alargadores, machos, fresas e ferramentas de forma. As ferramentas de aço-rápido são também muito usadas em materiais que não apresentam grandes dificuldades de usinagem e principalmente em pequenas produções para a confecção de ferramentas em geral, por causa da relação favorável de custo/benefício [11].

As vantagens do aço-rápido são a tenacidade, alta resistência à quebra, fácil manuseio e baixo preço. A alta tenacidade e fácil afiação permitem gumes muito afiados e delgados [4]. A pequena tendência ao lascamento leva estas ferramentas a serem bastante adequadas para operações de acabamento, principalmente em ligas de alumínio sem componentes abrasivos [36].

Para a usinagem de alumínio, utilizam-se as classes mais duras de aço-rápido, com 12 % de tungstênio, que têm boa resistência à temperatura. Pela norma DIN, aços-rápidos são designados pela letra S e uma sequência de quatro números que indicam os percentuais dos elementos W, Mo, V e Co, respectivamente. A ausência do quarto elemento indica a falta do cobalto. Conforme o processo de usinagem, são recomendados os seguintes tipos de aço-rápido [4,36] :

Brocas	S 12 - 1 - 2
Machos para fresamento	S 9 - 1 - 2
Ferramentas para fresamento	S 12 - 1 - 2
Ferramentas para torneamento	S 12 - 1 - 4
Ferramentas de perfil	S 12 - 1 - 2

Em cortes pesados são empregadas ferramentas de aço-rápido com 5 a 10% de cobalto, para elevar a resistência a quente [2].

Para facilitar o controle de cavacos, as ferramentas de aço-rápido possibilitam a retificação de quebra-cavacos em forma de degrau. Esta característica, apesar de vantajosa, apresenta os inconvenientes de dificuldade de se adequar os elementos do ressalto (altura, distância e raio) às condições de corte empregadas e também aos custos de retificação que envolvem essa operação.

A principal desvantagem da utilização de aços-rápidos é a impossibilidade de se trabalhar em altas velocidades de corte, onde o desgaste da ferramenta torna-se muito elevado [10,11].

2.13.3. Aço-rápido sinterizado

Os aços-rápidos sinterizados, quando comparados com os aços-rápidos convencionais, apresentam uma distribuição mais homogênea de grãos finos de carbonetos e a falta de qualquer precipitado [36].

As expectativas de um longo tempo de vida destas ferramentas ainda não se confirmaram. Porém, as vantagens esperadas com a utilização de aços-rápidos sinterizados são a isotropia das propriedades mecânicas, estabilidade de forma, boas propriedades de conformação e retificabilidade. Essas vantagens tornam-se relevantes, por exemplo, na confecção de ferramentas grandes e/ou complexas, as quais podem ser facilmente produzidas por sinterização. Quanto ao desempenho, se será possível diminuir a diferença da velocidade de corte em relação ao metal duro, irá depender principalmente da combinação de uma grande tenacidade com uma maior resistência ao desgaste e dureza a quente [15,36].

2.13.4. Metal duro

A maioria das peças em ligas de alumínio são usinadas atualmente com ferramentas de metal duro. Estes materiais apresentam alta dureza, que se mantém a altas temperaturas (1100°C) e lhes confere uma boa resistência à abrasão. Além disso, possuem pequena tendência ao empastamento, grande rigidez (cerca de três vezes a do aço-rápido) e granulação fina, que permitem a produção de gumes muito afiados [2,37,38].

As ferramentas de metal duro possibilitam o uso de grandes velocidades de corte na usinagem de ligas de alumínio, se comparadas com o aço-rápido [2]. Em ligas de alumínio de corte livre pode-se chegar a velocidades de 3.000 m/min no torneamento e até 5.000 m/min no fresamento. Em geral, a limitação para se usar essas velocidades não está na ferramenta e sim na rotação e potência disponível na máquina. Na prática, a velocidade raramente é superior a 1.500 m/min [36,39].

As grandes vantagens das ferramentas de metal duro tendem a levar a uma utilização generalizada das mesmas, principalmente em ligas de alumínio de baixo silício, seja em operações de

desbaste ou acabamento [2,4].

Na usinagem de alumínio e suas ligas, prefere-se sem exceção o metal duro da classe K. O material básico aqui é o carboneto de tungstênio. A classe K possui uma resistência mecânica relativamente alta e cumpre as exigências de estabilidade de quina e superfície de corte lisa da ferramenta [4,36].

A escolha das classes de metal duro K 01, K 10 ou K 20 depende principalmente dos seguintes fatores [4]:

- no torneamento, onde o gume não sofre impactos, em geral as exigências quanto à tenacidade podem ser menores em favor da resistência ao desgaste (K 10);
- no fresamento, onde o gume sofre impactos e mudanças bruscas de temperatura, é exigida uma maior tenacidade da ferramenta (K20);
- na usinagem de materiais abrasivos (Al-Si), ferramentas do tipo K 01 têm os melhores resultados.

Ferramentas de metal duro revestidas, normalmente usadas na usinagem de aço, não podem ser utilizadas satisfatoriamente na usinagem de ligas de alumínio em decorrência da afinidade química do alumínio com o carboneto de titânio dos revestimentos. Este efeito provoca desgaste por difusão e reduz a vida das ferramentas. Pelo mesmo motivo, os aços-rápidos revestidos também não são adequados para a usinagem de alumínio [36,38,40].

As características básicas da usinagem do alumínio, ou seja, geometrias muito positivas, grande volume de cavacos, alta velocidade e precisão dimensional com alta qualidade superficial, exigem o desenvolvimento de ferramentas especiais. Tecnologias modernas para a produção de metal duro tem tentado tornar possível a confecção de insertos intercambiáveis específicos para a usinagem de alumínio em uma ampla variedade de tipos, formas e com quebra-cavacos incorporados aos insertos [36,38].

2.13.5. Cerâmica

A usinagem de ligas de alumínio com materiais cerâmicos é inadequada por dois motivos.

Primeiro, os insertos de cerâmica não podem trabalhar com a geometria necessária para a usinagem do alumínio, devido à baixa resistência à flexão, já que a ponta relativamente afilada pode quebrar. Fundamental não é este problema, que poderia ser resolvido com insertos de metal duro revestidos com cerâmica ou através de uma matriz mais tenaz. A causa principal é, na verdade, a reação química que ocorre entre o óxido de alumínio da ferramenta e o alumínio da peça [4,40].

2.13.6. Diamante

O diamante se oferece como material de corte devido à sua extrema dureza e resistência ao desgaste. Além disso, o coeficiente de atrito extremamente baixo entre o diamante e o alumínio ocasiona menores temperaturas na zona de corte e praticamente nenhuma tendência à adesão. Estes efeitos garantem ao diamante possibilidades de uso das maiores velocidades de corte entre os materiais de ferramenta. Entretanto, devido à sua fragilidade, foi necessário um extenso trabalho de desenvolvimento para poder utilizá-lo como material para ferramenta [2,4,41].

Na usinagem de ligas de alumínio, o diamante é importante em dois campos de aplicação:

a) Torneamento polido (brilhante): exigências extremas de qualidade superficial tornam necessário o uso de ferramentas que não alterem sua geometria por um longo período de tempo. Como exemplo de produtos obtidos tem-se discos de memória de computador, rolos fotoreceptores de copiadoras e analisadores Laser. Para essas tarefas o diamante monocristalino (natural) se mostra muito eficaz [4,37,40];

b) Usinagem de peças muito abrasivas: na usinagem de ligas hipereutéticas de alumínio-silício, a vida de ferramentas de metal-duro não chega a ser satisfatória, principalmente se grandes séries de peças forem produzidas. Devido a isso, a indústria utiliza cada vez mais ferramentas de diamante policristalino (PKD). Nessas ferramentas uma micropastilha de diamante policristalino é utilizada sobre uma base de metal duro [4]. Comparações entre ferramentas PKD e metal duro para essas aplicações geralmente são difíceis, devido às diferenças entre as condições de corte aplicadas. Contudo, estudos demonstraram que se pode chegar a vidas de 10 a 100 vezes maiores com o uso de ferramentas PKD [38]. Por serem policristalinos, estes materiais não podem ser produzidos com

um gume tão afiado como um diamante monocristalino e, em consequência, a qualidade superficial é inferior [2].

Assim como algumas aplicações de ferramentas de metal duro, o desenvolvimento de ferramentas de diamante possibilitou o uso de alíssimas velocidades de corte e a necessidade de produção de máquinas-ferramentas especiais para a usinagem de ligas de alumínio [41].

2.13.7. Nitreto de boro cúbico (CBN)

Na usinagem de vários metais, as ferramentas de CBN podem ser empregadas vantajosamente em decorrência de sua elevada dureza, principalmente onde o metal duro e a cerâmica não são suficientes. Na indústria automobilística, por exemplo, estes materiais já possuem várias aplicações na usinagem de aços temperados [15].

Até o momento, a usinagem de ligas de alumínio com ferramentas de CBN foi pouco investigada. Experimentos realizados em ligas de alumínio-silício mostraram desgastes muito elevados e tempos de vida insatisfatórios em relação às ferramentas de diamante. Quanto à utilização em ligas de alumínio tratadas termicamente, devido ao alto custo das ferramentas de CBN parece não haver vantagens significativas quando comparadas com o metal-duro e aço-rápido [15].

2.14. Máquinas-Ferramentas

Os princípios de usinagem de ligas de alumínio e a capacidade das ferramentas modernas fazem com que as máquinas universais não sejam sempre adequadas à usinagem do alumínio e suas ligas [2,4,41]. Algumas das exigências importantes que devem ser feitas às mesmas são:

a) Alta velocidade de corte - normalmente as velocidades empregadas na indústria não alcançam a velocidade permitida pela ferramenta. Isto vale principalmente para as ligas de alumínio de corte livre, onde pode-se chegar a velocidades de 3.000 m/min no torneamento e até 5.000 m/min no fresamento. Na prática, devido à limitação das máquinas, a velocidade de corte raramente é

superior a 1.500 m/min [36,39,41];

b) Alta potência - as máquinas-ferramentas geralmente são projetadas para trabalhar na usinagem do aço. Embora as forças de usinagem em ligas de alumínio cheguem apenas a 1/3 das do aço, as potências disponíveis em máquinas-ferramentas convencionais nem sempre são suficientes. A velocidade de corte muito superior no corte do alumínio pode requerer o aumento da potência de até cinco vezes em relação ao aço [4,41];

c) Alta rigidez dinâmica - necessária devido aos maiores desbalanceamentos e forças centrífugas, decorrentes das altas velocidades de rotação da máquina [4,41];

d) Sistemas de fixação adequados - para evitar deformações, distorções e amassamentos da peça, já que o módulo de elasticidade é baixo, é vital um projeto adequado do sistema de fixação das peças. Também as altas rotações exigem o uso de fixações melhores do que na usinagem do aço, para evitar o desprendimento da peça [4]. O tipo de fixação utilizado irá depender da peça e das condições de usinagem empregadas. A literatura técnica apresenta uma série de sistemas de fixação recomendados para as peças de ligas de alumínio [12,15];

e) Remoção adequada de cavacos - uma remoção segura e adequada dos cavacos na usinagem de ligas de alumínio é importante por vários fatores. As altas velocidades de corte levam à produção de uma grande quantidade de cavacos. Para evitar danos à superfície usinada, os cavacos não devem entrar em contato com a peça. Além disso, o alto valor do material estimula a reciclagem e deve-se, quando possível, separar cada tipo de liga [41];

f) Proteção adequada ao operador - necessária devido às altas velocidades, grande produção de cavacos, jato de fluido de corte e possibilidade de desprendimento da peça [4,41];

g) Usinagem automática - com o aumento da velocidade de corte, os tempos secundários tornam-se significativos. Por isso, o uso de máquinas de comando numérico ou máquinas automáticas em produções seriadas é muito importante [21];

h) Instalações para fluidos de corte - mesmo que a usinagem a seco seja suficiente em alguns casos, os fluidos de corte são importantes. As altas exigências quanto à qualidade superficial, refrigeração da peça e ferramenta e uma melhor remoção dos cavacos evidenciam a necessidade de fluidos de corte e, em consequência, instalações adequadas para estes [4,41].

CAPÍTULO 3

PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

3.1. Considerações Iniciais

Neste trabalho são analisadas as características de usinabilidade de algumas das ligas de alumínio tratáveis termicamente. As ligas ensaiadas correspondem às ligas 2011-T3, 6061-T8 e 6262-T8, conforme sistema de classificação mencionado anteriormente. As características específicas de cada liga serão vistas no item 3.3.

O processo de usinagem adotado é o de torneamento longitudinal externo, em ensaios de curta duração. A escolha desta operação deve-se à facilidade de obtenção de dados experimentais e também por ser uma das mais utilizadas na indústria [22]. Além disso, os dados obtidos na operação de torneamento podem ser transferidos, em muitos aspectos, para os demais processos de usinagem que utilizam ferramentas com geometria definida.

Na usinagem de ligas de alumínio tratáveis termicamente com baixos teores de silício, os desgastes das ferramentas são muito pequenos, mesmo após um elevado tempo de utilização, por isso o critério vida das ferramentas não é empregado nesta análise.

Os critérios qualidade superficial e formas de cavacos são os que apresentam maior importância para as ligas de alumínio estudadas. Quanto à qualidade superficial, a necessidade crescente de se obter peças com maior precisão leva continuamente à intensificação dos estudos para otimização das variáveis que influem sobre o acabamento das peças usinadas. Já as formas de cavacos são importantes principalmente pelas altas velocidades de corte possíveis na usinagem de ligas de alumínio, que acarretam em grande remoção de material. Assim, neste trabalho procura-se fazer um estudo abrangente dos diversos fatores influentes sobre estes dois critérios de usinabilidade.

As forças na usinagem, por sua vez, geralmente não causam grandes problemas na usinagem de ligas de alumínio. Entretanto, o conhecimento de seus valores característicos é importante para

auxiliar na seleção de ligas específicas e para não ultrapassar a potência disponível nas máquinas-ferramentas. Quanto a este critério, o presente trabalho limita-se a determinar as influências dos parâmetros reconhecidamente importantes sobre as forças na usinagem de metais, bem como busca a determinação dos coeficientes de Kienzle para condições específicas de trabalho.

3.2. Planejamento dos Ensaios

3.2.1. Variáveis de entrada

Com o intuito de determinar a influência das variáveis de entrada do processo sobre os critérios de usinabilidade analisados, ou seja, sobre a qualidade superficial, formas de cavaco e forças na usinagem, além das considerações econômicas, é necessária uma combinação destas variáveis entre si. Esta combinação deve ser feita de maneira que apenas uma das variáveis sofra alteração, mantendo-se as outras variáveis constantes, permitindo verificar a influência de cada uma delas, separadamente, sobre o resultado final da usinagem [29,42]. O número de variáveis de entrada ou independentes envolvidas na usinagem de um material, entretanto, é extremamente elevado. As principais variáveis de entrada para um estudo da usinabilidade de ligas de alumínio tratáveis termicamente com baixos teores de silício e utilizando-se o processo de torneamento estão resumidas na figura 3.1.

Pela análise da figura 3.1, percebe-se que cada variável de entrada citada pode ter influência em um ou mais critérios de usinabilidade. Assim, todas as variáveis deveriam ser analisadas nos critérios que causam influência. Contudo, se fossem combinados cada um destes fatores nas condições em que normalmente são recomendados para a usinagem das ligas de alumínio tratáveis termicamente e se mantivessem as demais variáveis constantes, o número de ensaios se tornaria tão elevado que seria impossível a sua realização.

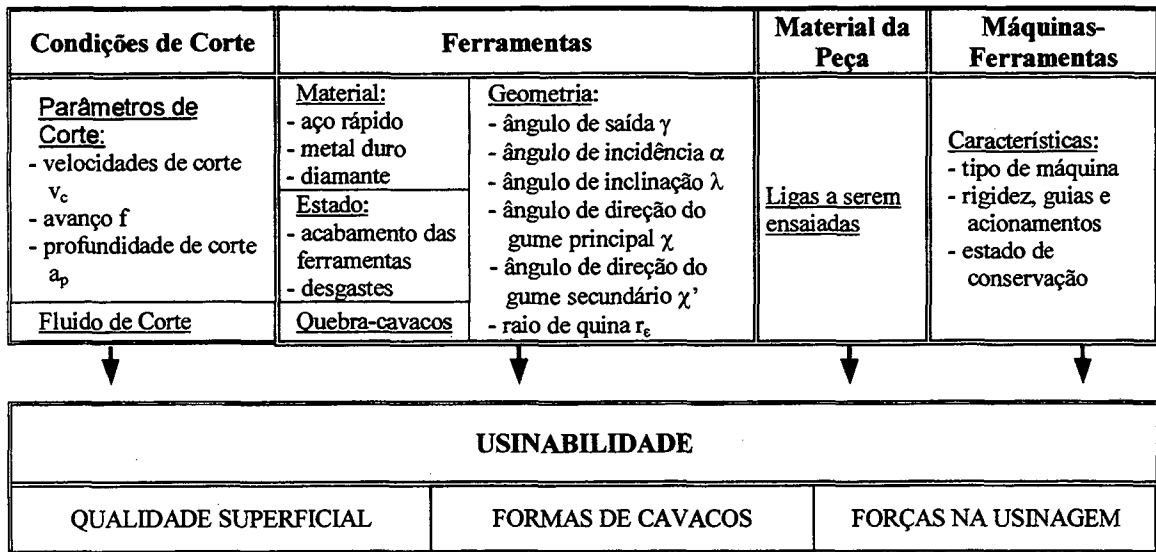


Figura 3.1 - Principais variáveis de entrada para a usinabilidade de ligas de alumínio tratáveis termicamente - Processo de torneamento

Neste trabalho são adotados alguns procedimentos de simplificação com o objetivo de reduzir o número de ensaios:

a) Estabelecer a qualidade superficial como principal critério para análise: ensaios com as variáveis que influem sobre a rugosidade obtida nas peças (vide figura 2.9) são prioritários. Como estas englobam a maior parte das variáveis que influem sobre a formas de cavacos, pode-se fazer uma abordagem conjunta. Para as forças de usinagem são previstos ensaios específicos.

b) Utilizar o aço-rápido como principal material de ferramenta, devido à facilidade de confecção das diversas geometrias de ferramentas e pela limitação das máquinas-ferramentas disponíveis em se conseguir altas velocidades de corte.

c) Aproveitar algumas conclusões obtidas em trabalhos anteriores, realizados no Laboratório de Mecânica de Precisão - UFSC, na usinagem das mesmas ligas [7]:

- a velocidade de corte tem pouca influência sobre a qualidade superficial entre 63 e 250 m/min;
- o avanço tem efeito significativo sobre a rugosidade;
- variações na profundidade de corte, dentro dos limites de 0,25 a 4,0 mm, não têm influência significativa sobre a qualidade superficial;

- uma geometria de ferramenta recomendada para o torneamento apresenta os seguintes valores:

$$\gamma = 25^\circ ; \alpha = 8^\circ ; \lambda = 0^\circ ; \chi = 75^\circ ; \chi' = 5^\circ ; r_e = 0,8 \text{ mm} ;$$

- fluido de corte recomendado: emulsão de óleo em concentração de 3%.

Para estudar o comportamento das diversas variáveis de entrada é definida, com o auxílio dos procedimentos de simplificação, uma condição padrão de ensaios (condições de corte, material e geometria de ferramenta fixos) na qual se pode analisar a influência de uma variável de entrada nas situações normais de utilização das demais ou onde estas não causam alterações nos resultados.

A condição padrão utilizada nos ensaios é a seguinte:

- *velocidade de corte: $v_c = 160 \text{ m/min}$;*
- *avanços: $f = 0,064 / 0,128 / 0,256 / 0,512 \text{ mm}$ (condições de acabamento e desbaste);*
- *profundidade de corte: $a_p = 2,5 \text{ mm}$;*
- *fluido de corte: emulsão de óleo a 3%;*
- *material da ferramenta: aço-rápido;*
- *geometria da ferramenta:*

$$\gamma = 25^\circ ; \alpha = 8^\circ ; \lambda = 0^\circ ; \chi = 75^\circ ; \chi' = 5^\circ ; r_e = 0,8 \text{ mm} ;$$

Exceções a este planejamento são adotadas em situações onde exista interesse em se estudar mais profundamente interrelações entre duas variáveis de entrada. Nestes casos são variadas as duas características, mantendo-se as demais constantes.

O planejamento de ensaios é elaborado de forma que inicialmente sejam analisadas as variáveis de geometria da ferramenta (em condições específicas). Tendo-se uma geometria otimizada para o critério qualidade superficial, serão executados ensaios com as outras variáveis de entrada citadas na figura 3.1, bem como serão analisadas as suas influências sobre os demais critérios de usinabilidade.

No presente trabalho a metodologia adotada prevê a realização de dois ensaios de usinagem

idênticos para cada combinação de variáveis. O ensaios será repetido mais vezes acaso ocorram dúvidas ou divergências significativas quanto aos resultados obtidos.

3.2.2. Variáveis de saída

A análise das influências das variáveis de entrada é realizada através de fatores de avaliação, chamados de variáveis de saída ou dependentes [42]. A escolha da variável de saída utilizada nos ensaios é dependente do critério de usinabilidade a ser analisado.

a) Qualidade Superficial

A qualidade superficial obtida em peças usinadas de alumínio normalmente é verificada através da observação das alterações na rugosidade. Os parâmetros de rugosidade mais empregados, devido à simplicidade dos equipamentos utilizados nas suas medições [43], são os seguintes:

- desvio médio de rugosidade (rugosidade R_a);
- profundidade de rugosidade (rugosidade R_t);
- profundidade média de rugosidade (rugosidade R_z);
- profundidade máxima de rugosidade (rugosidade R_{max}).

Para avaliação da usinabilidade, em relação à qualidade superficial, optou-se por utilizar a rugosidade R_a e a rugosidade R_z , visto que estes parâmetros são menos influenciados por perturbações externas aleatórias [43].

Em ensaios onde se pretende analisar a rugosidade sem a remoção do corpo de prova da máquina, é utilizada também a rugosidade R_t , já que o rugosímetro portátil disponível não permite a obtenção da rugosidade R_z .

Na análise da qualidade superficial não são utilizados os parâmetros horizontais de superfície (erros de forma, perfil, ondulação), pois estes são influenciados sobretudo pelo tipo de processo de usinagem e máquina-ferramenta utilizados e não têm relação direta com a usinabilidade do material.

Para maior confiabilidade dos resultados, em cada ensaio são executadas três medições de rugosidade em pontos aproximadamente equidistantes da circunferência do corpo de prova. A

comprovação da suficiência deste número de medições encontra-se no Anexo I. O valor resultante de rugosidade do ensaio corresponde à média aritmética entre os valores das medições.

b) Forma de Cavacos

Nos ensaios de usinagem são empregadas as recomendações de teste Stahl-Eisen para classificação de cavacos (vide item 2.11.1). Para facilitar a especificação das formas de cavacos obtidos, foram adotadas as letras A a E, onde o menor tamanho de cavaco é A e o maior é o E. Além disso, utilizaram-se sinais “+” para cavacos mais favoráveis e “-” para os menos favoráveis (figura 3.2).

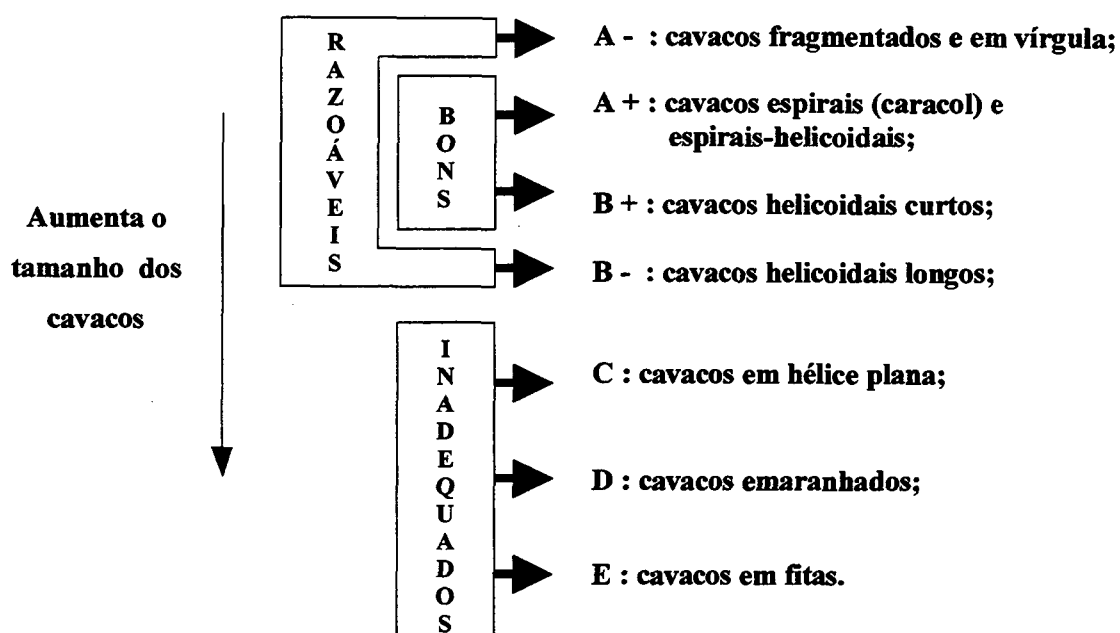


Figura 3.2 - Classificação de cavacos adotada nos ensaios

c) Forças na usinagem

Para o critério forças na usinagem são analisadas as três componentes da força de usinagem, ou seja, a força de corte (F_c), força passiva (F_p) e a força de avanço (F_f).

Na medição das componentes da força de usinagem é utilizado um “software” desenvolvido por Rocha [44]. Com esse programa é possível tomar dez leituras de força durante o ensaio de torneamento, sendo feito um tratamento estatístico dos dados (média dos valores e desvio-padrão).

A seguir são mostradas as características do material ensaiado e a infraestrutura necessária para os ensaios.

3.3. Material Ensaiado

Nos ensaios de torneamento para a determinação da usinabilidade de ligas de alumínio tratáveis termicamente são ensaiadas as ligas produzidas pela Alcan Alumínio do Brasil S.A. e que possuem as seguintes denominações comerciais:

- USINAL 101 (correspondente a 2011-T3);
- USINAL 201 (correspondente a 6262-T8);
- USINAL 301 (correspondente a 6061-T8).

3.3.1. Composição química

Os materiais utilizados nos ensaios foram analisados quanto à composição química. Os valores encontram-se na tabela 7, estando os mesmos dentro dos limites indicados para as ligas tratáveis termicamente correspondentes (vide também a tabela 2).

Composição Química										
Liga	Cu	Mn	Si	Mg	Zn	Cr	Bi	Pb	Fe	Ti
USINAL 101 (2011-T3)	5,20	0,033	0,27	0,02	0,045	0,004	0,48	0,48	0,36	0,024
USINAL 201 (6262-T8)	0,26	0,080	0,65	0,95	0,043	0,06	0,50	0,48	0,37	0,087
USINAL 301 (6061-T8)	0,20	0,075	0,63	0,88	0,058	0,14	0,004	0,02	0,33	0,020

Tabela 7 - Composição química das ligas de alumínio ensaiadas

3.3.2. Processos de fabricação

As principais especificações do processo de fabricação, ou seja, os tratamentos térmicos e mecânicos aplicados às ligas segundo o fabricante são as seguintes:

- **USINAL 101 (2011-T3):**

- solubilização em prensa sob temperatura de 515 a 560 °C;
- resfriamento em água;
- trefilação, endireitamento, escovação e embalagem.

- **USINAL 201 (6262-T8):**

- solubilização em prensa sob temperatura de 515 a 560 °C;
- resfriamento em água;
- trefilação, endireitamento, escovação e marcação;
- envelhecimento a uma temperatura de 170 °C por 6 horas;
- resfriamento ao ar;
- embalagem.

- **USINAL 301 (6061-T8):**

- solubilização em prensa sob temperatura de 515 a 550 °C;
- resfriamento em água;
- trefilação, endireitamento, escovação e marcação;
- envelhecimento a uma temperatura de 175 °C;
- resfriamento ao ar;
- embalagem.

3.3.3. Propriedades mecânicas

A determinação das principais propriedades mecânicas das ligas ensaiadas foi feita através

de ensaios de tração e dureza. Na tabela 8 são mostrados os resultados das medições de algumas das propriedades mecânicas das ligas ensaiadas.

Propriedades Mecânicas				
Liga	Limite de Resistência à Tração [MPa]	Limite de Escoamento [MPa]	Alongamento Mínimo (50 mm) [%]	Dureza Brinell 500/10 [kg/mm²]
USINAL 101 (2011-T3)	336	267	13,2	97
USINAL 201 (6262-T8)	380	369	9,9	104
USINAL 301 (6061-T8)	335	322	10,8	100

Tabela 8 - Propriedades mecânicas das ligas de alumínio ensaiadas

3.3.4. Corpos de prova

Os corpos de prova utilizados nos ensaios têm dimensões conforme a figura 3.3, de maneira a permitir a sua fixação em um torno através de placa de três castanhas e contra-ponta. O diâmetro máximo do corpo de prova foi fixado em 63 mm, em decorrência de ser o maior diâmetro possível da matéria-prima fornecida.

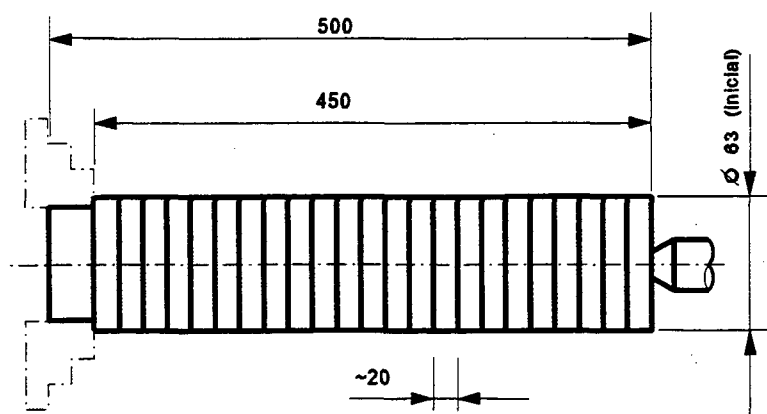


Figura 3.3 - Corpo de prova

3.4. Materiais para Ferramentas

Os materiais de ferramentas adotados para os ensaios são o aço-rápido e o metal duro. A escolha de ferramentas de aço-rápido decorre da facilidade de afiação das diversas geometrias de corte que influem sobre a usinabilidade de ligas de alumínio. Para as ferramenta de metal duro os ensaios resumem-se a comparações entre resultados de usinabilidade de um tipo de inserto de metal duro comercial e os de uma geometria semelhante de aço-rápido.

Em razão da insuficiência de melhores características técnicas e estruturais das máquinas-ferramentas (rotação máxima, rigidez e vibrações) e das dimensões da matéria-prima disponíveis (diâmetro máximo), não se justifica o emprego de ferramentas de diamante [45].

3.4.1. Aço-rápido

Para analisar a influência da geometria das ferramentas, são previstos ensaios com ferramentas de aço-rápido com 10 % de cobalto nas seguintes variações geométricas:

- ângulo de saída γ : 0°; 10°; 18°; 25°; 32°; 40°;
- ângulo de incidência principal α : 5°; 7°; 8°; 12°;
- ângulo de incidência secundário α' : 5°; 7°; 8°; 12°;
- ângulo de inclinação λ : 0°; 4°; 10°;
- ângulo de direção do gume principal χ : 30°; 60°; 75°; 90°;
- ângulo de direção do gume secundário χ' : 3°; 5°; 7°;
- raio de quina r_ϵ : 0,2 mm; 0,8 mm; 2,0 mm.

As especificações das ferramentas de aço-rápido utilizadas nos ensaios encontram-se no Anexo II.

