

**UNESP**  
**Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá**

**Guaratinguetá**  
**2011**

RAFAEL GONÇALVES DOS SANTOS

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA APLICAÇÃO DO FLUIDO DE  
CORTE NO TORNEAMENTO DA LIGA DE ALUMÍNIO AA7075

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro

Guaratinguetá

2011

Santos, Rafael Gonçalves dos  
S237 e      Estudo da influência da aplicação do fluido de corte no torneamento da  
liga de alumínio AA7075 / Rafael Gonçalves dos Santos – Guaratinguetá:  
[s.n], 2011.  
65 f: il.

Bibliografia: f. 63-65

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade  
Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011.

Orientador: Marcos Valério Ribeiro

1. Usinagem 2. Alumínio I. Título

CDU 621.9

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA APLICAÇÃO DO FLUIDO DE CORTE NO  
TORNEAMENTO DA LIGA DE ALUMÍNIO AA7075


RAFAEL GONÇALVES DOS SANTOS


ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO  
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE  
GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA


APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Mauro Hugo Mathias  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**

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

  
Prof. Dr. MARCELINO PEREIRA DO NASCIMENTO  
UNESP-FEG

  
Prof. Dr. MARCELO DOS SANTOS PEREIRA  
UNESP-FEG

Dezembro de 2011

## **DADOS CURRICULARES**

### **RAFAEL GONÇALVES DOS SANTOS**

NASCIMENTO 29.09.1988 – TAUBATÉ / SP

FILIAÇÃO Haroldo Elias dos Santos

Maria Isabel Gonçalves dos Santos

2006/2011 Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.

De modo especial, à minha família, que sempre me apoiaram e me deram forças para continuar.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus, que me deu forças, sabedoria e saúde para superar todas as adversidades encontradas ao longo do curso e da minha vida.

Aos meus pais, Haroldo e Maria Isabel, que apesar das dificuldades sempre incentivaram meus estudos.

Aos meus amigos de faculdade e amigos de república, que foram peças fundamentais nos questionamentos e dúvidas das mais diversas ordens;

Ao meu orientador Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro, pela paciência e grande auxílio no desenvolvimento deste trabalho;

Aos professores e funcionários da Faculdade pelos serviços prestados.

À FAPESP, por todo o apoio fornecido para a realização deste trabalho.

E a todos aqueles que não foram mencionados neste texto, mas que com certeza têm sua parcela de colaboração neste trabalho e na minha vida.

Este trabalho contou com apoio das seguintes entidades

- FAPESP – através do contrato nº 2009/01082-5



SANTOS, R. G. S. **Estudo da influência da aplicação do fluido de corte na usinagem da liga de Alumínio AA7075**. 2011, 65 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

## **RESUMO**

Uma das maneiras de se minimizar os efeitos dos tempos improdutivos causados pelos desgastes das ferramentas, pode ser alcançada pela introdução, no processo, de sistemas de lubrificação e refrigeração eficientes. Porém, na última década as pesquisas tiveram como meta restringir ao máximo o uso de fluidos refrigerantes e/ou lubrificantes na produção metal-mecânica. Os fatores importantes que justificam esse procedimento incluem os custos operacionais da produção, questões ecológicas, as exigências legais de conservação do meio ambiente e a preservação da saúde do ser humano. O objetivo do trabalho proposto é o estudo da usinagem por torneamento com o enfoque na influência causada pela aplicação de fluido de corte por diversas formas de aplicação (abundante e MQF) e também através da comparação com os resultados obtidos na usinagem sem a presença de fluido. Para tanto, os ensaios de torneamento foram realizados utilizando uma liga de alumínio (AA 7075). As variáveis de resposta a serem analisadas seriam as rugosidades obtidas ( $R_a$  e  $R_y$ ), os desgastes apresentados (VB) e suas respectivas progressões em relação ao comprimento de corte alcançado; o tipo dos cavacos formados, além das variações do grau de acabamento (rugosidade) apresentado pelas peças torneadas. Os resultados deste trabalho irão oferecer informações mais detalhadas sobre a real influência dos fluidos de corte no torneamento dessa liga, que se caracterizam pelas altas taxas de deformação quando da formação do cavaco prejudicando a sua usinagem e também a qualidade da superfície gerada. Assim sendo, se espera apresentar subsídios para se promover a otimização da usinagem desta liga tirando o máximo proveito do papel do fluido de corte.

**PALAVRAS-CHAVE:** Usinagem, Alumínio, Fluido de Corte.

SANTOS, R. G. S. **Study of the influence of the application of cutting fluid in machining of aluminum alloy AA7075**. 2011, 65 pp. Final Paper (Bachelor's Degree in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Guaratinguetá, 2011.

### **ABSTRACT**

One of the ways to minimize the effects of unproductive time caused by tool wear can be achieved by introducing an efficient system of lubrication and cooling in the process. However, in the last decade the research had the goal to restrict the maximum use of refrigerants and / or lubricants in metal-mechanical production. The important factors that justify this procedure include the operational costs of production, ecological issues, and the legal requirements of environmental conservation and preservation of human health. The purpose of the proposed work is the study of machining by turning with the focus on the influence caused by the application of cutting fluid in several ways of application (abundant and MQF) and also by comparing the results obtained by machining without the presence of fluid . For this purpose, the turning tests are conducted using an aluminum alloy (AA 7075). The response variables to be analyzed were obtained from the roughness ( $R_a$  and  $R_y$ ), the stresses presented (VB) and their progression in relation to the cutting length achieved, the type of chip formed, in addition to changes in the degree of finish (roughness) presented by the turned parts. The results of this study should provide more detailed information about the actual influence of cutting fluids in turning this alloy, which are characterized by high rates of deformation when the formation of damaging your chip machining and also the quality of surface generated. Therefore, it is expected to provide subsidies to promote the optimization of machining this alloy making the most of the role of cutting fluid.

**KEYWORDS:** Machining, Aluminum, Cutting fluid.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Representação da formação da aresta postiça de corte (Diniz et AL., 1999). .....	29
Figura 2 - Geometria de uma pastilha de torneamento para alumínio (Diniz et. al, 1999).....	29
Figura 3 – Relação de custos de fabricação associados ao uso de fluido de corte, (Novaski e Dörr, 1999).....	33
Figura 4 - Esquema do ensaio de torneamento cilíndrico externo de acabamento.....	36
Figura 5 - Fluxograma dos procedimentos de ensaio adotados para o estudo da usinagem da liga de Alumínio e análise dos resultados. ....	37
Figura 6 - Representação do corpo de prova .....	38
Figura 7 - Torno CNC.....	40
Figura 8 - Microscópio óptico acoplado a um microcomputador .....	40
Figura 9 – Montagem do rugosímetro portátil .....	41
Figura 10 - Resultados de rugosidade “Ra” em relação ao comprimento de corte “Lc”, da usinagem da liga AA 7075 sob condição de fluido de corte abundante. ....	43
Figura 11 - Resultados de rugosidade “Ry” em relação ao comprimento de corte “Lc”, da usinagem da liga AA 7075 sob condição de fluido de corte abundante. ....	44
Figura 12 - Resultados de rugosidade “Ra” em relação ao comprimento de corte “Lc”, da usinagem da liga AA 7075 sem aplicação de fluido de corte.....	45
Figura 13 - Resultados de rugosidade “Ry” em relação ao comprimento de corte “Lc”, da usinagem da liga AA 7075 sem aplicação de fluido de corte.....	46
Figura 14 - Resultados de rugosidade média “Ra” em relação ao comprimento de corte “Lc”, da usinagem da liga AA7075 com uso do método da Mínima quantidade de fluido (MQF). ....	47

Figura 15 - Resultados de rugosidade total “Ry” em relação ao comprimento de corte “Lc”, da usinagem da liga AA 7075 com uso do método da Mínima quantidade de fluido (MQF).....	47
Figura 16 - Resultados de rugosidade média “Ra” em relação ao comprimento de corte “Lc”, dos vários métodos empregados na usinagem da liga AA7075 .....	48
Figura 17 - Resultados de rugosidade média “Ra” em relação ao comprimento de corte “Lc”, dos vários métodos empregados na usinagem da liga AA7075. ....	49
Figura 18 - Resultados de rugosidade média “Ra” em relação ao comprimento de corte “Lc”, dos vários métodos empregados na usinagem da liga AA7075 .....	50
Figura 19 - Resultados de rugosidade média “Ra” em relação ao comprimento de corte “Lc”, dos vários métodos empregados na usinagem da liga AA7075 .....	51
Figura 20 - Resultados de rugosidade total “Ry” em relação ao comprimento de corte “Lc”, dos vários métodos empregados na usinagem da liga AA7075.....	52
Figura 21 - Resultados de rugosidade total “Ry” em relação ao comprimento de corte “Lc”, dos vários métodos empregados na usinagem da liga AA7075.....	52
Figura 22 - Resultados de rugosidade total “Ry” em relação ao comprimento de corte “Lc”, dos vários métodos empregados na usinagem da liga AA7075.....	53
Figura 23 - Resultados de rugosidade total “Ry” em relação ao comprimento de corte “Lc”, dos vários métodos empregados na usinagem da liga AA7075.....	54
Figura 24 – Desgastes das Ferramentas de corte usadas nos ensaios com fluido abundante .....	55
Figura 25 – Desgastes das Ferramentas de corte usadas nos ensaios sem fluido de corte .....	56

Figura 26 – Desgastes das Ferramentas de corte usadas nos ensaios com Mínima Quantidade de fluido (MQF) .....	57
Figura 27 – Imagem dos cavacos formados no processo de usinagem com fluido de corte abundante.....	59
Figura 28 – Imagem dos cavacos formados nos processos de usinagem sem a utilização de fluido de corte.....	60
Figura 29 – Imagem dos cavacos formados nos processos de usinagem com método da Mínima quantidade de fluido (MQF). .....	61

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Sistema de designação do Alumínio e suas ligas trabalhadas, segundo ASTM.....	21
Tabela 2 - Sistema de designação do Alumínio e suas ligas fundidas, segundo ASTM. .....	22
Tabela 3 - Propriedades do alumínio comparadas com as do aço a 20°C.....	24
Tabela 4 - Comparação da usinabilidade de uma liga de alumínio com outros materiais (Metals Handbook, 1989).....	28
Tabela 5 - Elemento de liga e suas influências na Usinabilidade do (Diniz et al., 1999). .....	30

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

AA	Aluminum Alloy
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Al	Alumínio
ALCAN	Aluminum Canadian
ALCOA	Aluminum Company of America
ap	Profundidade de Usinagem (mm)
ASM	American Society for Metals
ASTM	American Society for Testing Materials
Bi	Bismuto
CNC	Controle Numérico Computadorizado
Co	Cobalto
Cr	Cromo
Cu	Cobre
f	Avanço (mm/volta)
Fe	Ferro
HB	Hardness Brinell
Lc	Comprimento de Corte (m)
Lf	Comprimento de Usinagem (mm)
Mg	Magnésio
Mn	Manganês
Mo	Molibidênio
MQF	Mínima Quantidade de Fluido
Nb	Nióbio
Ni	Níquel
Pb	Chumbo
Ra	Rugosidade Superficial
Ry	Rugosidade Máxima
Si	Silício
Sn	Estanho
Ti	Titânio
VB	Desgaste de Flanco
Vc	Velocidade de Corte (m/min)
Zn	Zinco

# Sumário

1	INTRODUÇÃO .....	17
1.1	Objetivo .....	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	19
2.1	Alumínio e suas ligas .....	19
2.1.1	Classificação das ligas de alumínio .....	20
2.1.2	Uso da liga de Alumínio 7XXX .....	23
2.2	Generalidades da Usinagem das Ligas de Alumínio .....	24
2.2.1	Densidade e condutividade térmica .....	24
2.2.2	Coefficiente de dilatação térmica .....	25
2.2.3	Módulo de elasticidade .....	25
2.2.4	Força de corte e potência .....	26
2.2.5	Ponto de fusão .....	26
2.2.6	Coefficiente de atrito do alumínio .....	27
2.2.7	Usinabilidade .....	27
2.2.8	Influências dos microconstituintes presentes nas ligas de alumínio .....	30
2.3	Métodos para racionalização de fluidos de corte .....	31
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	36
3.1	Ensaio de usinagem .....	37
4	MATERIAIS E EQUIPAMENTOS .....	38
4.1	Materiais .....	38
4.1.1	Corpos de Prova .....	38
4.1.2	Ferramentas .....	39
4.1.3	Fluidos de corte .....	39



4.2	Equipamentos .....	39
4.2.1	Máquina-Ferramenta.....	39
4.2.2	Microscópio Óptico .....	40
4.2.3	Rugosímetro.....	41
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	42
5.1	Análise dos resultados da rugosidade em relação ao comprimento de corte... 43	
5.1.1	Fluido Abundante .....	43
5.1.2	Usinagem á Seco .....	45
5.1.3	Mínima Quantidade de Fluido (MQF) .....	46
5.1.4	Comparação dos Métodos .....	48
5.2	Análise do desgaste das ferramentas via microscopia óptica.....	54
5.3	Análises dos cavacos formados durante o processo de usinagem .....	58
6	CONCLUSÕES .....	62
7	BIBLIOGRAFIA .....	63

## 1 INTRODUÇÃO

O alumínio, dentre os metais não ferrosos, se destaca por ter uma alta resistência à corrosão e por apresentar um comportamento muito melhor a baixas temperaturas se comparado com os metais ferrosos. O alumínio e suas ligas têm grande importância técnica devido a sua baixa densidade, elevada relação resistência/peso, endurecibilidade de muitas ligas, aparência, fabricabilidade, possibilidade de tratamento superficial e propriedades físicas e mecânicas. Devido a isso, muitas pesquisas têm sido feitas para avançar o uso desses materiais.

Desde o início do século é empregado fluido de corte nos processos de usinagem, com o objetivo de resfriar a peça, lubrificar o processo de corte, aumentar a vida útil da ferramenta, entre outros objetivos. Porém nos últimos anos as pesquisas tiveram como meta restringir ao máximo o uso desses fluidos refrigerantes, devido aos altos custos operacionais, a questões ecológicas, preservação da saúde do ser humano, entre outros. Para isso foram desenvolvidas duas técnicas que tem sido intensamente estudadas: o corte sem fluido(corte a seco) e o corte com mínima quantidade de lubrificante (MQL).

## 1.1 Objetivo

O trabalho proposto visa o estudo da influência das diferentes técnicas de aplicação de fluido, tais como, com utilização de fluido de corte abundante, com mínima quantidade de fluido (MQF) e usinagem sem aplicação de fluido, no torneamento da liga AA7075 em usinagem CNC, permitindo assim fazer uma comparação posterior entre os resultados das diferentes técnicas de usinagem, oferecendo informações mais detalhadas sobre o processo produtivo.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Alumínio e suas ligas

O alumínio possui uma combinação de propriedades que o tornou um dos metais mais versáteis, econômicos e atrativos para inúmeras aplicações em diversos setores da engenharia (Hunsicker, 1992). É utilizado tanto na forma de metal puro como na forma de ligas, combinado com outros elementos.

