

ANDERSON CARMO DIOGENES

ESTUDO DA USINAGEM POR TORNEAMENTO DE LIGAS DE ALUMÍNIO

Trabalho de graduação apresentado para a
UNESP – Universidade Estadual Paulista
“Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de
Engenharia – Campus de Guaratinguetá,
para a conclusão do curso de Engenharia
Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro

Guaratinguetá

2011

D591e	Diógenes, Anderson Carmo Estudo da usinagem por torneamento de ligas de alumínio / Anderson Carmo Diógenes – Guaratinguetá : [s.n], 2011. 69 f : il. Bibliografia: f. 66 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011. Orientador: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro 1. Usinagem 2. Alumínio 3. Fluido de Corte I. Título CDU 621.9
-------	---

ESTUDO DA USINAGEM POR TORNEAMENTO DE LIGAS DE ALUMÍNIO

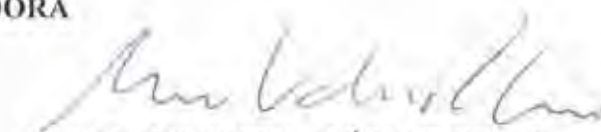
ANDERSON CARMO DIOGENES

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

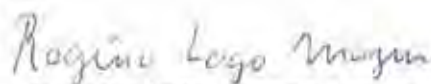
**APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Prof. Dr. Mauro Hugo Mathias
Coordenador

BANCA EXAMINADORA


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


Prof. Dr. MARCELINO PEREIRA DO NASCIMENTO
UNESP-FEG


Dr. ROGÉRIO LAGO MAZUR
UNESP-FEG

dezembro de 2011

DADOS CURRICULARES

ANDERSON CARMO DIOGENES

NASCIMENTO	13.08.1986 – SÃO JOSÉ DOS CAMPOS/ SP
FILIAÇÃO	Jurandi Bessa Diogenes Maria Antonia do Carmo Diogenes
2002/2004	Colégio Engenheiro Juarez Wanderley Instituto EMBRAER de Educação e Pesquisa
2006/2011	Curso de Graduação Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá – Universidade Estadual Paulista “Julio Mesquita Filho”

Dedicatória

de modo especial aos meus pais Jurandi e Maria Antonia por
quem tenho infinda admiração, pelo constante apoio e
incentivo que sempre me deram ao longo de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por me conceder o privilégio de estudar nesta instituição de qualidade, por me proporcionar oportunidades de crescimento pessoal e profissional durante este período e por me dar sempre saúde, esperança e fé, o que nos caminhos diversos me guiou com sabedoria.

Agradeço aos meus pais Jurandi e Maria Antonia, pelo apoio e incentivo ininterruptos que me deram ao longo de toda minha vida e que, em momento algum, faltaram durante este período de faculdade.

Agradeço também a todos os amigos conquistados durante estes 6 anos de vivência em Guaratinguetá – na faculdade, os de república e aqueles que apesar de não serem parte integrante da república também se tornaram membros desta grande família, com quem por diversas vezes precisei contar com o apoio e também dei auxílio em momentos difíceis ao longo desta caminhada.

Ao meu orientador Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro, pelo empenho e dedicação para elaboração deste trabalho, bem como pelos conhecimentos transmitidos ao longo do curso.

Não poderia deixar de agradecer, finalmente, a todos aqueles que não foram nominalmente mencionados aqui, mas que fizeram e fazem parte do meu sucesso pela conclusão desta etapa de minha vida.

Epígrafe

"É melhor tentar e falhar,
que preocupar-se e ver a vida passar;
é melhor tentar, ainda que em vão,
que sentar-se fazendo nada até o final.
Eu prefiro na chuva caminhar,
que em dias tristes em casa me esconder.
Prefiro ser feliz, embora louco,
que em conformidade viver ..."

Martin Luther King

DIOGENES, A. C. **Estudo da usinagem por torneamento de ligas de alumínio**. 2011, 69f, Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

RESUMO

Os materiais não ferrosos possuem propriedades mecânicas, físicas e químicas que lhes propiciam posição consolidada no meio industrial. Neste contexto, encontram-se as ligas de alumínio que têm sido muito reconhecidas em diversas áreas da engenharia – principalmente nos setores automobilístico, aeronáutico e aeroespacial, devido às suas principais características, tais como baixa densidade, elevada resistência à corrosão, relação peso da estrutura / resistência do material favorável, dentre outras mencionadas no corpo deste estudo. O estudo em questão visa analisar o comportamento de ligas de alumínio de forma geral quando submetidas ao processo de usinagem por torneamento, exemplificando para tanto, as ligas de alumínio 6262 e 7050. Com este objetivo, a análise feita busca estudar os dados obtidos durante os ensaios de torneamento realizado em 3 passes, no que tange às rugosidades média (R_a) e total (R_y) – com a utilização de um rugosímetro portátil, bem como aos cavacos formados – através de inspeção visual, sob condições de aplicação de fluido de corte diferentes (a seco, fluido abundante e MQF – Mínima Quantidade de Fluido). Os resultados deste trabalho oferecem informações detalhadas da influência dos fluidos de corte na usinagem das ligas de alumínio em questão e das ligas de alumínio de forma geral quando submetidas a diferentes condições de usinagem. Desta forma, ficou evidenciado para a liga 6262, como melhor condição de usinagem, de forma geral, a aplicação do fluido refrigerante mediante técnica MQF. Já no que diz respeito aos resultados obtidos com a liga 7050, constatou-se a usinagem a seco como responsável pelos melhores resultados.