3.4.2. Metal duro

Variações na geometria de ferramentas de metal duro são mais difíceis de serem obtidas do

que de ferramentas de aço-rápido. Em comparação com os aços-rápidos, os metais duros apresentam uma afiação mais complexa, mas o principal problema é que as ferramentas de metal duro assim produzidas não ficam idênticas às comerciais. Isto pode ser exemplificado pela grande dificuldade de se reproduzir os mesmos raios de gume e quebra-cavacos de insertos de metal duro disponíveis no mercado.

No presente trabalho optou-se por ensaiar apenas uma geometria de ferramenta de metal duro. As ferramentas foram fornecidas pela Sandvik Coromant e são específicas para a usinagem de ligas de alumínio. As especificações e as principais características dos insertos e porta-ferramentas são relacionadas abaixo:

- Inseto (ISO 1832): T C G X 16 T 3 08-AL;

* Designação comercial: T-MAX U - AL;

* Quebra cavaco sinterizado;

- Porta-ferramenta (ISO 5608): S T G C R 25 25 M - 16;

- Geometria resultante:

$$\gamma = 20^\circ; \alpha = 8^\circ; \alpha' = 8^\circ; \lambda = 10^\circ; \chi = 90^\circ; \chi' = 30^\circ; r_\epsilon = 0,8 \text{ mm.}$$

3.5. Máquinas-Ferramentas

Os ensaios de usinabilidade são executados principalmente em um torno Imor P400, adaptado para trabalhos de pesquisa. Este torno possibilita uma variação contínua da velocidade, rotação máxima de 1.300 rpm e para medição do número de rotações possui um taco-gerador WEG 1R/60 ligado a um voltímetro.

Em ensaios isolados também é prevista a utilização de um torno de acabamento Kart EKM 200 e um torno universal de produção Romi I-45. O objetivo desses ensaios é estudar a influência das características da máquina-ferramenta sobre a usinabilidade das ligas de alumínio, principalmente quanto ao critério qualidade superficial. As principais características técnicas das máquinas citadas encontram-se no Anexo III.

3.6. Equipamentos para Confeção e Controle das Ferramentas

As diversas ferramentas de aço-rápido são confeccionadas em conformidade com a norma ISO 3685 [46] de afiação de ferramentas. As máquinas-ferramentas utilizadas para a afiação de ferramentas são:

- Afiadora de ferramentas Werko SWU 200;
- Retificadora ótica de perfis WMW SWPO 80;

As principais características técnicas das máquinas citadas encontram-se no Anexo III.

Para a qualificação e acompanhamento do desgaste das ferramentas após uma seqüência de ensaios é utilizado um microscópio óptico de medição Nikon, com ampliação de 30 vezes.

3.7. Equipamentos para Verificação da Qualidade Superficial

Para a medição da qualidade superficial é utilizado principalmente um rugosímetro digital Perthen S8P, pertencente ao Laboratório de Análise de Superfícies Usinadas - UFSC. Em alguns ensaios de longa duração também é prevista a utilização de um rugosímetro analógico Perthen M3A, que por ser portátil permite a medição na própria máquina-ferramenta, sem a necessidade de remoção do corpo de prova. As principais especificações técnicas destes dois instrumentos de medição encontram-se no Anexo III.

3.8. Equipamentos para Medição de Forças na Usinagem

Para a medição das forças na usinagem é montado um sistema compreendido por um dinamômetro piezelétrico, amplificador de sinais, unidade de tratamento e aquisição de dados, além de um microcomputador como processador de dados (figura 3.4). As características técnicas dos elementos que compõem o sistema de medição de forças encontram-se no Anexo III.

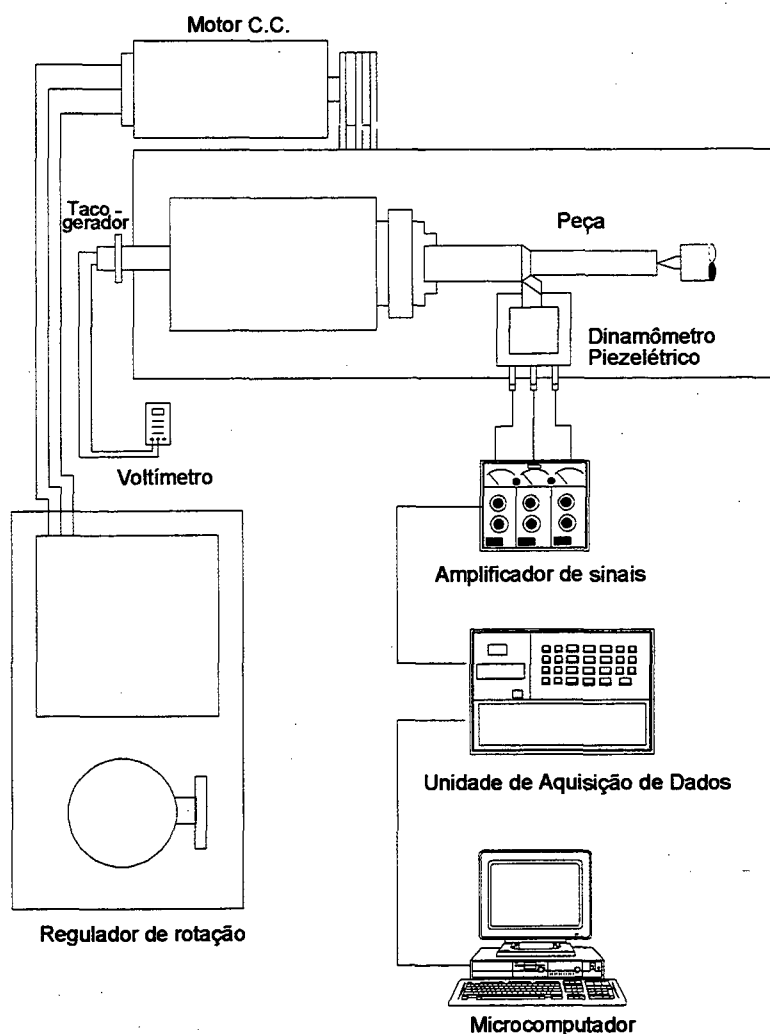


Figura 3.4 - Representação esquemática do sistema para medição das forças na usinagem

3.9. Calibrações

3.9.1. Controle das velocidades de rotação e avanço

As calibrações dos sistemas de medição ou de variáveis de entrada inerentes às máquinas-ferramentas (como avanço e rotação) são necessárias para que os erros sistemáticos possam ser corrigidos. Para as rotações das árvores das máquinas-ferramentas, as calibrações foram realizadas

através do princípio da frequência luminosa com uma lâmpada estroscópica (características no anexo III). Como resultados dessas calibrações e das calibrações dos avanços temos o seguinte:

a) **Torno Imor P-400**: por possuir um taco-gerador para variação de rotações, a máquina apresentou erros extremamente pequenos em todo o campo de rotações (cerca de 0,3 %). Em relação às velocidades de avanço foi verificada também uma grande correspondência dos avanços reais com os avanços nominais, resultando em erros inferiores a 1%.

b) **Torno Romi I-45**: a máquina já possuía um sistema para variação contínua de velocidade, mas com pouca precisão dos valores de rotação. Para a realização dos ensaios foi acoplado um tacômetro portátil e, com isso, o sistema apresentou erros reduzidos nas rotações. Quanto aos avanços, os erros sistemáticos ficaram em torno de 2%. Estes erros são considerados aceitáveis para uma máquina de produção [47].

c) **Torno Kart EKM-200**: na calibração das rotações e avanços foram verificados erros sensivelmente elevados, talvez em razão das várias transformações sofridas nos acionamentos desse torno de acabamento. Além das correções dos erros sistemáticos, por possuir sistema escalonado de rotações, é necessário o emprego de diâmetros específicos de corpos de prova para se obter as velocidades de corte nominais. As curvas de erros para a rotação e o avanço do torno Kart encontram-se no Anexo IV.

3.9.2. Calibração do sistema de medição de forças na usinagem

Um sistema foi montado para permitir a calibração estatística das componentes da força de usinagem, ou seja, a força de corte F_c , a força passiva F_p e a força de avanço F_f . Para se obter as leituras de força, foram aplicadas sobre o dinamômetro piezelétrico forças gradativamente maiores na direção da componente de força pretendida. Essas aplicações de força foram executadas através de um conjunto de massas-padrão e um sistema de alavanca. Este procedimento foi repetido para as

demais componentes da força de usinagem.

A calibração do sistema para medição de forças foi realizada com o auxílio de um “software” desenvolvido por Rocha [44] e Moreira [48]. O programa faz um tratamento dos dados de força e permite determinar a curva de erros do sistema de medição. Os resultados da calibração de cada componente da força de usinagem encontram-se no Anexo IV.-

3.10. Considerações Finais

Os ensaios de usinabilidade são realizados, tanto quanto possível, dentro das condições recomendadas pela literatura. Exceções a esse planejamento são a velocidade de corte e o ângulo de saída das ferramentas de aço-rápido. Para a primeira existe a limitação do equipamento (torno Imor, rotação máxima = 1300 rpm), que combinada com o máximo diâmetro da matéria-prima, não permite ensaios com velocidades de corte tão altas quanto as sugeridas na literatura. Quanto ao ângulo de saída, já em trabalhos anteriores no Laboratório de Mecânica de Precisão - UFSC [7,49,50] haviam-se observado divergências entre as recomendações desse ângulo e os resultados obtidos em ensaios de usinagem das mesmas ligas. Para esse caso, o presente trabalho extrapola as recomendações e busca estudar a influência do ângulo de saída em uma ampla faixa de valores (de 0° a 40°).

Antes da realização de uma seqüência de ensaios, os corpos de prova têm a camada externa removida, de modo que não haja influência das mesmas sobre os resultados.

As ferramentas são fixadas na altura do centro da peça conforme recomendações de Stemmer [11] para operações de acabamento. Em alguns ensaios esta posição é alterada justamente para verificação da sua influência sobre o resultado final do trabalho.

Após a realização de uma seqüência de dez ensaios, é verificado o estado das ferramentas quanto ao desgaste, adesões ou qualquer característica que possa comprometer os ensaios futuros.

Para o registro das condições empregadas em cada ensaio e os resultados obtidos são preenchidas tabelas com dados dos ensaios (vide exemplo no anexo V).

CAPÍTULO 4

ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1. Critério Qualidade Superficial

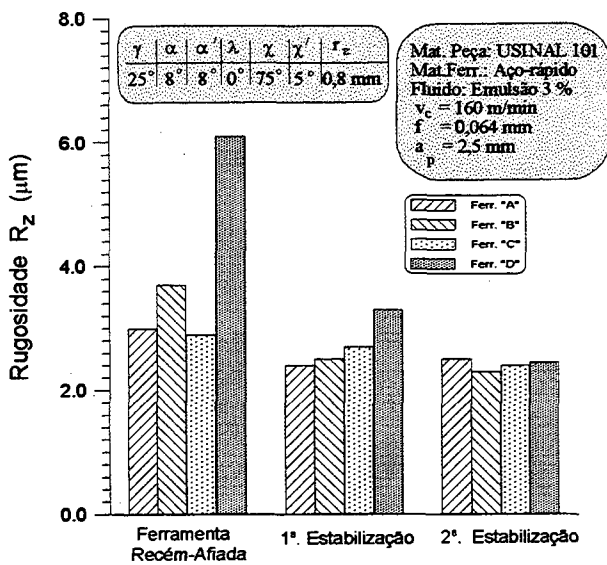
4.1.1. Estabilização de ferramentas

No início dos ensaios, considerando a intenção de analisar o efeito da variação da geometria das ferramentas sobre as rugosidades obtidas nas superfícies usinadas, foi necessário verificar se ferramentas afiadas com a mesma geometria apresentavam resultados similares. Para tanto, confeccionaram-se quatro ferramentas idênticas e foram executados ensaios de usinagem na condição padrão mencionada no capítulo anterior.

Os resultados dos ensaios mostraram que as ferramentas recém-afiadas não apresentavam repetibilidade dos valores de rugosidade, apesar de não mostrarem alterações na forma dos cavacos. Após várias tentativas infrutíferas para identificação da causa das dispersões de rugosidade, entre as quais a verificação das ferramentas em microscópio, medição de rugosidade na superfície de saída das ferramentas e controle rigoroso sobre as reafiações das ferramentas, optou-se por fazer uma estabilização do gume das ferramentas através de usinagem, ou seja, fazer um torneamento de 250 mm de comprimento linear com as quatro ferramentas no material USINAL 101, sob condições específicas.

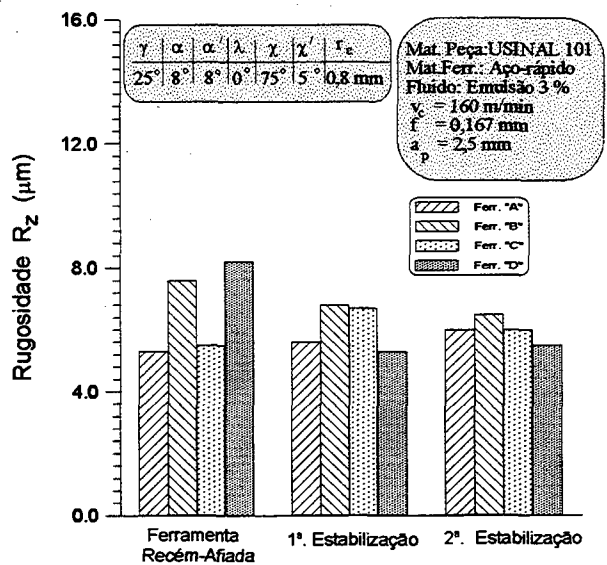
Os novos ensaios de usinagem realizados apresentaram uma redução substancial das dispersões de rugosidade. Repetindo-se o procedimento de estabilização acima e executando-se novamente ensaios de usinagem foram obtidos resultados muito satisfatórios de dispersão de rugosidade para as quatro ferramentas, como se pode observar na figura 4.1. Assim, para poder comparar as influências da geometria das ferramentas de corte sobre a qualidade superficial adotou-se o procedimento de estabilização em todas as ferramentas utilizadas nos ensaios.

A explicação para as dispersões de rugosidades em ferramentas com a mesma geometria pode ser creditada às instabilidades ou microimperfeições do gume das ferramentas recém-afiadas. Estas irregularidades são pouco visíveis mesmo os gumes sendo observados em microscópio óptico sob grandes ampliações, mas têm grande influência sobre a rugosidade nos primeiros minutos de usinagem. Provavelmente após um certo período de trabalho, a própria condição de corte estabiliza essas irregularidades, seja pelo despreendimento de micropartículas protuberantes no perfil do raio de quina e do raio do gume ou pelo preenchimento dos microvales nestas mesmas regiões.



GRAF. 1 - Estabilização de ferramentas x R_z

($f = 0,064$ mm)



GRAF. 2 - Estabilização de ferramentas x R_z

($f = 0,167$ mm)

Figura 4.1 - Influência da estabilização de ferramentas sobre a qualidade superficial

As características de usinagem utilizadas para a estabilização das ferramentas são as seguintes:

- material: USINAL 101;
- comprimento torneado: 500 mm;
- parâmetros de corte: $v_c = 100$ m/min; $f = 0,25$ mm;
- $a_p = 1,5$ mm; fluido: emulsão 3%.

O estado do gume ou microgeometria da ferramenta, segundo Odin [26], é um fator muito importante sobre a qualidade superficial. Por exemplo, a rugosidade do gume produzida pela afiação ou através do uso (desgaste) imprime-se sobre a superfície usinada, e mesmo a rugosidade das superfícies ativas da ferramenta intervém indiretamente, modificando as condições de corte, através da variação de esforços, do coeficiente de atrito e dos fatores responsáveis pelos gumes postigos.

4.1.2. Comparações entre as ligas USINAL 101, 201 e 301

Uma análise comparativa do aspecto visual das superfícies obtidas no torneamento das três ligas analisadas mostrou que existe uma tendência das ligas USINAL 301 e 201 de apresentarem superfícies mais brilhantes (maior refletividade) em relação à liga USINAL 101. Esta característica decorre possivelmente das maiores concentrações de cromo naquelas ligas.

Nos diversos ensaios de usinabilidade executados não foram verificadas diferenças significativas nas rugosidades obtidas entre as três ligas ensaiadas, independentemente da variável de entrada utilizada. Desta forma, para evitar repetições, neste trabalho somente serão apresentados os gráficos de resultados sobre a qualidade superficial para a liga USINAL 201, que foi a mais profundamente estudada. Em casos de grandes discrepâncias entre os resultados obtidos para as diferentes ligas, entretanto, será apresentada uma análise individual das mesmas.

4.1.3. Geometria da ferramenta

As influências da geometria da ferramenta sobre a qualidade superficial advém principalmente de condições que reduzam a rugosidade cinemática (formato da ferramenta e avanço), de medidas que melhorem o fluxo e diminuam o recalque dos cavacos.

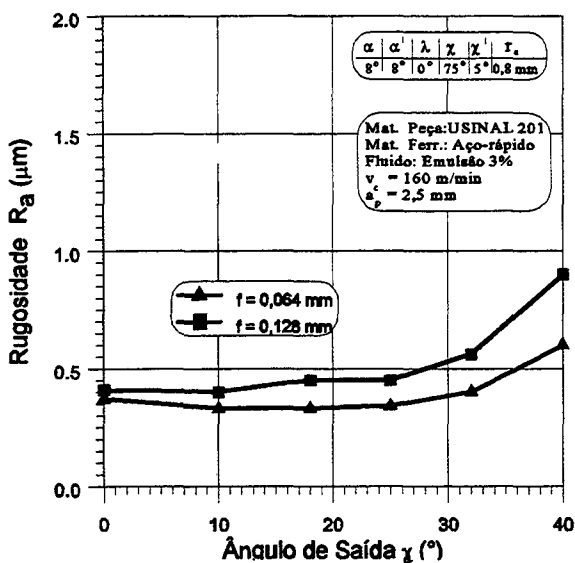
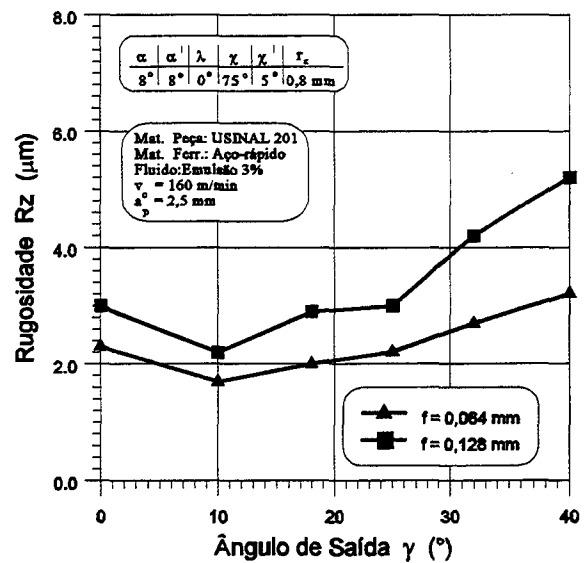
a) Influência do ângulo de saída γ

O ângulo de saída é responsável pela deformação e separação do material na usinagem.

Quanto maior o ângulo de saída, tanto menores são os esforços de corte e a temperatura de corte, que acarretam em diminuição do desgaste das ferramentas. Em consequência da diminuição do trabalho de deformação e separação, o mecanismo de formação do cavaco é mais contínuo, não introduzindo vibrações na ferramenta e, conseqüentemente, a rugosidade na peça se aproxima mais da rugosidade teórica. Entretanto, um ângulo de saída demasiadamente positivo diminui a resistência da cunha, permitindo novamente o surgimento de vibrações ou a quebra da ferramenta [43].

Segundo Weingaertner e Schroeter [4] os valores recomendados de ângulos de saída para o torneamento de ligas de alumínio tratáveis termicamente estão entre 25° a 40° . Contudo, para estudar mais profundamente a sua influência, nos ensaios foram usados ângulos de saída de 0° a 40° .

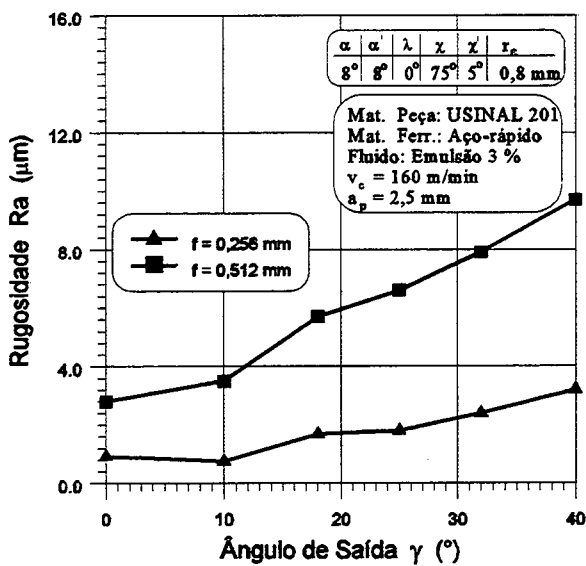
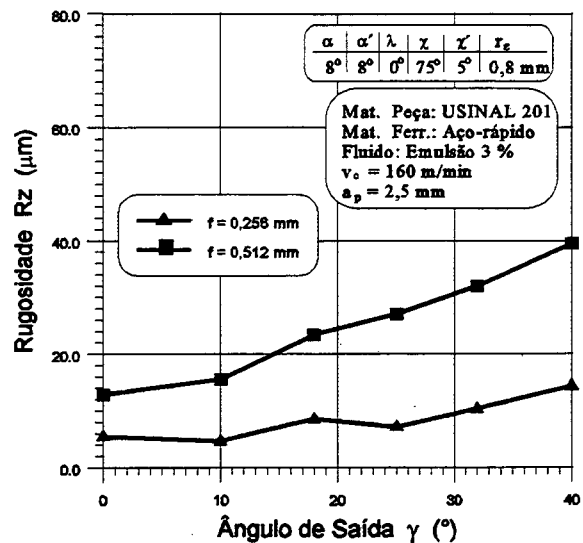
Embora fosse esperada uma melhora significativa na qualidade superficial com o aumento positivo do ângulo de saída [10,11,15], tal tendência não foi confirmada nos ensaios realizados. A influência do ângulo de saída γ sobre a qualidade superficial pode ser observada na figura 4.2.

GRAF. 3 - $\gamma \times R_a$ GRAF. 4 - $\gamma \times R_z$ Figura 4.2 - Influência de γ sobre a qualidade superficial

Em condições de acabamento (gráficos 3 e 4) observa-se uma tendência clara de aumento da rugosidade com o aumento de γ . Contudo, pode-se verificar melhores resultados para γ entre 10° e 25° . Para valores menores, em decorrência da maior deformação, as superfícies obtidas em

geral foram foscas e com grandes dispersões entre as medições de rugosidade em um mesmo ensaio, apesar do valor médio de rugosidade ser baixo (vide comparação estatística no item 2 do Anexo I). Nessas situações possivelmente ocorrerão maiores problemas quanto a integridade superficial.

Para valores de γ acima de 25° o aumento de rugosidade é mais pronunciado. Uma explicação para essa influência é que a ferramenta torna-se mais instável e suscetível a vibrações que tendem a piorar o acabamento superficial. Apesar de não ser comum analisar a qualidade superficial em condições de desbaste (figura 4.3), pode-se observar que com o aumento do avanço e, portanto, de maiores forças e vibrações sobre a ferramenta, a tendência de aumento mais pronunciado da rugosidade ocorre já para ângulos de saída menores.

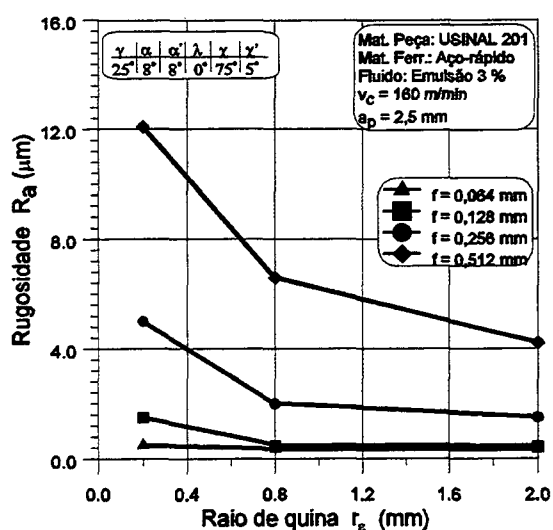
GRAF. 5 - $\gamma \times R_a$ GRAF. 6 - $\gamma \times R_z$ Figura 4.3 - Influência de γ sobre a qualidade superficial em condições de desbaste

Ferramentas com $\gamma = 40^\circ$, além de não trazerem bons resultados de qualidade superficial, apresentaram com frequência lascamentos no gume (principalmente em condições de desbaste). Estas ferramentas foram consideradas inadequadas para a usinagem de ligas de alumínio tratáveis termicamente. Portanto, os resultados de ensaios de ferramentas com $\gamma = 40^\circ$, que serão apresentados no decorrer deste trabalho, deverão ser considerados apenas como referenciais na análise da variação do ângulo de saída sobre os critérios de usinabilidade.

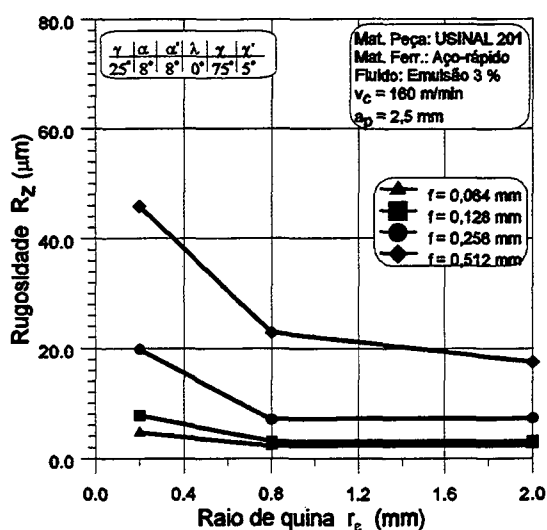
b) Influência do raio de quina r_e

A influência do raio de quina sobre a qualidade superficial pode ser verificada através da equação 3 (item 2.10.2). Esta equação mostra que a rugosidade aumenta com a diminuição do raio de quina e vice-versa. Esta tendência é claramente visível nos ensaios realizados (figura 4.4). Observa-se que a melhoria da qualidade superficial é mais visível à medida que se aumenta o avanço. Para avanços acima de 0,25 mm as ferramentas com menor raio de quina acarretam sempre em uma superfície de pior qualidade superficial.

Os valores recomendados para o raio de quina no torneamento de ligas de alumínio tratáveis termicamente estão entre 0,2 e 3,0 mm [4]. Os ensaios foram realizados com três diferentes raios de quina: 0,2; 0,8 e 2,0 mm. Segundo Koenig [10] e Ferraresi [23], é recomendado o uso do maior raio de quina em operações de acabamento, tomando-se precauções, entretanto, no sentido de que este não supere em mais de dez vezes o avanço ($r_{e\text{máx}} = 10 \cdot f$). Isto levaria a um comprimento de contato excessivo entre a peça e ferramenta, podendo ocorrer vibrações prejudiciais ao acabamento superficial. Também o limite inferior de $a_{p\text{mín}} = 2 \cdot r_e$ deveria ser observado, segundo Consalter [51]. Tais restrições não foram confirmadas pelos ensaios, visto que os limites inferior e superior foram ultrapassados sem que fosse possível perceber alterações na qualidade superficial.



GRAF. 7 - $r_e \times R_a$



GRAF. 8 - $r_e \times R_z$

Figura 4.4 - Influência de r_e sobre a qualidade superficial

Para analisar o aumento não esperado da rugosidade com o aumento de γ , mesmo em avanços baixos, foram realizados ensaios de usinagem com a utilização simultânea de duas variáveis de entrada, ou seja, o ângulo de saída e o raio de quina.

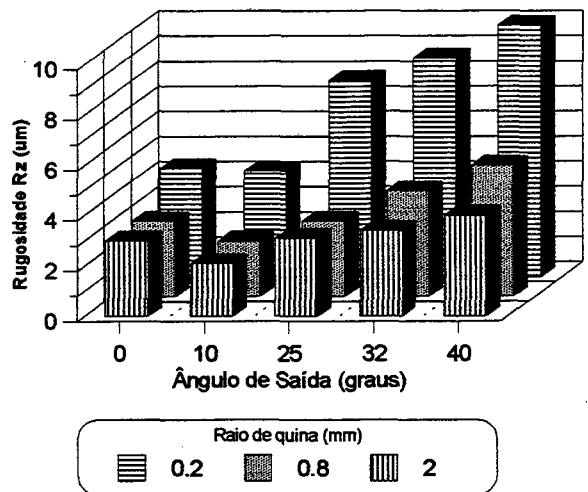
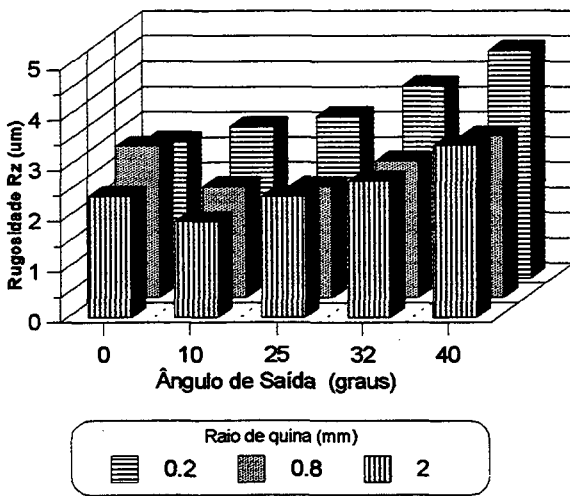
Os resultados dos ensaios mostraram haver uma certa interdependência de γ e r_e sobre a qualidade superficial obtida (figura 4.5). Apesar de serem confirmadas as influências mencionadas anteriormente, quando γ e r_e foram analisados separadamente, nota-se que dependendo do raio de quina utilizado, as rugosidades mínimas são verificadas em diferentes valores do ângulo de saída. Em trabalhos anteriores [7,49] haviam sido observados comportamentos similares na usinagem das mesmas ligas.

$$\frac{\alpha}{8^\circ} \quad \frac{\alpha'}{8^\circ} \quad \frac{\lambda}{0^\circ} \quad \frac{\gamma}{75^\circ} \quad \frac{\gamma'}{5^\circ}$$

Mat. Peça: USINAL 201 $v_c = 160 \text{ m/min}$
 Mat. Ferr.: Aço-rápido $a_p = 2,5 \text{ mm}$
 Fluido: Emulsão 3 %

$f = 0,064 \text{ mm}$

$f = 0,128 \text{ mm}$



GRAF. 9 - γ e r_e x R_z

GRAF. 10 - γ e r_e x R_z

Figura 4.5 - Influência de γ e r_e sobre a qualidade superficial

O aumento verificado da rugosidade com o aumento do ângulo de saída e a sua interdependência com o raio de quina sobre a qualidade superficial normalmente não são abordados

na literatura especializada. Entretanto, num dos poucos trabalhos encontrados que tratam destes assuntos, Enache [50] afirma que estas influências podem ser creditadas ao fato de que com a utilização de ferramentas de acabamento ($r_e > 0$), o ângulo de saída é variável ao longo do raio de quina da ferramenta. Devido a isso, ocorrem alterações na deformação do material usinado e conseqüentemente nas rugosidades obtidas. Estes comportamentos tendem a ser intensificados quanto maiores forem os ângulos de saída da ferramenta.

Em concordância com a explicação anterior e também provavelmente aliado ao desenvolvimento de novas técnicas de sinterização de metal duro, os fabricantes de ferramentas têm apresentado insertos especiais para a usinagem de materiais que permitam a utilização de grandes ângulos de saída positivos, como por exemplo, para as ligas de alumínio. A característica principal destes insertos é justamente a manutenção de um ângulo de saída constante em todo o perfil do gume, ou seja, na região do raio de quina da ferramenta. Uma representação esquemática deste tipo de inserto pode ser verificado na figura 4.6.