Segundo Sherve e Brink Jr. (1980), da ordem de 8,05% da crosta terrestre sólida é constituída de alumínio, o que o torna o metal mais abundante da crosta. Para efeito de comparação, o ferro, que é o metal mais utilizado pela humanidade há mais de 3000 anos, existe na proporção de 5%. Por sua vez, o cobre, largamente empregado na confecção de utensílios e armamentos há mais de 6000 anos, apresenta-se na proporção de aproximadamente 0,007% da composição básica dos elementos da Terra.

O alumínio e suas ligas tem grande importância técnica devido à sua baixa densidade (2,6 a 2,8 g/cm<sup>3</sup>), elevada relação resistência / peso, elevada resistência à corrosão, endurecibilidade de muitas ligas, aparência, fabricabilidade, possibilidade de tratamentos superficiais, propriedades físicas e mecânicas e outras propriedades. O campo de aplicação do alumínio e suas ligas é cada vez maior. Os maiores campos de aplicação são hoje a indústria de transportes como automóveis, aviões, bicicletas etc., a construção civil, a engenharia mecânica e eletrotécnica e a indústria de embalagens.

Em 1906 Alfred Wilm descobriu como endurecer uma liga Al-Cu através do tratamento de solubilização, seguido de precipitação natural. Iniciou-se a utilização em larga escala das ligas de alumínio, principalmente na indústria aeronáutica, já que anteriormente a esta data o alumínio era apenas utilizado na forma pura.

Os principais elementos químicos que formam ligas com o alumínio são, normalmente, considerados em três grupos, segundo seus comportamentos nos respectivos sistemas (Coutinho, 1980).

1° - Cobre, Magnésio, Zinco: que formam soluções sólidas de vários percentuais, em temperaturas relativamente elevadas, com solubilidade quase nula à temperatura ambiente, cabendo a maior percentagem ao zinco, que solubiliza à 400°C – 82,8% de peso e à 100°C – 4% aproximadamente.

2° - Silício e Estanho: que formam eutéticos. Com 12,6% de silício, a fase rica em alumínio tem teores baixos de silício em solução. O estanho e o alumínio são, igualmente, insolúveis á temperatura ambiente.

3° - Ferro, Manganês, Níquel, Cromo e Titânio: São poucos solúveis no alumínio, formando determinadas fases ou compostos intermediários, tais como Al<sub>3</sub>Fe, Al<sub>6</sub>Mn, Al<sub>3</sub>Ni, Al<sub>7</sub>Cr e Al<sub>3</sub>Ti, que produzem efeitos pronunciados nas propriedades mecânicas quando em pequenas quantidades.

Adições de cromo e titânio visam o refino de grão, enquanto adições de estanho, chumbo e bismuto, que são insolúveis no alumínio, objetivam a usinagem ou corte fácil.

Historicamente, as ligas de alumínio foram desenvolvidas com a finalidade de aumentar a resistência mecânica do alumínio puro, que apesar da elevada ductilidade e boa resistência á corrosão apresenta baixas propriedades mecânicas (Mazzolani, 1995).

A tecnologia mundial desenvolveu até hoje quase um milhar de ligas de alumínio, muitas das quais permanecem em uso por causa das suas características excepcionais. Outras, com pequenas alterações na composição ou pela adição de novos elementos crescem de importância, enquanto muitas se tornaram obsoletas ante ás modernas ligas desenvolvidas pela indústria aeronáutica, como as ligas quaternárias Al-Zn-Mg-Cu da série 7xxx, que foram desenvolvidas em grande escala para o uso em aplicações industriais (Carvalho, 1999).

### 2.1.1 Classificação das ligas de alumínio

Segundo Bresciani Filho (1992), as principais normas de classificação do alumínio e suas ligas são: ASTM (*American Society for Testing Materials*), Alcoa (*Aluminum Company of America*), ASM (*American Society for Metals*), Alcan

(Aluminum Canadian), Din 1712 e 1725 e da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas).

Aqui iremos descrever o sistema de classificação segundo a ASTM, um sistema adotado internacionalmente.

As ligas de alumínio foram divididas em dois grupos, com base no processo de fabricação, ou seja, o grupo das ligas trabalhadas ou dúcteis e o grupo das ligas fundidas (na forma de lingotes ou produtos). As ligas trabalhadas são aquelas que sofreram deformações plásticas a quente e ou a frio, cuja composição e microestrutura diferem das ligas fundidas, o que caracteriza as diferenças de cada processo de fabricação (Zangrandi et al., 2008).

As tabelas 1 e 2 apresentam os critérios adotados pela ASTM para designação das ligas de Alumínio:

Tabela 1 - Sistema de designação do Alumínio e suas ligas trabalhadas, segundo ASTM.

<b>ALUMÍNIO E SUAS LIGAS TRABALHADAS</b>	
<b>Série</b>	<b>Liga e seus principais elementos constituintes</b>
1XXX	Alumínio Puro, composição Controlada (% Al > 99,0)
2XXX	Al-Cu
3XXX	Al-Mn
4XXX	Al-Si
5XXX	Al-Mg
6XXX	Al-Mg-Si
7XXX	Al-Zn
8XXX	Al-Li, Al-Sn, Al-Fe, etc.
9XXX	Série não utilizada

Para os grupos 2xxx até 7xxx, o grupo de ligas é determinado pelo elemento de liga presente em maior percentagem média. Uma exceção pode ser feita com relação

às ligas da série 6xxx, em que a proporção de magnésio e silício disponíveis para formar Mg<sub>2</sub>Si são predominantes.

O segundo dígito indica uma modificação dos limites de impurezas para o alumínio do grupo 1xxx e uma modificação da liga original para os grupos de 2xxx a 8xxx.

A designação da série 10xx é usada para indicar composição de material puro, tendo somente impurezas naturais.

No caso do alumínio ligado, grupo 1000, os dois últimos algarismos representam os centésimos do teor de alumínio em percentagem.

Para as ligas fundidas também é usado um sistema de quatro dígitos, com o último dígito separado dos três primeiros por um ponto decimal, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Sistema de designação do Alumínio e suas ligas fundidas, segundo ASTM.

<b>ALUMÍNIO E SUAS LIGAS FUNDIDAS</b>	
<b>Série</b>	<b>Liga e seus principais elementos constituintes</b>
1XX.X	Alumínio Puro, composição Controlada (%Al>99,0)
2XX.X	Al-Cu
3XX.X	Al-Mn
4XX.X	Al-Si
5XX.X	Al-Mg
6XX.X	Al-Mg-Si
7XX.X	Al-Zn
8XX.X	Al-Li, Al-Sn, Al-Fe, etc.
9XX.X	Série não utilizada

Para a série 1xx.x, o primeiro dígito designa o alumínio não ligado (comercialmente puro), com composição controlada. Os dois dígitos seguintes (segundo e terceiro) indicam aproximadamente a porcentagem mínima de alumínio acima de 99% (Zangrandi et al., 2008).

O quarto dígito colocado após o ponto decimal indica a forma do produto, ou seja, 1xx.0 (produto fundido) e 1xx.1 (lingote) (Davis, 2002).

Para as ligas fundidas das séries 2xx.x à 8xx.x, o primeiro dígito do sistema de identificação designa a série à qual pertence a liga e o seu principal elemento de liga, ou seja, aquele com a maior porcentagem média, exceto naqueles casos em que a composição de uma liga atual representa uma modificação de uma liga previamente registrada.

Se a maior porcentagem média for comum a mais de um elemento, quem determina à qual série pertencerá à liga é o primeiro elemento na seqüência dos elementos.

Os dois dígitos seguintes (segundo e terceiro) que formam o número de identificação das ligas não têm nenhum significado especial e servem apenas para identificar diferentes ligas de uma mesma série (Davis, 2002).

#### 2.1.2 Uso da liga de Alumínio 7XXX

As ligas de alumínio da série 7xxx foram desenvolvidas para ter um alto desempenho nas estruturas das aeronaves. Com a combinação de teores de elementos de ligas, de cobre, magnésio e principalmente zinco, formam a tradicional liga quaternária Al-Zn-Mg-Cu. Os elementos de liga Zn e Mg, com as devidas razões de proporções, são adicionados para formarem precipitados resistentes  $\eta$  e  $\eta'$ , e produzir endurecimento por precipitação. O elemento Cu é adicionado com a finalidade de melhorar a resistência à corrosão. As ligas contendo teores de Zr e Cr combinam com o alumínio formando dispersóides resistentes para retardar o processo de recristalização (Carvalho, 1999).

Anterior a 1940 foram desenvolvidas as ligas Al-Zn-Mg-Cu, que permitiu a obtenção de propriedades mecânicas mais uniformes e produtos relativamente finos, devido, em parte, ao considerado processo especial termomecânico da época. Esta liga é a que possui a maior resistência mecânica entre as ligas de alumínio.

Em 1940 foi descoberta a liga 7075 que foi o primeiro produto a ser usado no avião B29 na condição T6, utilizado na Segunda Guerra Mundial.



## 2.2 Generalidades da Usinagem das Ligas de Alumínio

As propriedades mecânicas e térmicas do alumínio puro são fatores decisivos nas características de usinagem de suas ligas (Metals Handbook, 1989) e suas principais características estão na Tabela 3:

Tabela 3 - Propriedades do alumínio comparadas com as do aço a 20°C.

<b>Material</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Condutividade Térmica (cal.cm/°C.cm<sup>2</sup>.s)</b>	<b>Dilatação Linear (°C<sup>-1</sup>)</b>	<b>Resistividade Elétrica, p(ohm.cm) a 20°C</b>	<b>Módulo de Elasticidade média, MPa a 20°C</b>
Aço (1040)	7,85	0,115	11,3x10 <sup>-6</sup>	17,1x10 <sup>-6</sup>	2,06x10 <sup>5</sup>
Ligas de Alumínio	2,7	0,4	22x10 <sup>-6</sup>	3,5x10 <sup>-6</sup>	6,86x10 <sup>4</sup>
Diferença entre os metais	Al = 1/3 Aço	Al = 3 Aço	Al = 2 Aço	Al = 1/4 Aço	Al = 1/3 Aço

A seguir serão abordadas as propriedades mais importantes das ligas de alumínio no que diz respeito às características da usinagem dessas ligas.

### 2.2.1 Densidade e condutividade térmica

Com uma densidade três vezes menor do que a dos aços e do latão, as ligas de alumínio permitem operações com velocidades bem mais elevadas e com menor desgaste do equipamento. Como os esforços inerciais são menores, é possível realizar mudanças de velocidade e manobras rápidas com menor vibração do conjunto, o que favorece a obtenção de um bom acabamento superficial. O aproveitamento de material durante a usinagem é três vezes maior no caso do alumínio, sendo assim o custo de usinagem por peça de alumínio é sempre inferior ao da usinagem do latão e em alguns casos, quando a velocidade de corte for essencial, por exemplo, o custo de usinagem do alumínio pode ser inferior ao custo de usinagem do aço.

As ligas de alumínio, por possuírem alta condutividade térmica, atraem para a peça boa parte do calor gerado, ocasionando uma elevação na temperatura. Este fato

favorece a usinagem destas ligas, já que as mesmas possuem uma resistência bastante reduzida em temperaturas elevadas (Diniz et al., 1999).

### 2.2.2 Coeficiente de dilatação térmica

O coeficiente de dilatação térmica do alumínio é bastante elevado, maior que o do aço e do latão, isso pode gerar dificuldade de obtenção de tolerâncias apertadas devido à alta taxa de calor gerada no atrito dos pares ferramenta-peça, ferramenta-cavaco, na operação de usinagem (Diniz et al., 1999). Isto se deve principalmente ao fato de que no decorrer do torneamento de peças cilíndricas, a temperatura aumenta gradativamente conforme se processa a usinagem, fazendo com que a ferramenta de corte, que se desloca em trajetória retilínea, retire uma quantidade cada vez maior de material da superfície da peça (devido a sua dilatação), dando à mesma um formato cônico após o resfriamento.

### 2.2.3 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade do alumínio é cerca de 1/3 do módulo de elasticidade do aço e bem inferior ao módulo de elasticidade do latão, o que torna necessário certos cuidados para evitar ou minimizar distorções e erros dimensionais nas peças. Basicamente estes cuidados consistem em:

- Usinar com avanços menores, reduzindo a carga de compressão sobre a peça e evitando a flexão da mesma.
- Quando a peça for muito comprida, utilizar apoios (suportes) ao longo do seu comprimento.
- Somente utilizar ferramentas com ângulos de corte agudos e bem afiadas, ou seja, com gumes bem acabados e polidos.
- É necessário tomar cuidado no controle do aperto de fixação, com o objetivo de evitar amassamentos e deformações. A peça só deve ser fixada em suas seções mais

sólidas ou mais espessas. Em caso de uso de mordentes hidráulicos em equipamentos automáticos, geralmente dimensionados para trabalhar com aços, recomenda-se diminuir a pressão de trabalho.

#### 2.2.4 Força de corte e potência

O alumínio em geral pode ser facilmente usinado. A energia consumida por unidade de volume de metal removido é muito baixa. Apenas o magnésio e suas ligas podem ser usinados com a mesma taxa de energia consumida (Diniz et al., 1999).

Tomadas como base às propriedades mecânicas do alumínio, a força de corte, e por essa razão a potência requerida para usinagem, é menor do que a esperada para esses materiais. Embora algumas ligas de alumínio apresentem um limite de resistência equivalente ao de alguns aços de baixo carbono a temperatura ambiente, em temperaturas elevadas essa resistência é bastante reduzida. Este fato favorece a usinagem dessas ligas, já que a elevação da temperatura é inerente ao processo de usinagem e, as ligas de alumínio, por possuírem alta condutividade térmica, atraem para a peça boa parte do calor gerado.

#### 2.2.5 Ponto de fusão

A temperatura de fusão das ligas de alumínio, situada entre 650 e 700 °C pode ser atingida na interface de contato peça-cavaco-ferramenta, o que pode levar à soldagem por fusão do alumínio à ferramenta, “empastando” a mesma. Neste caso devem ser usados recursos para reduzir o atrito e refrigerar a peça.

### 2.2.6 Coeficiente de atrito do alumínio

Comparado com o coeficiente de atrito do aço, o coeficiente de atrito do alumínio é alto, o que resulta na redução do ângulo de cisalhamento durante o corte, aumentando a energia de deformação necessária para que ocorra o destacamento do cavaco. Esse fenômeno se agrava quando o cavaco é contínuo, ou seja, com intenso contato com a face da ferramenta. O uso de lubrificantes, de materiais de ferramenta com menor coeficiente de atrito e dispositivos de quebra de cavacos, permite reduzir o arrasto sobre a ferramenta, melhorando as condições de corte. Também é necessário um bom acabamento na afiação da ferramenta para reduzir o atrito.

### 2.2.7 Usinabilidade

Se comparada a usinabilidade de uma liga de alumínio com relação a outros materiais em condições específicas de usinagem, pode-se perceber a grande diferença que este material apresenta em relação aos demais, conforme a Tabela 4.