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

DIOGENES, A. C. **Study of the machining by turning of aluminium alloys.** 2011, 70f, Final Paper (Bachelor's Degree in Mechanical Engineering) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

ABSTRACT

The non-ferrous materials have got so many mechanical, physical and chemical advantageous properties so that is provided to them consolidated position in industry. In this context, aluminium alloys have been seen a lot on many applications of engineering areas – specially on automotive, aeronautical and aerospace due to their main properties such as low density, high corrosion resistance, favorable structure weight / material resistance relation, among others characteristics that are mentioned through this study. This study aims to analyze the aluminium alloys behavior on a general context when they are used on turning process, taking for examples the 6262 and 7050 aluminium alloys. In this way, the analysis studies the datas obtained during the turning tests realized on 3 steps each one; those datas are concerning the medium and total rugosities – obtained with the assistance of a portable Surface Roughness Finish Tester, as well as the chips obtained during the tests - visual analysis, and the cutting tools wear – with the assistance of an optical microscope, under different conditions of application of cutting fluids (dry machining, application of coolant in abundance and MQL – Minimum Quantity of Lubricant). The results concerning this study show detailed information about influence of cutting fluids on the machining by turning of the aluminium alloys related on this work and also about aluminium alloys in general when they are used on turning processes with different conditions from one another. By this way, it was evident the MQL technique is the best one for the 6262 alloy. However, for 7050 alloy, it was evident that the dry machining is responsible for the best results.

KEYWORDS: Machining, Aluminium, Cutting Fluid.

Lista de figuras

Figura 1: Representação esquemática de uma célula eletrolítica para redução da alumina (ZANGRANDI, 2008).....	20
Figura 2: Alumínio (WIKIPEDIA, 2011).....	21
Figura 3: Principais elementos de liga e classificação das ligas de alumínio.....	22
Figura 4: Cabos nus de alumínio	28
Figura 5: Refrigerador de motores.....	28
Figura 6: Pistões e blocos de motores	29
Figura 7: alumínio para indústria naval.....	29
Figura 8: alumínio na ind. Aeroespacial.....	29
Figura 9: Carroceria de alumínio.....	29
Figura 10: Exemplos de operações de usinagem com ferramentas de geometria definida; torneamento (a), fresamento (b), furação (c) e alargamento (d).....	32
Figura 11: Exemplos de operações de usinagem com ferramentas de geometria não definida; retificação (a), brunimento (b) e lapidação (c).	33
Figura 12: Geometria da ferramenta de corte por torneamento e suas principais características (UFSC, 2004).....	34
Figura 13: Detalhe da cunha de corte e da peça usinada	34
Figura 14: Limitantes do processo de usinagem por torneamento (STOETERAU, 2007).	35
Figura 15: Grandezas relevantes no processo de usinagem por torneamento (STOETERAU, 2007).	35
Figura 16: Velocidade de corte v_c , de avanço v_f e efetiva v_e no torneamento.	36
Figura 17: Rugosidade média (R_a) (UFPE MECANICA, 2011)	38
Figura 18: Rugosidades máxima $R_{máx}$ e R_y (UFPE MECANICA, 2011).....	39
Figura 19: Regiões da formação do cavaco, (OLIVEIRA, 2011)	41
Figura 20: Classificação dos cavacos (OLIVEIRA, 2011).....	41
Figura 21: Exemplos de quebra-cavaco (UFRGS, 2011).	42
Figura 22: Classificação dos tipos de metal duro, segundo a norma ISO (FERRARESI, 1988).....	44
Figura 23: Máquina Ferramenta Torno CNC, Marca ROMI, Modelo Centur 30S.	50
Figura 24: Rugosímetro Portátil, marca Mitutoyo, modelo SURFTEST-301.....	51

Figura 25: Resultados de rugosidade média (Ra) com relação ao comprimento de corte (Lc) para as ligas AA6262 e AA7050 para a usinagem a seco.	53
Figura 26: Resultados de rugosidade total (Ry) com relação ao comprimento de corte (Lc) para as ligas AA6262 e AA7050 para a usinagem a seco.	54
Figura 27: Resultados de rugosidade média (Ra) com relação ao comprimento de corte (Lc) para as ligas AA6262 e AA7050 para a usinagem com fluido de corte abundante.	55
Figura 28: Resultados de rugosidade total (Ry) com relação ao comprimento de corte (Lc) para as ligas AA6262 e AA7050 para a usinagem com fluido de corte abundante.	55
Figura 29: Resultados de rugosidade média (Ra) com relação ao comprimento de corte (Lc) para as ligas AA6262 e AA7050 para a usinagem realizada mediante técnica de MQF.	56
Figura 30: Resultados de rugosidade total (Ry) com relação ao comprimento de corte (Lc) para as ligas AA6262 e AA7050 para a usinagem realizada mediante técnica de MQF.	57
Figura 31: Cavacos obtidos na usinagem a seco para a liga AA7050: (a) cavaco inicial, (b) cavaco intermediário, (c) cavaco final	58
Figura 32: Cavacos obtidos na usinagem a seco para a liga AA6262: (a) cavaco inicial, (b) cavaco intermediário, (c) cavaco final	59
Figura 33: Cavacos obtidos na usinagem com fluido de corte abundante para a liga AA7050: (a) cavaco inicial, (b) cavaco intermediário, (c) cavaco final.....	60
Figura 34: Cavacos obtidos na usinagem com fluido de corte abundante para a liga AA6262: (a) cavaco inicial, (b) cavaco intermediário, (c) cavaco final.....	61
Figura 35: Cavacos obtidos na usinagem mediante técnica MQF para a liga AA7050: (a) cavaco inicial, (b) cavaco intermediário, (c) cavaco final	62
Figura 36: Cavacos obtidos na usinagem mediante técnica MQF para a liga AA6262: (a) cavaco inicial, (b) cavaco intermediário, (c) cavaco final	63

Lista de tabelas

Tabela 1: Parâmetros de consumo da alumina (ABAL – Associação Brasileira do alumínio, 2011).....	19
Tabela 2: Insumos para a produção de alumínio primário (ano-base 2003) (ABAL – Associação Brasileira do alumínio, 2011).....	20
Tabela 3: Propriedades físicas do elemento alumínio (BRESCIANI FILHO, 1992).....	21
Tabela 4: Classificação e usos de ligas de alumínio (THE ALUMINIUM ASSOCIATION, 1998)	28
Tabela 5: Análise Química da Liga 6262E (ALCOA – ALUMINIUM COMPANY OF AMERICA, 2010)	30
Tabela 6: Designações e Definições de Têmperas para a Liga 6262 (ALCOA – ALUMINIUM COMPANY OF AMERICA, 2010).....	30
Tabela 7: Comparação da usinabilidade de uma liga de alumínio com outros materiais (ASM - American Society for Metals, 1989)	46
Tabela 8: Elementos de liga e suas influências na usinabilidade do alumínio (DINIZ ET AL., 2008)	47
Tabela 9: Composição química (% em peso) da liga 7050 (ALCOA - ALUMINUM COMPANY OF AMERICA, 2011)	48