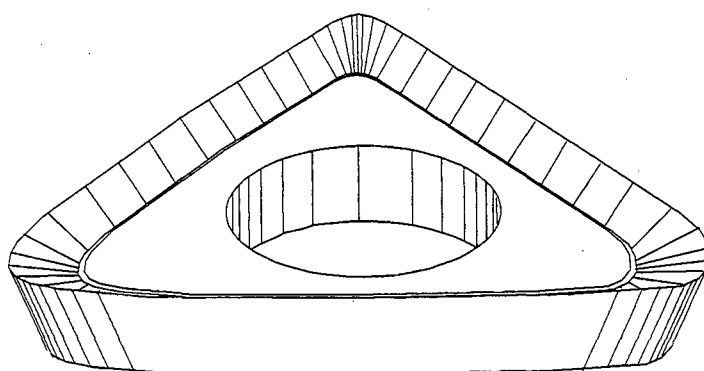
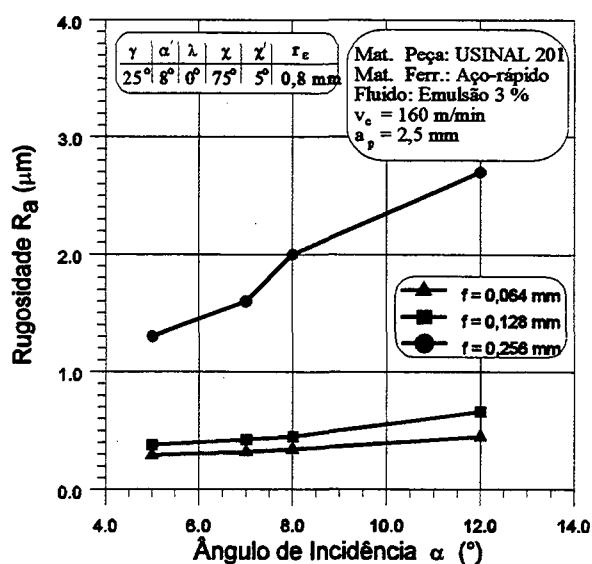


Figura 4.6 - Representação esquemática de um inserto para a usinagem de alumínio e suas ligas [52]

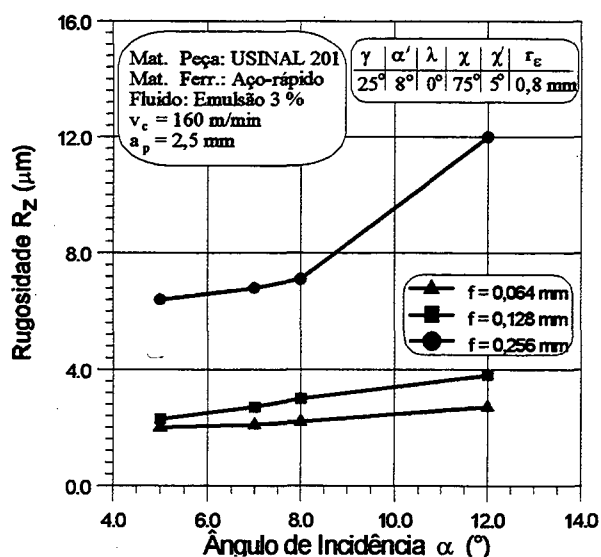
c) Influência dos ângulos de incidência α e α'

A variação recomendada para o ângulo de incidência no torneamento de ligas tratáveis termicamente deve permanecer entre 7° a 10° [4]. Além disso, não são esperadas alterações significativas de rugosidade com a variação desse ângulo [4,7]. Entretanto, na bibliografia consultada não se faz distinção de recomendações e influências entre o ângulo de incidência principal α e o ângulo de incidência secundário α' . Assim, decidiu-se realizar ensaios de usinabilidade com esses ângulos variados separadamente, com valores de 5° a 12° .

Os resultados dos ensaios para os ângulos de incidência mostraram que os mesmos possuem uma influência marcante sobre a qualidade superficial. Como se pode observar nos gráficos 11 e 12 da figura 4.7, quanto menor o ângulo de incidência principal α dentro do intervalo testado, menores as rugosidades obtidas. Para o ângulo de incidência secundário α' a situação se inverte, obtendo-se as menores rugosidades para ângulos maiores (figura 4.8).

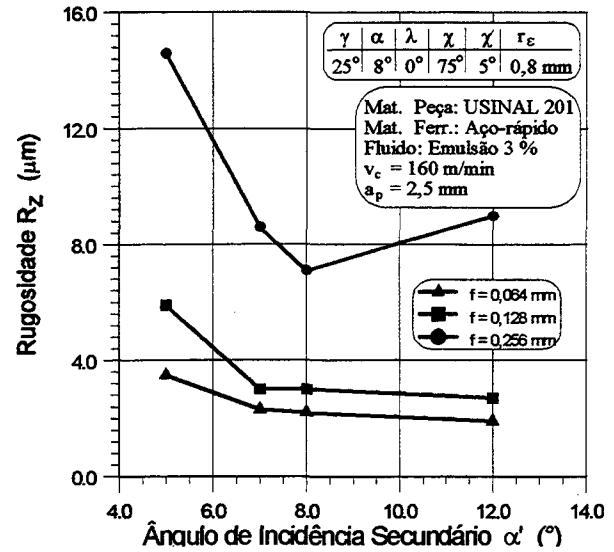
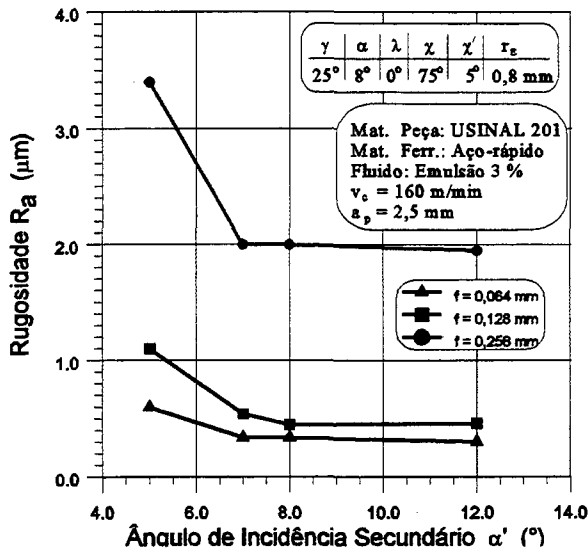


GRAF. 11 - α x R_a



GRAF. 12 - α x R_z

Figura 4.7 - Influência de α sobre a qualidade superficial

GRAF. 13 - α' x R_a GRAF. 14 - α' x R_z Figura 4.8 - Influência de α' sobre a qualidade superficial

Os comportamentos antagônicos observados nos ângulos de incidência em relação à qualidade superficial são de difícil explicação. Contudo, o menor atrito entre a superfície recém-usinada e a ferramenta explicaria uma menor rugosidade para α' maiores. Já as menores rugosidades encontradas em ferramentas com α menores, possivelmente sejam decorrentes de uma maior rigidez da ferramenta durante o corte. Vale lembrar, entretanto, que a utilização de pequenos ângulos de incidência principais tenderia a apresentar aumentos mais rápidos nos desgastes de flanco das ferramentas e a conseqüente piora na rugosidade.

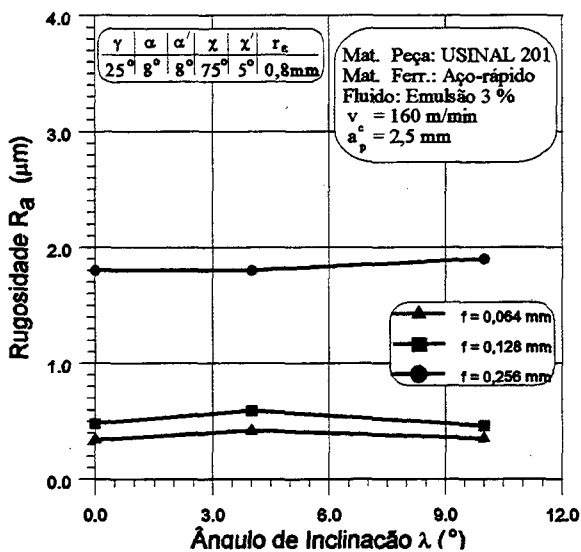
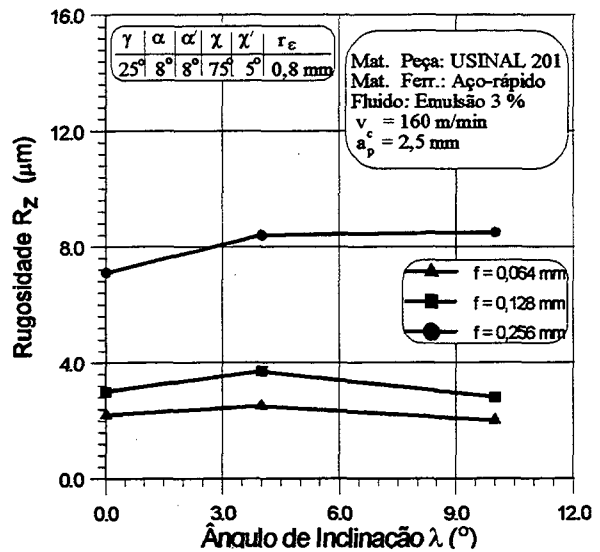
As influências dos ângulos de incidência encontradas nos ensaios não chegam a contradizer a literatura técnica, já que se nos ensaios fossem variados conjuntamente os ângulos α e α' , o que corresponderia à média entre as curvas obtidas pelos dos dois ângulos separadamente, a variação na rugosidade resultante tenderia a ser pouco significativa.

d) Influência do ângulo de inclinação λ

Os valores recomendados para o ângulo de inclinação λ estão entre 0° e 4° no torneamento

das ligas de alumínio em questão [4]. Este ângulo possibilita o direcionamento do cavaco, no sentido de afastá-lo da peça em caso de ângulo de inclinação positivo e no sentido paralelo à peça se for nulo (desde que $\chi = 90^\circ$). O direcionamento do cavaco para longe da peça é muito útil para evitar que os cavacos se choquem contra a superfície usinada e possam comprometer a qualidade superficial. Ângulos $\lambda = 0^\circ$ ou pequenos são recomendados para o torneamento de peças muito esbeltas, para evitar que surjam componentes normais ao eixo da peça que a deformem, alterando assim as dimensões de usinagem [7,10].

Para verificar a influência do ângulo de inclinação sobre a qualidade superficial foram utilizadas nos ensaios ferramentas com λ de 0° a 10° . Os resultados obtidos nestes demonstraram que as diferenças de rugosidade são tão pequenas que se pode dizer que não há alterações na qualidade superficial com a variação do ângulo de inclinação (figura 4.9).

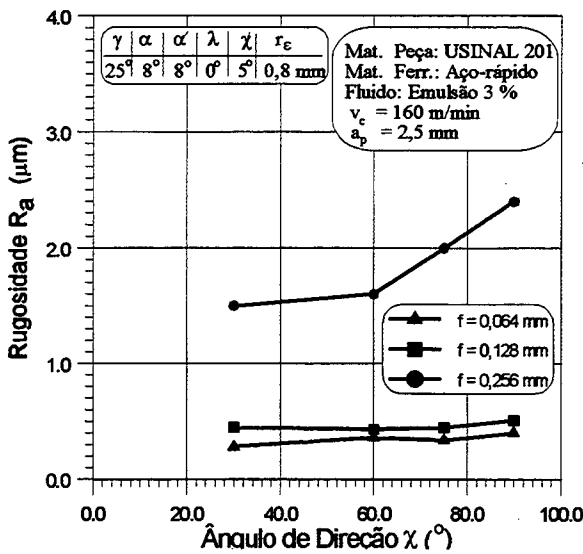
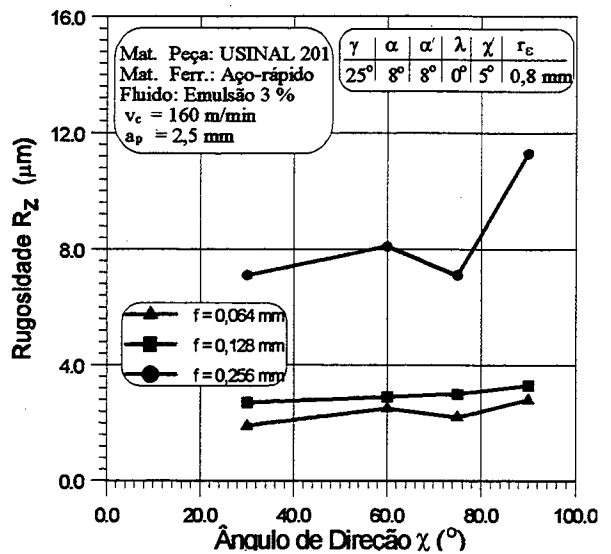
GRAF. 15 - $\lambda \times R_a$ GRAF. 16 - $\lambda \times R_z$ Figura 4.9 - Influência de λ sobre a qualidade superficial

e) Influência dos ângulos de direção do gume χ e χ'

Nas operações de acabamento o ângulo de direção do gume principal χ geralmente não tem grande influência sobre a qualidade superficial [23]. Através da análise dos resultados dos ensaios

essa expectativa foi confirmada, conforme pode ser verificado na figura 4.10. Analisando-se uma variação de χ entre 30° a 90° , as variações de rugosidade foram extremamente pequenas quando foram utilizados avanços de 0,064 e 0,128 mm.

Para avanços de desbaste ocorre um aumento substancial da rugosidade com o aumento de χ . Esse comportamento também era esperado, já que nessas condições o formato da quina da ferramenta torna-se um fator predominante sobre a rugosidade cinemática.

GRAF. 17 - $\chi \times R_a$ GRAF. - $\chi \times R_z$ Figura 4.10 - Influência de χ sobre a qualidade superficial

O ângulo de direção do gume secundário χ' , por sua vez, tem a função de permitir que apenas uma pequena parte do gume entre em contato com a superfície usinada, evitando assim uma parcela das vibrações [11].

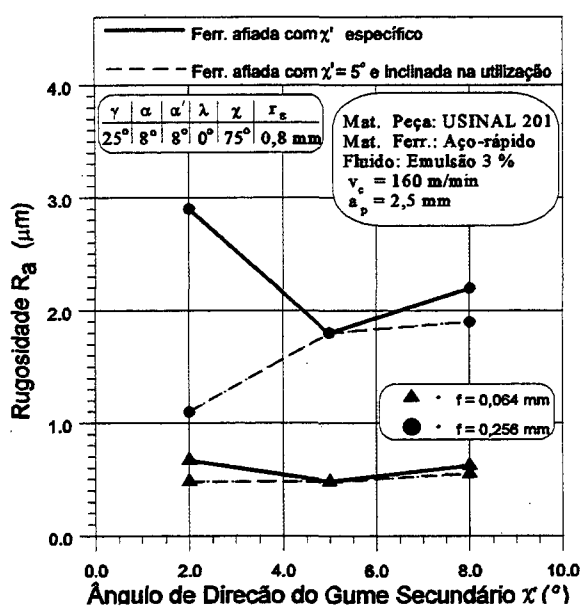
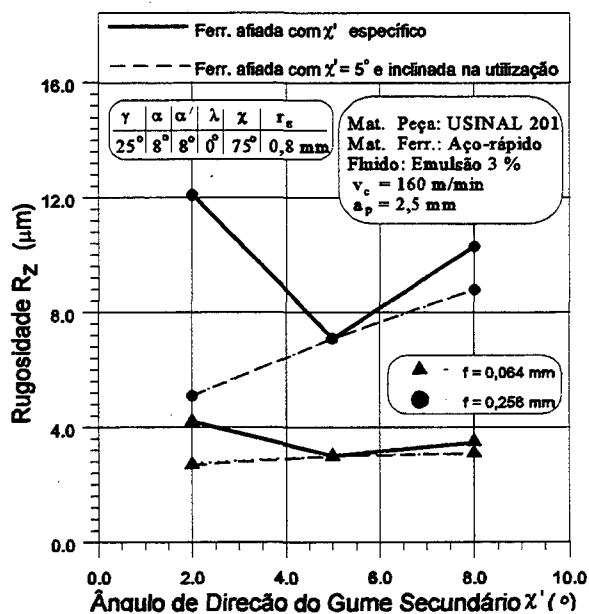
Nos ensaios de usinabilidade com a variação de χ' foram analisadas duas situações:

- ferramentas afiadas com χ' específicos de 2° , 5° e 8° ;
- ferramentas com $\chi' = 5^\circ$ inclinada em relação ao eixo de rotação da peça para simular ferramentas com χ' de 2° e 8° .

Pela análise dos gráficos da figura 4.11 verifica-se que com uma ferramenta em início de corte pode-se esperar melhores acabamentos superficiais com χ' menores, já que ocorre um

amassamento ou corte das irregularidades da superfície usinada pelo gume secundário da ferramenta (linhas tracejadas nos gráficos). Para avanços de desbaste, pelas mesmas razões que ocorrem com o χ , foram confirmadas as expectativas de aumento da rugosidade com o aumento de χ' .

Quando as ferramentas já executaram um período de corte, contudo, como é o caso das ferramentas com χ' específico e que passaram por uma usinagem de estabilização, os valores de rugosidade para χ' menores crescem significativamente, devido ao rápido desgaste do gume secundário.

GRAF. 19 - $\chi' \times R_a$ GRAF. 20 - $\chi' \times R_z$ Figura 4.11 - Influência de χ' sobre a qualidade superficial

f) Pré-otimização da geometria de ferramentas

A partir dos resultados até então obtidos, foram selecionadas as geometrias de ferramentas que forneceram melhores resultados quanto ao critério qualidade superficial. Como não foram verificadas diferenças significativas de rugosidade para as três ligas ensaiadas, independentemente da variável de entrada, essa escolha inicial das geometrias de ferramentas pôde ser única.

Para execução dos demais ensaios de usinabilidade em relação à qualidade superficial, foram escolhidas as seguintes geometrias de ferramentas:

- $\gamma = 10^\circ$ a 25° : ângulo que apresentou a maior variação nos valores de rugosidade;
- $\alpha = 5^\circ$ a 8° ;
- $\alpha' = 7^\circ$ a 12° ;
- $\lambda =$ indiferente entre 0° a 10° ;
- $\chi =$ indiferente entre 30° a 90° (condições de acabamento);
- $\chi' \geq 5^\circ$;
- $r_s = 0,8$ mm.

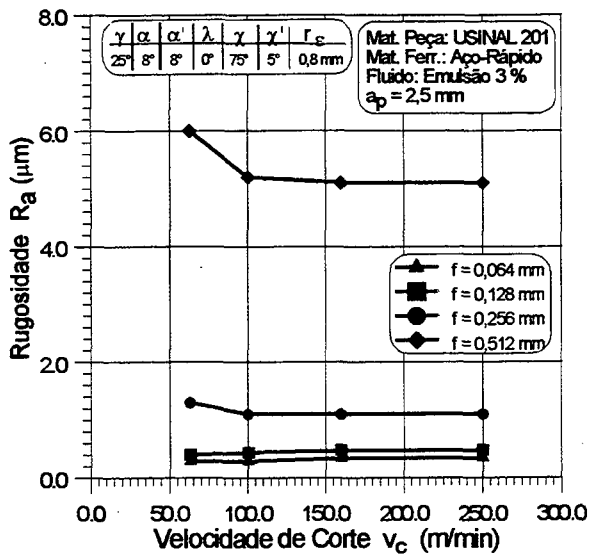
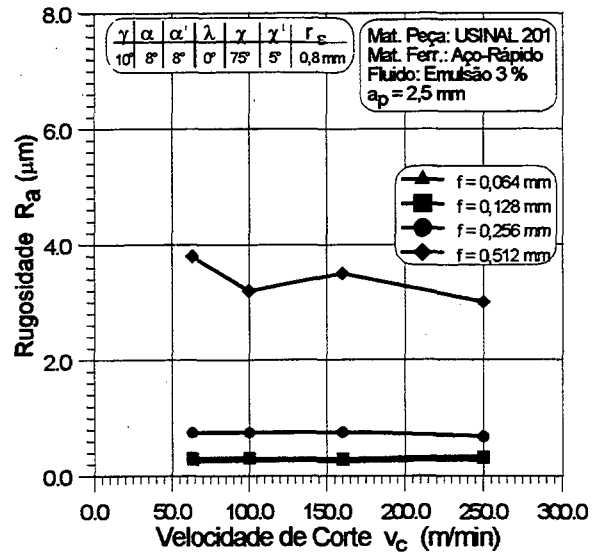
Como a geometria da condição padrão (item 3.2.1) até então adotada satisfazia as condições de pré-otimização, decidiu-se pela continuidade daquela geometria para os próximos ensaios. Em decorrência da grande influência de γ sobre os resultados e da expectativa de alteração dos resultados com a variação desse ângulo e dos parâmetros de corte, além de $\gamma = 25^\circ$, também foram empregadas ferramentas com $\gamma = 10^\circ$.

4.1.4. Condições de corte

a) Influência da velocidade de corte v_c

Para as condições de ensaio utilizadas, ou seja, torneamento externo longitudinal de ligas de alumínio tratáveis termicamente com ferramentas de aço-rápido, são recomendadas velocidades de corte entre 160 e 600 m/min [4]. Por limitação na máquina de ensaios (torno Imor P-400), contudo, a máxima velocidade de corte ensaiada ficou em 250 m/min.

Os ensaios mostraram que, dentro do intervalo de velocidades de corte testado (ou seja, 63 a 250m/min) e em operações de acabamento, não ocorre uma variação significativa na qualidade superficial para as alterações na velocidade de corte (figura 4.12). Essa influência era esperada, visto que Weingaertner et al [2] já haviam chegado às mesmas conclusões na usinagem destas ligas.

GRAF. 21 - $v_c \times R_a$ ($\gamma = 25^\circ$)GRAF. 22 - $v_c \times R_a$ ($\gamma = 10^\circ$)Figura 4.12 - Influência de v_c sobre a qualidade superficial

Na análise dos gráficos pode-se observar também uma pequena tendência de queda da rugosidade com o aumento da velocidade de corte para avanços maiores. Esta característica ocorre principalmente em baixas velocidades (63 e 100 m/min), onde existe uma maior probabilidade de formação de gumes postiços.

As afirmações da bibliografia consultada [10,11,15,23] de que ocorre queda na rugosidade para velocidades mais altas do que as utilizadas, mesmo para baixos avanços, só foram analisadas quando se executaram ensaios em uma máquina-ferramenta que possibilitava maiores rotações (torno Kart EKM-200).

b) Influência do avanço f

Os valores de avanço recomendados para o torneamento das ligas em questão situam-se entre 0,05 e 0,25 mm para operações de acabamento e entre 0,15 e 0,50 mm para operações de desbaste [4]. Dentro do intervalo de avanço testado (0,064 a 0,512 mm), percebe-se nitidamente a tendência de aumento da rugosidade à medida que se aumenta o avanço, como pode ser visto em

todos os gráficos apresentados até o momento. Esses resultados são esperados, já que no torneamento a rugosidade cinemática tem uma relação direta e quadrática com o avanço (item 2.10.2).

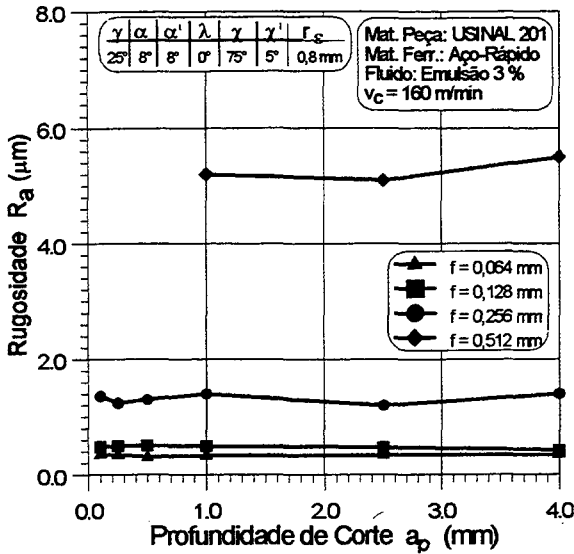
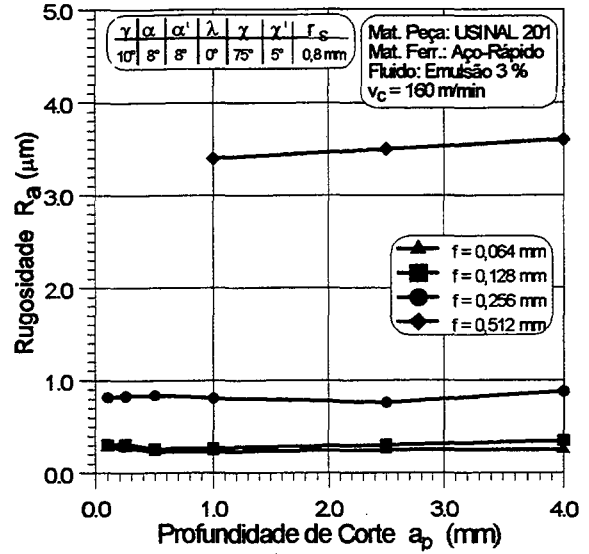
Em situações de acabamento, como visto anteriormente, a influência de fatores que alteram a rugosidade de processo normalmente são predominantes em relação aos relacionados com a rugosidade cinemática. Assim, como recomendam Odin [26], não é necessário reduzir o avanço ao seu mínimo para se executar um trabalho de acabamento, pois o ganho em relação à rugosidade, se existir, está longe de compensar a diminuição na produção. Isso fica claro quando se observam nos ensaios algumas situações em que o uso de avanços de 0,128 mm apresentam praticamente as mesmas rugosidades que com avanços de 0,064 mm, ocorrendo ainda a usinagem na metade do tempo.

c) Influência da profundidade de corte a_p

Para o torneamento de ligas de alumínio tratáveis termicamente com ferramentas de aço-rápido pode-se empregar uma profundidade de corte de até 5,0 mm [4]. Através dos ensaios realizados, é possível verificar que a variação na profundidade de corte, dentro do intervalo de 0,05 a 4,0 mm, praticamente não causa alterações de qualidade superficial (figura 4.13).

Os resultados dos ensaios vêm a confirmar as afirmações de alguns autores [4,7,10,26,33] de que a profundidade de corte não tem influência sobre a qualidade superficial, desde que a_p seja maior que um valor mínimo crítico para que ocorra a usinagem. Esse valor mínimo está aproximadamente entre 4 e 10 μm , dependendo do grau de afiação do gume.

Os resultados dos ensaios, entretanto, não confirmaram os comportamentos verificados por Johne [15] para o torneamento de ligas de alumínio. Segundo este autor, com o aumento da profundidade de corte acima do seu valor mínimo crítico deveriam ocorrer aumentos sensíveis na rugosidade. A medida que a profundidade fosse aumentada, o crescimento da rugosidade tenderia a ser mais brando e somente para profundidades maiores do que 1 mm é que não deveriam ser mais percebidas alterações na rugosidade.

GRAF. 23 - $a_p \times R_a$ ($\gamma = 25^\circ$)GRAF. 24 - $a_p \times R_a$ ($\gamma = 10^\circ$)Figura 4.13 - Influência de a_p sobre a qualidade superficial

d) Influência dos fluidos de corte

Em geral os fluidos de corte influenciam favoravelmente a qualidade superficial e em algumas aplicações são considerados essenciais para a usinagem de ligas de alumínio [4,15].

Segundo Johne [15], o tipo de fluido empregado não é tão significativo, sendo de maior importância se com a aplicação de algum fluido obtém-se uma redução no atrito na superfície de saída e no gume, diminuindo a adesão de partículas do material da peça sobre a ferramenta.

Na análise da influência de fluidos de corte sobre a qualidade superficial foram utilizados os principais fluidos normalmente recomendados para a usinagem de ligas de alumínio. Os ensaios foram executados para as condições de acabamento com as ferramentas de geometria pré-otimizada.

Nos gráficos dos ensaios onde é analisada a influência do fluido de corte (figura 4.14 e 4.15), os diversos fluidos foram ordenados de forma a se ter uma seqüência em ordem crescente do poder de lubrificação, ou seja:

- 1 - A seco (sem fluido de corte);
- 2 - Álcool;
- 3 - Emulsão de óleo a 3 %;

- 4 - Emulsão de óleo a 10 %;
- 5 - Querosene;
- 6 - Querosene + óleo de corte mineral (mistura de 1:1);
- 7 - Óleo de corte mineral.

Pela análise dos gráficos pode-se concluir que, para a obtenção de melhores qualidades superficiais, parece haver uma necessidade maior de refrigeração do que lubrificação na usinagem das ligas de alumínio tratáveis termicamente. Fluidos com baixo poder lubrificante, mas altamente refrigerantes, como é o caso principalmente das emulsões e do álcool, em geral, levaram a melhores resultados de qualidade superficial. Outros fluidos mais lubrificantes, como o óleo de corte e a mistura deste com querosene (apesar de serem muito utilizados no fresamento), chegaram a ter influência negativa na usinagem, ocasionando resultados muito piores do que ensaios sem a aplicação de nenhum fluido de corte. Fluidos com maior poder de lubrificação somente levaram a qualidades superficiais semelhantes aos demais em velocidades de corte mais altas ou quando foram aplicados na usinagem com ferramentas de $\gamma = 25^\circ$ (vide gráficos 25 a 28).

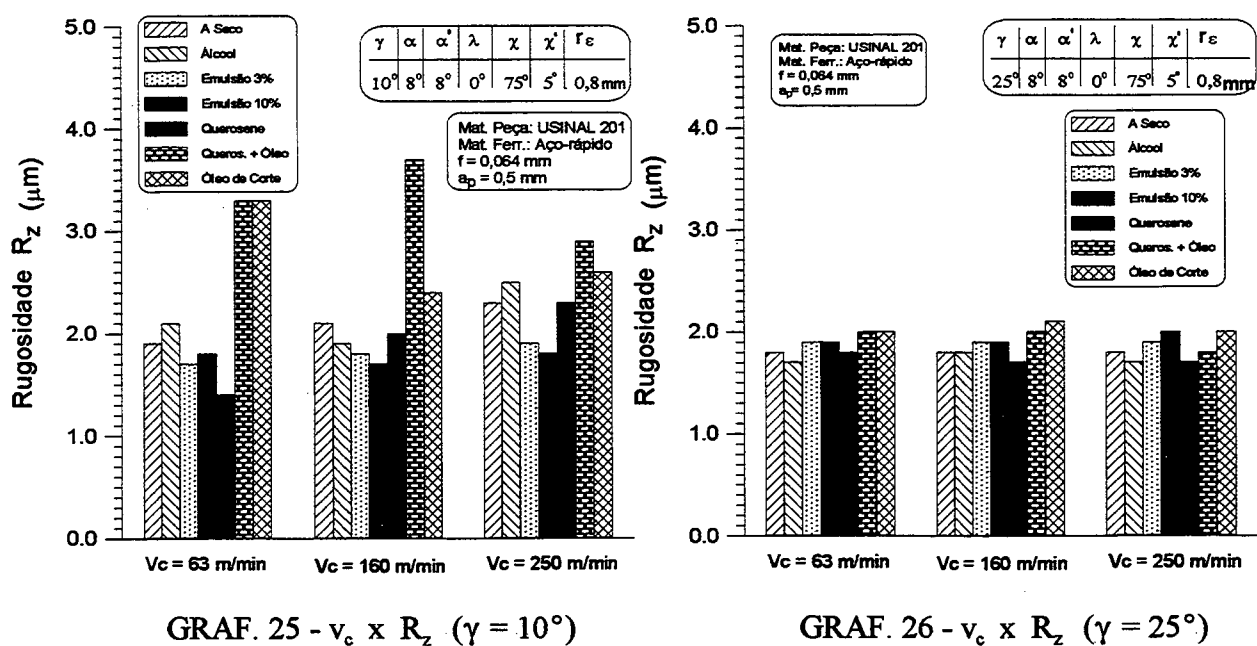


Figura 4.14 - Influência dos fluidos de corte sobre a qualidade superficial

A influência favorável sobre a qualidade superficial quando da aplicação de fluidos de corte diminuiu com o aumento da velocidade de corte, provavelmente pela dificuldade destes em alcançar a zona de contato cavaco-ferramenta. Além disso, foram confirmadas as expectativas de uma ação favorável dos fluidos de corte mais significativa quanto maior a deformação sofrida pelo cavaco. Exemplos disso são as comparações entre ferramentas com ângulos de saída de 10° e 25° (gráfico 28).