Tabela 4 - Comparação da usinabilidade de uma liga de alumínio com outros materiais (Metals Handbook, 1989)

<b>Ligas</b>	<b>Condições (a)</b>	<b>Usinabilidade (b)</b>
<b>Liga de Alumínio 2017</b>	STA	300
<b>B1112 Aço resulfurizado</b>	HR	100
<b>1020 Aço Carbono</b>	CD	70
<b>Aço 4340</b>	A	45
<b>Titânio</b>	A	40
<b>302 Aço Inoxidável</b>	A	35
<b>Ti-5Al-2,5Sn</b>	A	30
<b>Ti-6Al-4V</b>	A	22
<b>Ti-6Al-6V-2Sn</b>	A	20
<b>Ti-6Al-4V</b>	STA	18
<b>HS25 (Base - Co)</b>	A	10
(a) STA = Tratado Por solubilização e estabilizado; HR = Laminado a quente; CD = Estirado a frio; A = Recozido. (b) Baseado em uma taxa de 100 para aço B1112		

Com relação aos critérios de usinabilidade baseados na rugosidade da peça, em condições normais de usinagem, não se pode dizer que o alumínio tenha uma boa usinabilidade, pois o cavaco formado é longo e o acabamento superficial obtido é insatisfatório. Porém, bons acabamentos superficiais podem ser obtidos se a velocidade de corte for suficientemente e a geometria da ferramenta for adequada (Diniz et al., 1999).

Para que se possa ter uma boa usinabilidade das ligas de alumínio é necessário que a dureza da liga seja maior que 80 HB, já que se a dureza for menor que este valor, a tendência à formação de aresta postiça de corte é muito alta e se torna muito difícil à obtenção de rugosidades baixas da peça em usinagem (Diniz et al., 1999).

A aresta postiça de corte é um fenômeno que ocorre na superfície de contato entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta. Uma camada de cavaco que, permanecendo aderente á aresta de corte, modifica seu comportamento em relação à força de corte, acabamento superficial da peça e desgaste da ferramenta (Diniz et al., 1999). A aresta postiça de corte tende a crescer gradualmente até que em certo momento rompe bruscamente, causando perturbação dinâmica no sistema. Para evitar

a ocorrência da aresta postiça de corte e garantir um cisalhamento perfeito do cavaco, as ferramentas para corte de alumínio possuem aresta afiada (sem raio na aresta) com ângulos bastante positivos.

O material de ferramenta típico para usinagem de ligas de alumínio (com exceção das ligas de alumínio-silício) é o metal duro classe K sem cobertura. A classe K é recomendada, pois as temperaturas de corte são baixas e, por isso, a formação do desgaste de cratera via processo difusivo não é um problema. Por outro lado, metais duros à base de carbeto de titânio (classe P) são inadequados para usinagem de alumínio, devido a um acelerado desgaste, por difusão, da ferramenta de corte (Cunha, 2004).

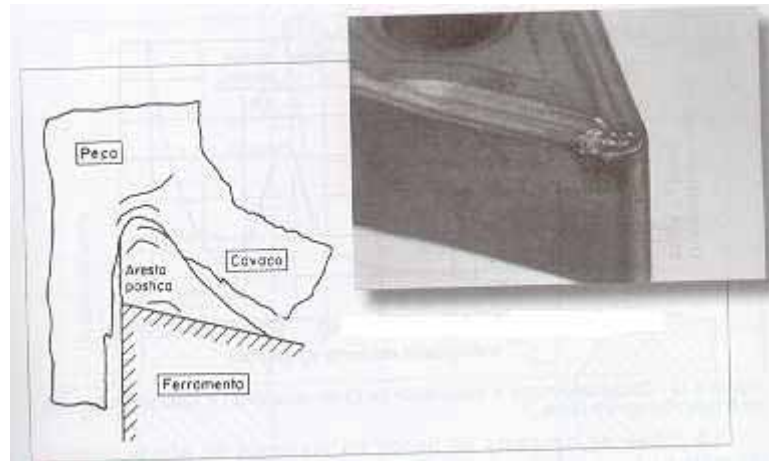


Figura 1– Representação da formação da aresta postiça de corte (Diniz et AL., 1999).



Figura 2 - Geometria de uma pastilha de torneamento para alumínio (Diniz et. al, 1999)

A ferramenta é sem cobertura, pois não se necessita grande resistência ao desgaste e, por outro lado, requer-se uma aresta bastante afiada, o que não é fácil de ser obtido com espessas camadas de cobertura sobre a ferramenta.

De modo geral existe pouco conhecimento das vantagens que as ligas de alumínio podem oferecer com respeito a sua usinabilidade, principalmente porque estas ligas carregam um falso estigma de impróprias a esta operação. Entretanto, nota-se que se forem otimizadas, é possível obter ótimos resultados, tanto em termos de qualidade da peça final, quanto em termos de custos (Weingaertner, 1994)

### 2.2.8 Influências dos microconstituintes presentes nas ligas de alumínio

As características de usinagem das ligas de alumínio podem ser afetadas pela variação de alguns fatores como elementos de liga, impurezas, processos de fundição e tratamentos aplicados ao metal. Na tabela 5 são mostrados alguns elementos utilizados na formação de ligas de alumínio e suas respectivas influências na usinabilidade da liga.

Tabela 5 - Elemento de liga e suas influências na usinabilidade do Alumínio (Diniz et al., 1999).

<b>Elemento de liga</b>	<b>Influência na Usinabilidade</b>
<b>Sn, Bi, Pb</b>	Atuam como lubrificantes e como fragilizadores do cavaco
<b>Fe, Mn, Cr, Ni</b>	Combinam entre si ou com o alumínio e/ou com silício, para formarem partículas duras, que favorecem a quebra do cavaco e que, em grande quantidade, têm efeito abrasivo sobre a ferramenta.
<b>Mg</b>	Em teores baixos (cerca de 0,3%) aumenta a dureza do cavaco e diminui o coeficiente de atrito entre cavaco e ferramenta
<b>Si</b>	Aumenta a abrasividade da peça – a vida da ferramenta diminui com o aumento do tamanho da fase primária do silício
<b>Cu</b>	Forma o intermetálico $CuAl_2$
<b>Zn</b>	Não exerce influência na usinabilidade

### 2.3 Métodos para racionalização de fluidos de corte

Segundo Vilela (1988), uma das maneiras de otimizar a produção diária de peças é diminuir os tempos de usinagem. Uma análise do processo permite a redução destes tempos, por meio da escolha correta da ferramenta, utilização de avanços e profundidade de corte coerentes com a capacidade da máquina-ferramenta, utilização adequada do fluido de corte, etc. O aumento da velocidade de corte também permite obter uma maior taxa de remoção de cavaco e, conseqüentemente, reduzir o tempo de usinagem. Entretanto, o aumento da velocidade de corte tem efeito negativo sobre a vida da ferramenta. O que pode provocar aumento do tempo de fabricação, devido à necessidade de trocas mais freqüentes de ferramentas.

Uma das maneiras de se minimizar os efeitos dos tempos improdutivos causados pelos desgastes das ferramentas pode ser alcançada pela introdução de sistemas de lubrificação eficientes no processo (Cunha, 2004).

A utilização de fluidos de corte na usinagem dos materiais foi introduzida por F.W. Taylor em 1890. Utilizando água, ele concluiu que o recurso aumentava a vida da ferramenta. Depois de Taylor, diversas pesquisas desenvolveram novos tipos de fluidos além da água, já que esta, apesar de ter alto poder refrigerante, promove oxidação da peça, da ferramenta e da máquina e tem baixo poder lubrificante (Machado e Diniz, 2000).

Anteriormente os fluidos de corte não apresentavam características para satisfazer as necessidades de lubrificação, refrigeração e estabilidade química, que eram fundamentais para os processos de usinagem. Eles eram classificados como à base de água ou de óleo, dependendo da sua constituição média. Atualmente com o desenvolvimento dos fluidos sintéticos, os fluidos de corte são classificados como: óleo puro, óleo emulsionável, fluido semi-sintético e fluido sintético (Machado e Diniz, 2000). Para evitar danos nos equipamentos devido à água presentes na emulsão, empregam-se aditivos anticorrosivos, tais como o nitrito de sódio. Também são introduzidos biocidas e fungicidas, que inibem o crescimento de bactérias e fungos, devendo ser compatíveis com a pele humana e também atóxicos.



Porém, na última década as pesquisas tiveram como meta restringir ao máximo o uso de fluidos refrigerantes e/ou lubrificantes na produção metal-mecânica. Os fatores importantes que justificam esse procedimento incluem os custos operacionais da produção, questões ecológicas, as exigências legais de conservação do meio ambiente e a preservação da saúde do ser humano (Machado e Diniz, 2000).

No princípio, os refrigerantes deveriam resfriar a peça, lubrificar o processo de corte e arrastar os cavacos gerados no corte de metais. Mas nos últimos anos as operações de fresamento, torneamento e mesmo as de furação estão cada vez mais sendo feitas sem refrigeração, tanto para minimizar o impacto ambiental e os danos para a saúde quanto para reduzir os custos (Mason, 2001).

Os custos de refrigeração relacionados com o processo de usinagem são frequentemente relegados a um segundo plano. Mas é importante que eles sejam observados ao lado dos custos fixos da instalação dos sistemas de refrigeração. Neles estão embutidos, por exemplo, os gastos feitos com fornecimento, tratamento e eliminação dos resíduos nocivos ao meio ambiente.

Na Alemanha o custo com eliminação, incluindo a separação do lixo, queima, ou armazenamento dos resíduos é mais elevado do que os de fornecimento. Além disso, não se pode menosprezar a manutenção dos sistemas de armazenamento dos fluidos e o consumo de energia associado, necessário, por exemplo, para o resfriamento.

Nas operações de corte de metais, os custos de aquisição dos refrigerantes, o seu uso e o descarte podem ser de 1,5 até 4 vezes o custo das ferramentas de desgaste usadas na operação (Mason, 2001).

Em um processo de usinagem os gastos relacionados com a ferramenta representam apenas de 2 a 4%, contra 17% em refrigeração. Adicionalmente, na usinagem com refrigeração ocorre a necessidade de se separar os cavacos, o que ocasiona mais desembolso (Novaski e Dörr, 1999).



Figura 3 – Relação de custos de fabricação associados ao uso de fluido de corte, (Novaski e Dörr, 1999).

Ao substituir parte dos processos que utilizam fluidos de corte por processos de usinagem a seco, tem-se um ganho relativo de custos de fluidos e um acréscimo nos custos da ferramenta. Porém, no geral, o custo total fica reduzido, representando um ganho não só financeiro como, também, ambiental, (Granger, 1994, Cselle, 1995; Hyatt, 1997.b, Heine, 1997).

De acordo com Silva et al. (2001), Mason, (2001) e Heisel et al. (1998), apesar das insistentes tentativas de eliminar completamente os fluidos refrigerantes, em muitos casos a refrigeração ainda é essencial, para se obter vidas econômicas de ferramentas e as qualidades superficiais requeridas. Isto é particularmente válido quando há exigência de tolerâncias estreitas, e alta precisão dimensional e de forma ou quando se trata de usinagem de materiais críticos, de corte difícil, como por exemplo, no caso das superligas.

Para que a utilização do fluido de corte seja minimizada, duas técnicas têm sido intensamente experimentadas: o corte completamente sem fluido (corte a seco) e o corte com mínima quantidade de fluido (MQF), ou seja, quase a seco.

Para a primeira técnica (corte a seco), é fundamental que se tenha materiais de ferramentas e condições de usinagem adequadas, para que não ocorra uma queda drástica da vida da ferramenta ou a perda da qualidade da peça. Com relação aos materiais para ferramentas, os desenvolvimentos apontam para utilização do metal duro com novas camadas duras de cobertura, principalmente as de TiCN, TiAlN e AlTiN e diamante. Também o cermet e o material cerâmico são opções quando se

pensa em corte sem fluido. Tais ferramentas possuem as características necessárias para esse fim citadas anteriormente, e muitas delas, como o cermet e classes de cerâmico, nem devem ser utilizadas com fluido de corte, devido à baixa resistência ao choque térmico (Novaski e Dörr, 1999).

A otimização das condições de corte para torná-las mais adequadas ao corte a seco é realizada através do aumento do avanço e da diminuição da velocidade de corte. Com isso, pode-se manter o volume de cavaco removido na unidade de tempo constante (e com isso, obter-se o mesmo tempo de corte por peça) e, assim aproximadamente a mesma quantidade de calor gerado na unidade de tempo. Porém, devido ao maior avanço, tem-se uma maior área da ferramenta em contato com o cavaco, maior área para receber o calor gerado e, conseqüentemente, menor temperatura da ferramenta. Esse procedimento deve aumentar a rugosidade da peça e, portanto, é necessário também se aumentar o raio de ponta da ferramenta para se manter rugosidades similares às que se tinha antes da mudança das condições de usinagem. O aumento do raio de ponta aumenta o comprimento de contato da aresta da ferramenta com a peça e, assim ajuda ainda mais a distribuição do calor gerado, o que facilita ainda mais a utilização do corte a seco (Diniz et al., 1999).

Algumas vezes, a usinagem a seco promove a substituição de alguns processos. Por outro lado, operações críticas, como a furação de alumínio ou aço, não permitem a eliminação total da refrigeração. Nestes casos, podemos utilizar a técnica de Mínima Quantidade de Fluido (MQF).

Segundo Mason (2001), a idéia da usinagem quase sem fluido de corte é borrifar uma quantidade mínima de refrigerante e/ou lubrificante sobre a aresta de corte, técnica denominada Mínima Quantidade de Fluido (MQF). Frequentemente, uma mistura ar-óleo é bombeada através da ferramenta diretamente na zona de corte. As vantagens incluem o baixo consumo de lubrificante, cavacos secos, e ar mais limpo. A grande desvantagem está associada à necessidade de sistemas de exaustão de ar junto às máquinas, com o objetivo de proteger a saúde dos operadores, em função dos danos que a névoa produzida pelos sistemas pode provocar.

Os resultados para o sistema MQF são encorajadores, e têm-se obtido bons resultados com essa técnica. Machado e Wallbank (1997) utilizaram essa técnica no

torneamento de aço médio carbono e concluíram que, em alguns casos, a mistura ar + água ou ar + óleo solúvel mostrou-se melhor que a aplicação abundante de óleo solúvel.

Um dos melhores exemplos da aplicação com sucesso da MQF é a furação de ligas de alumínio. Devido à alta ductibilidade do alumínio, logo nos primeiros furos sem fluido de corte, o cavaco adere aos canais helicoidais da broca, provocando o entupimento destes canais. Isto, na maior parte das vezes, causa a quebra da broca. Braga et al (1999) realizaram diversos ensaios de furação em liga de alumínio-silício (7% de silício), utilizando brocas inteiriças de metal duro e comparando a utilização do óleo solúvel abundante com a mínima quantidade de fluido (10 ml/h de óleo em um fluxo de 4,5 bars de ar). Em todos os ensaios por eles realizados, o desgaste da ferramenta quando se utilizou MQF não foi maior que quando da utilização do óleo solúvel e os parâmetros de qualidade da peça, como tolerância dimensional e de forma (circularidade do furo) e rugosidade, também não se deterioraram com a introdução da MQF.

### 3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foram realizados ensaios de torneamento cilíndrico externo (Figura 5), com parâmetros de usinagem típicos de acabamento (baixos valores de avanço e profundidade de usinagem) em corpos de prova que foram obtidos a partir de tarugos de liga de Alumínio AA 7075. O processo de usinagem foi realizado com a utilização de ferramentas de metal duro, sem cobertura, com mecanismo de quebra-cavaco.