Sumário

1. Introdução.....	16
1.1. Objetivo	16
2. Revisão Bibliográfica	18
2.1. Aspectos gerais das ligas de alumínio	18
2.1.1. Obtenção do alumínio primário.....	18
2.1.1.1. Mineração.....	18
2.1.1.2. Refino.....	18
2.1.1.3. Redução.....	19
2.1.2. Propriedades do alumínio	20
2.1.3. Elementos químicos formadores das principais ligas de alumínio.....	22
2.1.4. Nomenclatura das ligas de alumínio conformadas	23
2.1.4.1. Nomenclatura – Visão Geral	23
2.1.4.2. Série 1xxx.....	23
2.1.4.3. Série 2xxx.....	24
2.1.4.4. Série 3xxx.....	24
2.1.4.5. Série 4xxx.....	25
2.1.4.6. Série 5xxx.....	25
2.1.4.7. Série 6xxx.....	25
2.1.4.8. Série 7xxx.....	26
2.1.4.9. Série 8xxx.....	26
2.1.5. Aplicações das ligas de alumínio.....	27
2.1.6. Aspectos gerais da liga de alumínio AA6262E.....	29
2.1.6.1. Aplicações da liga de alumínio AA6262E	30
2.1.7. Aplicações da liga de alumínio AA7050.....	31
2.2. Os Processos de Usinagem	31
2.2.1. Usinagem com ferramentas de geometria definida	31
Na Figura 10 estão esquematizadas operação de torneamento (figura 10a), fresamento (figura 10b), furação (figura 10c) e alargamento (figura 10d):	31
2.2.2. Usinagem com ferramentas de geometria não definida.....	32
Na Figura 11 estão esquematizadas operação de retificação (figura 11a), brunimento (figura 11b) e lapidação (figura 11c):	32
2.2.3. Características do processo de usinagem por torneamento	34

2.2.3.1.	Características gerais do processo de usinagem por torneamento	34
2.2.3.2.	Estudo acerca dos principais parâmetros quantitativos do processo de usinagem por torneamento para o estudo em questão	36
2.2.3.2.1.	Velocidade de corte	36
2.2.3.2.2.	Avanço.....	37
2.2.3.2.3.	Rugosidade	37
2.2.3.2.3.1.	Rugosidade média (Ra).....	37
2.2.3.2.3.2.	Rugosidade Máxima (Rmax) e Total (Ry).....	38
2.2.3.2.4.	Comprimento de corte	39
2.2.3.3.	Estudo acerca dos principais parâmetros qualitativos do processo de usinagem por torneamento para o estudo em questão	39
2.2.3.3.1.	Características mais relevantes e importância em se estudar a variável “rugosidade”	39
2.2.3.3.2.	Características mais relevantes e importância em se estudar as formas de cavaco	40
2.2.4.	Materiais para ferramentas de corte.....	42
2.2.4.1.	Metal duro	43
2.3.	A usinabilidade das ligas de alumínio	45
2.3.1.	Conceito de usinabilidade.....	45
2.3.2.	Fatores que influenciam na usinabilidade das ligas de alumínio.....	46
2.3.3.	Usinabilidade da liga de alumínio AA6262E.....	48
2.3.4.	Aspectos gerais da liga de alumínio AA7050	48
3.	Materiais e Métodos	49
3.1.	Procedimento experimental	49
3.2.	Equipamentos, ferramentas e materiais utilizados.....	50
3.2.1.	Equipamentos utilizados.....	50
3.2.2.	Ferramentas utilizadas	51
3.2.3.	Materiais utilizados	51
3.3.	Análise dos resultados	51
4.	Resultados e Discussão	53
4.1.	Comparação entre as rugosidades superficiais obtidas.....	53
4.1.1.	Rugosidades obtidas para as operações a seco	53
4.1.2.	Rugosidades obtidas para as operações com fluido de corte abundante ..	54

4.1.3.	Rugosidades obtidas para as operações com aplicação de fluido de corte mediante a técnica de MQF (Mínima Quantidade de Fluido).....	56
4.2.	Análise dos cavacos gerados durante as operações de torneamento.....	57
4.2.1.	Análise dos cavacos gerados durante operação a seco	57
4.2.2.	Análise dos cavacos gerados durante operação com fluido de corte abundante	60
4.2.3.	Análise dos cavacos gerados durante operação com aplicação de fluido mediante técnica de MQF (Mínima Quantidade de Fluido)	62
5.	Considerações finais	64
6.	Conclusões	65
7.	Referências	66

1. Introdução

Ha milênios variações do metal puro de alumínio que conhecemos hoje são usados para diversas aplicações. Há mais de sete mil anos, os ceramistas da Pérsia fabricavam vasos de barro com óxido de alumínio (conhecido atualmente como alumina) e, trinta séculos mais tarde, os egípcios e babilônicos utilizavam outro composto similar em seus cosméticos e produtos medicinais. No entanto, a real existência e funcionalidade do alumínio ainda eram desconhecidas. Em 1886, Charles Martin Hall – aluno de Oberlin College, Ohio, colocou em um recipiente certa quantidade de criolita com alumina e passou uma corrente elétrica. O resultado foi uma massa congelada, que ele trabalhou com um martelo. Várias partículas de alumínio se formaram, dando origem a um dos metais mais utilizados na história.