Ensaio de usinagem sem fluido de corte forneceram, em algumas situações, rugosidades até menores do que com a aplicação de emulsões, contudo vale lembrar que os ensaios de torneamento foram de curta duração e não foi possível verificar a probabilidade de desgaste mais rápido da ferramenta. Um aspecto característico da usinagem a seco foram superfícies normalmente mais foscas, independentemente do tipo de liga de alumínio utilizada.

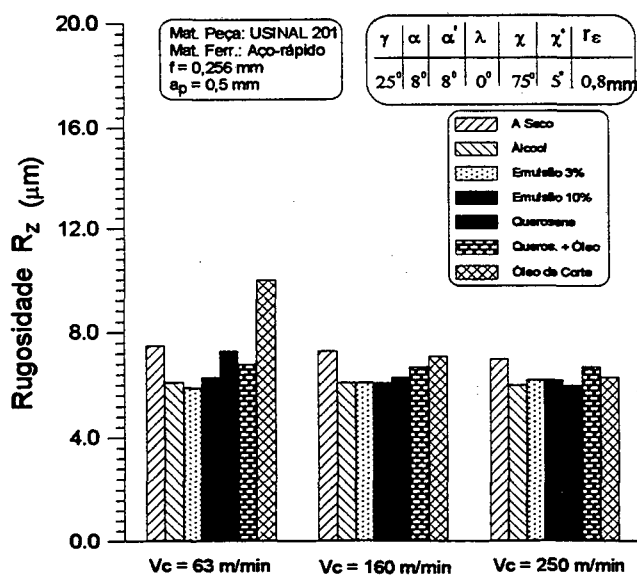
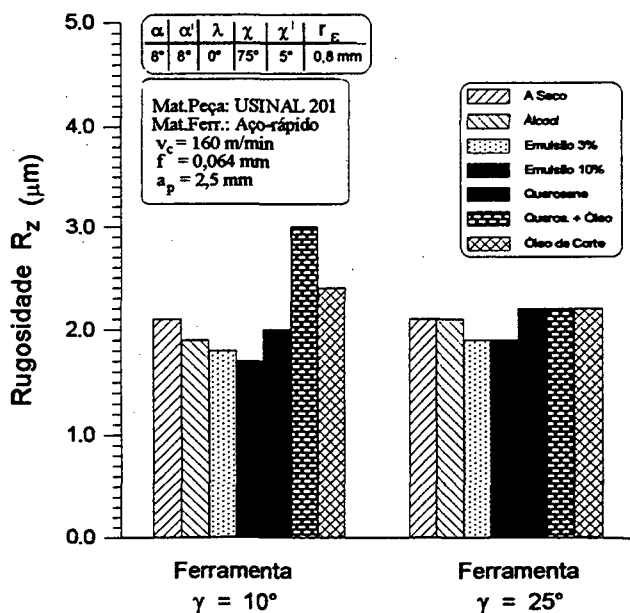
GRAF. 27 - $v_c \times R_z$ GRAF. 28 - $\gamma \times R_z$

Figura 4.15 - Influência dos fluidos de corte sobre a qualidade superficial

Em um ensaio de usinagem a seco com a liga USINAL 301 foi observado um fato interessante. Verificando-se irregularidades no acabamento da superfície usinada e na forma de

cavacos, ao desligar o torno para suspender o ensaio foi verificado que sobre a superfície de saída da ferramenta ainda havia a formação de gume postiço. Na figura 4.16 e 4.17 são apresentadas as fotografias do gume postiço e as condições de corte utilizadas.

γ	α	α'	λ	χ	χ'	r_e
10°	8°	8°	0°	75°	5°	0,8mm

Mat. peça: USINAL 301
 Mat. ferramenta: Aço-rápido
 Fluido: A seco
 $v_c = 63 \text{ m/min}$ $f = 0,256 \text{ mm}$
 $a_p = 2,5 \text{ mm}$

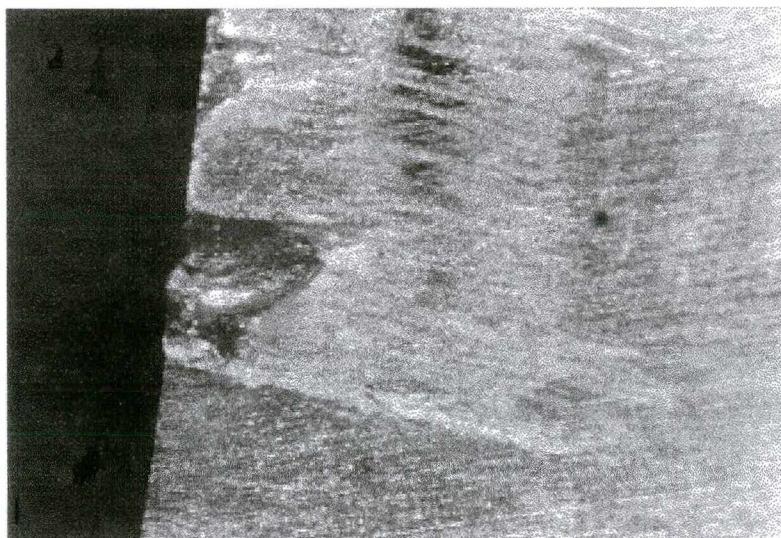


Figura 4.16 - Ferramenta com gume postiço - Vista superior

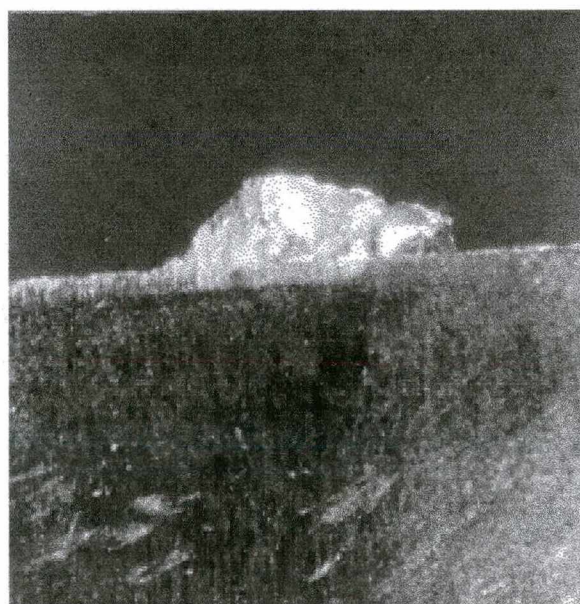
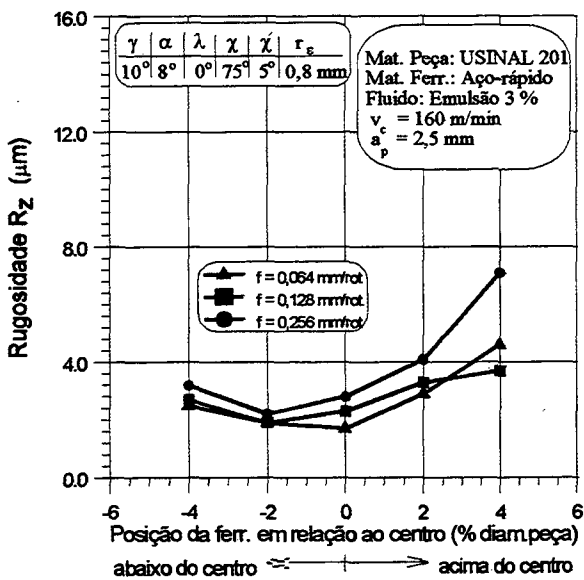


Figura 4.17 - Ferramenta com gume postiço - Vista lateral

e) Influência da posição da ferramenta em relação ao centro da peça

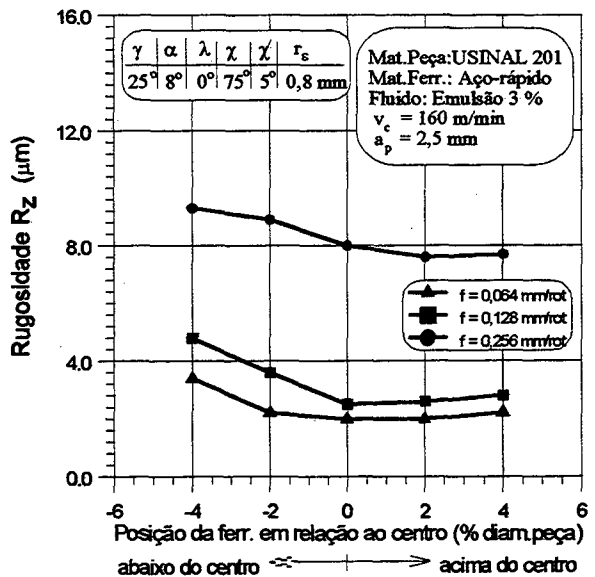
A análise da qualidade superficial com a variação da posição da ferramenta em relação ao centro da ferramenta foi feita dentro da faixa de +4% a -4% do diâmetro da peça (de 4% acima do centro até 4% abaixo do centro da peça).

Através dos resultados obtidos verifica-se que, dentro da faixa testada, as variações de rugosidade são significativas (figura 4.18). Próximo à região central foram verificadas as melhores rugosidades, enquanto que tanto para um posicionamento acima como abaixo do centro são encontrados aumentos de rugosidade. Este comportamento vem a confirmar as recomendações de Stemmer [11] e Degner [25] de que as ferramentas devem usinar no torneamento de acabamento em uma posição central. Para operações de desbaste pode ser usada uma posição levemente acima do centro da peça (até aproximadamente 1% do diâmetro da peça).



GRAF. 29 - Posição da ferr. x R_z

($\gamma = 10^\circ$)



GRAF. 30 - Posição da ferr. x R_z

($\gamma = 25^\circ$)

Figura 4.18 - Influência da posição da ferramenta em relação ao centro da peça

sobre a qualidade superficial

Uma montagem abaixo do centro tende a enfraquecer o gume da ferramenta, além de haver a possibilidade de ocorrência de vibrações, pela tendência da peça “montar” na ferramenta [7]. Este comportamento foi verificado nos ensaios principalmente quando se utilizaram ferramentas de maior ângulo de saída, que por serem menos rígidas são mais suscetíveis a vibrações.

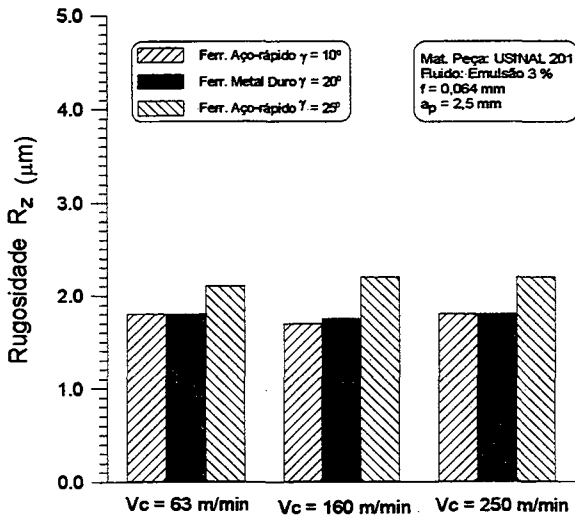
Nos ensaios de usinagem com as ferramentas acima do centro da peça, os aumentos de rugosidade obtidos podem ser creditados à redução do ângulo de incidência secundário α' na ferramenta em trabalho. Como foi observado no item 4.1.3.c, com a redução deste ângulo na usinagem de ligas de alumínio tratáveis termicamente ocorrem rugosidades maiores.

4.1.5. Comparações entre ferramentas de aço-rápido e metal duro

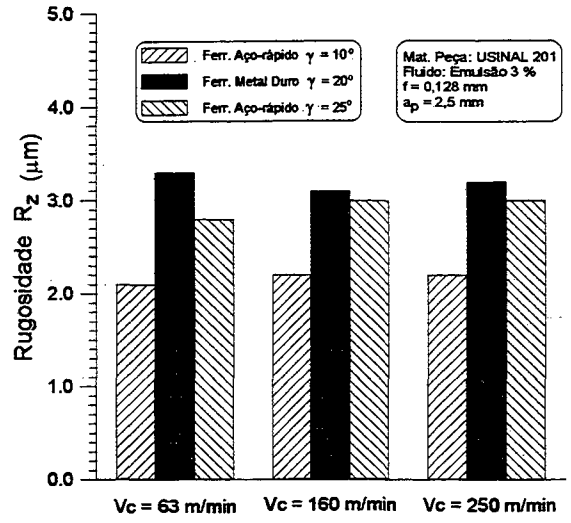
Trabalhando-se em velocidades de corte normais de utilização de ferramentas de aço-rápido, as ferramentas de metal duro normalmente não possibilitam grandes ganhos quanto à qualidade superficial se comparadas com as anteriores. Isto foi comprovado com a execução de ensaios comparativos com ferramentas dos dois materiais em velocidades de até 250 m/min (figura 4.19). A melhoria na qualidade superficial normalmente conseguida com ferramentas de metal duro vem da possibilidade de utilização de velocidades de corte mais altas.

Para os ensaios comparativos foram utilizadas ferramentas de aço-rápido na condição padrão (item 3.2.1), com ângulos de saída de 10° e 25° e insertos de metal duro como especificados no item 3.4.2. Os ensaios foram executados em condições de acabamento, já que para avanços maiores a influência da rugosidade cinemática é determinante em decorrência das diferenças dos perfis das ferramentas (ângulos de direção do gume). Mesmo para avanços de 0,128 mm essa tendência de aumento da rugosidade resultante foi verificada nas ferramentas de metal duro.

Em relação aos parâmetros de corte, ferramentas de metal duro apresentaram os mesmos comportamentos das ferramentas de aço-rápido já analisados, ou seja, variações na velocidade de corte (gráficos 31 e 32) e profundidade de corte praticamente não acarretam nos valores de rugosidade das superfícies usinadas. Analogamente aos resultados anteriores, a rugosidade cinemática determina a grande influência dos avanços sobre a qualidade superficial.



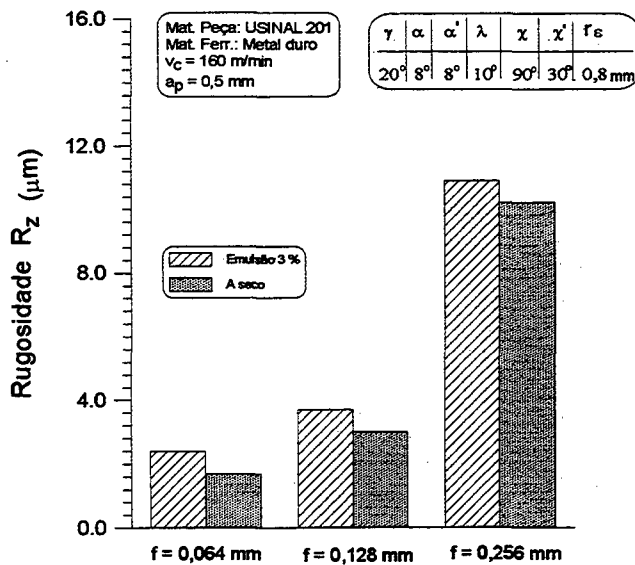
GRAF. 31 - $v_c \times R_z$ ($f = 0,064$ mm)



GRAF. 32 - $v_c \times R_z$ ($f = 0,128$ mm)

Figura 4.19 - Comparações entre ferramentas de aço-rápido e metal duro

Em ensaios sem a utilização de fluido de corte (figura 4.20), as ferramentas de metal duro apresentaram em geral a tendência de melhores resultados em comparação com ensaios onde foram aplicadas emulsões de óleo a 3 %. Apesar dessas diferenças serem pequenas, ocorreram em todos os ensaios realizados.

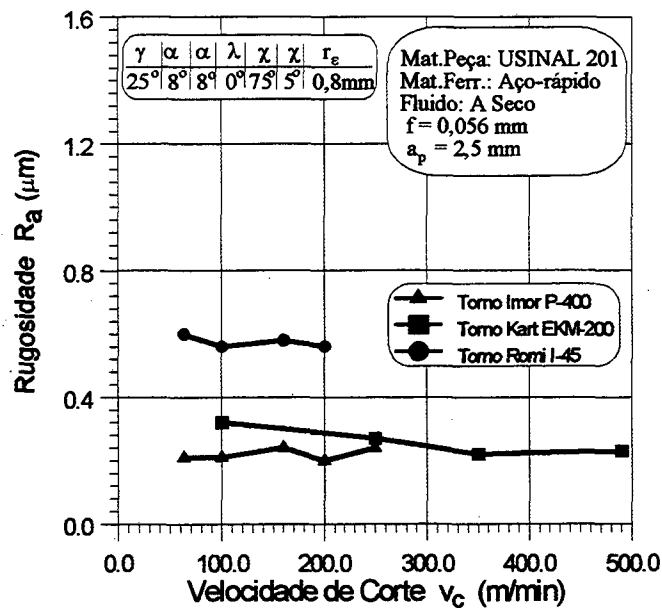


GRAF. 33 - $f \times R_z$

Figura 4.20 - Influência do fluido de corte sobre a qualidade superficial Ferramentas de metal duro

4.1.6. Comparações entre máquinas-ferramentas

Uma boa rigidez da máquina-ferramenta é evidentemente uma condição indispensável para a obtenção de uma qualidade superficial satisfatória. Para permitir comparações entre a máquina-ferramenta até então utilizada nos ensaios (torno Imor P-400), foram realizados alguns ensaios de usinagem em mais duas máquinas: um torno de acabamento Kart EKM-200 com mancais de deslizamento e um torno universal Romi I-45. Os resultados desses ensaios encontram-se na figura 4.21.



GRAF. 34 - $v_c \times R_a$

Figura 4.21 - Influência das máquinas-ferramentas sobre a qualidade superficial

Os ensaios de usinagem em ligas de alumínio tratáveis termicamente mostraram que as características de elevada rigidez da máquina-ferramenta são muito importantes, devido às altas velocidades de corte empregadas. Utilizando-se o torno Kart, que possibilita maiores rotações, percebe-se uma tendência de redução da rugosidade com o aumento da velocidade de corte. A mesma tendência não foi verificada no torno Imor e também no torno Romi. Pela própria concepção dessas últimas duas máquinas, com mancais de rolamentos, são esperadas vibrações maiores nas rotações

máximas e essas podem ter prejudicado um melhor acabamento em maiores velocidades de corte.

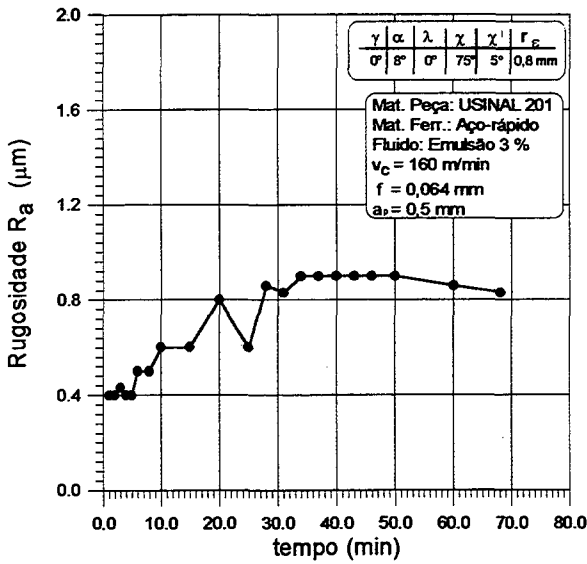
A comparação entre as máquinas-ferramentas mostra claramente as melhores rugosidades quando foram utilizados o torno de acabamento Kart e o torno Imor. Vale ressaltar que no torno Romi não foi feito nenhum trabalho de preparação antes dos ensaios como os executados no torno Imor (troca e ajuste dos mancais de rolamentos).

4.1.7. Influência do tempo de usinagem

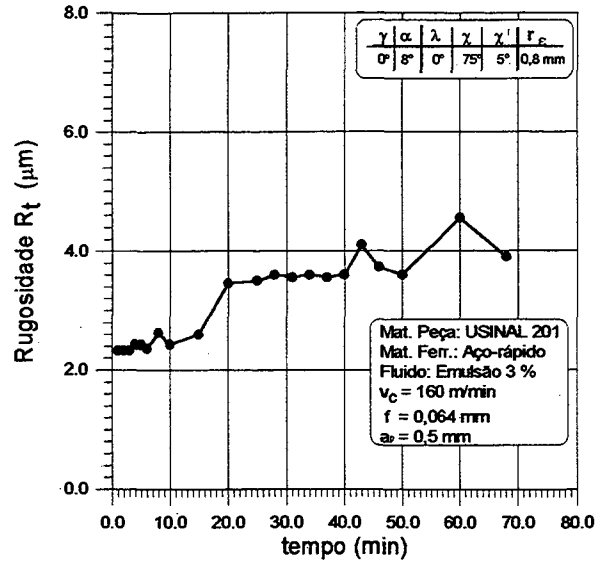
No presente estudo, a análise da usinabilidade de ligas de alumínio com relação à qualidade superficial foi executada através de ensaios de curta duração. Contudo, sabe-se que com o decorrer da usinagem os desgastes das ferramentas e as rugosidades obtidas aumentam progressivamente. Em operações de acabamento é comum estabelecer a qualidade superficial como um parâmetro de final de vida da ferramenta.

A execução de ensaios de longa duração para acompanhamento das variações de rugosidade na usinagem de ligas de alumínio acaba sendo excessivamente onerosa. Como os desgastes são pequenos, são necessários tempos elevados de usinagem e grande volume de material. Neste trabalho foi executado apenas um ensaio de longa duração na liga USINAL 201 com o intuito de verificar o comportamento da qualidade superficial em relação ao tempo de usinagem. Para verificar uma condição mais crítica de usinagem, foi utilizada no ensaio uma ferramenta com $\gamma = 0^\circ$, onde as expectativas de desgastes são maiores.

Os resultados do ensaio de longa duração encontram-se na figura 4.22. Analisando-se os mesmos, pode-se verificar que a velocidade de corte empregada encontra-se muito aquém do que se poderia recomendar para a usinagem da liga de alumínio USINAL 201, mesmo utilizando ferramentas de aço-rápido e ângulo de saída reduzido. Isto pode ser explicado por duas considerações. Em primeiro lugar, sabe-se que a velocidade de corte é escolhida principalmente em função vida da ferramenta e que hoje é estabelecida entre 10 e 15 minutos. Aliado a isso, caso fosse pretendido um bom acabamento superficial para operações de torneamento, por exemplo um limite admissível de rugosidade R_a de 4,0 μm , observa-se que a velocidade de corte poderia ser aumentada em muito.



GRAF. 35 - tempo de usinagem x R_a



GRAF. 36 - tempo de usinagem x R_t

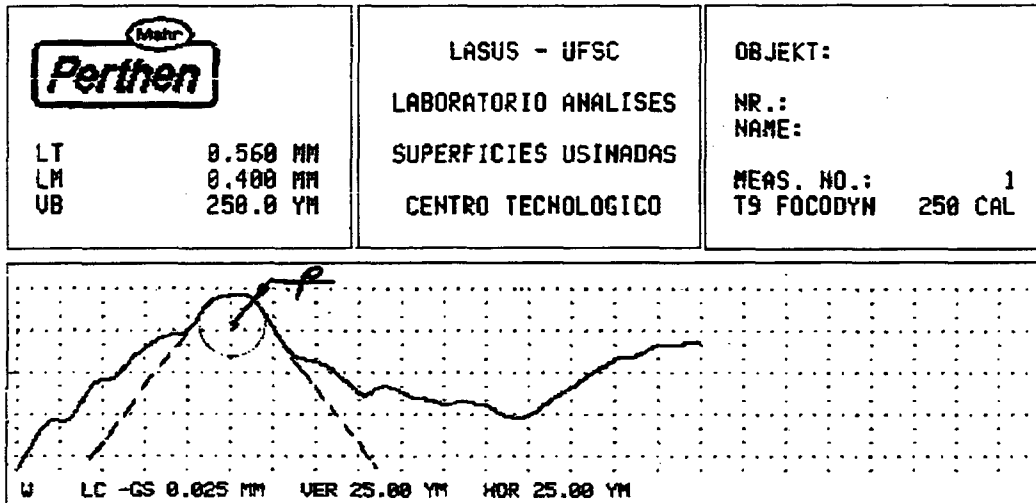
Figura 4.22 - Influência do tempo de usinagem sobre a qualidade superficial

Antes e após o ensaio de usinagem de longa duração foi verificado qualitativamente o raio do gume ρ da ferramenta, através de medições normais ao gume. Essa condição de avaliação só foi possível graças à utilização do rugosímetro Perthen S8P, no modo de medição para perfis e com o cabeçote laser Focodyn (equipamentos pertencentes ao Laboratório de Análises de Superfícies Usinadas - UFSC). As duas impressões de medição de ρ mencionadas são apresentadas na figura 4.23 e 4.24.

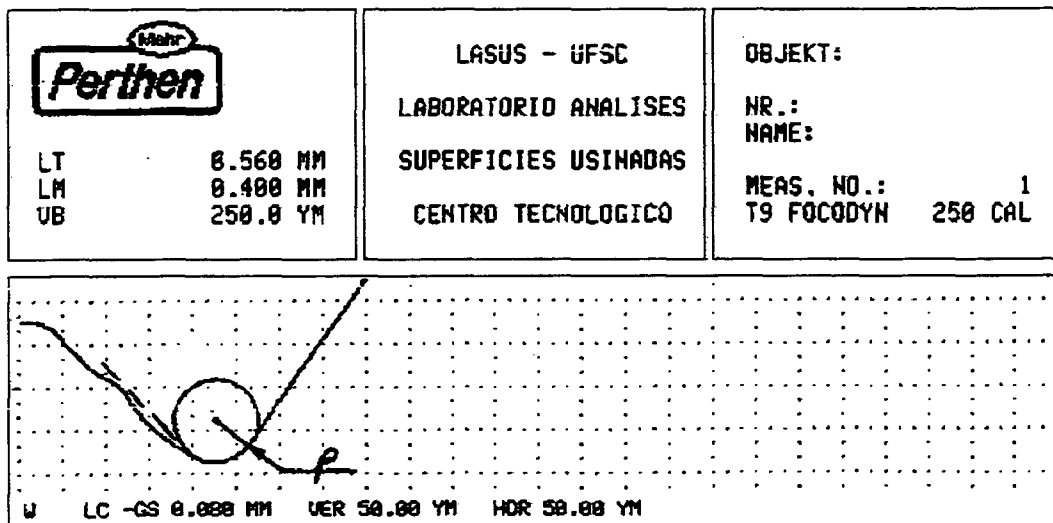
Pela análise das impressões pode-se observar que a ferramenta em início de corte apresentou um raio de gume de aproximadamente 20 μm . Após usinar a liga USINAL 201 por 68 minutos, o gume da ferramenta se encontra deslocado e com um maior arredondamento. Nesta condição a determinação de ρ torna-se mais complexa, já que o perfil não se aproxima da forma circular, mas pode-se verificar que o raio de gume da ferramenta apresenta um valor de no mínimo 50 μm .

Os resultados da medição do raio do gume da ferramenta utilizada nos ensaios de longa duração, apesar de terem sido obtidos de forma qualitativa, apresentaram correspondência com o comportamento de desgaste das ferramentas na usinagem de ligas de alumínio mencionados anteriormente (item 2.8).

perthometer S8P 4.51

Figura 4.23 - Medição qualitativa de ρ - ferramenta em início de corte

perthometer S8P 4.51

Figura 4.24 - Medição qualitativa de ρ - após ensaio de usinagem de longa duração

4.2. Critério Formas de Cavacos

Nos ensaios de torneamento realizados as formas de cavacos são utilizadas como critério para determinação da usinabilidade de ligas de alumínio tratáveis termicamente. Em ligas de corte livre, por serem largamente utilizadas em tornos automáticos, encontrar cavacos em tamanho e forma adequados é primordial para a execução de uma boa usinagem.

Inicialmente são apresentadas as tendências gerais das formas de cavacos obtidas na usinagem de cada liga específica e o modo de apresentação destes resultados nos gráficos.

- No início dos ensaios já foi verificada a tendência geral da liga USINAL 101 (2011-T3) reafirmar sua condição de liga de corte livre e apresentar cavacos em tamanho reduzido durante a usinagem. Para as outras duas ligas, contudo, independentemente dos parâmetros de usinagem e da geometria da ferramenta, os cavacos tendem a ser dos piores tipos (emaranhados e fitas). Até mesmo para a liga USINAL 201 (6262-T8), que apresenta em sua composição o chumbo e o bismuto para facilitar a quebra de cavaco, os cavacos foram desfavoráveis.

- Nos ensaios de usinagem da liga USINAL 101 foram verificadas diferenças significativas nas formas de cavacos para algumas barras de matéria-prima, mesmo utilizando as mesmas condições de usinagem. Esses ensaios foram desconsiderados na análise. As diferenças nos cavacos obtidos possivelmente podem ser creditadas à deficiências no tratamento térmico.

- Os gráficos da variação de formas de cavacos apresentados a seguir têm indicadas as regiões de melhor formação de cavacos. No caso, as melhores formas de cavacos possíveis, “A+” e “B+” (cavacos espirais e helicoidais curtos, respectivamente) são mostradas nos gráficos inscritas em elipses de linha contínua, enquanto que as regiões onde são encontradas formas de cavaco razoáveis e boas estão delimitadas por linhas tracejadas.

A análise das influências das variáveis de processo (geometria da ferramenta, velocidade

de corte, avanço e profundidade de corte) sobre as formas de cavacos obtidas na usinagem das ligas de alumínio estudadas é apresentada na seqüência.