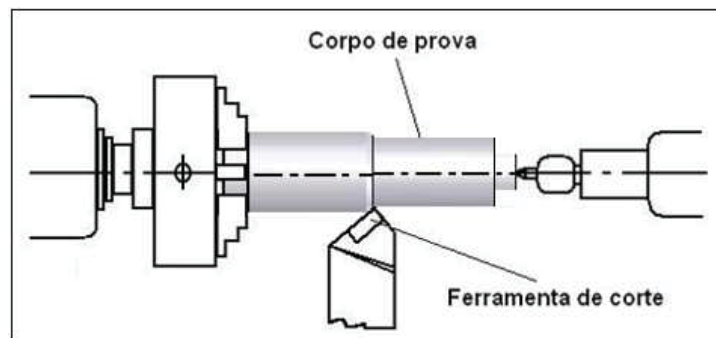


Figura 4 - Esquema do ensaio de torneamento cilíndrico externo de acabamento.

O desempenho de uma ferramenta de corte é normalmente expresso em termos de sua vida. A vida é usualmente baseada em certos critérios de desgaste. Geralmente o desgaste de flanco é o mais considerado, uma vez que com o seu aumento afeta a estabilidade da aresta de corte e conseqüentemente as tolerâncias dimensionais da peça usinada são ultrapassadas. Além do desgaste de flanco, a superfície final da peça usinada também pode ser usada como indicador do desempenho da ferramenta.

Assim sendo, foram avaliados, com o auxílio de microscopia óptica, os tipos e a intensidade dos desgastes sofridos pela ferramenta durante a operação de corte, além da variação da rugosidade superficial ou média ( $R_a$ ) e rugosidade máxima ( $R_y$ ) apresentada pelas peças produzidas, que foi quantificada utilizando-se um rugosímetro portátil.

### 3.1 Ensaios de usinagem

Para os ensaios com a liga de Alumínio AA 7075 foram realizados os procedimentos mostrados no fluxograma da Figura 5:

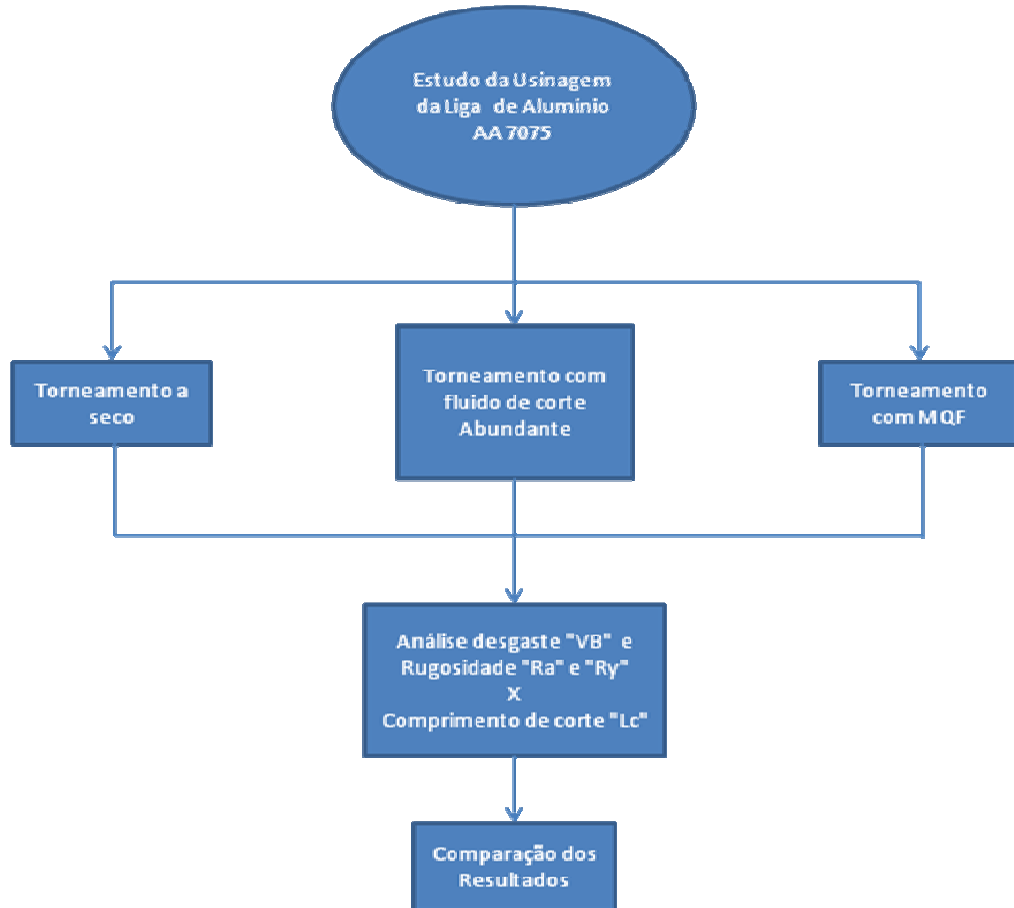


Figura 5 - Fluxograma dos procedimentos de ensaio adotados para o estudo da usinagem da liga de Alumínio e análise dos resultados.

Os parâmetros de usinagem utilizados para os ensaios iniciais foram: velocidade de corte ( $v_c$ ) de 400 e 300 m/min, profundidade de usinagem ( $a_p$ ) de 0,5 mm e avanço ( $f$ ) de 0,4 e 0,2 mm/volta. Após cada operação de usinagem foi medida a qualidade da superfície gerada nos testes, por meio do rugosímetro e também foram observados desgastes, por meio de uma lupa. Os ensaios foram realizados aplicando os dois métodos de aplicação de fluido (Abundante e MQF), e também sem a aplicação do fluido (Corte a seco). Com os valores obtidos foram construídos os gráficos de Rugosidade "Ra" x Comprimento de corte "Lc", e Rugosidade "Ry" x Comprimento de corte "Lc".

## 4 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

### 4.1 Materiais

#### 4.1.1 Corpos de Prova

O material utilizado para a realização dos ensaios foi à liga de Alumínio AA 7075 de uso aeronáutico, obtida junto à Alcoa Alumínio S/A, o qual foi utilizado na forma de barras cilíndricas das quais foram confeccionados os corpos de prova, que possuíam diâmetros variando entre 47 e 48 mm, sendo usinados com uma velocidade de corte ( $V_c$ ) de 400 m/min até atingirem um diâmetro de 36 mm, a partir disto usinava-se o material com uma velocidade de 300 m/min até atingir o diâmetro de 30 mm. Foi feito um rebaixamento em uma das extremidades para que o corpo de prova fosse preso ao torno sem ocorrência de variação do comprimento de usinagem "Lf" durante os ensaios, conforme esquematizado na Figura 6. Os corpos de prova foram confeccionados por torneamento na oficina mecânica do Departamento de Materiais e Tecnologia (DMT - UNESP- Campus de Guaratinguetá), e possuíam um comprimento de usinagem variando entre 221 e 229 mm .

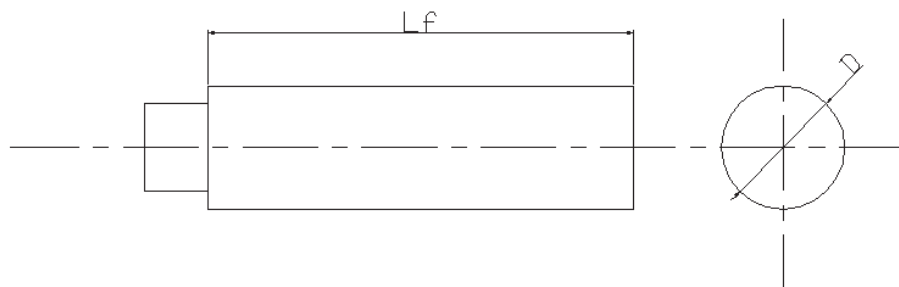


Figura 6 - Representação do corpo de prova

#### 4.1.2 Ferramentas

Nos ensaios iniciais foram utilizadas as pastilhas de geometria CCGT09T304F-AL KX de metal duro sem cobertura, juntamente com o suporte SCLCR2020K09.

#### 4.1.3 Fluidos de corte

Para os ensaios com aplicação de fluido de corte em abundância o fluido utilizado foi o Lubrax OP 38 EM, fluido de base semi-sintética produzida pela empresa Petrobrás.

Porém, para os ensaios realizados com mínima quantidade de fluido de corte utilizou-se o lubrificante LB 1000, fluido de base vegetal fabricado pela empresa ITW Chemical Products Ltda.

### 4.2 Equipamentos

Para a realização dos ensaios foram utilizados os seguintes equipamentos:

#### 4.2.1 Máquina-Ferramenta

Torno CNC (Figura 8), marca Romi, modelo Centur 30S, comando MACH 9, rotação máxima 3500 RPM, potência de 10 KW, do Laboratório de Estudo da Usinagem do Departamento de Materiais e Tecnologia (DMT/UNESP-Guaratinguetá).





Figura 7 - Torno CNC

#### 4.2.2 Microscópio Óptico

Microscópio óptico metalúrgico da marca NIKON, modelo EPIPHOT 200 com aumento ampliação de 50x equipado com um *software* de análise de imagens "SPOT" acoplado em um computador, utilizando o *software ImageJ* (Figura 9). Quanto às fotografias digitais dos cavacos, estas foram feitas por meio da câmera digital Sony Cyber-shot 5.1 MP, com lentes Carl Zeiss.



Figura 8 - Microscópio óptico acoplado a um microcomputador

### 4.2.3 Rugosímetro

As medidas de rugosidade foram realizadas com o auxílio de um rugosímetro portátil SurfTest 301 da Mitutoyo (com apalpador mecânico tipo estilete e raio de ponta de  $5\ \mu\text{m}$ ), conforme montagem da Figura 10.



Figura 9 – Montagem do rugosímetro portátil

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como o objetivo do trabalho é realizar uma análise da influência da utilização de diferentes técnicas de usinagem no torneamento da liga de Alumínio AA 7075, isso se realizou através de diferentes testes de torneamento nos quais se variou a estratégia de aplicação do fluido de corte com a variação das condições de usinagem.

Foram realizadas operações de usinagem nas quais variou-se a velocidade de corte e o avanço, com aplicação de fluido de corte em abundância, sem aplicação de fluido de corte, e também com a técnica de mínima quantidade de fluido (MQF), sendo observados durante os testes, os tipos de desgaste apresentados e também medida a intensidade destes, além da medição dos níveis de rugosidade da superfície dos corpos de prova, pois é esperado que os mecanismos de desgaste atuantes na ferramenta variem em função das modificações no processo.

Devido à alta deformação no processo de usinagem, a formação do cavaco ocorre num tempo muito curto, ao mesmo tempo, uma grande quantidade de material cisalhado sofre deformação plástica, alta pressão e alta temperatura também acompanham e influenciam no processo de formação do cavaco. O material da peça usinada ao redor da aresta de corte é submetido a grandes tensões e pode sofrer algumas mudanças metalúrgicas.

Durante o processo de usinagem, o material da peça usinada sofre uma grande deformação plástica por causa da movimentação entre a ferramenta e a peça, onde são observadas duas regiões específicas do cavaco que podem ser formadas. Estas regiões são denominadas zonas ou bandas de cisalhamento primário e secundário.

Amostras de cavaco foram colhidas após algumas operações de usinagem, tanto nas operações a seco, quanto para as operações usinagem com fluido de corte, e posteriormente foram tiradas as fotos dos cavacos no final dos ensaios para uma primeira análise das características dos cavacos formados.

A análise dos desgastes sofridos pela ferramenta de corte foi realizada em microscópio óptico acoplado a um microcomputador, onde foi possível a análise de suas imagens para medição dos desgastes.

## 5.1 Análise dos resultados da rugosidade em relação ao comprimento de corte

### 5.1.1 Fluido Abundante

Os gráficos a serem apresentados são referentes aos ensaios realizados com a aplicação do fluido de corte em abundância, a partir dos quais foi analisado o comportamento da rugosidade "Ra" e "Ry" em relação ao comprimento de corte, a velocidade de corte e o avanço, estes últimos foram os parâmetros variados.

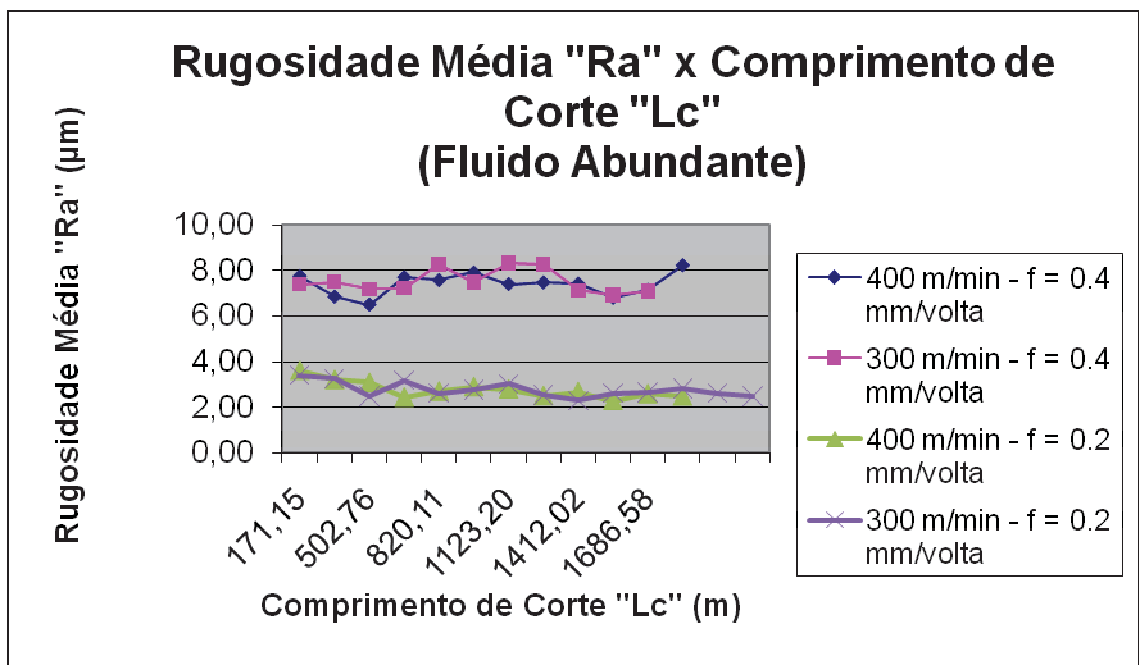


Figura 10 - Resultados de rugosidade "Ra" em relação ao comprimento de corte "Lc", da usinagem da liga AA 7075 sob condição de fluido de corte abundante.