Nos dias de hoje as ligas de alumínio apresentam grande ascensão no meio industrial devido às suas características, dentre as quais se destacam favorável relação peso estrutural / resistência do material, baixa densidade e elevada resistência a corrosão. Desta forma, de maneira mais específica, pode-se dizer que as ligas de alumínio apresentam aplicações nas mais variadas áreas da engenharia e, por este motivo, estas ligas são objeto de estudo neste trabalho.

Gradativamente, têm sido incorporadas aos processos de usinagem a aplicação de fluidos de corte, devido às suas características favoráveis aos mesmos. Dentre as principais características dos fluidos de corte, podem ser mencionadas suas funções em refrigerar, lubrificar, proteger contra oxidação, além de limpar a região de usinagem. Neste contexto, foram introduzidas técnicas para aplicação adequada de fluidos de corte durante as operações de usinagem e, desta forma, o presente estudo aborda também a influência da aplicação de fluido de corte sob diferentes aspectos nas operações de torneamento com ligas de alumínio, conforme mencionado anteriormente.

1.1. Objetivo

O presente Trabalho de Graduação tem por objetivo estudar o comportamento de ligas de alumínio sob o processo de usinagem por torneamento, no que diz respeito às rugosidades obtidas e informações retiradas por meio de análises de cavacos originados das peças usinadas, ao longo do experimento realizado com as ligas de alumínio

AA6262 e AA7050 em condições variadas de aplicação de fluido de corte (usinagem a seco, com fluido de corte abundante e MQF – Mínima Quantidade de Fluido).

Com os dados obtidos nos ensaios realizados, é objeto de estudo ainda a comparação entre os comportamentos dos dois materiais mencionados, em específico.

Com os experimentos em questão, espera-se poder contribuir com informações que auxiliem os processos produtivos com ligas de alumínio de uma forma geral.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Aspectos gerais das ligas de alumínio

2.1.1. Obtenção do alumínio primário

Segundo Zangrandi (2008), através do minério denominado bauxita obtem-se o alumínio. E, desta forma, para que a produção do alumínio seja economicamente viável, a bauxita deve apresentar, no mínimo, 30% de alumina aproveitável.

Uma vez que o alumínio primário, da forma que utilizamos, não é encontrado na natureza, sua obtenção provém de etapas que são apresentadas pela ABAL - Associação Brasileira do alumínio (2011), conforme segue:

2.1.1.1. Mineração

O processo da mineração da bauxita, que origina o alumínio, pode ser exemplificado da seguinte maneira:

- 1 - Remoção planejada da vegetação e do solo orgânico;
- 2 - Retirada das camadas superficiais do solo (argilas e lateritas);
- 3 - Beneficiamento:
 - 3.1 Inicia-se na britagem, para redução de tamanho;
 - 3.2 Lavagem do minério com água para reduzir (quando necessário) o teor de sílica contida na parcela mais fina;
 - 3.3 Secagem (ABAL, 2011).

2.1.1.2. Refino

Esta é a etapa do processo de obtenção do alumínio na qual temos a bauxita sendo transformada em alumina calcinada. Para esta etapa, o processo mais utilizado é o Bayer, sendo esta a primeira etapa para se chegar ao alumínio metálico.

- 1 - Dissolução da alumina em soda cáustica;
- 2 - Filtração da alumina para separar o material sólido;
- 3 - O filtrado é concentrado para a cristalização da alumina;
- 4 - Os cristais são secados e calcinados para eliminar a água;
- 5 - O pó branco de alumina pura é enviado à redução;

6 - Na redução, ocorre o processo conhecido como Hall-Héroult, por meio da eletrólise, para obtenção do alumínio. (ABAL, 2011)

As principais fases da produção de alumina, desde a entrada do minério até a saída do produto final são: moagem, digestão, filtração/evaporação, precipitação e calcinação. (ABAL, 2011)

Ainda, de acordo com ABAL (2011), além da bauxita e de combustíveis energéticos, a produção de uma tonelada de alumina requer outros insumos, cujo consumo depende da qualidade do minério. As relações de consumo para a fabricação de cada tonelada de alumina, são demonstradas na Tabela 1:

Tabela 1: Parâmetros de consumo da alumina (ABAL – Associação Brasileira do alumínio, 2011)

Bauxita (t/t)	1,85 a 3,4
Cal (kg/t)	10 a 50
Soda cáustica (kg/t)	40 a 140
Vapor (t/t)	1,5 a 4,0
Óleo combustível - calcinação (kg/t)	80 a 130
Floculante sintético (g/t)	100 a 1000
Energia elétrica (kwh/t)	150 a 400
Produtividade (Hh/t)	0,5 a 3,0
Água (m³/t)	0,5 a 2,0

2.1.1.3. Redução

Nesta etapa ocorre a transformação da alumina em alumínio metálico, conforme sequência abaixo:

- 1 - A alumina é dissolvida em um banho de criolita fundida e fluoreto de alumínio em baixa tensão, decompondo-se em oxigênio;
- 2 - O oxigênio se combina com o ânodo de carbono, desprendendo-se na forma de dióxido de carbono, e em alumínio líquido, que se precipita no fundo da cuba eletrolítica;
- 3 - O metal líquido (já alumínio primário) é transferido para a refusão através de cadinhos;
- 4 - São produzidos os lingotes, as placas e os tarugos (alumínio primário) (ABAL, 2011).

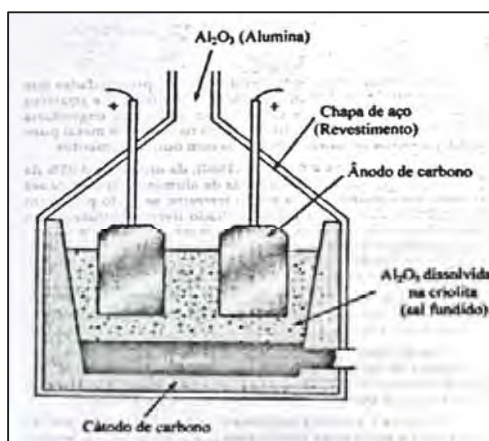


Figura 1: Representação esquemática de uma célula eletrolítica para redução da alumina (ZANGRANDI, 2008).