4.2.1. Geometria da ferramenta

A redução no tamanho dos cavacos através de variações na geometria da ferramenta é obtida principalmente pelo aumento da deformação dos cavacos. Em conformidade com essa afirmação, as alterações nos ângulos da ferramenta que não influem diretamente sobre essa propriedade (α , α' , λ , χ , χ') praticamente não acarretaram diferenças nas formas de cavacos nas três ligas ensaiadas. As principais influências foram verificadas com as variações no ângulo de saída e no raio de quina.

a) Influência do ângulo de saída γ e raio de quina r_e

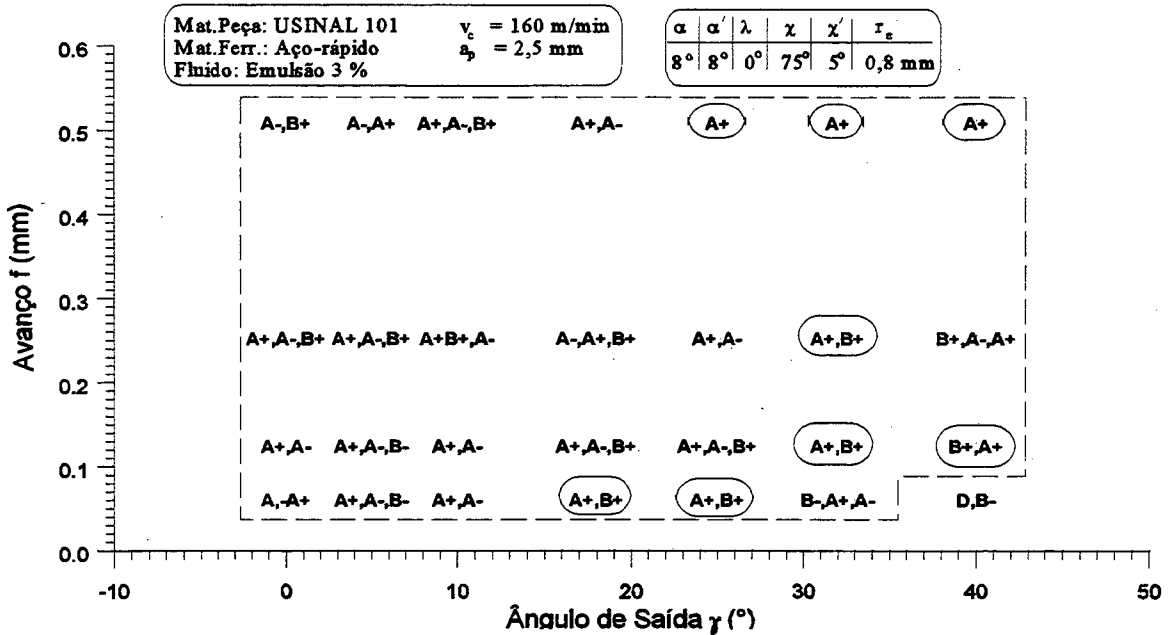
Os resultados dos ensaios para a variação de γ e do r_e na usinagem das ligas USINAL 101 sobre as formas de cavaco são mostrados nas figuras 4.25 e 4.26.

● USINAL 101

A maior deformação dos cavacos com o uso de ângulos de saída menores na usinagem do USINAL 101 acaba não sendo tão favorável. Na maioria dos ensaios, essa liga de corte livre já apresentava cavacos de pequeno tamanho, mas com o uso de ângulos de saída pequenos esses se apresentam tão reduzidos (vírgulas) que são considerados apenas razoáveis. Para o USINAL 101 foram encontrados no mínimo cavacos razoáveis, mesmo com a variação de γ de 0° a 40° . Ensaios com ângulos de saída entre 18° e 40° foram os que apresentaram os melhores cavacos.

A influência do raio de quina sobre a forma dos cavacos no USINAL 101 mostrou-se dependente do ângulo de saída utilizado. Pela análise dos resultados é evidente que o ângulo de saída tem uma influência dominante, mas em ensaios com γ pequenos, por exemplo, verifica-se uma tendência de se encontrar os melhores cavacos quando o r_e também é pequeno. Contudo, para

ângulos de saída maiores encontram-se os melhores cavacos quando se tem um raio de quina grande.



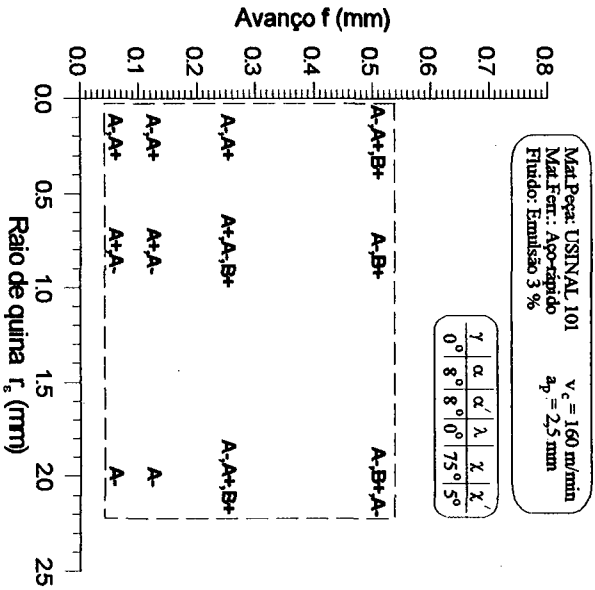
GRAF. 37 - γ x f

Figura 4.25 - Influência de γ sobre as formas de cavacos - USINAL 101

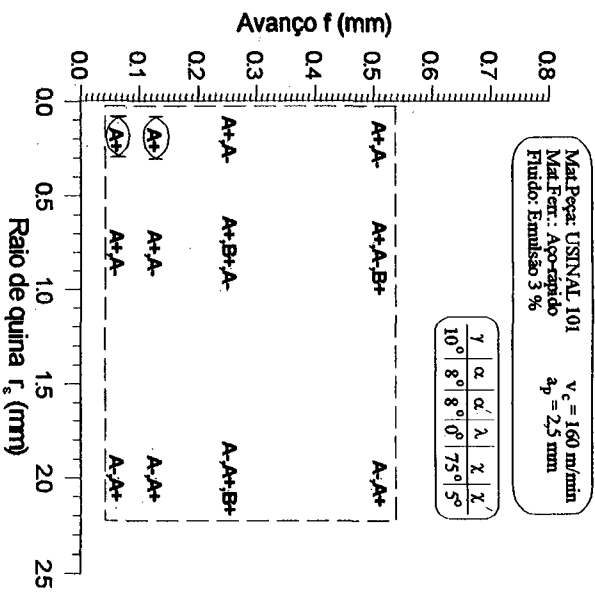
● USINAL 201 e USINAL 301

A usinagem destas ligas normalmente apresentou cavacos inadequados. Com respeito às variações de geometria da ferramenta apenas com uma variação do ângulo de saída é possível verificar uma alteração positiva nos cavacos e mesmo assim em condições restritas na liga USINAL 201 (uso de γ pequenos e grandes avanços).

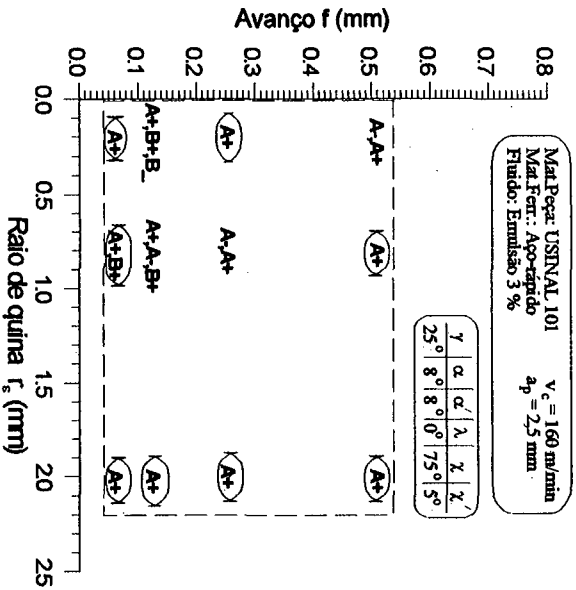
Os resultados dos ensaios para a variação do ângulo de saída γ na usinagem das ligas USINAL 201 e 301 sobre as formas de cavaco são mostrados nas figuras 4.27 e 4.28.



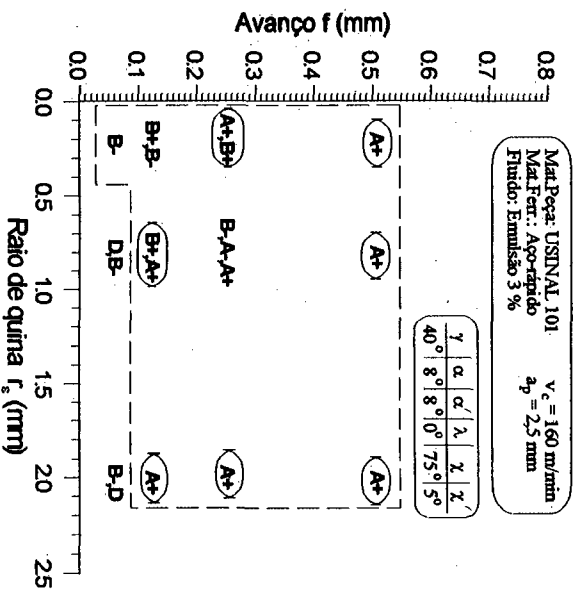
GRAF. 38 - $r_s \times f$ ($\gamma = 0^\circ$)



GRAF. 39 - $r_s \times f$ ($\gamma = 10^\circ$)

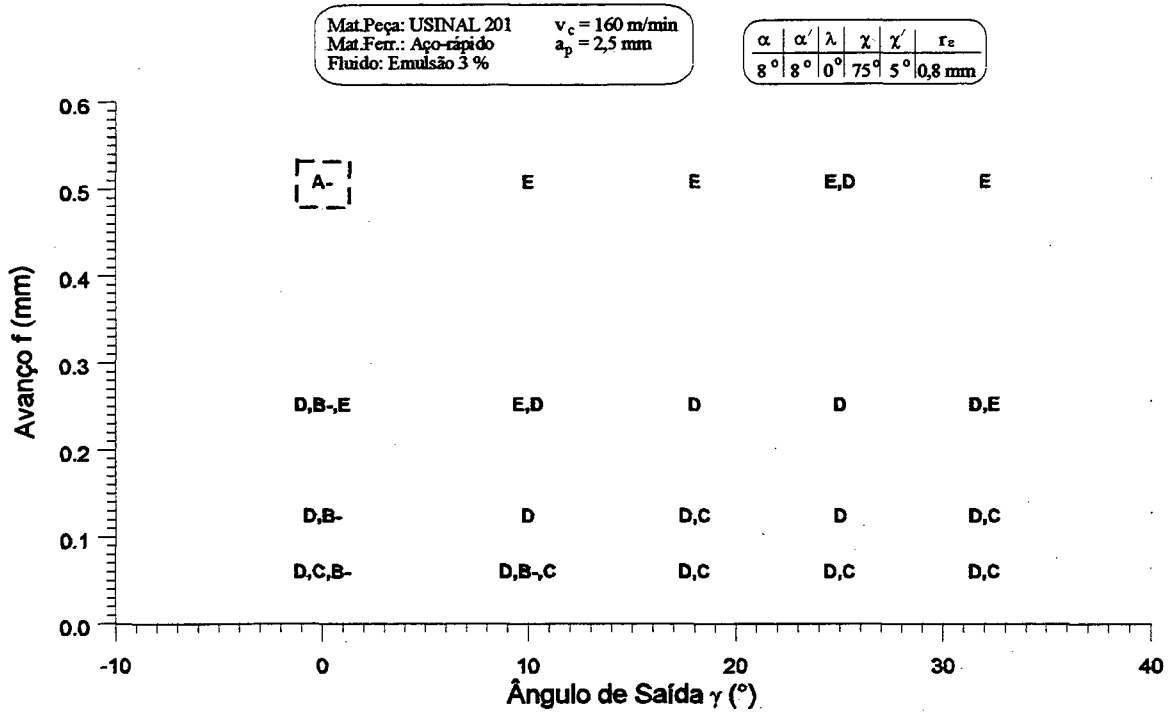


GRAF. 40 - $r_s \times f$ ($\gamma = 25^\circ$)



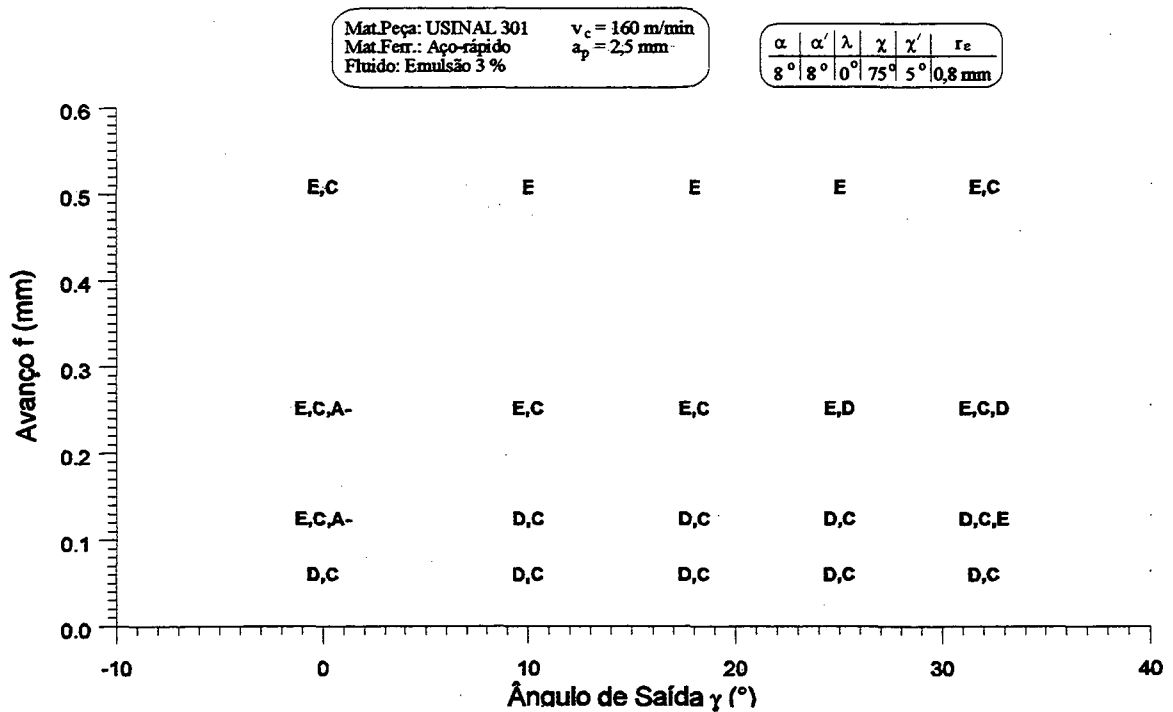
GRAF. 41 - $r_s \times f$ ($\gamma = 40^\circ$)

Figura 4.26 - Influência de γ e r_s sobre as formas de cavacos - USINAL 101



GRAF. 42 - γ x f

Figura 4.27 - Influência de γ sobre as formas de cavacos - USINAL 201



GRAF. 43 - γ x f

Figura 4.28 - Influência de γ sobre as formas de cavacos - USINAL 301

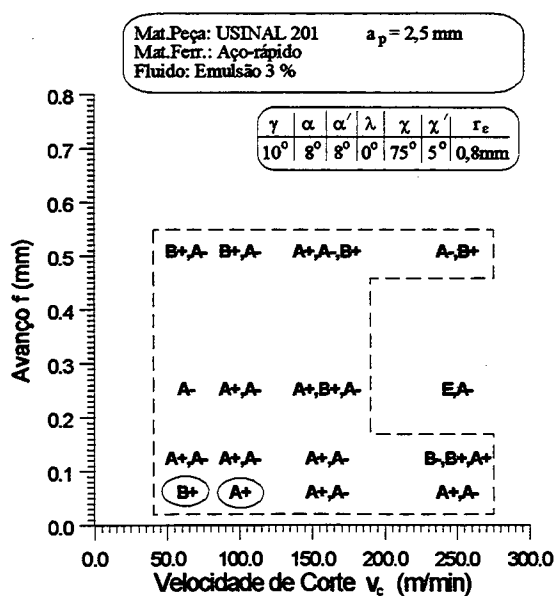
4.2.2. Condições de Corte

a) Influência da velocidade de corte

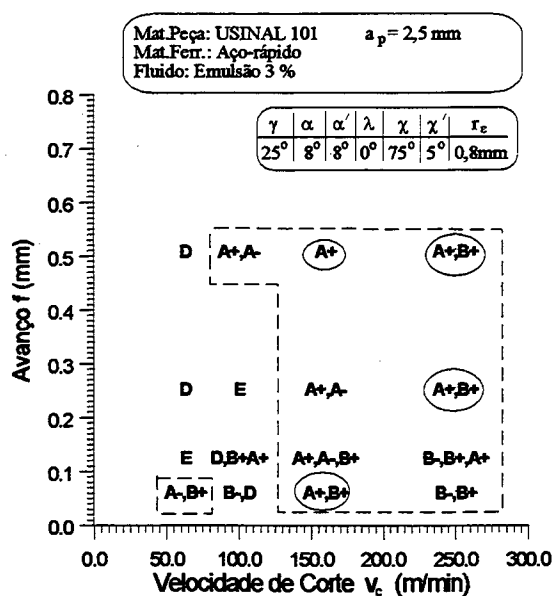
O limite superior de velocidade de corte possível nos ensaios (250 m/min) é muito reduzido para a usinagem de ligas de alumínio tratáveis termicamente, mesmo utilizando-se o aço-rápido como ferramenta de corte, entretanto foram possíveis algumas conclusões. Os resultados da influência da velocidade de corte com relação às formas de cavaco encontram-se nas figuras 4.29, 4.30 e 4.31.

● USINAL 101

Com a redução da velocidade de corte e usando grandes ângulos de saída foram observadas piores formas de cavaco. Nestas condições, a capacidade de deformação do material da peça provavelmente tem maior influência do que o aumento de ductilidade nos cavacos, decorrente das temperaturas mais altas (vide item 2.11.3). Para ângulos de saída menores ($\gamma = 10^\circ$) existe uma tendência inversa.



Graf. 44 - $v_c \times f$ ($\gamma = 10^\circ$)

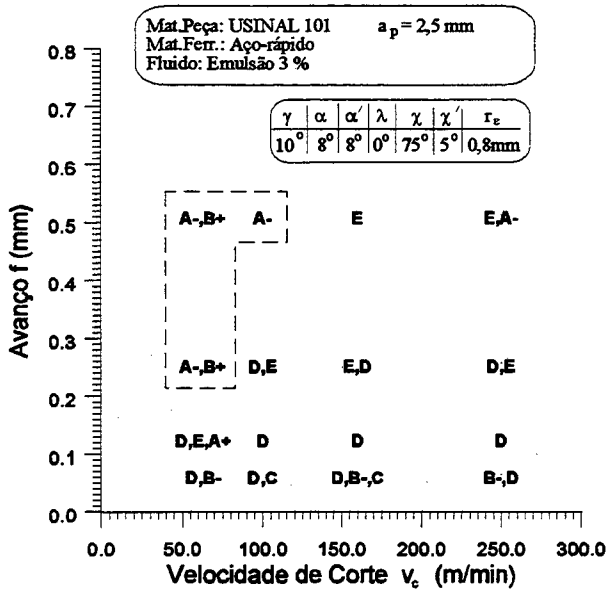


GRAF. 45 - $v_c \times f$ ($\gamma = 25^\circ$)

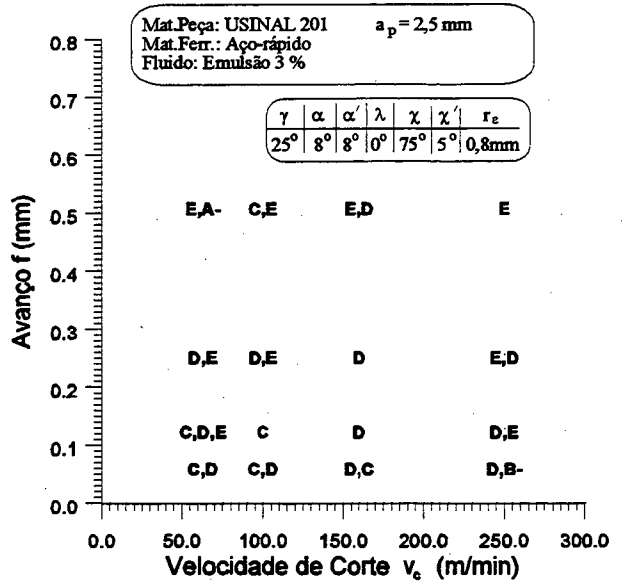
Figura 4.29 - Influência de v_c sobre as formas de cavacos - USINAL 101

● USINAL 201 e USINAL 301

Nestas duas ligas, apesar da velocidade de corte não alterar significativamente as formas dos cavacos, observa-se uma pequena tendência de melhora com o uso de baixas velocidades de corte.

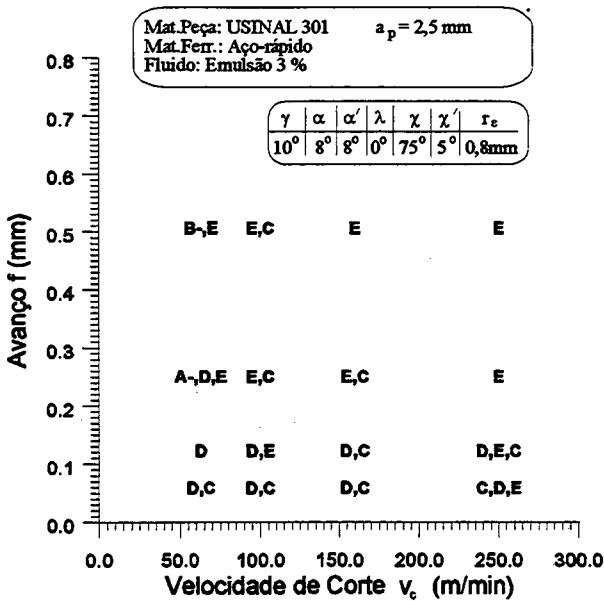


GRAF. 46 - $v_c \times f$ ($\gamma = 10^\circ$)

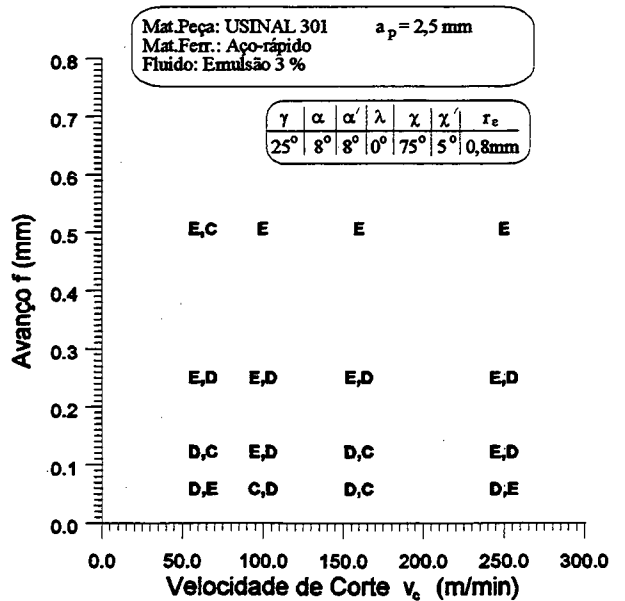


GRAF. 47 - $v_c \times f$ ($\gamma = 25^\circ$)

Figura 4.30 - Influência de v_c sobre as formas de cavacos - USINAL 201



GRAF. 48 - $v_c \times f$ ($\gamma = 10^\circ$)



GRAF. 49 - $v_c \times f$ ($\gamma = 25^\circ$)

Figura 4.31 - Influência de v_c sobre as formas de cavacos - USINAL 301

b) Influência da profundidade de corte

O aumento da profundidade de corte provoca uma maior deformação dos cavacos e conseqüentemente tende a causar a geração de cavacos de menor tamanho na usinagem. Os resultados dos ensaios para a variação na profundidade de corte sobre as formas de cavaco nas três ligas são mostrados nas figuras 4.32, 4.33 e 4.34.

● USINAL 101, 201 e 301

A profundidade de corte, a contrário do que se esperava, mostrou-se pouco influente sobre a forma dos cavacos das três ligas ensaiadas. Para o USINAL 101, que normalmente já apresenta cavacos de pequenos tamanhos, a variação na profundidade de corte não apresentou prejuízos nas formas dos cavacos. Já para as ligas USINAL 201 e 301, o aumento da deformação devido a acréscimos na profundidade de corte mostra-se insuficiente para a melhoria na forma de cavacos. Para essas ligas provavelmente são necessárias profundidades bem superiores a 4,0 mm (máximo utilizado nos ensaios) para se obter formas de cavacos razoáveis.

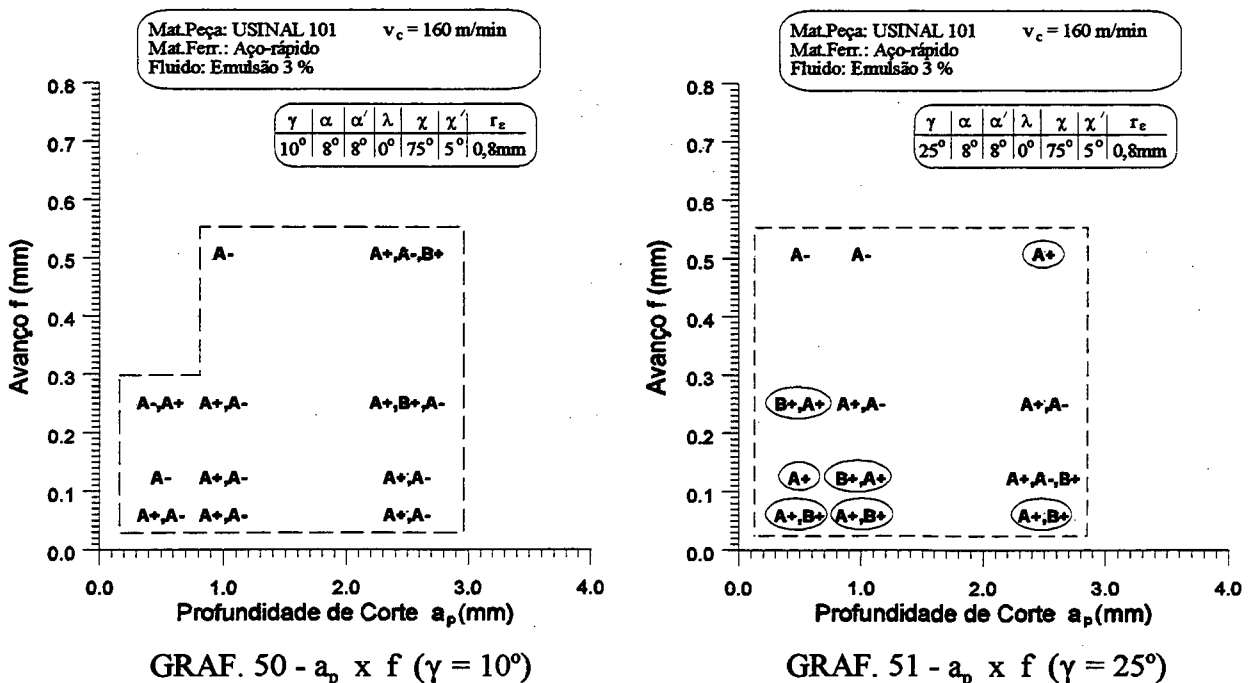
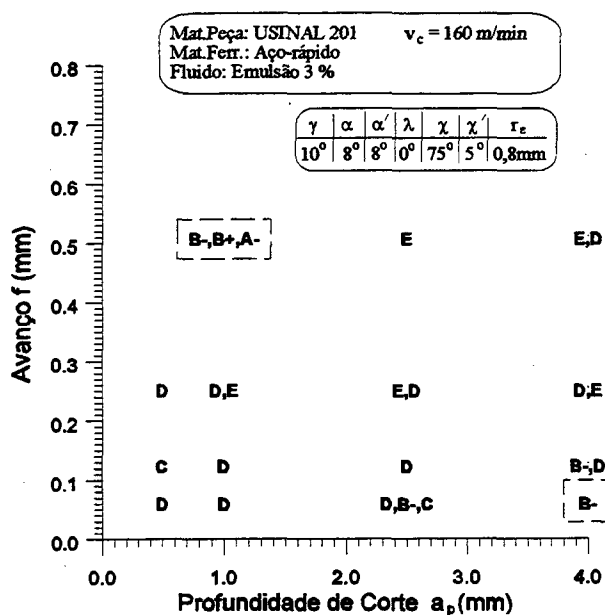
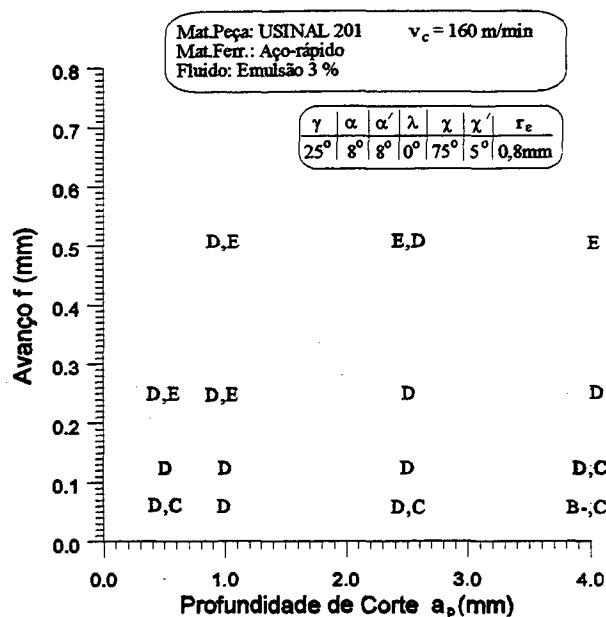


Figura 4.32 - Influência de a_p sobre as formas de cavacos - USINAL 101

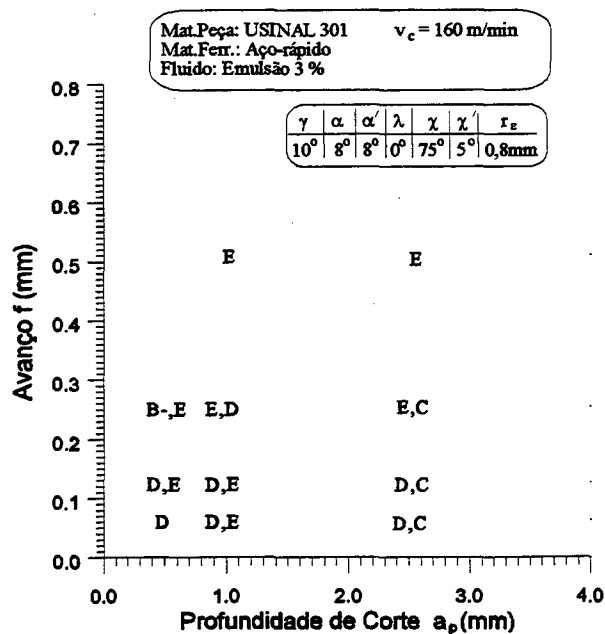


GRAF. 52 - $a_p \times f$ ($\gamma = 10^\circ$)

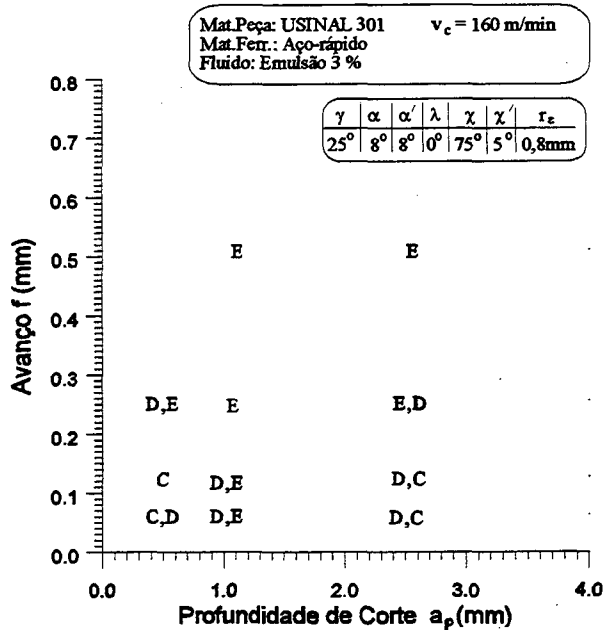


GRAF. 53 - $a_p \times f$ ($\gamma = 25^\circ$)

Figura 4.33 - Influência de a_p sobre as formas de cavacos - USINAL 201



GRAF. 54 - $a_p \times f$ ($\gamma = 10^\circ$)



GRAF. 55 - $a_p \times f$ ($\gamma = 25^\circ$)

Figura 4.34 - Influência de a_p sobre as formas de cavacos - USINAL 301

c) Avanço f

Da mesma forma que para a profundidade de corte, com o aumento no avanço são esperados cavacos com menor tamanho, em decorrência da maior deformação imposta aos mesmos. A influência do avanço é confirmada nos ensaios para as três ligas ensaiadas e pode ser verificada nos gráficos de formas de cavacos apresentados até o momento e nos gráficos a seguir. Na usinagem das ligas USINAL 201 e 301, mesmo aumentos de até 0,512 mm nos avanços não são suficientes, na maioria dos ensaios, para permitir a obtenção de cavacos adequados.

d) Influência dos fluidos de corte

● USINAL 101

Como visto no item 2.11.3.c, a aplicação de fluido de corte tende a facilitar a quebra dos cavacos, devido à menor ductilidade do material em menores temperaturas. Contudo, os ensaios na liga USINAL 101 sem a aplicação fluido de corte (a seco) apresentaram cavacos de menor tamanho do que com a aplicação de emulsão de óleo a 3% (figura 4.35).