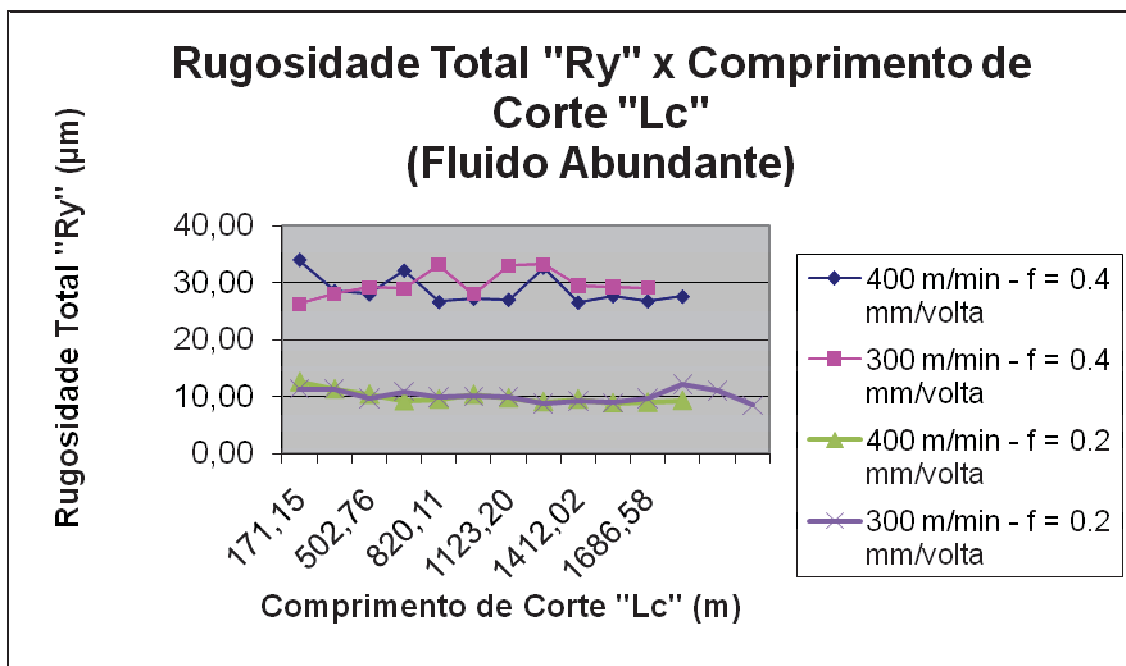


Figura 11 - Resultados de rugosidade "Ry" em relação ao comprimento de corte "Lc", da usinagem da liga AA 7075 sob condição de fluido de corte abundante.

Como se observa nas Figuras 9 e 10, podemos perceber que tanto a rugosidade média, "Ra", como a rugosidade total, "Ry", não sofrem grande influência da velocidade de corte, pois para as velocidades de corte de 300 e 400 m/min, as rugosidades médias e totais obtidas apresentaram valores bem próximos uma da outra. Observam-se apenas pequenas variações da curva no decorrer dos ensaios, porém a amplitude dessas oscilações é explicada através do fenômeno de vibração do sistema máquina-ferramenta-dispositivo de fixação-peça que, dependendo da velocidade de corte, pode ser mais forte ou mais fraca, de acordo com a rigidez do sistema.

Porém quando analisadas as curvas que possuem a mesma velocidade, mas para diferentes avanços pode-se verificar que os resultados demonstram uma grande diferença com relação aos valores de rugosidade obtidos. O corpo de prova submetido ao menor avanço ( $f = 0.2$  mm/volta) registrou os menores valores de rugosidade como se era de esperar, pois possui um valor de avanço típico de operações de acabamento, que visa obter superfícies com um bom acabamento superficial.

### 5.1.2 Usinagem á Seco

Abaixo se encontram os gráficos referentes aos ensaios realizados sem a aplicação do fluido de corte, onde também é analisado o comportamento da rugosidade "Ra" e "Ry" em relação ao comprimento de corte, quando se varia a velocidade de corte e o avanço.

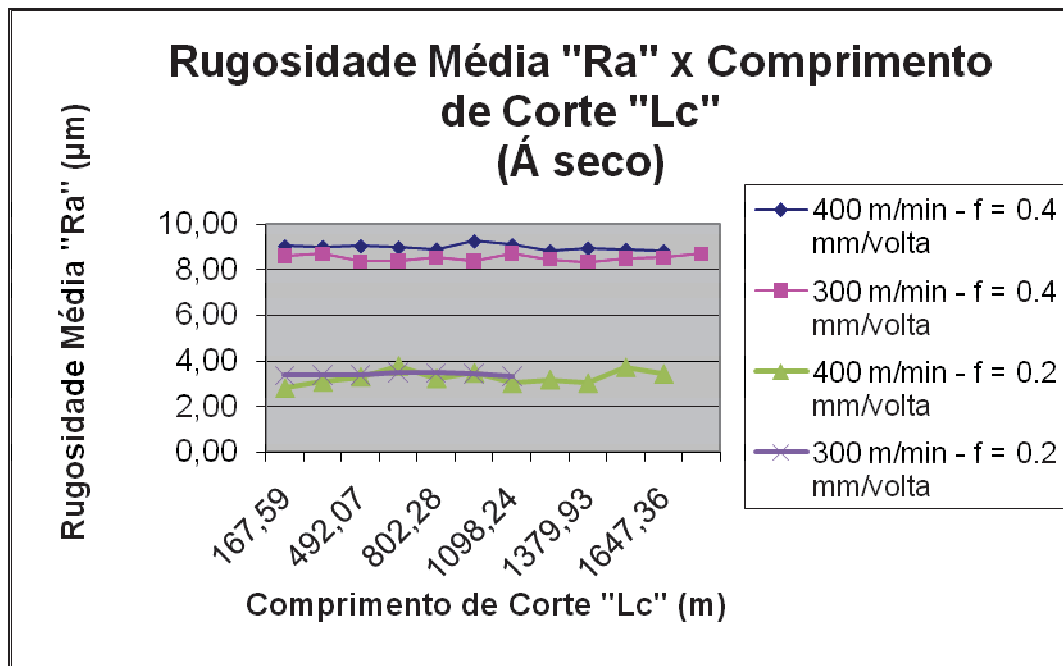


Figura 12 - Resultados de rugosidade "Ra" em relação ao comprimento de corte "Lc", da usinagem da liga AA 7075 sem aplicação de fluido de corte.

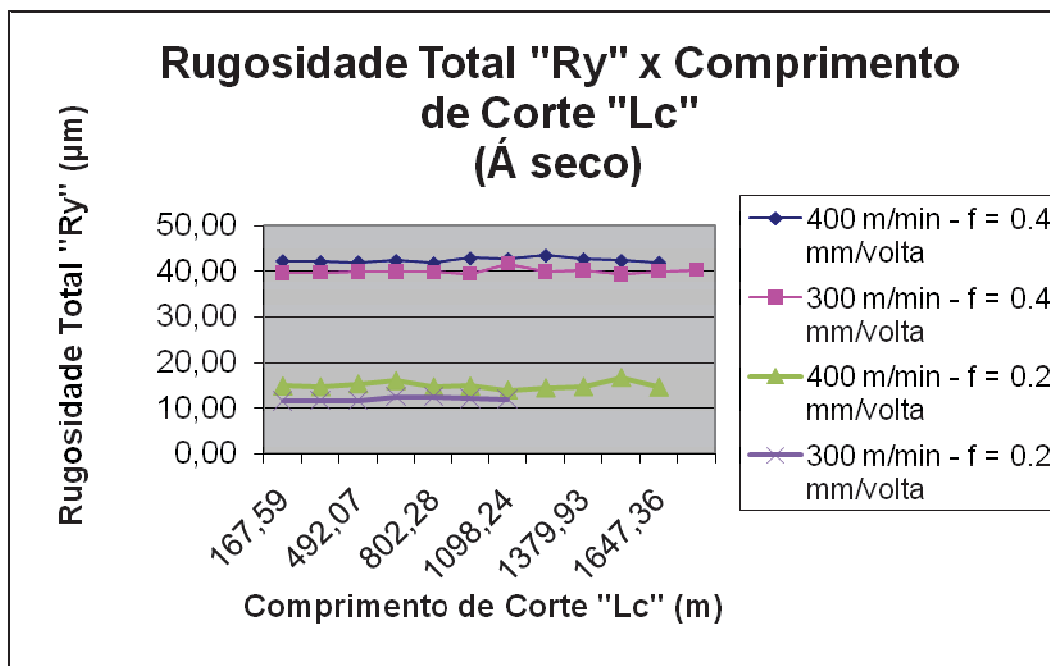


Figura 13 - Resultados de rugosidade "Ry" em relação ao comprimento de corte "Lc", da usinagem da liga AA 7075 sem aplicação de fluido de corte.

Assim como nos ensaios realizados com fluido abundante pode-se observar através das Figuras 11 e 12, que os ensaios realizados sem fluido também não apresentam variação das rugosidades média e total com a velocidade, porém apresentam grande variação da rugosidade quando variamos o avanço.

### 5.1.3 Mínima Quantidade de Fluido (MQF)

As Figuras 13 e 14 são referentes às rugosidades obtidas nos ensaios quando aplicado o método da Mínima quantidade de fluido (MQF), onde se pode notar que algumas curvas apresentam pequenas variações no decorrer dos ensaios, porém isto se deve ao fenômeno de vibração do sistema máquina-ferramenta-dispositivo.

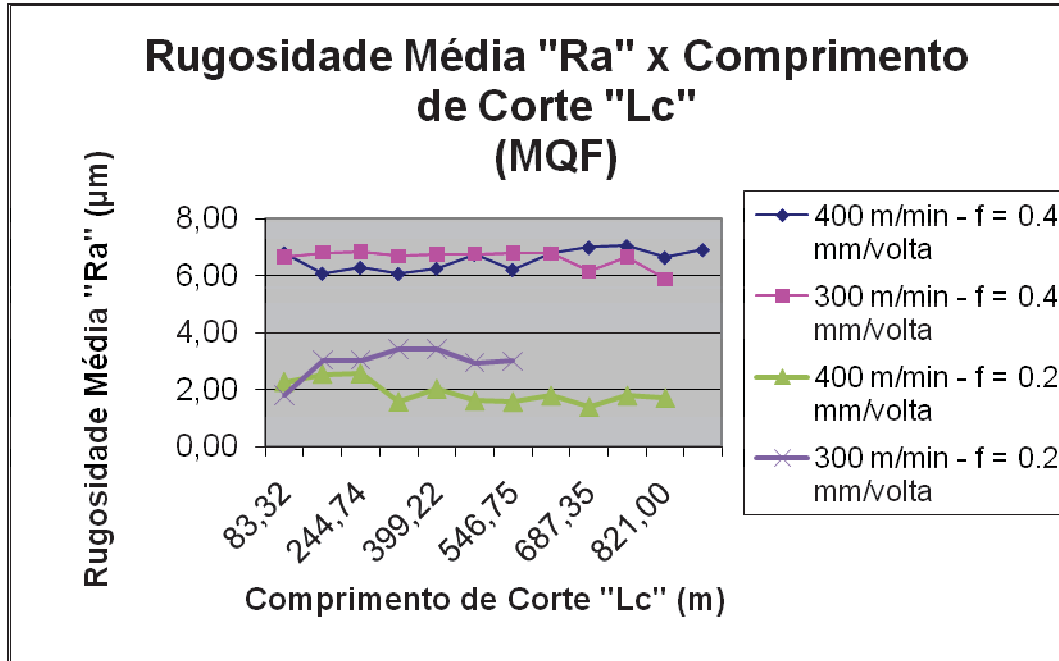


Figura 14 - Resultados de rugosidade média "Ra" em relação ao comprimento de corte "Lc", da usinagem da liga AA7075 com uso do método da Mínima quantidade de fluido (MQF).

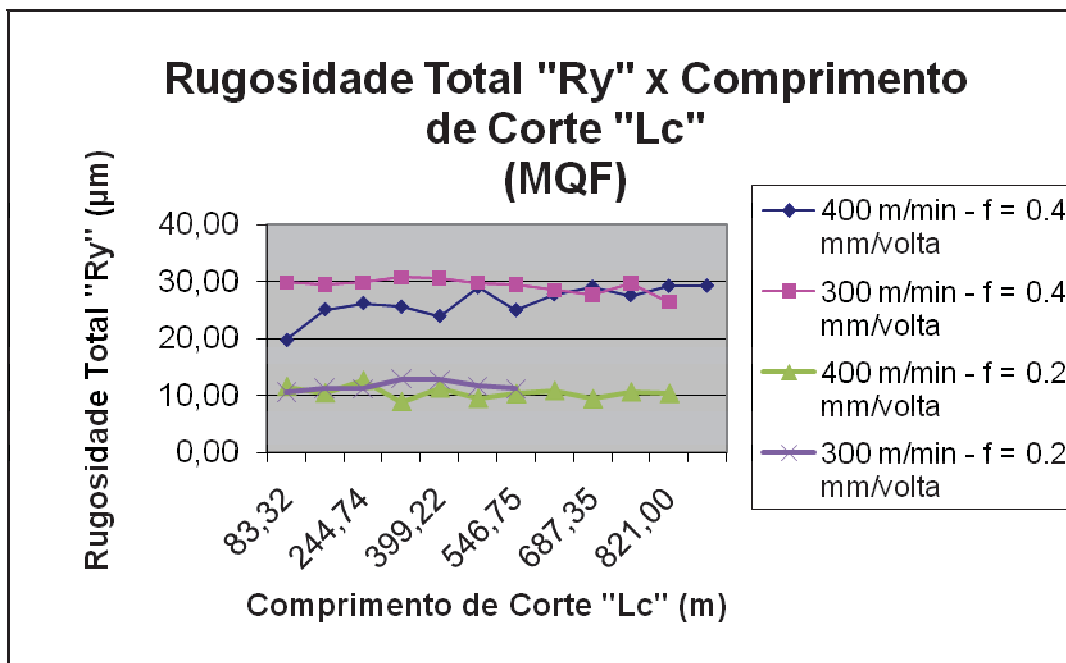


Figura 15 - Resultados de rugosidade total "Ry" em relação ao comprimento de corte "Lc", da usinagem da liga AA 7075 com uso do método da Mínima quantidade de fluido (MQF).

Por meio destes gráficos nota-se que assim como nos ensaios com fluido abundante, e sem fluido, o método da mínima quantidade possui interferência do



avanço nas rugosidades obtidas, e apresenta uma rugosidade ligeiramente menor do que a obtida pelos outros métodos, como será demonstrado a seguir.

#### 5.1.4 Comparação dos Métodos

As Figuras 16 e 17 apresentam os gráficos com as Rugosidades médias “Ra” e total “Ry” pelo comprimento de corte “Lc”, quando comparados os três métodos utilizados neste trabalho, os quais se deseja analisar como influenciam a liga em questão.