De acordo com ABAL (2011), os principais insumos e suas quantidades para a produção do alumínio primário, durante esta etapa, são descritos conforme Tabela 2:

Tabela 2: Insumos para a produção de alumínio primário (ano-base 2003) (ABAL – Associação Brasileira do alumínio, 2011)

Alumina (kg/t Al)	1919
Energia elétrica (MWhcc/t Al)	12
Criolita (kg/t)	8
Fluoreto de alumínio (kg/t)	19,7
Coque de petróleo (kg/kg Al)	0,384
Piche (kg/kg Al)	0,117
Óleo combustível (kg/t)	44,2

2.1.2. Propriedades do alumínio

Segundo Bresciani Filho (1992) as principais propriedades do alumínio são a sua baixa densidade e a sua elevada resistência à corrosão nos ambientes de atmosfera, nos meios líquidos aquosos e em alguns produtos químicos inorgânicos e orgânicos. Sendo a baixa densidade considerada como fator importante uma vez que, como tal, propicia uma relação peso da estrutura / resistência do material favorável. No caso da elevada resistência a corrosão nos meios citados, esta característica é ainda complementada com a vantagem de que o metal não precisa passar por um tratamento superficial para agir desta forma.

O alumínio não possui alta resistência mecânica, e, portanto, utiliza-se tanto de tratamento térmico bem como da adição de elementos de liga para a manipulação desta propriedade, dependendo, é claro, da aplicação da mesma.

Outras características que ampliam consideravelmente o campo de aplicação do alumínio são: comportamento não-ferromagnético, afascente e não tóxico, além da aparência brilhante; e, ainda, elevada condutibilidade elétrica (cerca de 65% de cobre eletrolítico) e térmica, e capacidade de reflexão de energia radiante (luz visível, calor radiante, ondas eletromagnéticas) (BRESCIANI FILHO, 1992, p. 25).

Tabela 3: Propriedades físicas do elemento alumínio (BRESCIANI FILHO, 1992)

Número atômico	13		
Massa atômica	26,98		
Densidade	2,70	mg/m ³	(20 °C)
Ponto de fusão	660	°C	
Calor específico	400	J/kg.K	(25 °C)
Calor latente de fusão	397	kJ/kg	
Condutibilidade térmica	247	W/m.K	(25 °C)
Resistividade elétrica	26,55	nΩ.m	(20 °C)
Condutibilidade elétrica (volumétrica)	64,94	% IACS	
Estrutura cristalina	cúbica de faces centradas		



Figura 2: Alumínio (WIKIPEDIA, 2011)

2.1.3. Elementos químicos formadores das principais ligas de alumínio

Conforme mencionado anteriormente, diversos elementos de liga podem ser combinados para se obter melhores resultados quando se deseja trabalhar com ligas de alumínio para determinado fim.

A figura 3 demonstra diversas combinações que resultam tanto em ligas binárias, bem como ternárias e quaternárias de alumínio, comumente utilizadas:

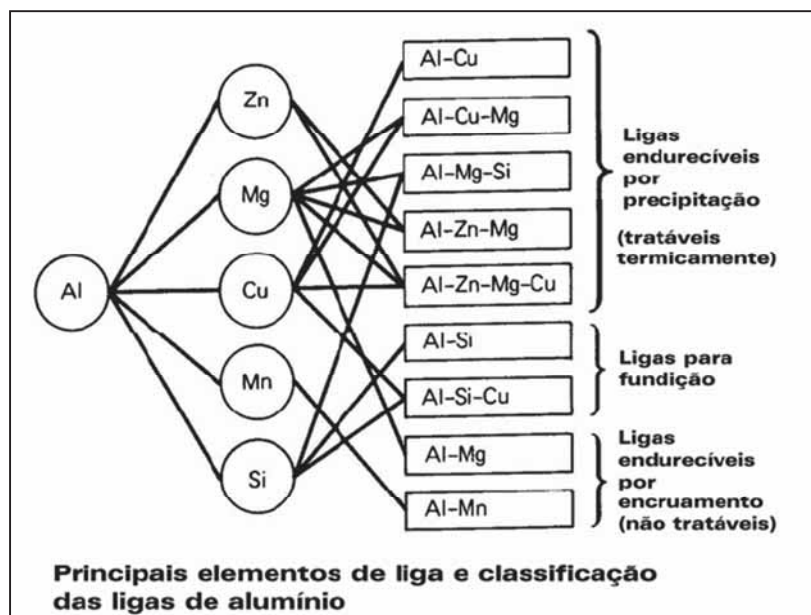


Figura 3: Principais elementos de liga e classificação das ligas de alumínio. (ZANGRANDI, 2008)

Conforme esquema acima, fica claro a majoritária influência de alguns elementos na formação das ligas de alumínio, sendo eles: Zn, Mg, Cu, Mn e Si.

De acordo com Zangrandi (2008), podemos rapidamente apontar as características dos principais elementos de liga adicionados ao alumínio citados anteriormente, conforme segue:

- O zinco aumenta de forma acentuada a resistência mecânica do alumínio ao proporcionar o endurecimento por precipitação natural e artificial da liga.
- O cobre, além de propiciar o endurecimento por precipitação natural, aumenta a resistência mecânica e diminui a resistência à corrosão, a ductilidade e a soldabilidade da liga.
- O magnésio age aumentando a resistência à corrosão da liga em água salgada, além de reduzir o endurecimento por deformação e a temperatura de fusão. Se adicionado junto ao Si, propiciam endurecimento por precipitação da liga.

- O silício melhora a ductilidade, a resistência mecânica, a temperatura de fusão, além de aumentar a fluidez da liga.
- O manganês contribui com melhora da resistência mecânica do alumínio comercialmente puro, bem como da resistência à corrosão, e com pequena redução da ductilidade.