A aplicação de fluido de corte, mesmo com o comportamento descrito acima, ainda é favorável na usinagem do USINAL 101, já que os cavacos de menor tamanho encontrados nos ensaios a seco são pequenos demais, ou seja, em sua maioria têm a forma de vírgulas. Esses cavacos, como visto anteriormente, são classificados normalmente em estudos de usinabilidade de um dado material apenas como razoáveis, em decorrência de apresentarem perigo ao operador na sua remoção e manipulação e também pela grande possibilidade de penetração e danificação das guias das máquinas-ferramentas.

● USINAL 201 e 301

Para as ligas USINAL 201 e 301 a aplicação de fluido de corte, em comparação com a utilização a seco, em situações normais de ensaios, não acarretou alterações significativas sobre as formas de cavacos.

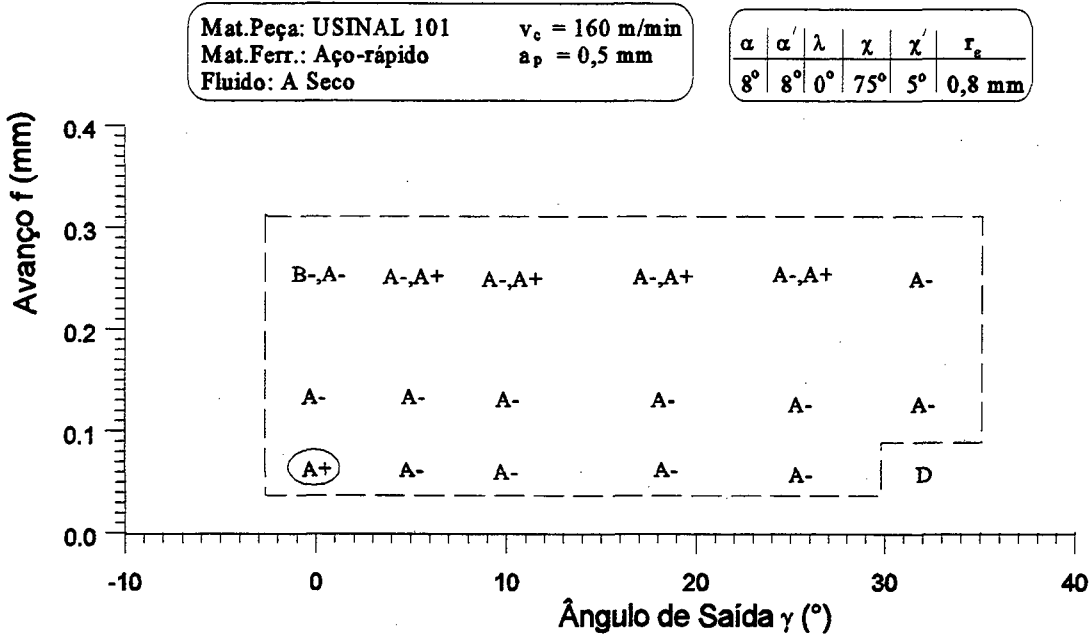
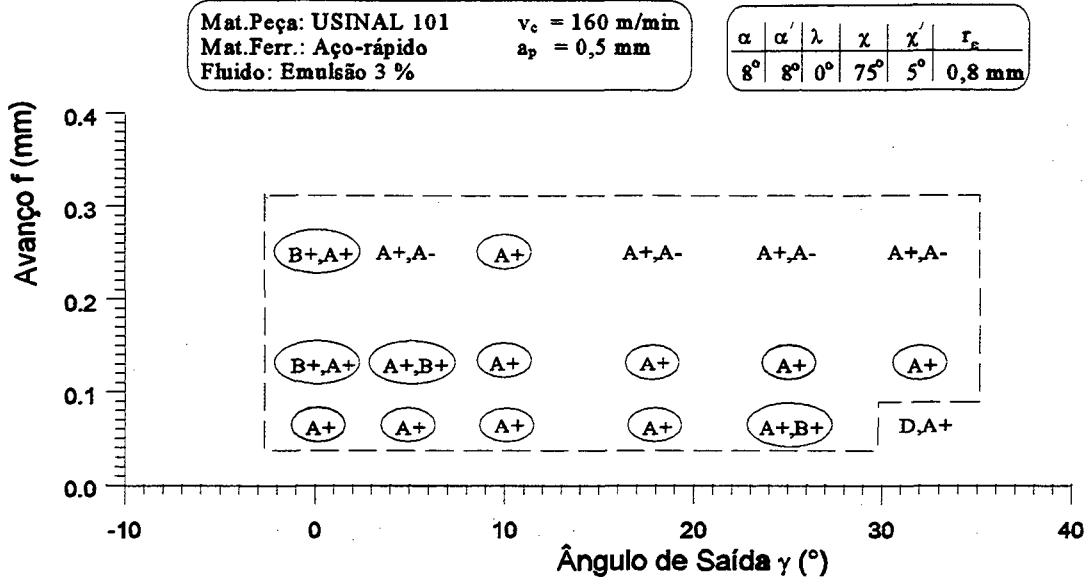


Figura 4.35 - Influência de fluidos de corte sobre as formas de cavacos - USINAL 101

4.2.3. Inseto de metal duro com quebra-cavacos

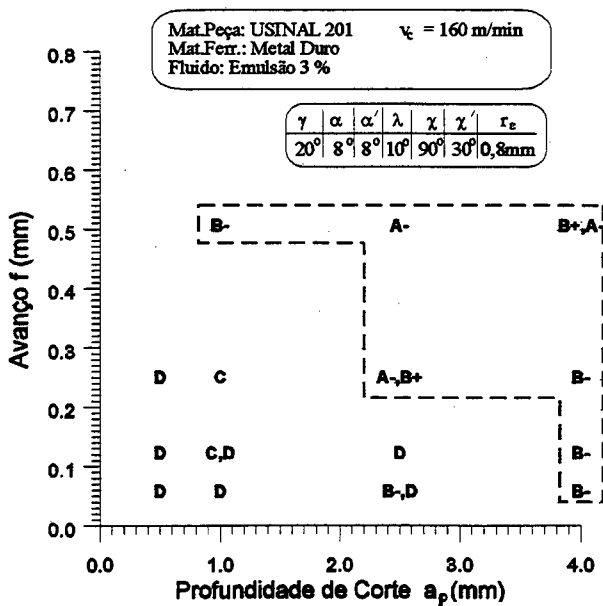
A aplicação de obstáculos no fluxo normal dos cavacos pela superfície de saída, chamados de quebra-cavacos, tem a função de forçar a conformação além do limite de resistência do material,

provocando a quebra dos cavacos em partículas menores.

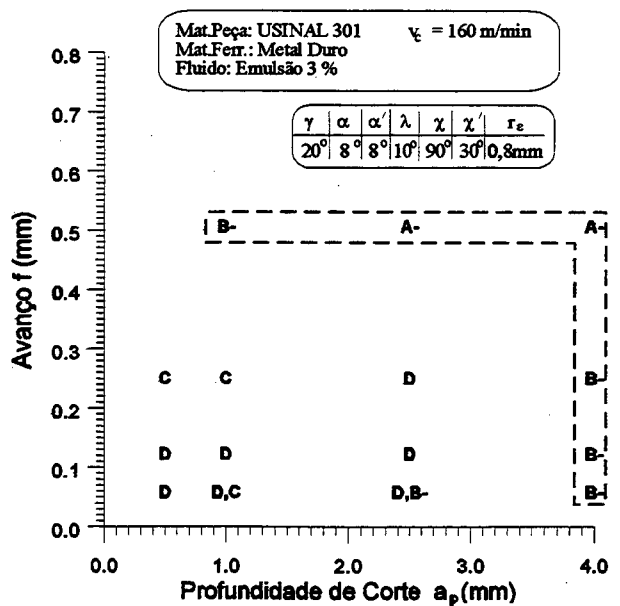
A utilização principal de quebra-cavacos está na usinagem de materiais dúcteis, onde as alterações na geometria da ferramenta e nos parâmetros de processo são insuficientes para a modificação das formas desfavoráveis de cavacos encontradas.

Pela análise dos resultados apresentada, na usinagem da liga de corte livre USINAL 101 a aplicação de quebra-cavacos torna-se completamente desnecessária. Entretanto, não se pode esperar uma usinagem eficiente sem a aplicação deste tipo de recurso na usinagem das ligas USINAL 201 e 301.

O resultados dos ensaios com uma ferramenta de metal-duro comercial que possui quebra-cavacos incorporado à pastilha na usinagem de ligas USINAL 201 e 301 são mostrados na figura 4.36. Considerando que na usinagem sem o auxílio de quebra-cavacos os cavacos resultantes em geral tendem a ser emaranhados ou em forma de fitas, a utilização de ferramentas com quebra-cavacos trouxe melhorias na usinagem destas duas ligas. Formas razoáveis de cavacos foram obtidas com o uso de grandes avanços ou grandes profundidades de corte. A liga USINAL 201, mais uma vez, apresentou uma pequena vantagem em relação à USINAL 301 quanto às formas de cavacos obtidas.



GRAF. 58 - $a_p \times f$ (USINAL 201)



GRAF. 59 - $a_p \times f$ (USINAL 301)

Figura 4.36 - Influência de ferramentas com quebra-cavacos na usinagem de USINAL 201 e 301

Durante a usinagem de preparação de um corpo de prova da liga USINAL 301 para a execução de novos ensaios, utilizando-se uma ferramenta de aço-rápido (geometria e desgastes não controlados), ocorreu uma falha no fornecimento de fluido de corte. Essa situação provocou a formação de um tipo anômalo de cavaco, chamado normalmente de cavaco aparente (vide item 2.6.3) e que não havia sido encontrado em nenhum dos ensaios até então. Simuladas as mesmas condições de usinagem, novamente o fenômeno se repetiu. Na figura 4.37 é apresentada a fotografia do cavaco aparente depositado sobre a ferramenta.

A ausência de fluido de corte na usinagem das ligas USINAL 201 e 301 não havia apresentado grandes diferenças nas formas de cavaco obtidas (item 4.2.2.d.). Entretanto, essa condição aliada a um grande quebra-cavaco, desgaste da ferramenta e uma velocidade de corte de 250 m/min provocou a ocorrência de cavacos aparentes, o que impossibilita o prosseguimento de uma usinagem adequada. O fenômeno pode ser explicado em função das condições desfavoráveis empregadas que propiciam uma grande elevação da temperatura na região de corte e com isso, reduzem a velocidade de corte crítica para a ocorrência destes tipos de cavacos na usinagem da liga USINAL 301.

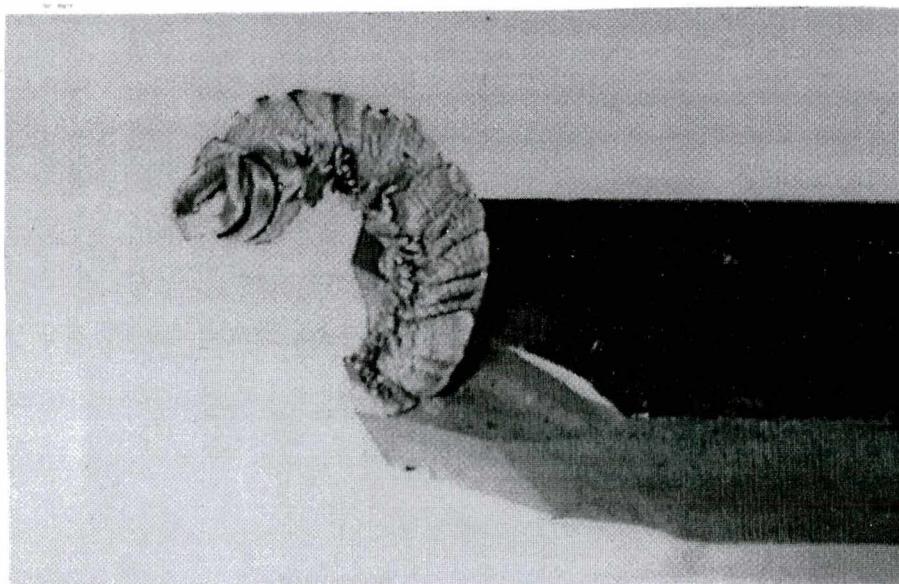


Figura 4.37 - Ferramenta com cavaco aparente encontrado na usinagem do USINAL 301

4.3. Critério Forças na Usinagem

O conhecimento da grandeza das forças na usinagem de ligas de alumínio torna-se importante principalmente para que durante a usinagem não se ultrapasse o limite máximo de potência disponível na máquina-ferramenta. Embora a força específica de corte de ligas de alumínio esteja na ordem de 35 % da dos aços, são exigidas potências de acionamento até três vezes maiores para a usinagem econômica, já que altas velocidades de corte são possíveis [7,17].

A seguir é feita a análise da influência das variáveis de processo (velocidade de corte, avanço, profundidade de corte e geometria da ferramenta) sobre as forças na usinagem, bem como a determinação de forças específicas de corte para cada uma das ligas de alumínio ensaiadas.

4.3.1. Geometria da ferramenta

Em relação aos elementos da geometria da ferramenta que influem sobre as componentes das forças de usinagem, serão apresentados neste item apenas os considerados mais importantes, ou seja, o ângulo de saída e o ângulo de direção do gume principal. Além dos ângulos citados, o ângulo de inclinação também é considerado como importante na alteração das forças na usinagem, mas a sua influência só deve ocorrer para valores negativos elevados [23]. Como no torneamento de ligas de alumínio tratáveis termicamente os valores recomendados para λ estão entre 0° e 4° , a influência do ângulo de inclinação sobre as forças na usinagem tende a ser muito pequena.

a) Influência do ângulo de saída γ

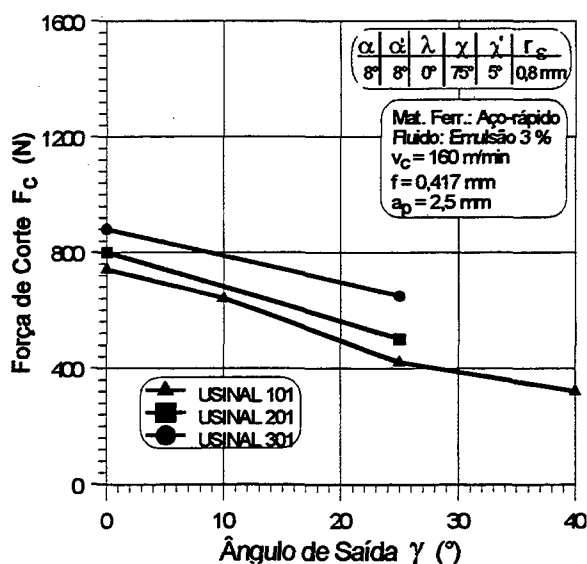
Conforme visto no item 2.9, são esperadas forças de corte menores quanto maior for o valor positivo do ângulo de saída. Segundo Kronenberg, a força de corte aumenta quase 50 % quando o ângulo de saída varia de $+30^\circ$ até um ângulo negativo de -15° [11]. Estas considerações podem ser verificadas na tabela 9, onde são mostradas as alterações esperadas nas componentes da força de usinagem com a variação dos ângulos de saída e de inclinação da ferramenta.

ALTERAÇÃO DA FORÇA POR GRAU DE VARIAÇÃO NO ÂNGULO

	F_c	F_r	F_p
↓ Ângulo de Saída	↑ 1,5 %	↑ 5,0 %	↑ 4,0 %
↓ Ângulo de Inclinação	↑ 1,5 %	↑ 1,5 %	↑ 10,0 %
↑ Ângulo de Saída	↓ 1,5 %	↓ 5,0 %	↓ 4,0 %
↑ Ângulo de Inclinação	↓ 1,5 %	↓ 1,5 %	↓ 10,0 %

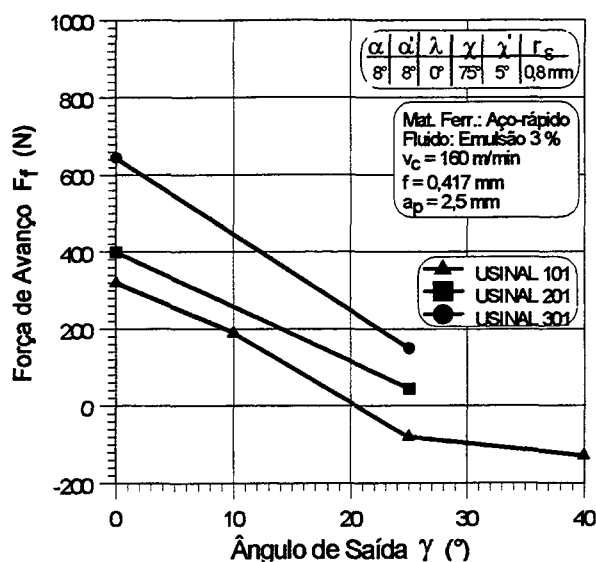
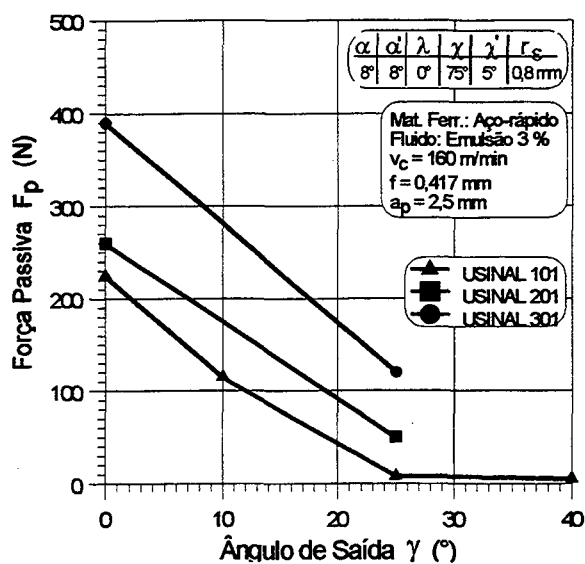
Tabela 9 - Influência da variação dos ângulos de saída e de inclinação sobre as componentes da força de usinagem [11]

Nos ensaios de usinagem foram utilizadas ferramentas com γ entre 0° e 40° . Através dos resultados obtidos (figuras 4.38 e 4.39) verifica-se que as alterações nas componentes da força de usinagem com a variação de γ são significativas e que os decréscimos destas forças por grau de aumento positivo no ângulo de saída são muito próximos aos indicados na tabela 9. A liga USINAL 101 apresentou os menores valores de força de corte em relação as demais, provavelmente devido à sua menor resistência e dureza.



GRAF. 60 - γ x F_c

Figura 4.38 - Influência de γ sobre a força de corte

GRAF. 61 - $\gamma \times F_f$ GRAF. 62 - $\gamma \times F_p$ Figura 4.39 - Influência de γ sobre a força de avanço e força passiva

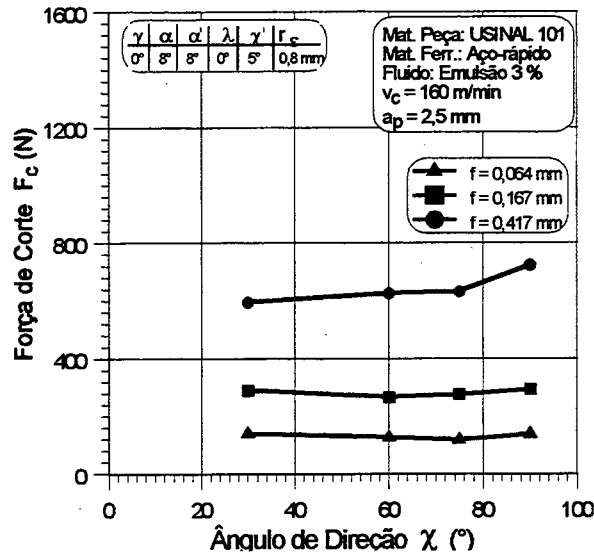
Um fato interessante na análise dos resultados é que ferramentas com $\gamma \geq 25^\circ$ apresentaram na usinagem do USINAL 101 valores negativos da força de avanço. Esta condição pode levar a ferramenta a ser puxada na direção de avanço durante uma usinagem.

Nos resultados obtidos para a força passiva, vale ressaltar que valores como os encontrados na usinagem do USINAL 301 com $\gamma = 0^\circ$, ou seja, forças passivas que chegam a quase 50 % da força de corte, podem apresentar comportamentos desfavoráveis no processo, como fletir a peça ou deslocar transversalmente a ferramenta, podendo provocar vibrações.

b) Influência do ângulo de direção do gume principal χ

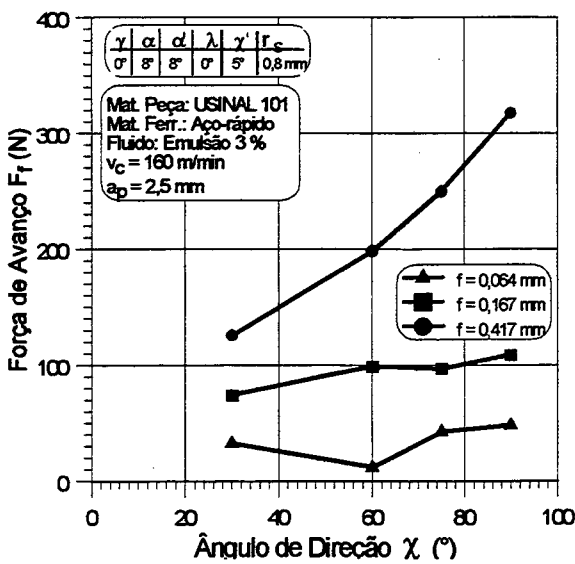
Segundo Ferraresi [23], um aumento no ângulo de direção do gume principal faz esperar uma diminuição nas forças de corte. Todavia, os ensaios com a liga USINAL 101 mostram resultados que não confirmam as previsões. Analisando-se uma variação de χ entre 30° a 90° , as alterações na forças de corte foram extremamente pequenas quando foram utilizados avanços de 0,064 e 0,167 mm. Para avanços maiores ($f = 0,417$ mm), contudo, foram verificados aumentos da força de corte com o aumento de χ (figura 4.40).

Os resultados da força de avanço e força passiva com a liga USINAL 101 mostraram-se coerentes com as indicações de Ferraresi [23]. O aumento esperado na força de avanço e a queda esperada na força passiva para aumentos no ângulo de direção do gume realmente tenderam a ocorrer (figura 4.41).

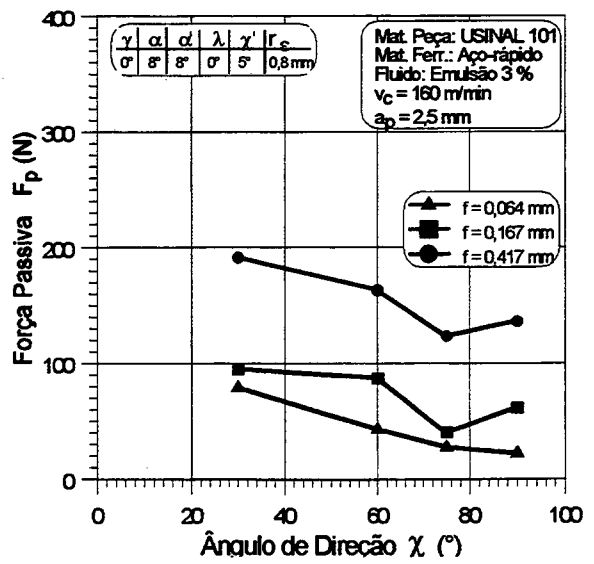


GRAF. 63 - $\chi \times F_c$

Figura 4.40 - Influência de χ sobre a força de corte - USINAL 101



GRAF. 64 - $\chi \times F_f$



GRAF. 65 - $\chi \times F_p$

Figura 4.41 - Influência de χ sobre a força de avanço e força passiva - USINAL 101

4.3.2. Condições de Corte

a) Influência da velocidade de corte

Com o aumento da velocidade de corte é esperada uma diminuição nos valores das componentes da força de usinagem. Este comportamento é decorrente da diminuição da resistência do material com o aumento da temperatura. Além disso, o campo inferior de velocidades de corte é influenciado pela formação de gume postiço, o que tende a proporcionar os valores máximos de forças [10].

Nos ensaios realizados com as ligas USINAL 201 e 301 são confirmadas as afirmações mencionadas acima, visto que realmente ocorre um decréscimo nas forças de corte com o aumento da velocidade de corte. Para a liga USINAL 201, na maior parte dos ensaios esta diminuição nas forças é pequena, enquanto que com a liga USINAL 301 este decréscimo assume valores mais significativos na maioria dos ensaios. Resultados não esperados ocorreram, entretanto, nos ensaios de força com a liga USINAL 101. Para esta liga, o aumento na velocidade de corte provocou um acréscimo nas forças de corte em boa parte dos ensaios. Para tais resultados não foi encontrada uma justificativa, fazendo-se necessária a realização de um estudo posterior sobre o tema. Na figura 4.42 estão resumidas as influências da velocidade de corte sobre as forças de corte das ligas ensaiadas.

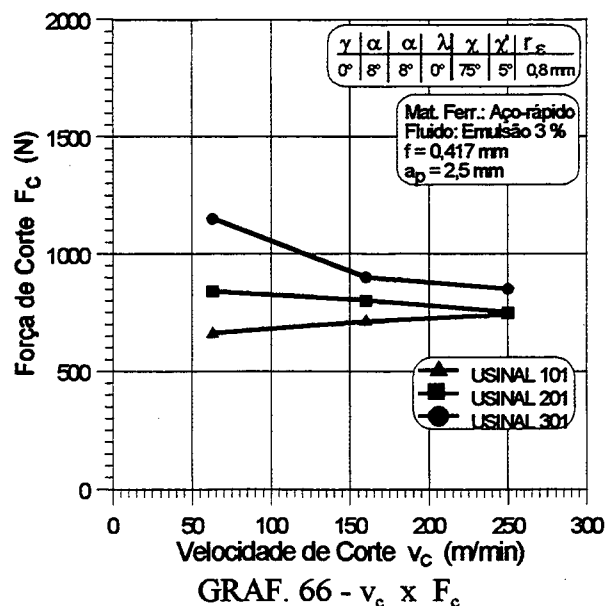


Figura 4.42 - Influência da velocidade de corte sobre as forças de corte

Com relação à influência da velocidade de corte sobre a força de avanço e a força passiva, os poucos dados disponíveis na literatura e a grande dispersões nos resultados dos ensaios não permitem uma análise confiável sobre o tema.

b) Influência do avanço e da profundidade de corte

O avanço e a profundidade de corte são variáveis da equação de Kienzle (vide item 2.9), 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. De um modo geral, verifica-se que a força específica de corte diminui com as dimensões do cavaco, sendo esta diminuição mais pronunciada para um aumento do avanço do que para um aumento da profundidade de corte [11].

As forças na usinagem aumentam com o aumento da profundidade de corte, de uma maneira proporcional. Isto, no entanto, só vale se a profundidade de corte for maior que o raio de quina da ferramenta. Da mesma maneira, também são esperados aumentos significativos nas componentes da força de usinagem com incrementos no avanço [10].

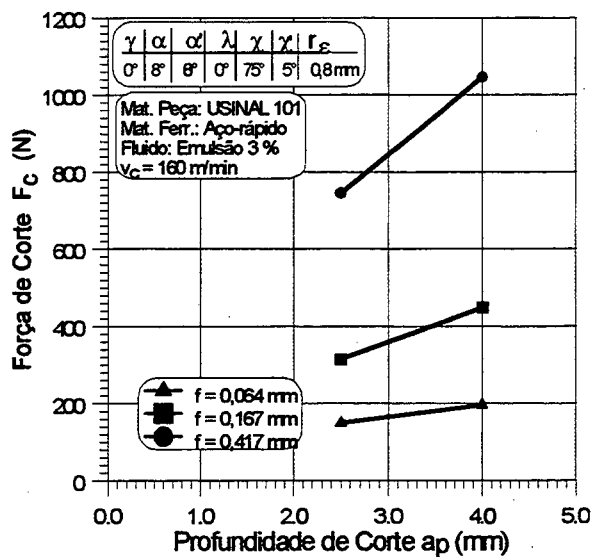
Os ensaios realizados na liga USINAL 101 confirmaram as expectativas de aumentos substanciais nas componentes da força de corte com o aumento da profundidade de corte (figura 4.43). A variação nos avanços na usinagem das três ligas de alumínio também apresentou um comportamento conforme o esperado, e a sua influência marcante pode ser verificada nos gráficos apresentados até o momento e na figura 4.43.

c) Influência do fluido de corte

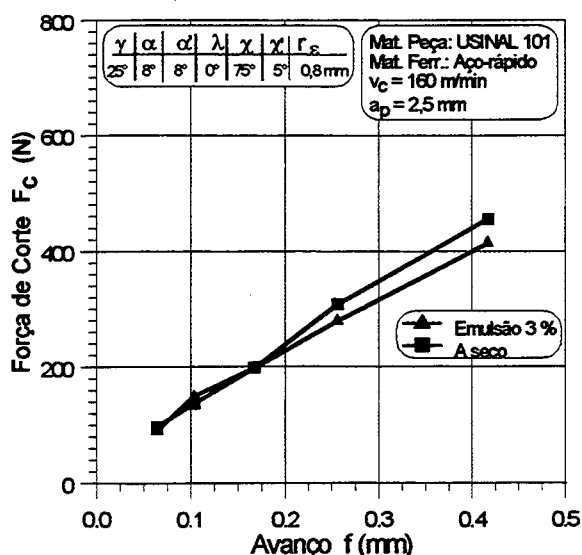
O fluido de corte atua no sentido de diminuir as forças na usinagem, principalmente para baixas velocidades de corte. Esta diminuição é diretamente proporcional à eficiência da penetração do fluido na zona de contato entre cavaco e ferramenta [23]. Os ensaios foram realizados com a aplicação de emulões de óleo a 3% e sem fluido de corte (a seco) somente para a USINAL 101.

Na figura 4.44 são mostradas as influências da aplicação de fluido de corte sobre as forças

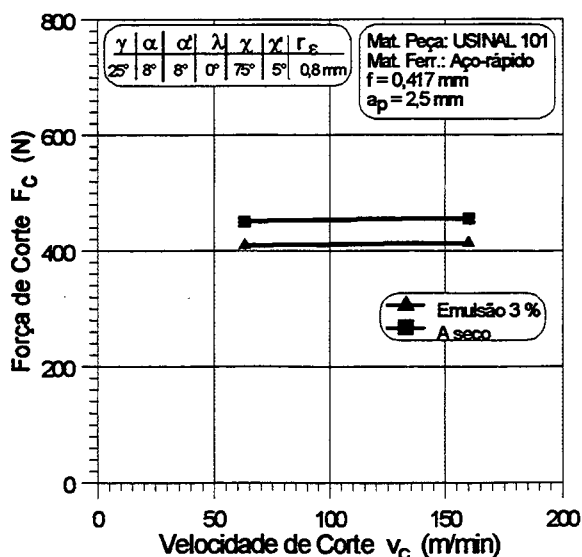
de corte. Pode-se observar uma leve diminuição das forças de corte para ensaios com fluido de corte em relação aos ensaios a seco em avanços maiores que 0,167 mm. Ensaios com velocidades de corte de 63 e 160 m/min e utilizando avanços grandes também apresentaram os mesmos comportamentos. Nas condições de corte ensaiadas, a redução na força de corte pode ser creditada a um menor atrito entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta.