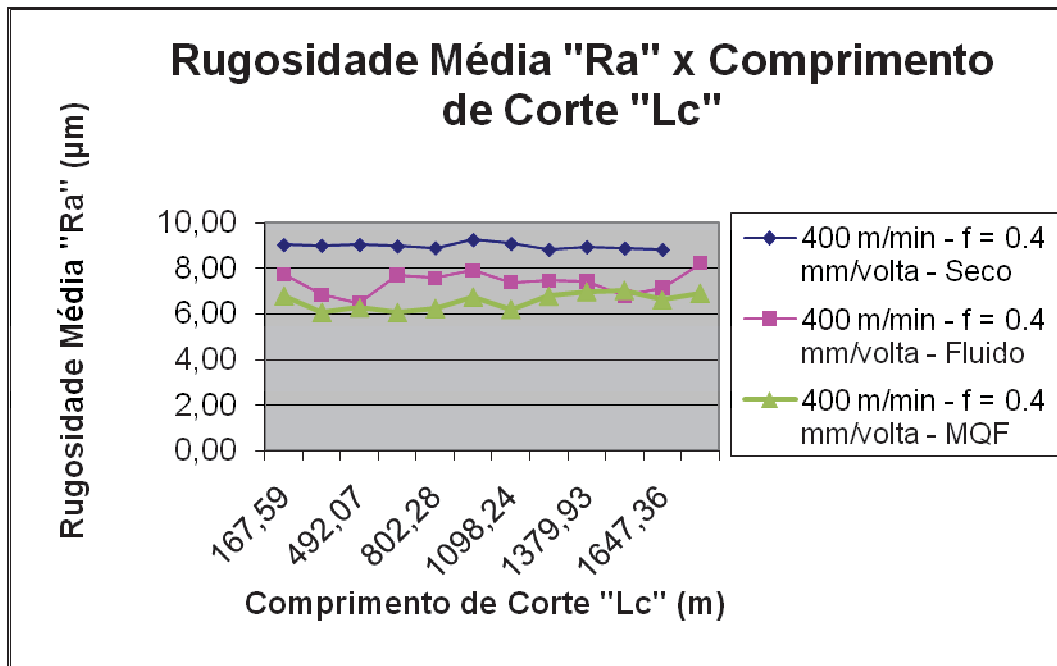


Figura 16 - Resultados de rugosidade média “Ra” em relação ao comprimento de corte “Lc”, dos vários métodos empregados na usinagem da liga AA7075

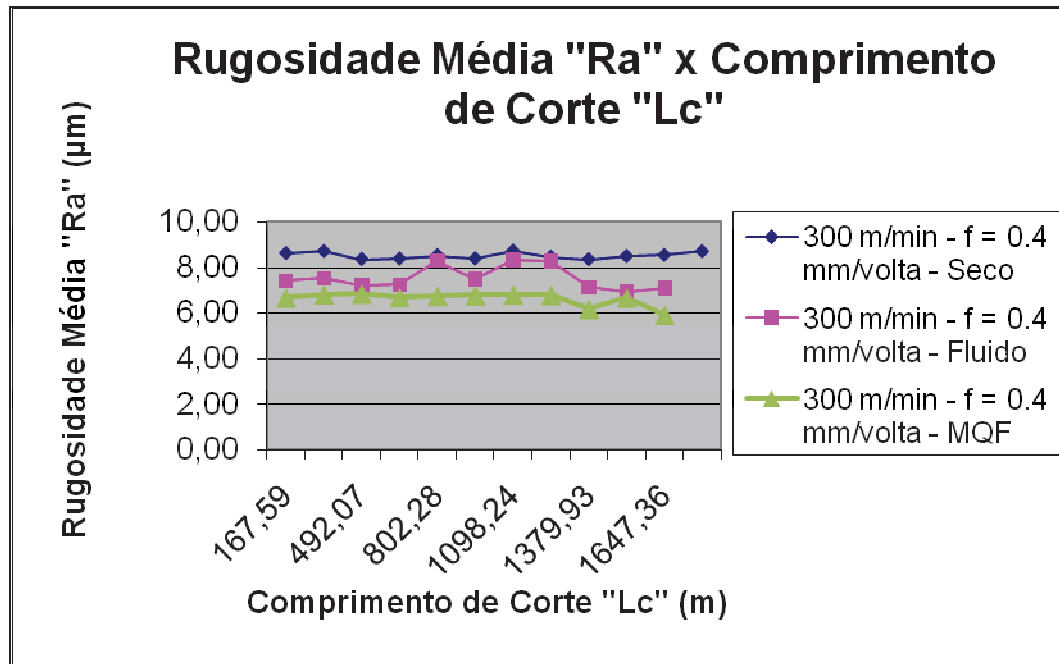


Figura 17 - Resultados de rugosidade média "Ra" em relação ao comprimento de corte "Lc", dos vários métodos empregados na usinagem da liga AA7075.

Como se pode perceber nas Figuras 16 e 17, quando utilizado um avanço de 0,4 mm/volta, a técnica de mínima quantidade de fluido (MQF) se mostrou mais eficaz, tanto para a velocidade de 300 como de 400 m/min. A técnica de fluido abundante se mostrou melhor que a não utilização do fluido, apesar de em alguns pontos elas apresentarem quase os mesmos valores para rugosidade.

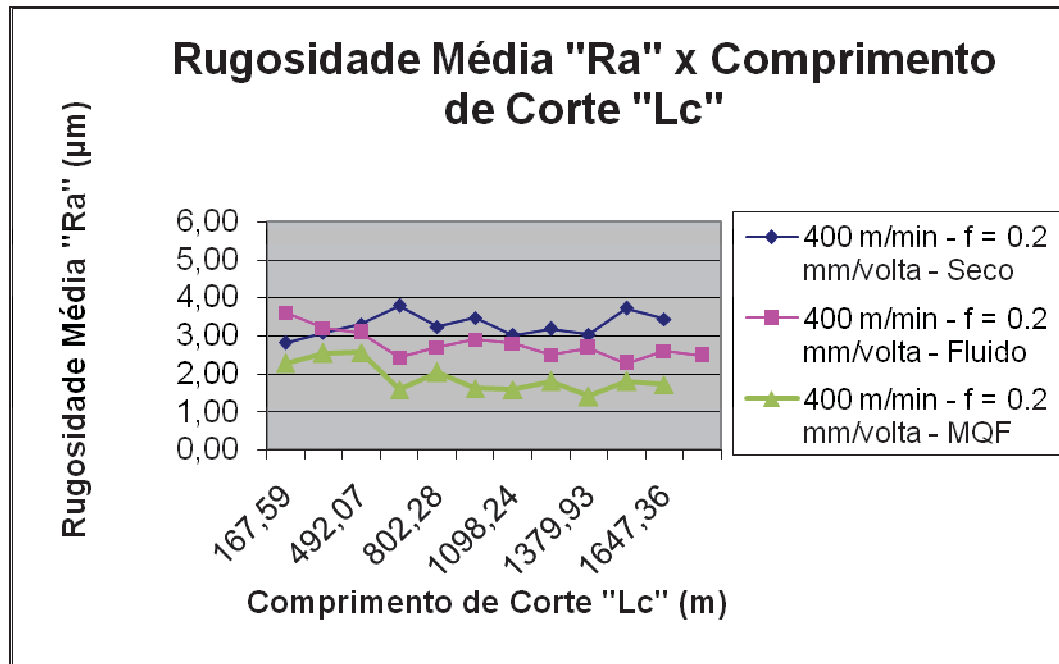


Figura 18 - Resultados de rugosidade média "Ra" em relação ao comprimento de corte "Lc", dos vários métodos empregados na usinagem da liga AA7075

A Figura 18 mostra que durante o processo de usinagem usando  $V_c$  400m/min e avanço de 0,2mm/volta, houve uma certa variação da rugosidade, fato este que provavelmente se deve ao fenômeno de vibração do sistema máquina-ferramenta-dispositivo. Porém assim como nas Figuras 16 e 17 ele demonstra a maior eficácia do método da mínima quantidade de fluido (MQF), que apresenta os melhores valores de rugosidade quando são comparados os três métodos estudados.

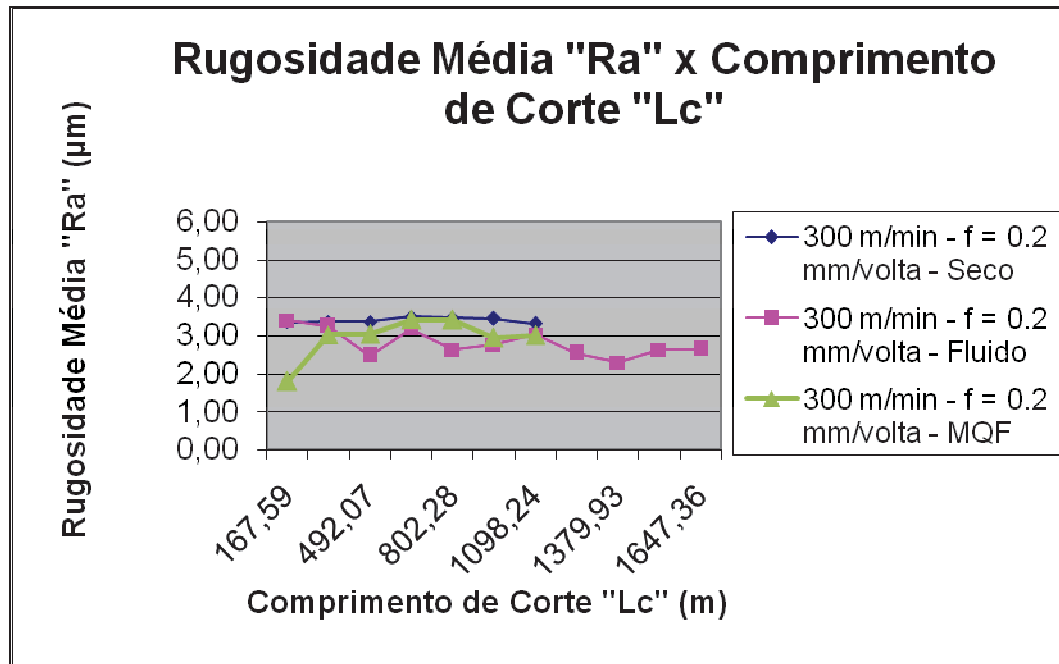


Figura 19 - Resultados de rugosidade média "Ra" em relação ao comprimento de corte "Lc", dos vários métodos empregados na usinagem da liga AA7075

Já na Figura 19, quando utilizados os parâmetros  $V_c = 300$  m/min, avanço = 0,2 mm/min, pode-se perceber que os métodos fornecem quase os mesmos resultados para rugosidade média, porém o método que utiliza fluido abundante apresenta valores ligeiramente melhores.

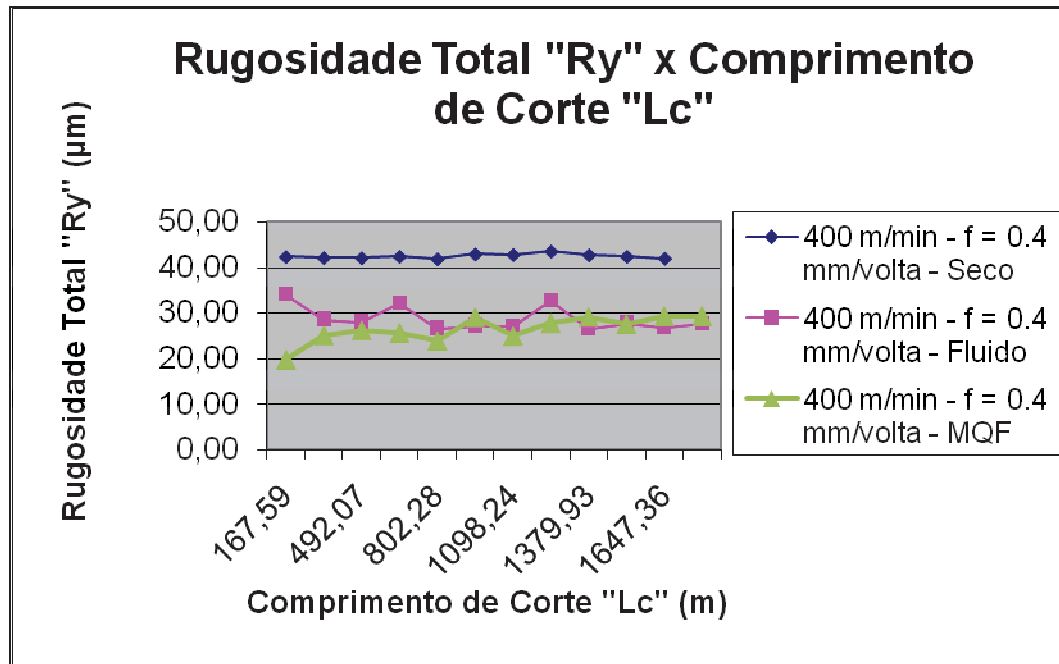


Figura 20 - Resultados de rugosidade total "Ry" em relação ao comprimento de corte "Lc", dos vários métodos empregados na usinagem da liga AA7075

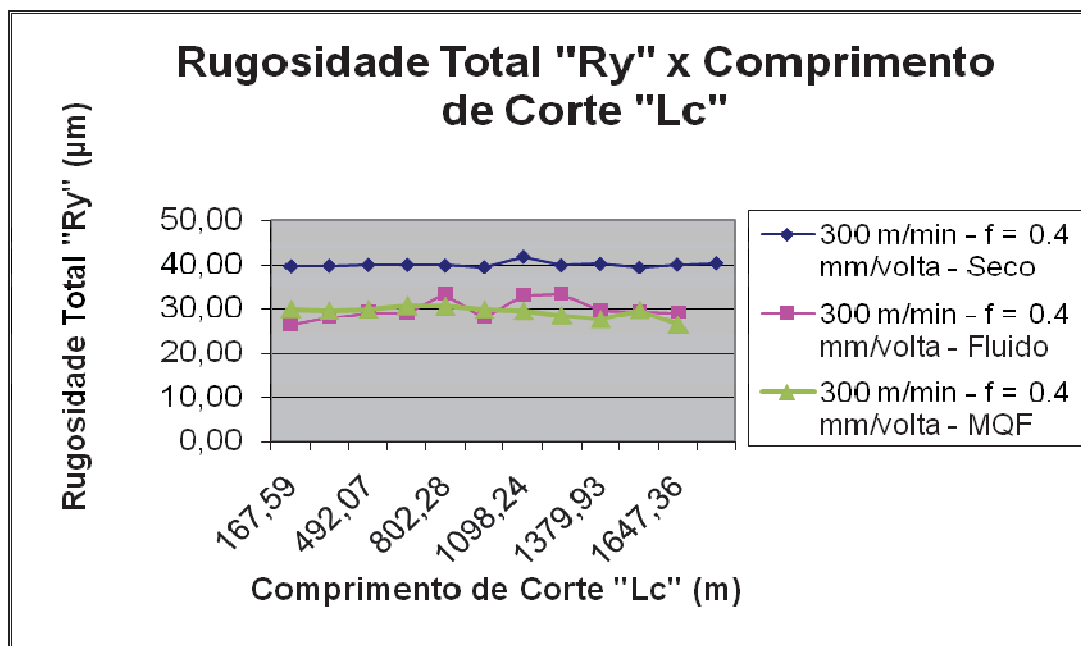


Figura 21 - Resultados de rugosidade total "Ry" em relação ao comprimento de corte "Lc", dos vários métodos empregados na usinagem da liga AA7075

Nas Figuras 20 e 21, é possível perceber que, quando não se utiliza o fluido de corte, a rugosidade total "Ry" é bem superior aos métodos que utilizam fluidos.