2.1.4. Nomenclatura das ligas de alumínio conformadas

Segundo Moreira (2004) a nomenclatura das ligas de alumínio deve ser feita conforme mostrado nos itens 2.1.4.1 a 2.1.4.9:

2.1.4.1. Nomenclatura – Visão Geral

Na série 1xxx, os dois últimos dígitos indicam a porcentagem de Al acima de 99%. exemplos:

- liga 1050 - 99,50% de Al
- liga 1060 - 99,60% de Al

O segundo dígito indica modificações no limite de impurezas ou a adição de algum elemento de liga. Se o segundo dígito for zero, indica que o Al não foi ligado e apresenta o limite de impurezas convencional. Os números entre um e nove indicam controle especial sobre uma ou mais impurezas ou a adição de elementos de liga.

Nas séries 2xxx à 8xxx, os dois últimos dígitos não possuem significado numérico, apenas identificam diferentes ligas do mesmo grupo. O segundo dígito indica modificações no limite de impurezas ou a adição de elementos de liga.

Ligas experimentais também utilizam este sistema de classificação, porém, são indicadas pelo prefixo X.

2.1.4.2. Série 1xxx

Alumínio comercialmente puro, não ligado, com pureza igual ou superior à 99% de Al. Fe e Si são as principais impurezas. As ligas da série 1000 são caracterizadas pela excelente resistência à corrosão, alta condutibilidade térmica e elétrica, baixa resistência mecânica e elevada ductilidade.

Um aumento moderado na resistência mecânica pode ser obtido por meio de encruamento.

As ligas dessa série podem ser aplicadas, por exemplo, em equipamentos de indústria química, refletores, trocadores de calor, condutores elétricos e capacitores, embalagens (papel alumínio), ou ainda em painéis decorativos para uso na construção civil.

2.1.4.3. Série 2xxx

O cobre é o elemento de liga principal e, na maioria das ligas, o Mg é o elemento de liga secundário. São ligas tratáveis termicamente, podendo, após os tratamentos, atingir a resistência de aço baixo carbono (450 MPa). A resistência à corrosão das ligas da série 2xxx é inferior a de outras ligas de alumínio. Sob certas condições estas pode apresentar corrosão intergranular. As ligas desta série apresentam boa usinabilidade e características de soldagem limitadas (exceto a liga 2219).

As ligas dessa série podem ser aplicadas, por exemplo, em componentes com elevada relação resistência/peso, sujeitos a temperaturas inferiores à 130 °C, rodas forjadas para a indústria aeronáutica e de caminhões, fuselagem e componentes estruturais de aeronaves, ou ainda componentes de suspensão de automóveis.

2.1.4.4. Série 3xxx

O manganês é o elemento de liga principal. As ligas desta série não são tratáveis termicamente; entretanto, apresentam resistência 20% superior as das ligas da série 1xxx. Devido a baixa solubilidade de Mn no Al (de até 1,8%) existem poucas da série 3xxx. Entretanto três delas são largamente empregadas na indústria: 3003, 3004 e 3105.

As ligas desta série podem ser aplicadas, por exemplo, em componentes de resistência mecânica baixa que exijam elevada ductilidade, como latas de bebidas, utensílios de cozinha, trocadores de calor, tanques de armazenamento, sinalização rodoviária, ou ainda em painéis decorativos e telhados para uso na construção civil.

2.1.4.5. Série 4xxx

O silício é o elemento de liga principal. A maior parte das ligas desta série não são tratáveis termicamente. O Si pode ser adicionado para abaixar a temperatura de fusão sem provocar fragilidade excessiva; assim, ligas Al-Si são utilizadas em arames de solda ou como ligas para brazagem de Al (soldagem de Al).

A liga 4032 é empregada na fabricação de pistões forjados devido ao baixo coeficiente de expansão e sua alta resistência ao desgaste.

Ligas contendo entre 4 e 7% de Si apresentam cores que variam do cinza ao negro após serem submetidas à anodização e assim são utilizadas em painéis decorativos na construção civil.

As ligas desta série podem ser aplicadas, por exemplo, em arquitetura e construção civil ou na produção de fios, arames e pós para brazagem.

2.1.4.6. Série 5xxx

O magnésio é o elemento de liga principal. O Mg é um dos elementos mais efetivos ao endurecimento do Al. Quando utilizado como elemento principal ou em conjunto com o Mn, o resultado são ligas não tratáveis com resistência de moderada a elevada. O Mg é considerado mais efetivo que o Mn como endurecedor, (0,8% de Mg tem o mesmo efeito sobre a resistência que 1,25% de Mn) e, ainda, pode ser adicionado em quantidades elevadas (~15%).

Ligas desta série possuem boas características de soldagem e resistência à corrosão em atmosfera marinha.

Como exemplos da aplicabilidade das ligas desta série pode-se citar seu uso em arquitetura e decoração, embalagens (tampas de latas de Al), suportes para iluminação pública, peças de barcos e navios, tanques para criogenia ou ainda componentes de guindastes e automotores.

2.1.4.7. Série 6xxx

O magnésio e o silício são os elementos de liga principais. A proporção de Mg e Si visa a formação da fase Mg_2Si , formando ligas tratáveis termicamente. As ligas da

série 6xxx apresentam boa ductilidade, boas características de soldagem e de usinagem e boa resistência à corrosão.

As ligas desta série podem ser aplicadas, por exemplo, em arquitetura e decoração, quadros de bicicletas, ou ainda estruturas soldadas.

2.1.4.8. Série 7xxx

O zinco é o elemento de liga principal, adicionado em quantidades entre 1 e 8%. Adições em conjunto com Mg resultam em ligas tratáveis termicamente com resistência mecânica elevada. Normalmente, Cu e Cr também são adicionados em pequenas quantidades.

As ligas desta série podem ser aplicadas, por exemplo, em componentes da indústria aeronáutica como estruturas, peças móveis e componentes de alta resistência.

Ainda, de acordo com ABAL (2011), as ligas desta série são denominadas “Ligas tratadas termicamente de elevada resistência”, as quais são tão resistentes quanto o aço estrutural, mas necessitam de proteção superficial, sendo, conforme mencionado anteriormente, utilizadas na aviação – setor onde o fator resistência / peso é fundamental.