GRAF. 67 - $a_p \times F_c$
Figura 4.43 - Influência da profundidade de corte e do avanço sobre a força de corte - USINAL 101



GRAF. 68 - $f \times F_c$



GRAF. 69 - $v_c \times F_c$

Figura 4.44 - Influência do fluido de corte sobre a força de corte - USINAL 101

4.3.3. Forças específicas de corte

Através do conhecimento das forças específicas de corte de um certo material, é possível determinar a potência de corte necessária para usinar este material para as diversas seções de corte, fazer comparações entre as usinagens de materiais distintos, dimensionar corretamente as máquinas-ferramentas e escolher melhor as condições de usinagem, entre outras aplicações. Com o emprego da fórmula de Kienzle (vide item 2.9) e utilizando os resultados dos ensaios de força executados, foi possível o cálculo das forças específicas de corte $k_{c1.1}$ e dos coeficientes angulares $(1-m_c)$ das ligas ensaiadas para algumas geometrias de ferramentas e condições de usinagem (tabela 10).

LIGA	GEOMETRIA DA FERRAMENTA	v_c (m/min)	$k_{c1.1}$ (N/mm ²)	$1-m_c$	
	$\gamma - \alpha - \lambda - \chi - \chi' - r'_e$				
USINAL 101	40° - 8° - 0° - 75° - 5° - 0,8 mm	160	246	0,74	
	25° - 8° - 0° - 75° - 5° - 0,8 mm	63	288	0,69	
		160	333	0,80	
	10° - 8° - 0° - 75° - 5° - 0,8 mm	63	419	0,79	
		160	542	0,91	
	0° - 8° - 0° - 75° - 5° - 0,8 mm	63	688	0,94	
		160	599	0,89	
		250	663	0,91	
	USINAL 201	25° - 8° - 0° - 75° - 5° - 0,8 mm	63	407	0,77
			160	376	0,74
0° - 8° - 0° - 75° - 5° - 0,8 mm		63	711	0,87	
		160	612	0,76	
		250	548	0,69	
USINAL 301	25° - 8° - 0° - 75° - 5° - 0,8 mm	63	526	0,81	
		160	534	0,83	
	0° - 8° - 0° - 75° - 5° - 0,8 mm	63	1003	0,90	
		160	615	0,62	
		250	559	0,61	

Tabela 10 - Forças específicas de corte para as ligas de alumínio USINAL 101, 201 e 301

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE DO TRABALHO

5.1. Conclusões

Com base nos resultados dos ensaios de usinabilidade realizados com as ligas de alumínio tratáveis termicamente USINAL 101, 201 e 301, tornam-se possíveis algumas conclusões. Deve-se observar que tais conclusões são válidas para condições bastante específicas, ou seja, para o torneamento longitudinal externo e principalmente utilizando ferramentas de aço-rápido.

Nos diversos ensaios de usinabilidade executados não foram verificadas diferenças significativas nas rugosidades obtidas entre as três ligas ensaiadas, independentemente da variável de entrada utilizada. Desta forma, pode-se concluir que o critério qualidade superficial não é adequado para a diferenciação entre as ligas ensaiadas.

Na análise das forças na usinagem, em geral as diferenças de valores não foram grandes entre as ligas USINAL 101 e 201, com menores forças para a primeira. Já os ensaios com a USINAL 301 foram os que apresentaram maiores valores de força. As forças específicas de corte calculadas para as três ligas de alumínio também vieram a confirmar as expectativas favoráveis em uma comparação com a usinagem de aços. Por exemplo, as ligas de alumínio ensaiadas possuem em torno de 70 % da resistência à tração de um aço com baixo teor de carbono, enquanto que na usinagem as ligas de alumínio apresentam forças específicas de corte de apenas 20 % a 30 % das encontradas naqueles aços.

Pelo critério de formas de cavacos, a usinabilidade da liga USINAL 101 pode ser considerada como excelente, enquanto que as demais apresentam sérios problemas e necessitam de recursos adicionais para facilitar a quebra de cavacos. A USINAL 301 foi a que apresentou pior usinabilidade pelo critério de formas de cavacos, sendo difícil a obtenção de cavacos favoráveis.

Um ponto importante observado nos ensaios das ligas de alumínio se mostrou a microgeometria do gume das ferramentas, onde imperfeições microscópicas no perfil do raio de quina ou no raio do gume podem acarretar alterações significativas nas rugosidades obtidas nas peças usinadas. Neste trabalho utilizou-se o artifício de uma estabilização das ferramentas durante a usinagem para amenizar este tipo de problema.

A escolha de uma geometria de ferramenta apropriada mostrou-se também fundamental para uma usinagem otimizada das ligas de alumínio tratáveis termicamente, tendo no ângulo de saída o principal fator de influência. Variando-se o ângulo de saída foram verificadas alterações substanciais nos três critérios de usinabilidade utilizados.

Nos ensaios de usinabilidade deste trabalho foram utilizadas predominantemente ferramentas de aço-rápido com afiação convencional. Os resultados dos ensaios mostraram haver uma certa interdependência do ângulo de saída γ com o raio de quina r_e da ferramenta para a obtenção das melhores qualidades superficiais. Este comportamento pode ser explicado pelo fato de que com ferramentas de acabamento ($r_e > 0$) o ângulo de saída não é constante ao longo do raio de quina da ferramenta. Além desse comportamento pouco explorado na literatura, também foi verificada a tendência de aumentos na rugosidade com o aumento de γ em avanços de desbaste, uma vez que a ferramenta torna-se mais instável e suscetível a vibrações. Nas ligas de alumínio ensaiadas foram obtidos os melhores resultados de qualidade superficial com γ entre 10° e 25° .

As formas de cavacos são influenciadas com a redução do ângulo de saída devido ao aumento da deformação dos cavacos. Na USINAL 101, as melhores formas de cavacos são encontradas com γ acima de 18° , abaixo desse valor os cavacos se apresentam tão reduzidos (vírgulas) que são considerados apenas razoáveis. Na usinagem das demais ligas os cavacos geralmente foram inadequados, apenas com a redução do ângulo de saída é possível verificar uma alteração positiva nos cavacos, mas mesmo assim em condições restritas na liga USINAL 201 (uso de γ pequenos e grandes avanços).

A confirmação das expectativas de obtenção de maiores valores nas componentes da força de usinagem com a redução do ângulo de saída complementam o estudo da verificação da influência de γ sobre a usinabilidade das ligas de alumínio ensaiadas. A escolha do ângulo de saída para a

usinagem das ligas de alumínio dependerá do critério de usinabilidade mais influente na usinagem em questão. Entretanto, pela análise dos resultados obtidos pode-se recomendar para a usinagem da liga USINAL 101 ângulos de saída entre 18° e 25° , por apresentarem excelentes resultados nos três critérios de usinabilidade analisados. Para as ligas USINAL 201 e 301, somente se poderia utilizar o mesmo campo de γ com o desenvolvimento de quebra-cavacos suficientemente eficientes para fornecer cavacos adequados. Como os resultados obtidos com insertos comerciais de metal duro com quebra-cavacos e $\gamma = 20^\circ$ não foram tão favoráveis quanto o esperado, faz-se supor a necessidade de redução do ângulo de saída aquém daqueles valores para a usinagem destas duas ligas, mesmo em detrimento do critério de forças na usinagem.

As geometrias de ferramenta que apresentaram as melhores qualidades superficiais no torneamento de acabamento das ligas de alumínio ensaiadas, além do ângulo de saída já mencionado, são relacionadas a seguir:

- ângulo de incidência principal: $\alpha = 5^\circ$ a 8° ;
- ângulo de incidência secundário: $\alpha' = 7^\circ$ a 12° ;
- ângulo de inclinação: $\lambda =$ indiferente entre 0° e 10° ;
- ângulo de direção do gume principal: $\chi =$ indiferente entre 30° e 90° ;
- ângulo de direção do gume: $\chi' \geq 5^\circ$;
- raios de quina grandes: $r_g = 0,8$ a $2,0$ mm.

Vale ressaltar que os ensaios de usinabilidade executados nas ligas de alumínio tratáveis termicamente foram de curta duração e com parâmetros de corte limitados. Para a comprovação da eficiência das geometrias de ferramentas apresentadas seriam ainda necessários ensaios de maior duração e em condições mais extremas (altas velocidades de corte, por exemplo).

Quanto aos parâmetros de corte é possível verificar através dos ensaios que a velocidade de corte tem pouca influência sobre a qualidade superficial no intervalo testado. Para velocidades de corte de até 250 m/min não se percebem alterações significativas na rugosidade. Para as forças na usinagem, com o aumento na velocidade de corte obtiveram-se reduções nas forças de corte para as ligas USINAL 201 e 301 e aumentos inesperados na usinagem da USINAL 101. As formas de cavacos das ligas ensaiadas apresentam pouca alteração com a variação na velocidade de corte, tendo

uma influência negativa em velocidades de corte muito baixas. Com os comportamentos mencionados e sabendo que em altas velocidades de corte os custos de fabricação são menores (menores tempos de usinagem), pode-se concluir que, dentro dos limites testados, altas velocidades de corte são mais vantajosas. Deve-se observar, todavia, que com o aumento de v_c pode haver uma piora nas formas de cavacos, assim como acréscimos na potência necessária à usinagem.

Comprovou-se também que o avanço tem um efeito significativo sobre a rugosidade. Um bom acabamento exige geralmente avanços reduzidos, o que é antieconômico, além de produzir cavacos piores. grandes avanços permitem grande produtividade, com formas de cavacos mais favoráveis, mas produzem superfícies de pior qualidade. No desbaste deve-se trabalhar com o avanço maximizado. Quando o critério de qualidade superficial domina, deve-se escolher o avanço adequado para atingir o resultado adequado. Para a escolha do avanço correto, portanto, deve-se antes verificar quais as exigências de rugosidade que se faz à peça produzida. Tal escolha pode ser feita com auxílio dos gráficos mostrados neste trabalho.

Variações na profundidade de corte, dentro dos limites de 0,25 a 4,0 mm, não têm influência sobre a qualidade superficial, segundo os ensaios realizados, havendo ainda formas de cavacos melhores para profundidades de corte maiores. Desta forma, em princípio é recomendável o emprego de profundidades de corte maiores, visto que assim também aumenta a produtividade. Entretanto, não pode ser esquecido que com profundidades maiores ocorrerão maiores forças de corte e a temperatura na região de usinagem se elevará, podendo trazer prejuízos à integridade superficial.

Em ensaios com a aplicação de vários tipos de fluidos de corte na liga USINAL 201 foram obtidas as menores rugosidades quando utilizados fluidos com baixo poder lubrificante, mas altamente refrigerantes, como é o caso das emulsões e do álcool. A influência favorável sobre a qualidade superficial quando da aplicação de fluidos de corte diminuiu com o aumento da velocidade de corte, em decorrência da dificuldade destes em alcançar a zona de contato cavaco-ferramenta. Em ensaios sem a aplicação de qualquer fluido de corte foi verificado que as rugosidades obtidas são, em algumas situações, até menores do que com a aplicações de fluidos de corte. Entretanto, nesta condição as superfícies se apresentaram mais foscas, as forças de corte tenderam a ser maiores e ainda na usinagem do USINAL 301 foram observadas as ocorrências de gume postiço e cavaco

aparente.

Recomendações da literatura quanto à qualidade superficial que foram confirmadas neste estudo da usinabilidade das ligas de alumínio tratáveis termicamente para o processo de torneamento são, entre outras:

- a ferramenta deve estar posicionada para usinagem na altura do centro de giro da peça;
- ferramentas de metal duro não garantem reduções de rugosidade em velocidades de corte normais de utilização de ferramentas de aço-rápido;
- o desgaste das ferramentas na usinagem de ligas de alumínio se dá principalmente através de um arredondamento e deslocamento do gume para trás;
- a necessidade de máquinas-ferramentas que possibilitem altas velocidades de corte e se mantenham rígidas nesta condição.

5.2. Sugestões para a continuidade do trabalho

Em um trabalho que se propõe a estudar a usinabilidade de três ligas de alumínio tratáveis termicamente, devido ao número elevado de variáveis envolvidas no processo, evidentemente, surgem aspectos que não são totalmente investigados ou que por limitação de infraestrutura e tempo não podem ser concluídos.

As principais recomendações que podem ser feitas para a continuidade da linha de pesquisa em usinabilidade das ligas USINAL 101, 201 e 301 propostas são:

- ensaios de longa duração e em altas velocidades de corte com as geometrias de ferramentas que apresentaram bons resultados no presente trabalho;
- desenvolvimento de quebra-cavacos para a usinagem das ligas USINAL 201 e 301;
- ensaios de usinagem com ferramentas de metal duro em condições normais de utilização;
- estudo da interdependência do ângulo de saída, raio de quina e avanço em relação à qualidade superficial das superfícies usinadas;
- avaliação de aspectos relacionados à integridade das superfícies usinadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CENTRO ESPAÑOL DE INFORMACION DEL COBRE. **Maquinado del Cobre**. Madrid, oct. 1979. 72 p.
- [2] HATSCHEK, R. L.; MAYFIELD, J. Machining Aluminum. **Machinist**, Special Report 702, march 1978. 16 p.
- [3] MACHADO, R. C. **A Indústria do Alumínio Neste Final de Século**. Edição da Fundação Gorceix, Ouro Preto, 1988. 464 p.
- [4] WEINGAERTNER, W. L.; SCHROETER, R. B. **Tecnologia de Usinagem do Alumínio e suas Ligas**. 1ª ed. São Paulo: Alcan Alumínio do Brasil, 1990. 79 p.
- [5] AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Metals Handbook**. 9ª edition, Metals Park, Ohio, 1984. vol. 1. 793 p.
- [6] ALUMINIUM-ZENTRALE. **Aluminium - Taschenbuch**. 14. Auflage, Düsseldorf, Aluminium Verlag, 1983. 1.094 p.
- [7] WEINGAERTNER, W. L.; SCHROETER, R. B. et al. **Análise da Usinabilidade de Ligas de Alumínio de Corte Livre**. 2º Relatório de Ensaios. Convênio Alcan-UFSC. Florianópolis - SC, 1991. 212 p.
- [8] DAVIES, D. W. Machinability and microstructure of some common non-ferrous metals and alloys. **Metals Technology**, may-june 1976. p. 272-284.
- [9] CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica**. Editora McGraw-Hill do Brasil - SP, 1977. p. 169-203.
- [10] KÖNIG, W. **Fertigungsverfahren: Drehen, Fräsen, Bohren**. Band 1. 4. Auflage., VDI-Verlag, Düsseldorf, 1990. 416 p.
- [11] STEMMER, C. E. **Ferramentas de Corte**. Florianópolis, Editora da UFSC, 1987, 203 p.
- [12] JOHNE, P. Spanen von Aluminiumwerkstoffen I. **Aluminium** nr.56, jun.1980. p. 413-416.
- [13] WILLY FORM, G.; BEGLINGER, H. The Mechanism of Chip Formation. **Z. Metallkde**. Bd. 63 - H.12, 1972. p. 767-771.

- [14] ABDELMONEIM, M.; SCRUTTON, R. F. The Tribology of Cutting Tools During Finish Machining I. *Wear* 25, 1973. p. 45-53.
- [15] JOHNE, P. **Handbuch der Aluminiumzerspanung**. 1a. Auflage. Aluminium-Verlag, Düsseldorf, 1984. 331 p.
- [16] VIERREGGE, G. **Zerspanung der Eisenwerkstoffen**. Düsseldorf, Verlag Stahleisen M.B.H., 1959. 346 p.
- [17] ERINSKY, D. **Abschlussbericht: Untersuchung der Zerspanbarkeit von Aluminium - Kokillengusslegierungen**. 1ª Auflage. Aachen, WZL. AIF - Forschungsvorhaben Nr. 4120, 1981. 307 p.
- [18] STASKO, D. Machinability Characteristics of Aluminum. **Modern Casting**, april 1980. p. 74-75.
- [19] STASKO, D. Aluminum Machining: A Practical Approach. **Modern Machine Shop**, march 1981. p. 101-107.
- [20] OLIVEIRA Jr., G. G. Fatores Metalúrgicos que Condicionam a Usinabilidade das Ligas de Alumínio. **Boletim ABM**, 1990. 12 p.
- [21] MICHELETTI, G. F. **Mecanizado por Arranque de Viruta**. 1ª ed. España. Ed. Blume, 1980. 425 p.
- [22] BOEHS, L. **Influência do Sulfeto de Manganês na Usinabilidade do Ferro Fundido Maleável Preto Ferrítico**. Florianópolis, U.F.S.C., abril 1979. 105 p. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica).
- [23] FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. 5ª ed. São Paulo - SP. Ed. Blücher, 1977. 751 p.
- [24] JOHNE, P. Spanen von Aluminiumwerkstoffen II. **Aluminium**, nr. 56, jahrg. 1980. p. 472-475.
- [25] DEGNER, W.; BÖTTGER, H. C. **Handbuch Feinbearbeitung**. 1. Auflage. Berlin, VEB Verlag Technik, 1979. 474 p.
- [26] ODIN, G.; BONHOMME, R. La qualité de surface des pièces usinées: influence des conditions d'usinage et influence du matériau usiné. **Materiaux et Techniques**, juillet-aout. 1977. p. 449-456.

- [27] WEINGAERTNER, W. L.; SCHROETER, R. B. et al. **Tecnologia de Usinagem e Ensaio de Usinagem com Ligas de Cobre/Análise Comparativa entre Ligas de Cobre e Ligas de Alumínio na Usinagem**. 3º Relatório de Ensaio. Convênio Alcan-UFSC. Florianópolis - SC, 1992. 78 p.
- [28] WEINGAERTNER, W. L.; SCHROETER, R. B. et al. **Análise de Forças na Usinagem de Ligas de Alumínio e Ligas de Cobre**. 4º Relatório de Ensaio. Convênio Alcan-UFSC. Florianópolis - SC, 1992. 90 p.
- [29] SCHROETER, R. B. **Alargamento de Precisão em Alumínio Aeronáutico com Ferramentas de Gume Único Regulável**. Florianópolis, U.F.S.C., outubro 1989. 113 p. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica).
- [30] BOEHS, L. **Notas de Aula - Disciplina Análise de Superfícies Usinadas**. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (UFSC) - Florianópolis SC, 1992.
- [31] MACHINABILITY DATA CENTER **Machining Data Handbook**. vol. 2, 3. Edition, Ohio, 1980. 136 p.
- [32] KALDOR, S.; BER, A.; LENZ, E. On the Mechanism of Chip Breaking. **Journal of Engineering for Industry**, vol. 101, aug. 1979. p. 241-249.
- [33] LESKOVAR, P. Machinability of Aluminium Alloys for Free Cutting and Importance of Machinability Research. **Strojnicki Vestnik - Mechanical Journal** 24 (1/2), jan-fev 1978. p. 1-7.
- [34] WANG, W. L.; CHEN, F. Y.; CHEN, W. H. Effect of Process Metallurgical Factors on the Properties of 2011 Free Cutting Aluminum Alloy: On the Size and Distribution of Bi-Pb Particles. **Bulletin Bismuth Institute** nr. 52, 1987. p. 3-7.
- [35] EDA, H.; KISHI, K.; UENO, H. Entwicklung und Untersuchung neuer Aluminium-Automatenlegierungen. **Werkstatt und Betrieb** 119, 1986. p. 751-755.
- [36] JOHNE, P. Spanen von Aluminiumwerkstoffen VII. **Aluminium** 56, jahrg. 1980. p.785-789.
- [37] SILVA, M. N. S. Materiais para Ferramentas de Corte para Alumínio. **Máquinas e Metais**, fev. 1990. p. 98-99.

- [38] STRICKER, R. Aluminium Specific Tools in Application. **Industrial & Production Engineering** 14, 1990. p. 55-61.
- [39] MAIER, H.; WALLINGER, G. Wendeschneidplatten mit Gepreßter Spanleitstufe zum Aluminiumdrehen. **Werkstatt und Betrieb** 117, 1984. p. 317-320.
- [40] JOHNE, P. Spanen von Aluminiumwerkstoffen VIII. **Aluminium** 57, jahrg. 1981. p.174-176.
- [41] JOHNE, P. Spanen von Aluminiumwerkstoffen IX. **Aluminium** 57, jahrg. 1981. p. 232-237.
- [42] SCHNEIDER, C.; ALBERTAZZI, A. **Notas de Aula - Disciplina de Técnicas de Pesquisa Experimental.** Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (UFSC) - Florianópolis SC, 1992.
- [43] DE MESQUITA, N. G. M. **Avaliação e Escolha de uma Superfície segundo sua Função e Fabricação.** Florianópolis, U.F.S.C., abril 1992. 142 p. (Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica).
- [44] ROCHA, A. S. **Determinação de um Modelo de Força de Usinagem para Furação, a partir do Modelo de Força de Usinagem do Torneamento.** Florianópolis, U.F.S.C., fevereiro 1985. 117 p. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica).
- [45] VALLEJOS, R. V. **Processos e Modos de Fabricação de Superfícies Esféricas de Precisão.** Florianópolis, U.F.S.C., abril 1992. 105 p. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica).
- [46] ISO 3685 **Tool-life Testing with Single-Point Turning Tools.** International Standard. 1a. Edition 1977. p. 5-15.
- [47] LEAL, L. C. **Apostila da Disciplina de Projetos de Máquinas-Ferramentas.** Curso de Engenharia Mecânica (UFSC) - Florianópolis SC, 1990.
- [48] MOREIRA, L. J. **Elaboração de Software para Medição Automática das Componentes da Força de Usinagem. II CICTE - Anais.** São Carlos SP, dezembro 1984. 1 p.
- [49] WEINGAERTNER, W. L.; SCHROETER, R. B.; SCHUITEK, A. J. **Análise da Usinabilidade de Ligas de Alumínio de Corte Livre. V Congresso Nacional de Ingeniería Mecánica - Anales - Chile,** nov. 1992. p. 756-767.

- [50] ENACHE, ST. **Researches Concerning Optimum Geometry of the Finishing Tools with Nose Radius.** *Annals of the C.L.R.P.* - Vol. XXIX, 1971. p. 411-416.
- [51] CONSALTER, L. A. **Arquivo de Dados Tecnológicos de Usinagem para a Determinação Automática de Condições de Corte em Tornos com Comando Numérico.** Florianópolis, U.F.S.C., agosto 1985. 131 p. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica).
- [52] SANDVIK COROMANT - **Herramientas y Plaquetas para Tornear.** Catálogo do Fabricante, 1991. 496 p.
- [53] SPENRATH, N. M. **Technologische Aspekte zum Feinstdrehen von Kupferspiegeln.** Aachen, 1991. 152 p. Dissertation (Doutorado em Engenharia), RWTH-Aachen, 1991.
- [54] SCHROETER, R. B. **Usinagem de Ultraprecisão de Elementos Ópticos Transmissivos no Espectro Infravermelho.** Florianópolis, U.F.S.C., fevereiro 1997. 194 p. (Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica).

ANEXO I

1. COMPROVAÇÃO DO NÚMERO DE MEDIÇÕES DE RUGOSIDADE

Diferenças locais na qualidade superficial de uma peça surgem em virtude de não-homogeneidades do processo de usinagem. Assim, normalmente não é suficiente a medição de uma peça em um só local e uma única vez. Especialmente para a determinação do acabamento superficial de uma peça fazer mais medições se torna imprescindível para se ter confiabilidade nos dados obtidos. A média desses valores é tomada como grandeza característica do acabamento superficial. Entretanto, deve-se verificar se ocorre representatividade suficiente do valor médio obtido para caracterizar o acabamento superficial de toda a peça. Evidentemente, não é possível se medir rugosidade em toda a superfície da peça, por isso deve-se recorrer a uma determinação estatística dos valores [53].

No presente trabalho, adotou-se a metodologia aplicada por Spenrath [53] e Schroeter [54] para a determinação do número de medições de rugosidade suficientes em cada ensaio.

● Determinação Estatística

Para se obter um desvio máximo do valor médio de poucas medições da superfície total da peça é necessário determinar o tamanho da amostra. Para isso as fórmulas estatísticas requerem o conhecimento do modo de distribuição do universo da qual se tira a amostra. O modo de distribuição pode ser determinado por um teste de adequação de Qui-quadrado.

● Teste de Adequação de Qui-quadrado

Com este teste de adequação pode-se verificar se a rugosidade da peça está relacionada a uma determinada distribuição. Para isso, retira-se uma amostra-piloto em forma de um número suficiente de medições. A seguir determina-se a distribuição teórica do universo. No teste é verificado se a distribuição dos valores de medição está correlacionada com a distribuição teórica. Procura-se, portanto, verificar se a diferença na distribuição teórica do universo pode ser dada como coincidência. Se este for o caso, aceita-se ou rejeita-se a distribuição hipotética, através da probabilidade de erro definida no início do teste.

● Amostra-Piloto

As medições da amostra-piloto foram realizadas na condição considerada como a padrão dos ensaios (vide capítulo 3) e na situação de acabamento com o menor dos avanços empregados, onde a variação nos valores de rugosidade tende a ter uma influência maior sobre a média das medidas. As condições de usinagem adotadas para a obtenção da amostra-piloto são as seguintes:

- **Material da Peça: USINAL 201;**
- **Material da Ferramenta: Aço-rápido;**
- **Fluido: Emulsão 3%;**
- $v_c = 160$ m/min;
- $a_p = 2,5$ mm;
- $f = 0,064$ mm;
- **Geometria da Ferramenta:**

$$\gamma = 25^\circ; \alpha = 8^\circ; \alpha' = 8^\circ; \lambda = 0^\circ; \chi = 75^\circ; \chi' = 5^\circ; r_\xi = 0,8 \text{ mm.}$$

O tamanho da amostra-piloto é de 90 partes de medição, sendo esse número correspondente a 30 ensaios repetidos nas condições de usinagem acima relacionadas e em cada ensaio foram executadas 3 leituras de rugosidade em pontos aproximadamente equidistantes da circunferência do corpo de prova. Na tabela 11 são apresentados os valores de rugosidade R_a e R_z obtidos na amostra-piloto.

O procedimento para a determinação no número de amostras necessários será desenvolvido a seguir, passo a passo, para a rugosidade R_a . Inicialmente é calculado a média, o desvio padrão e a variância dos valores da amostra-piloto:

$$\bar{x} = 0,3061 \text{ } \mu\text{m};$$

$$s = 0,0173 \text{ } \mu\text{m};$$

$$s^2 = 0,0002993 \text{ } \mu\text{m}.$$

Ensaio	Rugosidade R_a			Rugosidade R_z		
	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 1	Medição 2	Medição 3
1	0,274	0,298	0,273	1,842	1,962	2,072
2	0,296	0,282	0,276	1,843	2,098	1,973
3	0,314	0,323	0,308	2,161	2,348	2,285
4	0,318	0,328	0,319	1,987	2,210	1,957
5	0,309	0,302	0,307	1,984	2,085	1,991
6	0,281	0,306	0,309	2,317	2,343	2,404
7	0,293	0,314	0,313	2,351	2,374	2,360
8	0,304	0,316	0,301	2,192	2,341	2,307
9	0,272	0,301	0,298	2,199	2,337	2,312
10	0,310	0,284	0,318	2,231	2,348	2,295
11	0,281	0,296	0,299	2,087	1,898	1,964
12	0,331	0,306	0,332	2,266	2,404	2,276
13	0,288	0,310	0,314	2,087	2,131	2,172
14	0,315	0,326	0,318	2,172	2,084	2,253
15	0,298	0,290	0,292	2,088	2,166	1,915
16	0,284	0,294	0,296	2,169	2,320	2,145
17	0,316	0,315	0,310	2,281	2,369	2,432
18	0,274	0,296	0,298	2,194	2,218	2,221
19	0,335	0,339	0,333	2,294	2,422	2,452
20	0,307	0,319	0,325	2,481	2,504	2,506
21	0,324	0,340	0,326	2,512	2,567	2,570
22	0,325	0,308	0,310	2,421	2,386	2,389
23	0,316	0,319	0,324	2,216	2,324	2,223
24	0,355	0,340	0,333	2,394	2,473	2,539
25	0,312	0,301	0,296	2,356	2,361	2,374
26	0,281	0,293	0,286	1,941	1,803	1,866
27	0,301	0,286	0,294	2,087	2,243	2,261
28	0,284	0,304	0,299	2,199	2,294	2,348
29	0,299	0,305	0,302	2,406	2,326	2,370
30	0,308	0,301	0,293	2,343	2,271	2,113

Tabela 11 - Valores de rugosidade R_a e R_z da amostra-piloto

A amostra-piloto com valores de rugosidade R_a é dividida em $i = 9$ classes com largura de classe de $0,1 \mu\text{m}$ (tabela 12).

Classe	Intervalo de Rugosidade R_a	Frequências
1	0 - 0,275	4
2	0,275 - 0,285	8
3	0,285 - 0,295	11
4	0,295 - 0,305	21
5	0,305 - 0,315	20
6	0,315 - 0,325	14
7	0,325 - 0,335	8
8	0,335 - 0,345	3
9	0,345 - 0,355	1

Tabela 12 - Distribuição dos valores de R_a em classes de frequência

● **Definição de H_0 e H_1 (H_0 = hipótese nula; H_1 = hipótese alternativa)**

A hipótese nula é: a rugosidade amostral possui distribuição normal;

A hipótese alternativa é: a rugosidade não possui distribuição normal.

Além disso, é necessário verificar o nível de significância, ou seja, a probabilidade de erro devido a coincidências. Desta forma, determina-se com qual probabilidade a distribuição apresentada se difere de uma distribuição normal. Para este tipo de estudo é normalmente recomendado a utilização de um nível de confiabilidade não inferior a 95 %.

● **Determinação da Frequência de Ocorrência de Classe Absoluta Esperada**

Para a determinação da frequência da ocorrência absoluta através da distribuição em classes determina-se inicialmente os valores da função distribuição normal para os limites superiores de classe, isto é:

$$F_n(x_{i,0} / \mu ; \sigma) = F_N(z_{i,0}) \quad \text{com } z_{i,0} = (x_{i,0} - \bar{x}) / s$$

Como os parâmetros do valor médio e da variância do universo não são conhecidos pode-se utilizar, como valores confiáveis, a média e a variância da amostra-piloto de R_a (espaço amostral):

$$\mu = \bar{x} = 0,3061 \mu\text{m}$$

$$\sigma = s^2 = 0,0002993 \mu\text{m}$$

Os valores da função distribuição podem ser retirados de uma tabela de distribuição normal.