Quando se compara os métodos de mínima quantidade de fluido e o com fluido abundante pode-se perceber que eles fornecem valores bem próximos para a rugosidade total, o que demonstra que o método MQF tem suas vantagens, já que utiliza uma menor quantidade de fluido.

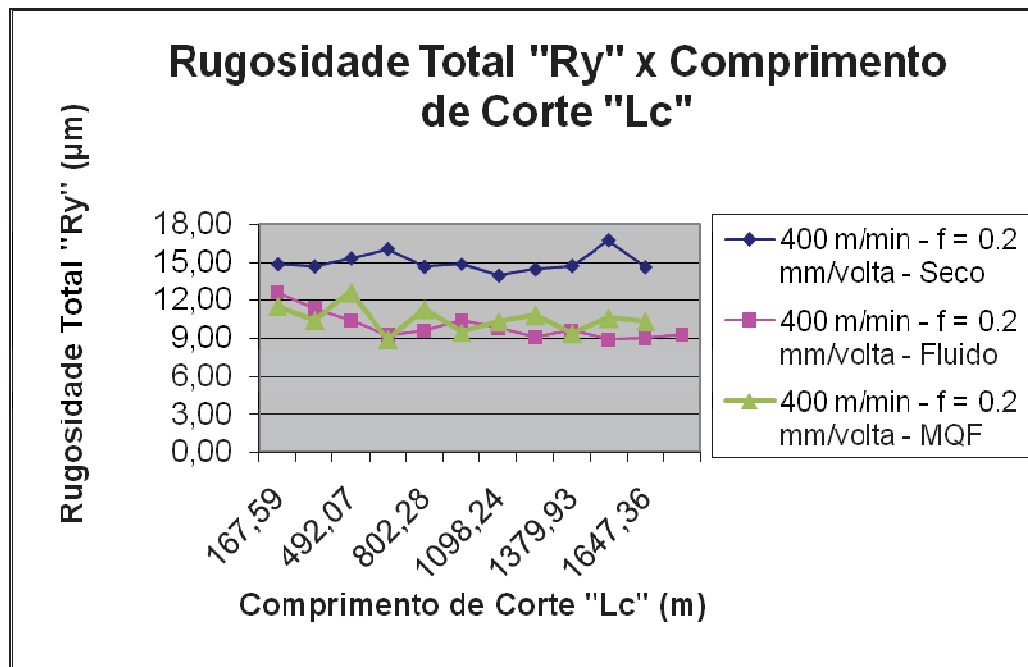


Figura 22 - Resultados de rugosidade total "Ry" em relação ao comprimento de corte "Lc", dos vários métodos empregados na usinagem da liga AA7075

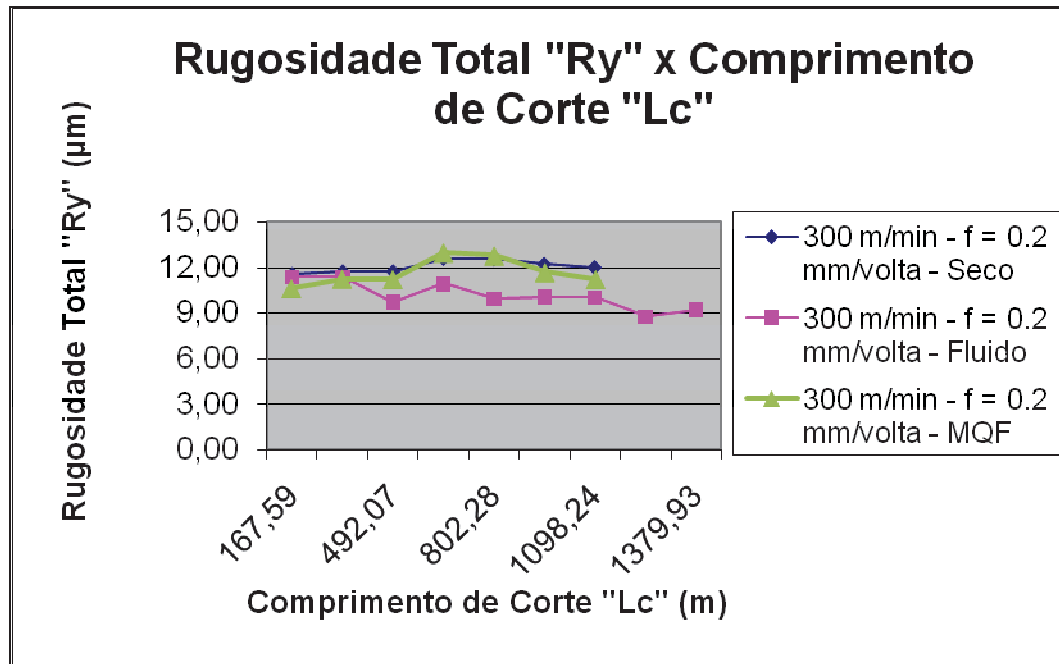


Figura 23 - Resultados de rugosidade total "Ry" em relação ao comprimento de corte "Lc", dos vários métodos empregados na usinagem da liga AA7075

Ao se analisar as Figuras 22 e 23, novamente percebe-se que ao não utilizar fluido de corte obtêm-se rugosidades maiores do que ao utilizar os outros dois métodos em estudo neste trabalho. E também se percebe que o método da mínima quantidade de fluido (MQF) apresenta valores bem próximos do método de fluido abundante quando utilizado uma  $V_c = 400$  m/min, e um avanço de 0,2 mm/volta. Já ao se analisar as rugosidades obtidas com uma  $V_c = 300$  m/min e uma avanço de 0,2 mm/volta, percebe-se que com fluido abundante foram obtidos rugosidades relativamente melhores do que ao utilizar o MQF.

## 5.2 Análise do desgaste das ferramentas via microscopia óptica

Quando analisadas as ferramentas utilizadas nos ensaios, notou-se que as ferramentas têm pouco ou quase nenhum desgaste na aresta de corte mesmo tendo sido utilizadas para um comprimento de corte de quase 1000 m. Isto reflete a grande taxa de usinabilidade por grandes períodos de tempo na usinagem desta liga de alumínio.

Porém, na superfície principal de saída foi possível notar um desgaste de cratera, causado pelo atrito entre ferramenta e cavaco. As figuras 24, 25 e 26 apresentam os desgastes gerados nas ferramentas para os diferentes métodos e parâmetros utilizados.

Porém como se pode observar na Figura 19 ( $V_c = 300\text{m/min}$ ;  $f = 0,4\text{mm/volta}$ ) houve um depósito de material da peça de alumínio na ferramenta, provavelmente devido á afinidade do material da ferramenta com o material usinado, que esta demonstrada pela parte cinza encontrada na ponta da ferramenta.

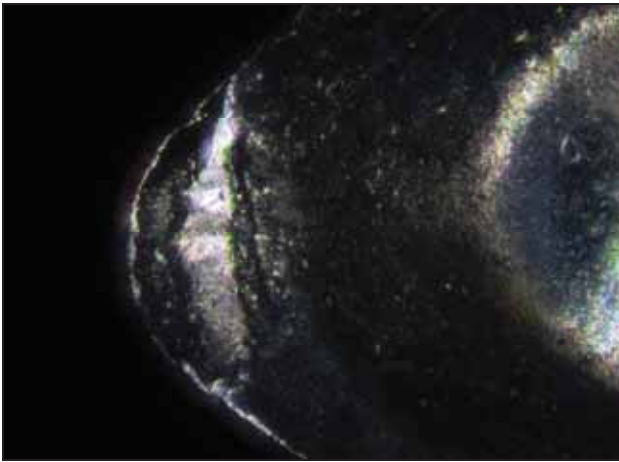

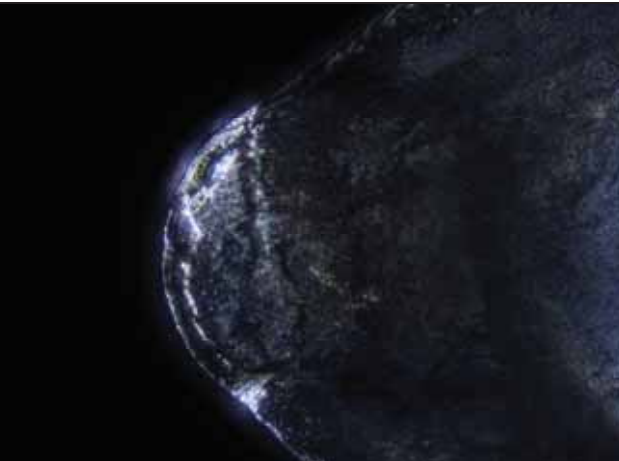
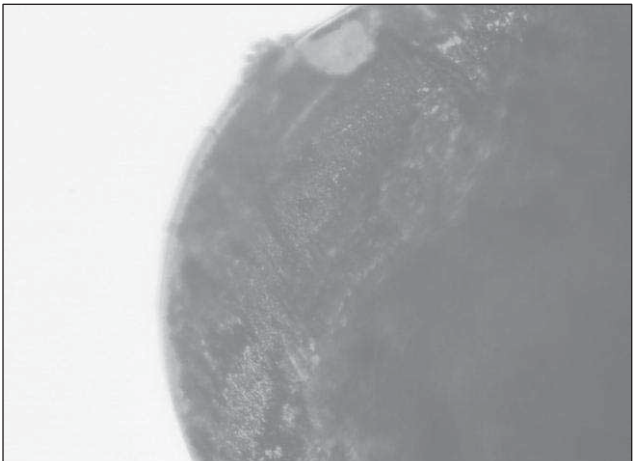
	
$V_c = 400 - f = 0.4 \text{ mm/volta.}$	$V_c = 300 - f = 0.4 \text{ mm/volta.}$
	
$V_c = 400 - f = 0.2 \text{ mm/volta.}$	$V_c = 300 - f = 0.2 \text{ mm/volta.}$

Figura 24 – Desgastes das Ferramentas de corte usadas nos ensaios com fluido abundante



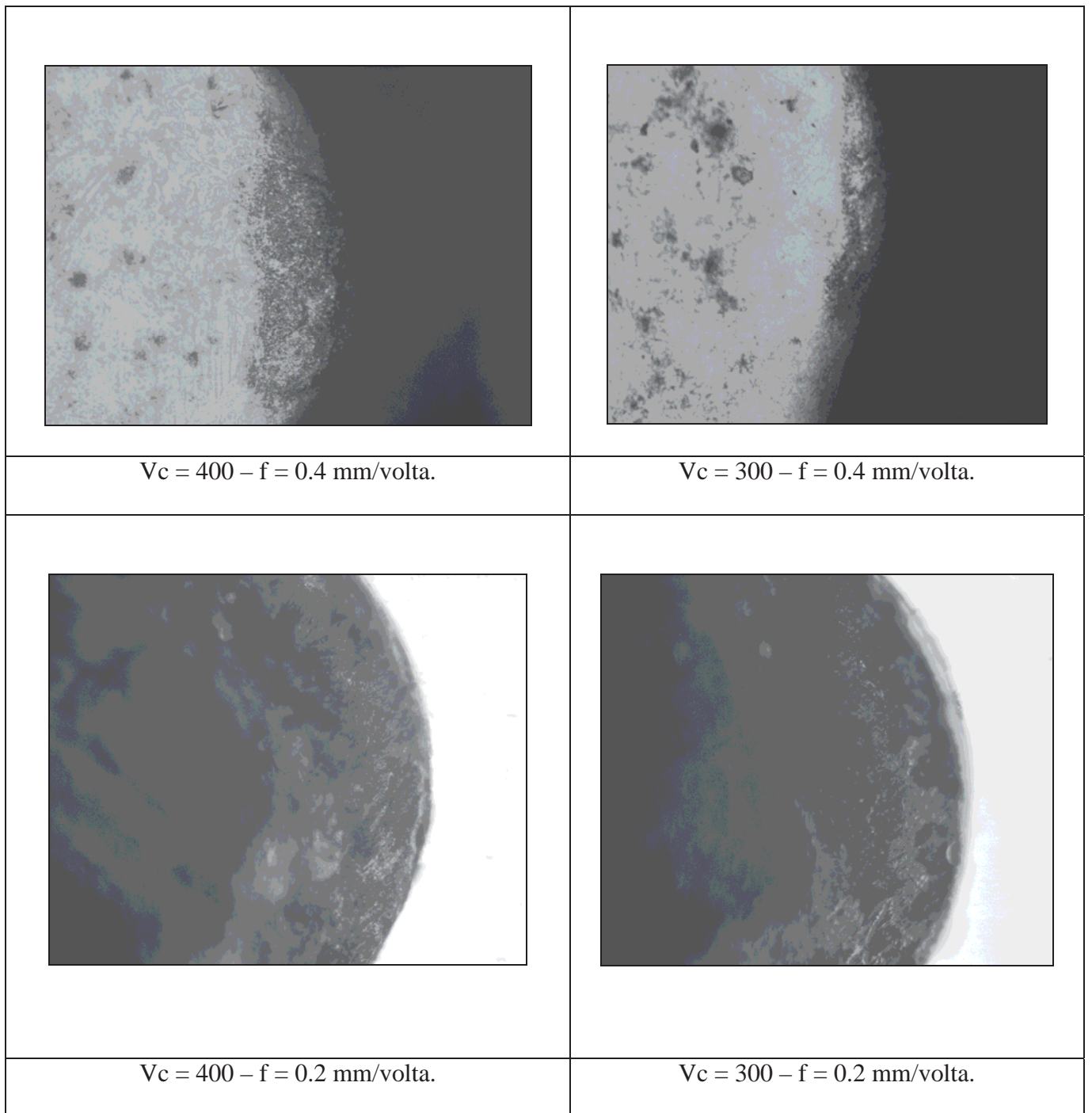


Figura 25 – Desgastes das Ferramentas de corte usadas nos ensaios sem fluido de corte