As ligas desta série, assim como as ligas da série 6xxx, apresentam boa usinabilidade (AEC - The aluminium Extruders Council, 2011).

2.1.4.9. Série 8xxx

As ligas da série 8xxx envolvem um grande número de composições com uma miscelânea de elementos de liga. As ligas conformadas contendo Li (2,4% a 2,8%) foram desenvolvidas para uso aeroespacial e criogenia.

2.1.5. Aplicações das ligas de alumínio

Devido às excelentes combinações de propriedades que podem ser reunidas em ligas de alumínio, estas constituem um dos mais versáteis materiais que devem ser utilizados quando se fala em termos seja de engenharia, seja de arquitetura ou de indústrias em geral.

As ligas de alumínio possuem amplo campo de aplicação, sendo, portanto, desenvolvidas de forma particular para cada uma de suas aplicações.

Segundo Alcoa (2007), dentre as principais aplicações das ligas de alumínio, destacam-se:

- Construção civil;
- Esquadrias e revestimentos;
- Telhas;
- Estruturas;
- Transportes;
- Aeronáutica;
- Indústria Automotiva;
- Embarcações;
- Vagões;
- Indústria eletro-eletrônica;
- Bens de consumo;
- Máquinas e equipamentos;
- Embalagens.

Na Tabela 6, de forma mais detalhada, apresenta a classificação e os usos das ligas de alumínio, segundo critério da Aluminium Association, (Yoshikawa, 2011):

Tabela 4: Classificação e usos de ligas de alumínio (THE ALUMINIUM ASSOCIATION, 1998)

Série	Composição química	Principais aplicações
1xxx	Al comercialmente puro	Contatos elétricos, Alclad
2xxx	Al-Cu e Al-Cu-Mg	Indústria aeronáutica
3xxx	Al-Mn e Al-Mn-Mg	Latas de bebidas, painéis
4xxx	Al-Si	Metal de adição para soldas, pistões forjados de motores
5xxx	Al-Mg	Aplicações náuticas (navios e barcos)
6xxx	Al-Mg-Si	Peris arquitetônicos, componentes automotivos
7xxx	Al-Zn-Mg e Al-Zn-Mg-Cu	Indústria aeronáutica
8xxx	Outras ligas (Al-Li, Al-Fe)	Diversas e variadas

Diante destas informações, percebe-se a importância cultural, tecnológica e, conseqüentemente, financeira, que o alumínio representa nos dias de hoje.

O alumínio é amplamente utilizado no mundo moderno devido à sua excelente performance e propriedades superiores na maioria das aplicações, pois suas técnicas de fabricação permitem a manufatura do produto acabado a preços competitivos (ALCOA, 2007).

As figuras 4, 5, 6, 7, 8 e 9 representam exemplos ilustrativos de aplicações das ligas de alumínio, retirados de Fundamentos e Aplicações do alumínio, (ALCOA, 2007):



Figura 4: Cabos nus de alumínio



Figura 5: Refrigerador de motores

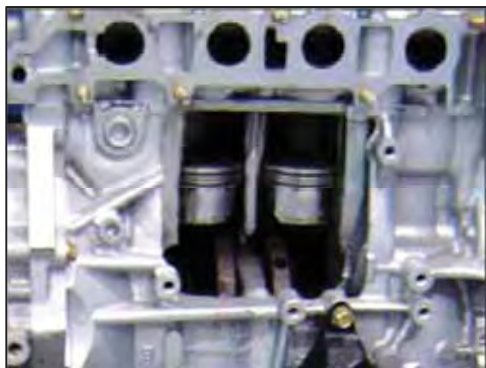


Figura 6: Pistões e blocos de motores



Figura 7: Alumínio para indústria naval



Figura 8: Alumínio na indústria aeroespacial



Figura 9: Carroceria de alumínio

2.1.6. Aspectos gerais da liga de alumínio AA6262E

De acordo com Alcoa (2010), a liga de alumínio AA6262E se constitui numa liga de fácil usinabilidade contendo chumbo e bismuto, sendo recomendada para aplicações que requeiram alto grau de usinabilidade aliado a alta resistência à corrosão.

Ainda segundo Alcoa (2010), a têmpera T9 tem sido utilizada em componentes que requerem significantes usinagens; já a têmpera T8, para esta liga, oferece média / baixa tensões residuais ao final da usinagem, conferindo, desta forma, ao material, bom controle dimensional global – o que contribui com uma diminuição significativa de desperdícios durante a usinagem.

A Tabela 7 apresenta a análise química da liga AA6262:

Tabela 5: Análise Química da Liga 6262E (ALCOA – ALUMINIUM COMPANY OF AMERICA, 2010)

Análise Química da Liga 6262				Temperatura Líquidos: 651°C			Temperatura Sólidos: 581°C			Densidade: 2,71 g/cm3			
Porcentagem em peso		Elementos											
	<u>Si</u>	<u>Fe</u>	<u>Cu</u>	<u>Mn</u>	<u>Mg</u>	<u>Cr</u>	<u>Zn</u>	<u>Ti</u>	<u>Pb</u>	<u>Bi</u>	<u>Outros Cada</u>	<u>Outros Total</u>	<u>alumínio</u>
Mínimo	0,4	---	0,15	---	0,8	0,04	---	---	---	0,4	---	---	
Máximo	0,8	0,7	0,4	0,15	1,2	0,14	0,25	0,15	0,4	0,7	0,05	0,15	Restante
Coeficiente Médio de Expansão Térmica (20 a 100°C) = 23,7µm/m.K													

A Tabela 8 apresenta características para os principais tipos de têmpera com os quais esta liga é comercializada, incluindo os tipos mencionados neste tópico:

Tabela 6: Designações e Definições de Têmperas para a Liga 6262 (ALCOA – ALUMINIUM COMPANY OF AMERICA, 2010)

Têmpera-padrão	Definições de Têmpera
T6,T651	Solubilizada e então envelhecida artificialmente. Aplicado aos produtos que não sofrem deformação plástica, depois do tratamento térmico de solubilização, ou nos quais o efeito do encruamento, devido ao endireitamento, pode ser desprezado ao serem fixados os limites de propriedades mecânicas. A têmpera –T651 é aplicada a produtos que sofrem alívio de tensão por tração.
T8	Solubilizada, trabalhada a frio e então envelhecida artificialmente. Aplicado aos produtos que sofrem deformação plástica a frio para aumentar a sua resistência mecânica, depois do tratamento térmico de solubilização, ou nos quais o efeito do encruamento, devido ao endireitamento, é levado em consideração ao serem fixados os limites para as propriedades mecânicas.
T9	Solubilizada, envelhecida artificialmente e então trabalhada a frio. Aplicada em produtos que são trabalhados a frio a fim de aumentar a resistência.