Na tabela 13 encontram-se os valores da função normal para as classes da rugosidade R_a .

i	$x_{i,0}$	$z_{i,0}$	$F_N(z_{i,0})$
1	0,275	- 1,7977	0,0363
2	0,285	- 1,2196	0,1114
3	0,295	- 0,6416	0,2605
4	0,305	- 0,0636	0,4743
5	0,315	0,5145	0,6956
6	0,325	1,0925	0,8628
7	0,335	1,6705	0,9525
8	0,345	2,2486	0,9877
9	∞	∞	1,000

Tabela 13 - Valores da função normal para as classes da rugosidade R_a

A frequência de ocorrência de classe esperada ocorre pela formação de diferenças:

$$f_{i,e} = F_N(z_{i,0}) - F_N(z_{i-1,0})$$

A frequência absoluta de ocorrência de classe é o resultado da multiplicação com o tamanho da amostra-piloto:

$$h_{i,e} = n \cdot f_{i,e}$$

Os resultados dos cálculo da frequência absoluta de ocorrência das classes para a rugosidade R_a encontram-se na tabela 14.

i	$h_{i,0}$	$f_{i,e}$	$h_{i,e}$
1	4	0,0363	3,2670
2	8	0,0751	6,7590
3	11	0,1491	13,4190
4	21	0,2138	19,2420
5	20	0,2213	19,9170
6	14	0,1672	15,0480
7	8	0,0897	8,0730
8	3	0,0352	3,1680
9	1	0,0100	0,9000
Σ	90	1	90

Tabela 14 - Cálculo da frequência absoluta de ocorrência das classes para a rugosidade R_a

Na tabela 15 é mostrada a reunião seqüencial das classes menos influentes da frequência absoluta de ocorrência das classes.

i	$h_{i,0}$	$f_{i,e}$	$h_{i,e}$
1	4	0,0363	3,2670
2	8	0,0751	6,7590
3	11	0,1491	13,4190
4	21	0,2138	19,2420
5	20	0,2213	19,9170
6	14	0,1672	15,0480
7	8	0,0897	8,0730
8	4	0,0452	4,0680

Tabela 15 - Frequência absoluta de ocorrência das classes corrigida para a rugosidade R_a

● **Determinação da Região Crítica do Intervalo de Confiança**

Após a reunião, o número de classes é $k = 8$ e o número de parâmetros ponderados da amostra-piloto, $m = 2$. Com isto, temos o número de graus de liberdade da distribuição Qui-quadrado:

$$v = k - m - 1$$

$$v = 8 - 2 - 1 = 5$$

Com o nível de significância $\alpha = 0,05$ (95 % de confiabilidade), obtemos da tabela de distribuição Qui-quadrado um valor crítico de:

$$\chi_e^2 = 11,1$$

● **Cálculo do Intervalo de Confiança**

O intervalo de confiança é calculado através de:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k (h_{i,0} - h_{i,e}) / h_{i,e}$$

$$\chi^2 = 1,06$$

● **Decisão e Interpretação**

Como $\chi^2 < \chi_e^2$ não podemos rejeitar a hipótese nula. Podemos então considerar que a rugosidade R_a da amostra-piloto possui distribuição normal.

● **Determinação do Tamanho da Amostra Necessário**

Após a comprovação de que a amostra-piloto possui uma distribuição normal é possível utilizar os resultados desta distribuição para o cálculo do tamanho da amostra n de medições de R_a , através da fórmula a seguir:

$$n = (t^2 \cdot \sigma^2) / \Delta\mu$$

O intervalo de confiança admissível da amostra piloto deve ser considerado. Assim, no lugar da variância do espaço amostral podemos também aqui utilizar a variância da amostra-piloto, com o grau de liberdade:

$$v = n - 1$$

A variável de distribuição t é obtida de uma tabela padronizada da distribuição de Student. Adotando-se valores para o número de amostras e com as considerações anteriores é feito o relacionamento entre a quantidade das medições e o tamanho do intervalo de confiança para a rugosidade R_z (tabela 16). O tamanho da amostra, ou seja, o número de medições de rugosidade R_z para um intervalo de confiança aceitável foi escolhido com $n = 6$ (linha em destaque da tabela 16).

n	v	t_{0,025}	$\Delta\mu$	%
2	1	12,71	0,155	50,6
4	3	3,18	0,028	9,0
6	5	2,57	0,018	5,9
8	7	2,36	0,014	4,7
10	9	2,26	0,012	4,0
20	19	2,09	0,008	2,6

Tabela 16 - Intervalo de confiança em função do tamanho da amostra para R_z

● Avaliação Estatística da Amostra-Piloto da Rugosidade R_z

Utilizando-se os mesmo procedimentos anteriores, chega-se na avaliação estatística para a rugosidade R_z aos seguintes resultados:

$$- \bar{x} = 2,238 \quad s = 0,1805 \quad s^2 = 0,03258$$

- distribuição dividida em 9 classes com intervalos de 0,10 μm ;

- o teste de adequação Qui-quadrado também forneceu uma distribuição normal com $\chi^2 = 6,77 < \chi_c^2 = 12,6$;

Na tabela 17 são mostrados os intervalos de confiança em função do tamanho da amostra para a rugosidade R_z e a escolha do número de amostras adotado (linha em destaque).

n	v	$t_{0,025}$	$\Delta\mu$	%
2	1	12,71	1,622	72,5
4	3	3,18	0,287	12,8
6	5	2,57	0,189	8,5
8	7	2,36	0,151	6,7
10	9	2,26	0,129	5,8
20	19	2,09	0,084	3,8

Tabela 17 - Intervalo de confiança em função do tamanho da amostra para R_z

Para que o custo e o tempo para a realização de ensaios e das medições mantenha-se em um patamar razoável, resolveu-se adotar como 6 o número suficiente de medições de rugosidade R_a e R_z . Como se pode observar nas tabelas 16 e 17, um número maior de medições não leva a uma melhora significativa dos valores de medição.

Como ainda existe a probabilidade de ocorrer divergências estranhas ao processo entre ensaios com as mesmas condições, adotou-se que em cada ensaio sejam feitas três medições de rugosidade em pontos distintos da circunferência do corpo de prova e que no mínimo sejam executados dois ensaios para uma mesma condição, totalizando portanto, no mínimo 6 medições.

2. COMPARAÇÃO ESTATÍSTICA DE RUGOSIDADES ENTRE A CONDIÇÃO PADRÃO E UMA CONDIÇÃO CRÍTICA DE USINAGEM

Uma abordagem estatística mais convencional da anteriormente empregada para determinação do número de medições suficientes nos ensaios para a Qualidade Superficial pode ser executada através da determinação da Dispersão de Medição (DM). Para isso, escolheu-se fazer a comparação estatística entre a “**Condição Padrão**” dos ensaios (vide capítulo 3) e uma outra onde as influências adversas do processo de corte tendem a resultar nas maiores dispersões de valores no acabamento da superfície usinada. Essa última situação foi considerada como “**Condição Crítica**”.

As condições utilizadas nesta abordagem foram as seguintes:

a) Condição Padrão

- Material da Peça: USINAL 201; - Material da Ferramenta: Aço-rápido;
- Fluido: Emulsão 3%; - $v_c = 160$ m/min;
- $a_p = 2,5$ mm; - $f = 0,064 / 0,128 / 0,256 / 0,512$ mm;
- Ferramenta: $\gamma = 25^\circ$; $\alpha = 8^\circ$; $\alpha' = 8^\circ$; $\lambda = 0^\circ$; $\chi = 75^\circ$; $\chi' = 5^\circ$; $r_\xi = 0,8$ mm.

b) Condição Crítica:

- Material da Peça: USINAL 301; - Material da Ferramenta: Aço-rápido;
- Fluido: A seco; - $v_c = 160$ m/min;
- $a_p = 2,5$ mm; - $f = 0,064 / 0,128$ mm;
- Ferramenta: $\gamma = 0^\circ$; $\alpha = 8^\circ$; $\alpha' = 8^\circ$; $\lambda = 0^\circ$; $\chi = 75^\circ$; $\chi' = 5^\circ$; $r_\xi = 0,8$ mm.

OBS - As expectativas de maiores dispersões de medição para a Condição Crítica são decorrentes da usinagem da liga de alumínio sem elementos de liga que facilitam a quebra dos cavacos, com uma ferramenta com ângulo de saída γ reduzido e sem a aplicação de fluido de corte.

Foram executados 30 ensaios repetidos para cada uma das condições propostas. Os resultados das medições e os cálculos estatísticos das rugosidades R_a e R_z encontram-se nas tabelas 18 e 19. Para o cálculo da Dispersão de Medição ($DM = t \cdot s$) foi utilizada uma confiabilidade de 95% e um Coeficiente de Student para 30 amostras, ou seja, $t = 1,7$.

Condição Padrão

Ensaio	f = 0,064 mm		f = 0,128 mm		f = 0,256 mm		f = 0,512 mm	
	R _a	R _z	R _a	R _z	R _a	R _z	R _a	R _z
1	0,282	1,96	0,420	2,60	1,99	9,02	5,76	23,31
2	0,285	1,97	0,407	2,56	2,11	9,93	5,95	24,28
3	0,315	2,26	0,401	2,47	2,07	9,38	5,75	23,98
4	0,322	2,05	0,423	2,72	2,34	10,77	5,73	24,31
5	0,306	2,02	0,408	2,58	2,05	8,95	5,80	23,81
6	0,299	2,35	0,422	2,67	1,99	9,24	6,01	25,01
7	0,307	2,36	0,406	2,45	2,02	9,31	5,94	24,60
8	0,308	2,28	0,433	2,78	1,96	8,60	5,97	24,06
9	0,290	2,28	0,464	2,92	1,93	8,85	6,17	24,89
10	0,304	2,29	0,478	2,87	1,96	8,36	6,13	25,06
11	0,292	1,98	0,436	3,05	1,93	8,19	6,11	24,84
12	0,323	2,31	0,417	2,77	1,96	9,46	6,08	25,00
13	0,304	2,13	0,439	2,75	1,92	9,21	6,02	24,25
14	0,320	2,17	0,452	2,86	1,93	8,64	6,10	24,81
15	0,293	2,06	0,475	2,98	2,02	9,07	5,97	24,74
16	0,291	2,21	0,434	2,97	2,01	8,94	6,06	25,07
17	0,314	2,36	0,450	2,85	1,86	8,24	6,01	24,50
18	0,289	2,21	0,451	2,85	2,00	8,99	6,00	24,55
19	0,336	2,39	0,407	2,39	1,99	9,09	6,23	24,80
20	0,317	2,50	0,417	2,62	2,06	9,68	6,04	24,81
21	0,330	2,55	0,419	2,84	1,90	9,11	6,07	25,10
22	0,314	2,40	0,449	2,97	1,89	9,04	6,01	24,77
23	0,320	2,25	0,474	2,87	1,97	8,69	5,99	25,23
24	0,343	2,47	0,451	2,73	1,88	9,13	5,92	24,31
25	0,303	2,36	0,428	2,62	1,99	9,28	5,58	22,80
26	0,287	1,87	0,468	3,05	1,99	9,78	5,70	23,51
27	0,294	2,20	0,459	2,86	1,95	9,11	5,75	22,82
28	0,296	2,28	0,477	3,01	1,93	9,50	5,62	23,12
29	0,302	2,37	0,420	2,71	2,04	9,73	5,66	23,69
30	0,301	2,24	0,466	2,89	1,98	8,94	5,72	23,28
Valor Mínimo	0,282	1,87	0,401	2,39	1,86	8,19	5,58	22,80
Valor Máximo	0,343	2,55	0,478	3,05	2,34	10,77	6,23	25,23
Amplitude (A)	0,061	0,68	0,077	0,66	0,48	2,58	0,65	2,43
Valor médio (\bar{x})	0,306	2,24	0,438	2,78	1,99	9,14	5,93	24,31
Desvio Padrão (s)	0,0155	0,171	0,0243	0,180	0,089	0,525	0,176	0,718
DM (95%)	± 0,03	± 0,29	± 0,04	± 0,30	± 0,15	± 0,9	± 0,30	± 1,2
(DM/\bar{x}).100	8,5 %	12,9 %	9,4 %	11,0 %	7,6 %	9,8 %	5,0 %	5,0 %

Obs - valores de rugosidade de cada ensaio correspondem a média de 3 medições.

Tabela 18 - Avaliação estatística de R_a e R_z para a condição padrão dos ensaios

Condição Crítica

Ensaio	f = 0,064 mm		f = 0,128 mm	
	R _a	R _z	R _a	R _z
1	0,317	2,74	0,362	2,97
2	0,327	2,54	0,485	4,05
3	0,306	2,77	0,386	3,29
4	0,376	3,19	0,335	3,01
5	0,330	2,77	0,368	2,88
6	0,282	2,61	0,359	2,78
7	0,290	2,62	0,385	2,73
8	0,366	2,80	0,329	2,86
9	0,364	2,66	0,356	2,81
10	0,323	2,84	0,421	2,97
11	0,278	2,37	0,374	2,95
12	0,272	2,54	0,424	2,91
13	0,254	2,11	0,385	2,82
14	0,279	3,00	0,449	3,55
15	0,260	2,08	0,408	3,47
16	0,269	2,15	0,376	2,77
17	0,259	2,60	0,405	3,73
18	0,274	2,54	0,419	3,81
19	0,290	2,34	0,394	2,75
20	0,288	2,44	0,408	3,23
21	0,284	2,62	0,409	3,50
22	0,300	2,45	0,376	2,93
23	0,295	2,39	0,375	2,92
24	0,286	2,73	0,435	3,04
25	0,262	2,04	0,432	3,84
26	0,300	2,34	0,438	3,85
27	0,325	2,56	0,443	3,99
28	0,298	2,27	0,336	3,07
29	0,282	2,47	0,314	2,71
30	0,328	2,96	0,449	3,42
Valor Mínimo	0,254	2,04	0,314	2,71
Valor Máximo	0,376	3,19	0,485	4,05
Amplitude (A)	0,122	1,15	0,171	1,34
Valor Médio (\bar{x})	0,299	2,55	0,395	3,19
Desvio Padrão (s)	0,032	0,276	0,0408	0,423
DM (95%)	± 0,05	± 0,47	± 0,07	± 0,72
(DM / \bar{x}) .100	18,0 %	18,4 %	17,6 %	22,5 %

Obs - valores de rugosidade de cada ensaio correspondem a média de 3 medições.

Tabela 19 - Avaliação estatística de R_a e R_z para a condição crítica dos ensaios

Pela análise dos dados das tabelas 18 e 19 pôde-se comprovar que nas condições de baixo avanço as dispersões de medição são as mais elevadas. Além disso, verifica-se que as dispersões de medição praticamente dobram na comparação entre a Condição Padrão e a Condição Crítica.

Em termos de variações nos resultados da qualidade superficial, a Condição Crítica é possivelmente uma das mais desfavoráveis condições que foram utilizadas nos ensaios de usinabilidade e, em contra-partida, a Condição Padrão uma das mais favoráveis. Desta forma, pode-se estimar que as dispersões de medição dos ensaios executados deste trabalho estão entre os resultados destas duas condições analisadas.

ANEXO II

GEOMETRIA DAS FERRAMENTAS

Ferr.	γ (°)	α (°)	α (°)	λ (°)	χ (°)	χ' (°)	r_e (mm)
A1A	25	8	8	0	75	5	0,8
A1B	25	8	8	0	75	5	0,8
A1C	25	8	8	0	75	5	0,8
A1D	25	8	8	0	75	5	0,8
A2A	0	8	8	0	75	5	0,8
A2B	0	8	8	0	75	5	0,8
A3	5	8	8	0	75	5	0,8
A4	10	8	8	0	75	5	0,8
A5	18	8	8	0	75	5	0,8
A6	32	8	8	0	75	5	0,8
A7	40	8	8	0	75	5	0,8
A8	0	8	8	0	75	5	0,2
A9	0	8	8	0	75	5	2,0
A10	10	8	8	0	75	5	0,2
A11	10	8	8	0	75	5	2,0
A12	25	8	8	0	75	5	0,2
A13	25	8	8	0	75	5	2,0
A14	40	8	8	0	75	5	0,2
A15	40	8	8	0	75	5	2,0
A16	25	5	8	0	75	5	0,8
A17	25	7	8	0	75	5	0,8
A18	25	12	8	0	75	5	0,8
A21	25	8	5	0	75	5	0,8
A22	25	8	7	0	75	5	0,8
A23	25	8	12	0	75	5	0,8
A24	25	8	8	4	75	5	0,8
A26	25	8	8	0	90	5	0,8
A27	25	8	8	0	60	5	0,8
A28	25	8	8	0	30	5	0,8
A32	25	8	8	0	75	3	0,8
A33	25	8	8	0	75	8	0,8
A38	32	8	8	0	75	5	0,2
A39	32	8	8	0	75	5	2,0
A40	25	8	8	10	75	5	0,8
A41	10	8	8	10	75	5	0,8

Tabela 20 - Geometria das ferramentas de aço-rápido utilizadas nos ensaios

ANEXO III

PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DAS MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NOS ENSAIOS

1. Máquinas-ferramentas

1.1. Torno Mecânico Universal (adaptado para pesquisas)

Fabricante: Indústrias Romi S.A.

Modelo: IMOR P-400

Mancais: Rolamentos

Taco-gerador: Weg IR/60 (constante de proporcionalidade = 0,06 V/rpm)

Faixa de rotações: 0 a 1.300 rpm (variação contínua)

Faixa de avanços: 0,056 a 0,833 mm

Potência de acionamento: 22 kW

Distância entre pontas: 1.000 mm

Altura das pontas: 215 mm.

1.2. Torno Mecânico de Acabamento

Fabricante: Kart - Hungria

Modelo: EKM-200

Ano: 1975

Mancais de Deslizamento

Faixa de rotações: 112 a 2.800 rpm (escalonadas)

Avanços nominais: 0,030 / 0,045 / 0,075 / 0,115 mm

Consumo máximo de corrente: 6,8 A

Consumo máximo de potência: 1,88 kW

Distância entre pontas: 500 mm

Altura das pontas: 100 mm

1.3. Torno Mecânico Universal (com adaptação para variação contínua de velocidade)

Fabricante: Indústrias Romi S.A.

Modelo: ROMI I-45

Mancais: Rolamentos

Comando: Weg

Faixa de rotações: 0 a 1.500 rpm (variação contínua)

Faixa de avanços: 0,06 a 18 mm

Potência máxima admissível: 20 CV

Distância entre pontas: 4.000 mm

2. Equipamentos para Confeccção e Controle de Ferramentas

2.1. Retificadora Universal de Ferramentas

Fabricante: Werko - Alemanha

Modelo: SWU-200

Ano: 1964

Potência: 1,1 kW

Largura máxima da peça: 200 mm

Comprimento máximo da peça: 400 mm

Movimento longitudinal máximo da mesa: 300 mm

Movimento transversal máximo da mesa: 150 mm

Rotação horizontal da mesa: até 45°

Inclinação vertical da mesa: até 10°

Inclinação da mesa transversal: até 10°

Deslocamento vertical do rebolo: 150 mm

Deslocamento horizontal do rebolo: 360°

Rotações do rebolo: 2.200 / 3.500 / 5.400 rpm

Diâmetro máximo do rebolo: 150 mm

2.2 Retificadora Ótica de Perfis

Fabricante: WMW - Alemanha

Modelo: SWPO-80

Potência do motor de retificação: 0,5 kW

Superfície diretamente trabalhável com o pantógrafo: 10 x 10 mm

Superf. indiretamente trabalhável com deslocamento da peça: 250 x 70 mm

Espessura máxima a ser trabalhada: 76 mm

Inclinação para retificação traseira axial: -10° a $+30^\circ$

Inclinação para retificação traseira lateral: -10° a $+10^\circ$

Curso ajustável: 10 a 80 mm

Diâmetro máximo do rebolo: 160 mm

Rotação do fuso porta-rebolo: 1.500 / 3.000 rpm

Faixa de ajuste do carro superior: - angular = -45° a $+45^\circ$

- curso máx. longitudinal = 150 mm

Faixa de ajuste do carro inferior: - angular = -45° a $+45^\circ$

- curso máx. transversal = 10 mm

Rotação do motor de retificação: 2.800 rpm.

3. Equipamentos para Verificação da Qualidade Superficial

3.1. Rugosímetro de Bancada

Fabricante: Feinprüf GmbH

Marca: Perthen

Modelo: S8P

Campo de medição: (+/-) 12,5 / 62,5 / 250 μm

(+/-) 125 / 625 / 2.500 μm

Comprimentos de medição: 0,56 / 1,75 / 5,6 / 17,5 / 56,0 mm

Parâmetros básicos: R_a / R_z / R_t / $R_{\text{máx}}$ / R_p / R_{pm} / R_q / P_t / W_t

Estatística: avaliação de até 12 parâmetros e 48 medições

Indicação: digital

Tela / visor: 12" (diagonal), alta resolução - frequência 21 kHz

Impressora: versão gráfica, resolução de 8 pontos/mm.

3.2. Rugosímetro Portátil

Fabricante: Feinprüf GmbH

Marca: Perthen

Modelo: Perthometer M3A

Parâmetros de rugosidade: R_a - R_t

Indicação: analógica

Resolução: 0,1 μm

Comprimentos de medição l_m : 1,5 / 4,8 / 15 mm

Filtros (cut-off) l_c : 0,25 / 0,8 / 2,5 mm

Campo de medição: 0...0,25 - 0...2,5 - 0...25 μm (R_a)

0...1 - 0...10 - 0...100 μm (R_t)

4. Equipamentos para Medição de Forças de Usinagem

4.1. Dinamômetro Piezelétrico

Fabricante: Kistler Instrumente A.G.

Modelo: 9263

Número de série: 142405

	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)	
Faixa de medição:	0...15	0...15	0...15	(kN)
Sensibilidade:	-3,94	-3,96	-3,72	(pC/N)
Linearidade:	0,3	0,3	0,3	(%)
Faixa de temperatura:	0...70 °C			

4.2. Amplificador de Sinais

Fabricante: Kistler Instrumente GmbH

Modelo: 5006

Faixa de medição: $\pm 10 \dots 500.000$ pC

Sensibilidade: $-0,1 \dots 11.000$ pC/u.m.

Impedância de entrada: ~ 100 T Ω

Faixa de frequência: $0 \dots 180$ kHz

Linearidade: $\leq \pm 0,05$ %

Incerteza de medição: $\leq \pm 1$ %

Temperatura de utilização: $0 \dots 50$ °C

4.3. Unidade de Tratamento e Aquisição de Dados

Fabricante: Hewlett - Packard

Modelo: 3497 A

Impedância de entrada: $> 10^{10}$ Ω (escala de 1 a 10 V)

Resolução: 10 mV (para 3 dígitos, escala 10 V)

Número de aquisições: 12 / s

4.4. Microcomputador

Fabricante: Hewlett - Packard

Modelo: HP-85

Memória RAM: 32 kBytes

5. Equipamento para Calibração das Rotações dos Tornos

5.1. Lâmpada Estroboscópica

Fabricante: General Radio Company

Marca: Strobotac

Modelo: 1531-AB

Campo de medição:	110...690	670...4.170	4.000...25.000(rpm)
Resolução:	2,5	10	50 (rpm)

ANEXO IV

CALIBRAÇÕES

1. As curvas obtidas para a correção do erro sistemático na rotação da árvore e no avanço do torno de acabamento Kart EKM-200 para as rotações e avanços são mostradas, respectivamente, nas figuras A1 e A2.

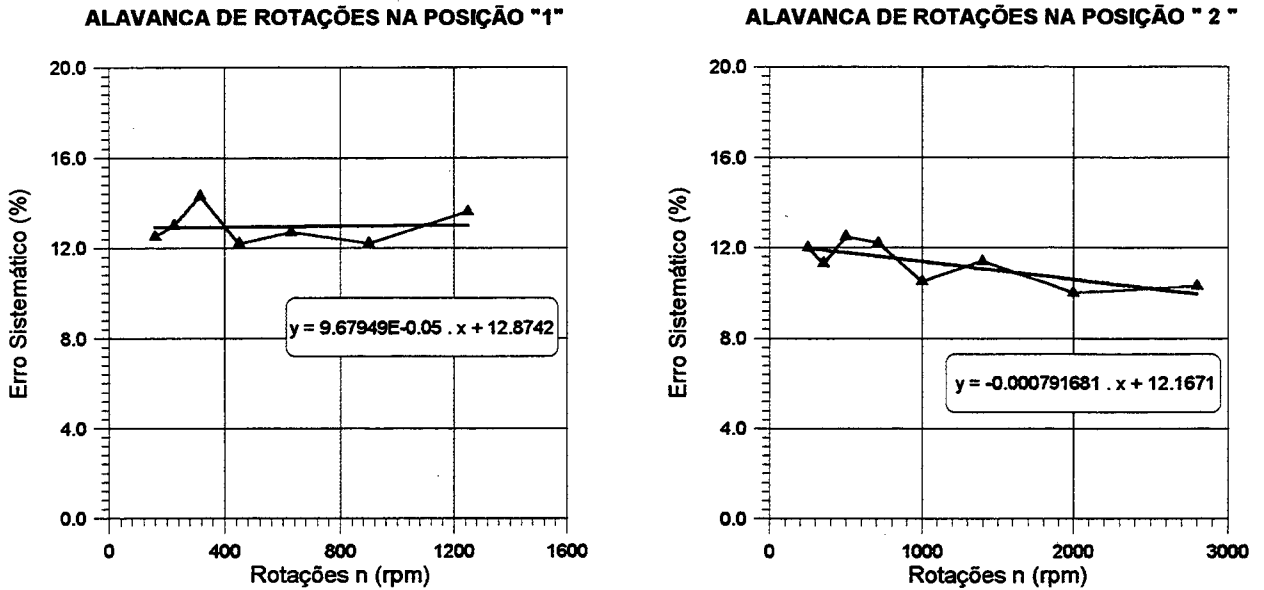


Figura A1 - Calibração das rotações do torno Kart EKM-200

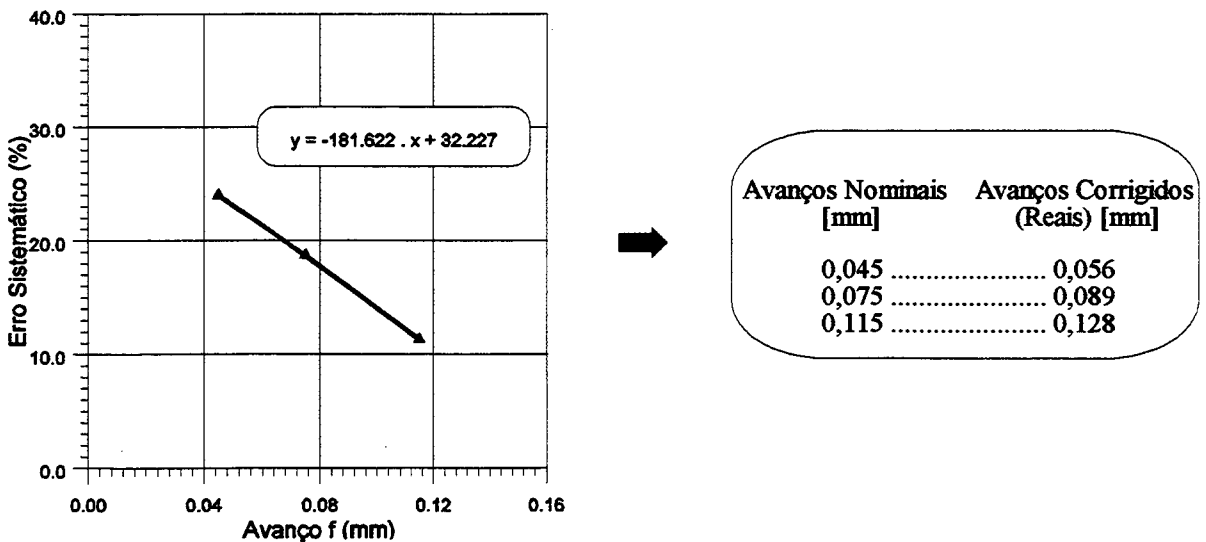


Figura A2 - Calibração dos avanços do torno Kart EKM-200

2. As curvas obtidas para a correção do erro sistemático na medição da força de corte F_c , força de avanço F_f e força passiva F_p encontram-se na figura A3.

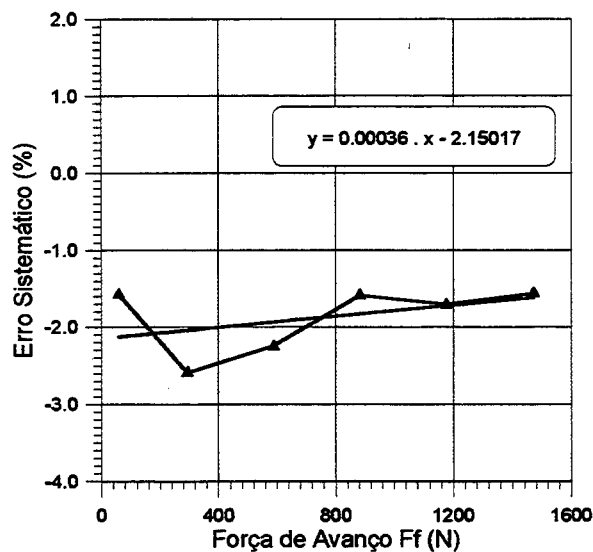
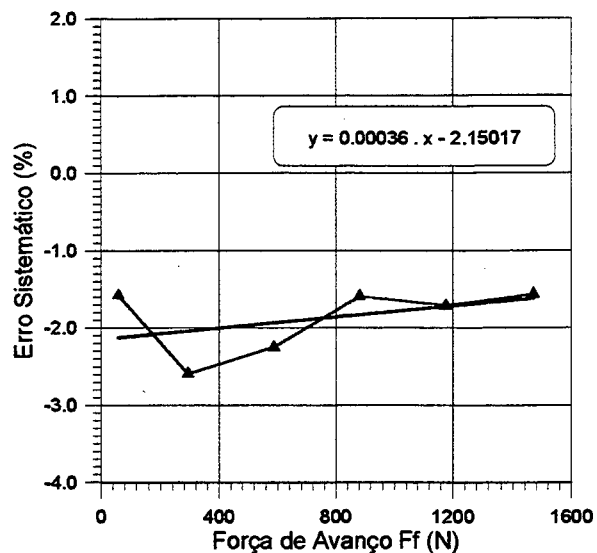
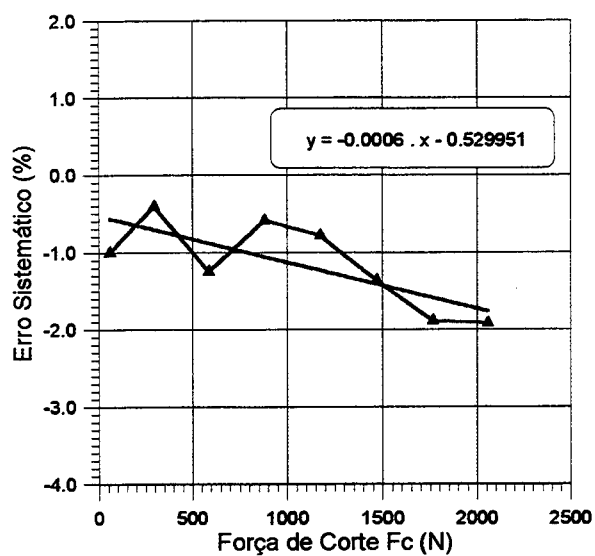


Figura A3 - Calibrações de F_c , F_f e F_p

ANEXO V

Figura A4 - Folha de ensaios de usinagem para avaliação da qualidade superficial e cavacos

Ensaio de Usinagem de Ligas de Alumínio													Folha nº: _____				
Experimento nº: _____				Material de Ensaio: _____				Máquina-ferramenta: _____									
Corpo de Prova nº: _____																	
Material da Ferramenta: _____				Ferramenta nº: _____				Fórmulas: $n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot d}$ [RPM] $V = n \cdot 0,06$ [V]			Formas de Cavacos: A - fragmentado; vírgula A+ - espiral; espiral-helicoidal B+ - helicoidal curto B- - helicoidal longo C - hélice plana D - emaranhado E - fita						
Fluido de Corte: _____				Geometria da Ferramenta:													
Vazão: _____ [l/min]				$\gamma =$ _____ [°] $\alpha =$ _____ [°] $\lambda =$ _____ [°] $r_e =$ _____ [mm] $\chi =$ _____ [°] $\chi' =$ _____ [°]													
Nº do Ensaio	v_c [m/min]	f [mm/rot]	a_p [mm]	Formas de Cavacos	Julg.	R_a [µm]			R_t [µm]			R_z [µm]			$R_{máx}$ [µm]		
1																	
2																	
3																	
4																	
5																	
6																	
7																	
8																	
9																	
10																	
Observações: _____										Data: ____ / ____ / ____			LMP UFSC				
_____										Executor: _____							Florianópolis - SC