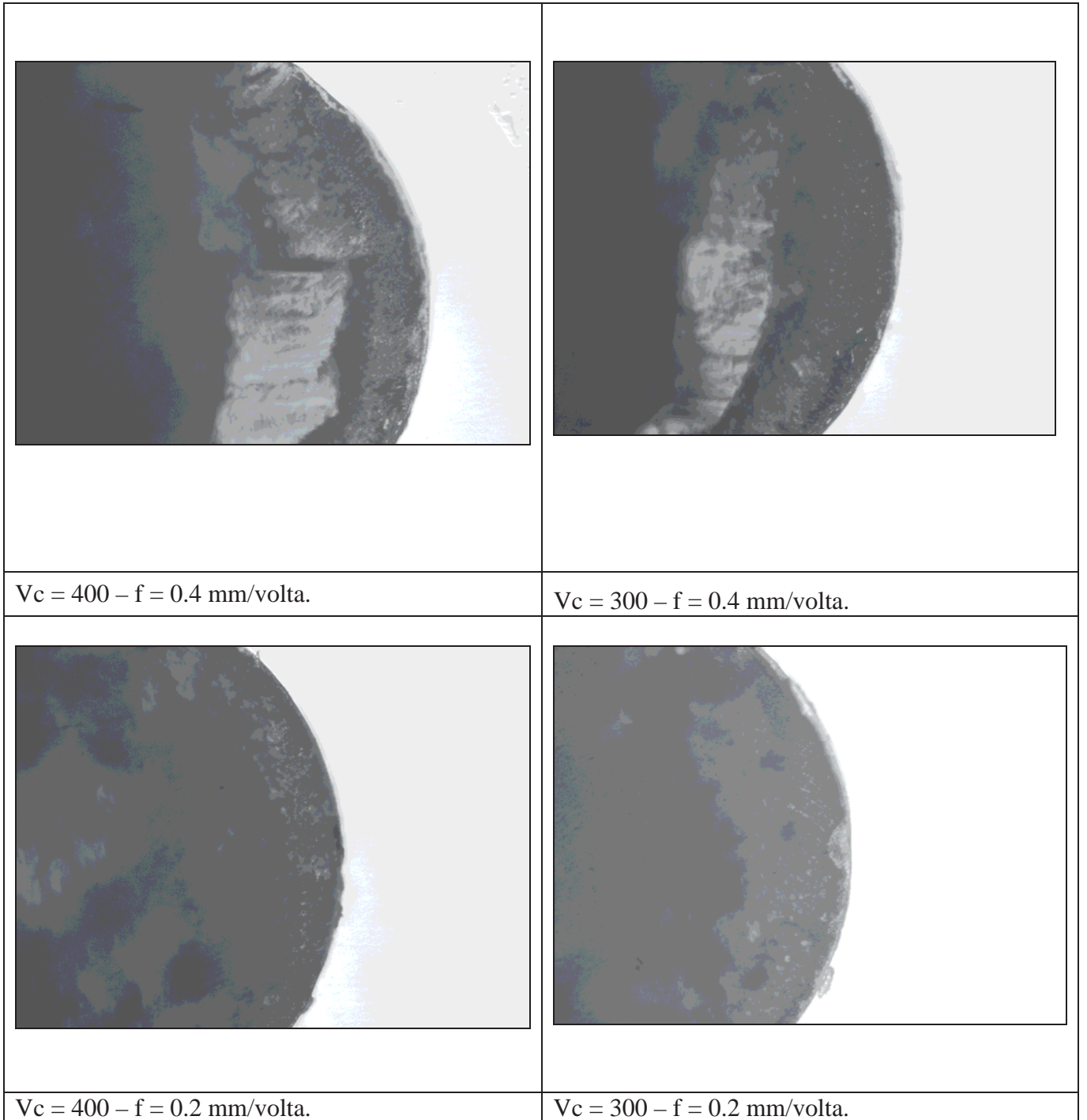


Figura 26 – Desgastes das Ferramentas de corte usadas nos ensaios com Mínima Quantidade de fluido (MQF)

### 5.3 Análises dos cavacos formados durante o processo de usinagem

Neste trabalho foram analisados os tipos de cavacos formados durante os processos de usinagem, nas condições de fluido abundante, sem aplicação de fluido e também pelo método da Mínima Quantidade de Fluido (MQF), e as prováveis causas da formação daqueles. Como se observa nas Figuras 27, 28 e 29, pode-se perceber que as velocidades utilizadas nestes ensaios não influenciaram nos tipos de cavacos obtidos uma vez que são velocidades bem próximas uma da outra 400 e 300m/min.

Porém, quando analisado a influência dos avanços, é possível notar que este parâmetro interfere na forma dos cavacos, pois em todos os ensaios realizados seja com ou sem fluido houve diferença na forma de dos cavacos devido à variação do avanço.

Como pode-se ver nas Figuras 27, 28 e 29, quando utilizado um alto valor de avanço ( $f = 0,4$  mm/volta), que corresponde a um valor típico de operações de desbaste, foram obtidos cavacos do tipo “fita” tendendo ao helicoidal; porém são quebradiços, provavelmente devido às altas forças de corte geradas pelo uso de um alto valor de avanço.

Já quando utilizados um avanço menor ( $f = 0,2$  mm/volta) que corresponde a valores típicos de avanços utilizados para operações de acabamento, foram obtidos cavacos do tipo helicoidal, menos quebradiços.

Também foi possível notar que para as operações sem fluido e utilizando MQF, os cavacos são mais quebradiços ( $V_c = 300$  m/min;  $f = 0,4$ mm/volta), provavelmente devido às altas temperaturas na região de formação do cavaco.




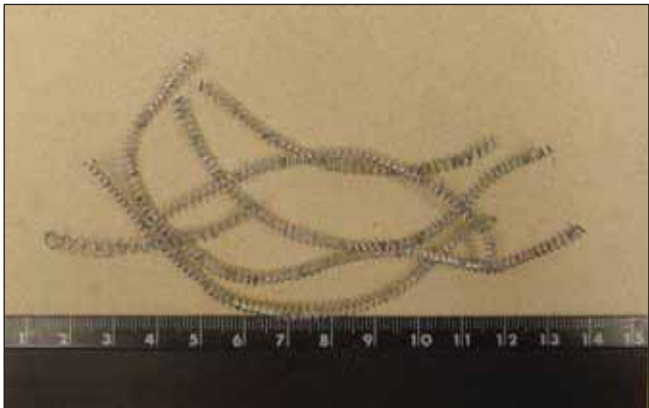
	
$V_c = 400 \text{ m/min}, f = 0.4 \text{ mm/volta.}$	$V_c = 300 \text{ m/min}, f = 0.4 \text{ mm/volta.}$
	
$V_c = 400 \text{ m/min}, f = 0.2 \text{ mm/volta.}$	$V_c = 300 \text{ m/min}, f = 0.2 \text{ mm/volta.}$

Figura 27 – Imagem dos cavacos formados no processo de usinagem com fluido de corte abundante.




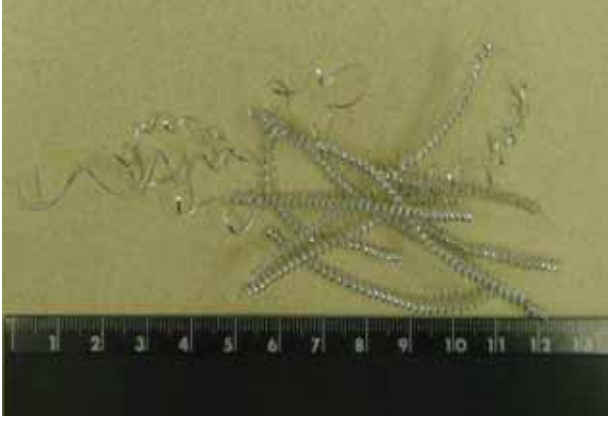
	
$V_c = 400 \text{ m/min}, f = 0.4 \text{ mm/volta.}$	$V_c = 300 \text{ m/min}, f = 0.4 \text{ mm/volta.}$
	
$V_c = 400 \text{ m/min}, f = 0.2 \text{ mm/volta.}$	$V_c = 300 \text{ m/min}, f = 0.2 \text{ mm/volta.}$

Figura 28 – Imagem dos cavacos formados nos processos de usinagem sem a utilização de fluido de corte.



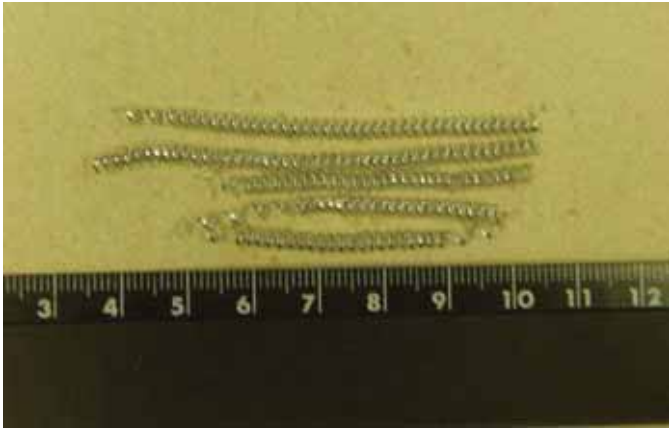
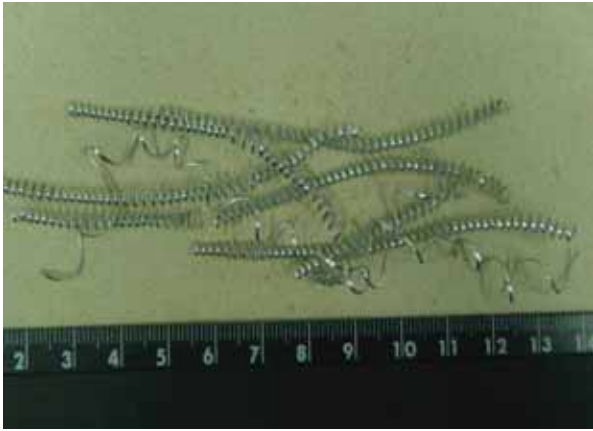
	
$V_c = 400 \text{ m/min}, f = 0.4 \text{ mm/volta.}$	$V_c = 300 \text{ m/min}, f = 0.4 \text{ mm/volta.}$
	
$V_c = 400 \text{ m/min}, f = 0.2 \text{ mm/volta.}$	$V_c = 300 \text{ m/min}, f = 0.2 \text{ mm/volta.}$

Figura 29 – Imagem dos cavacos formados nos processos de usinagem com método da Mínima quantidade de fluido (MQF).

## 6 CONCLUSÕES

Com relação aos ensaios realizados podemos ressaltar que a velocidade de corte não demonstrou grande influência sobre a rugosidade superficial das peças. Pois quando variamos as velocidades de corte, obtivemos rugosidades médias e totais com valores bem próximos uma da outra, onde apresentam uma pequena oscilação que pode ser explicada através do fenômeno de vibração do sistema máquina-ferramenta-dispositivo de fixação-peça que, dependendo da velocidade de corte, pode ser mais forte ou mais fraca, de acordo com a rigidez do sistema.

Por outro lado, também foi possível observar, como era de se esperar, que o avanço tem uma grande influência sobre a rugosidade superficial, e também exerce influência na forma dos cavacos.

Conforme já mostrado neste trabalho, por meio da análise dos dados retirados de processos de usinagem, com a utilização de três métodos diferentes de aplicação de fluido, o método com fluido abundante, a mínima quantidade de fluido, e sem aplicação de fluido de corte, foi possível concluir que os métodos com fluido (abundante e MQF) forneceram valores bem mais satisfatórios do que os valores fornecidos pelo método sem a utilização de fluido.

Cabe ressaltar que o método MQF forneceu valores de rugosidades média e totais bem próximas e muitas vezes melhores do que o método com fluido abundante, o que nos remete ao fato de que esta técnica pode ser muita vantajosa já que utiliza uma quantidade de fluido bem menor, acarretando vantagens financeiras e ambientais.

## 7 BIBLIOGRAFIA

AA – Aluminum association, 2001. Aluminum offers Structural Strength at Decreased Weight. Disponível: site URL: [www.aluminum.org](http://www.aluminum.org)

ABAL – Associação Brasileira do Alumínio, 2000. Produção e reciclagem de latas. Disponível: site ABAL. URL: [www.abal.org.br](http://www.abal.org.br)

Bresciani Filho, E. Seleção de Metais não Ferrosos. Campinas – SP: Editora da UNICAMP, 1992.

Bresciani Filho, E. e Gomes, M. R. propriedades e usos de metais não-ferrosos. São Paulo: Associação brasileira de metais (ABM). Édile serviços gráficos e Editora Ltda, 1976.

Camargo, J. A. M. Propagação de trinca por fadiga na liga de alumínio 7475-T761 submetida a carregamentos de amp - DM 1995.

Carvalho, A. L. M. Comportamento mecânico das ligas de alumínio 7010-T74 e 7050-T7451 de aplicação aeronáutica. Guaratinguetá - SP: Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá: FEG - UNESP, 1999. Dissertação (mestrado).

Coutinho, T.A. Metalografia de não-ferrosos: Análise e prática. São Paulo: Editora Blutcher, 1980.

Cunha, E. A. (2004). Estudo da usinagem por torneamento da liga ASTM AA-7050 T7451. Lorena: Faculdade de Engenharia Química de Lorena – FAENQUIL. 84p.

Davis, J. R. (Ed.) Properties of aluminum and aluminum alloys. In: ASM specialty handbook: Aluminum and Aluminum alloys. Metals park, Ohio: Asm International, 2002.

Diniz, A. E., Marcondes, F. C., Coppini N. L., 1999. Tecnologia da usinagem dos materiais. São Paulo: Editora M.M.



Dutra, C. A. M. Estudo da corrosão das ligas Al 2024 e Al 7050 em soluções de NaCl contendo nitrato e nitrito - DM 2002

Ferraresi, D. Fundamentos da Usinagem dos Metais. 1ª ed.; São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1977.

Guimarães, V. A. Estudo comparativo da deformação a frio sobre as propriedades mecânicas de uma liga de alumínio - DM 1994.

Hatch, John E. Aluminum: properties and physical metallurgy

Heisel, U.; Lutz, D.; Wassmer, R.; Walter, U. (1998). A técnica da quantidade mínima de fluidos e suas aplicações nos processos de corte”. Revista Máquinas e Metais, nº 386, p. 22-38.

Hunsicker, H. Aluminum. In: BOYER, H. E.; GALL, T. L. Metal handbook. Desk ed. Metals Park, Ohio: ASM, 1992

Kaufman, J. G. (John Gilbert), 1931- Properties of aluminum alloys

Machado, A.R.; Diniz, A.E. Corte a seco, com mínima quantidade de fluido e com fluido em abundância: uso, aplicações, vantagens e desvantagens. Usinagem 2000. Feira e Congresso. Anais em CD, setembro de 2000.

Mason, F. Usinando a seco... ou quase a seco. Revista Máquinas e Metais, São Paulo, vol. 37, n. 424, pp 160-173, mai. 2001.

Mazzolani, F.M. Aluminum Alloy Structures, London: E & FN, 2ed, 1995.

Metals Handbook. Ninth Edition, v16, 1989.

Novaski, O. e Dörr, J. Usinagem sem refrigeração. Revista Máquinas e Metais, São Paulo, vol. 35, n. 398, p 18-27, mar. 1999.

Pereira, M. C. Efeito do tratamento térmico na resistência à corrosão das ligas de alumínio 7010, 7050 e 74 - DM 2002.

Ribeiro, M.V.; Moreira, L.T.S. e Santos, R.G. The influence of coolant application on AA7075 turning. In: European Congress on Aluminium Alloys – ECAA 2011, Bremen/Alemanha, out. 05-07, 2011, ECAA-2011 Program and Abstract pp. 231. DGM.

Shreve, R. N.; Brink Jr., Indústrias eletrolíticas. In: Indústrias de processos químicos. 4. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1980.

Weingaertner, W. L., Schroeter, R. B., Barba Junior, D. J. e Kish, M. Qualidade superficial e formação de cavacos na usinagem de Al e Cu. Máquinas e Metais, p.82-89, Maio 1994.

Weingaertner, W.L.; Schroeter, R.B. Tecnologia de usinagem do alumínio e suas ligas. 2.ed. São Paulo: Alcan – Alumínio do Brasil, 1991.

Zangrandi, A. Alumínio e suas ligas: fundamentos metalúrgicos e tecnológicos. – Lorena: Instituto Santa Teresa, 2008.