2.1.6.1. Aplicações da liga de alumínio AA6262E

De acordo com Alcoa (2011) as aplicações desta liga incluem válvulas de transmissão automotiva, pistão de freio e aplicações em ar condicionado, quando passada pelo processo de têmpera T9. Além dessas, estão inclusas também aplicações tais como pinos de dobradiças, peças de câmera, equipamentos de televisão e tripé, acoplamentos, acessórios marinhos, puxadores e ferragens decorativas, peças magnéticas, peças de skate, peças de ferro a vapor, dentre outras.

Adicionalmente, segundo Alcoa (2010), esta liga é recomendada para aplicações onde se exijam alta produtividade com bom a excelente acabamento superficial.

2.1.7. Aplicações da liga de alumínio AA7050

Tipicamente, de acordo com Alcoa (2011), as aplicações desta liga incluem acessórios aeronáuticos, bem como anteparas com espessuras que variam de 50,8 a 152,4mm. No entanto, a principal aplicação da liga 7050 está em chapas com espessuras maiores ou iguais a 50,8mm (2”) – faixa de espessura na qual a liga em questão possui grande vantagem em suas propriedades.

2.2. Os Processos de Usinagem

No âmbito da usinagem – segundo Stoeterau (2007), definida de acordo com a norma DIN 8580 como processo de fabricação no qual existe remoção de material na forma de cavaco, existem variados processos passíveis de serem utilizados na fabricação de produtos, na análise de diversos materiais ferrosos ou não, bem como na análise de características e determinação de parâmetros acerca destes.

Através da usinagem é possível se obter acabamento de superfícies de peças fundidas ou conformadas mecanicamente, de modo a obter-se melhor aspecto superficial e dimensões mais precisas, de acordo com as especificações de fabricação e de acordo com o emprego destas.

Assim, ainda de acordo com Stoeterau (2007), de forma sucinta, são apresentados a seguir alguns exemplos de operações de usinagem, sendo estes separados em dois grandes grupos (usinagem com ferramentas de geometria definida e usinagem com ferramentas de geometria não definida).

2.2.1. Usinagem com ferramentas de geometria definida

Na Figura 10 estão esquematizadas operação de torneamento (figura 10a), fresamento (figura 10b), furação (figura 10c) e alargamento (figura 10d):

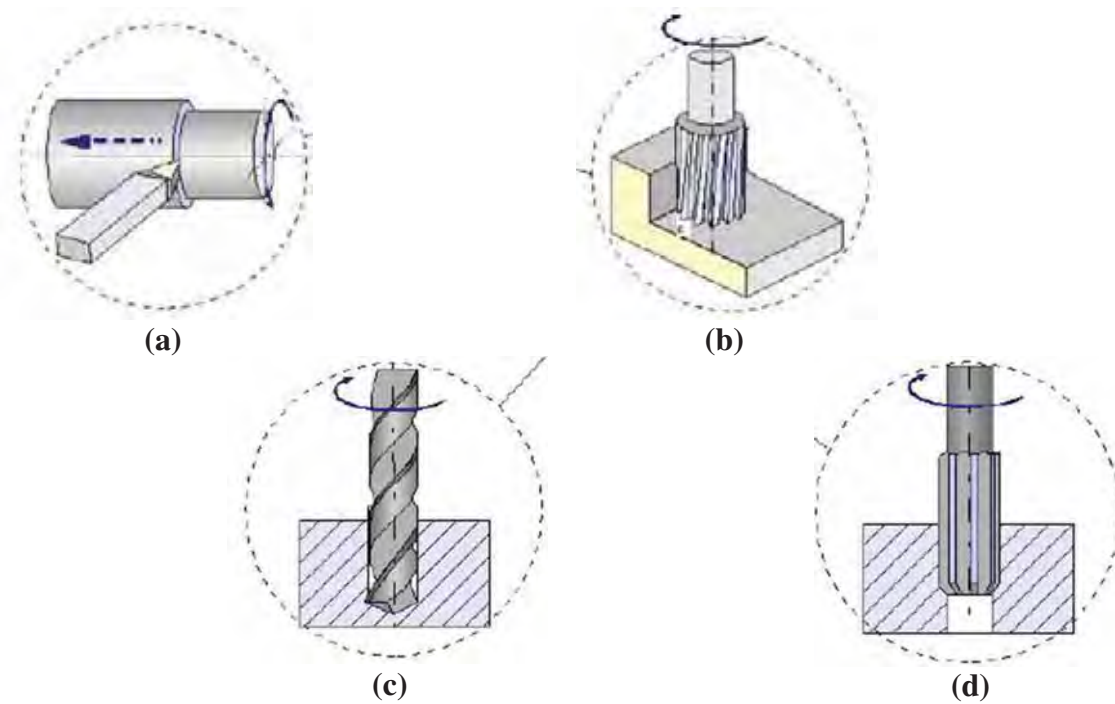


Figura 10: Exemplos de operações de usinagem com ferramentas de geometria definida; torneamento (a), fresamento (b), furação (c) e alargamento (d).

2.2.2. Usinagem com ferramentas de geometria não definida

Na Figura 11 estão esquematizadas operação de retificação (figura 11a), brunimento (figura 11b) e lapidação (figura 11c):

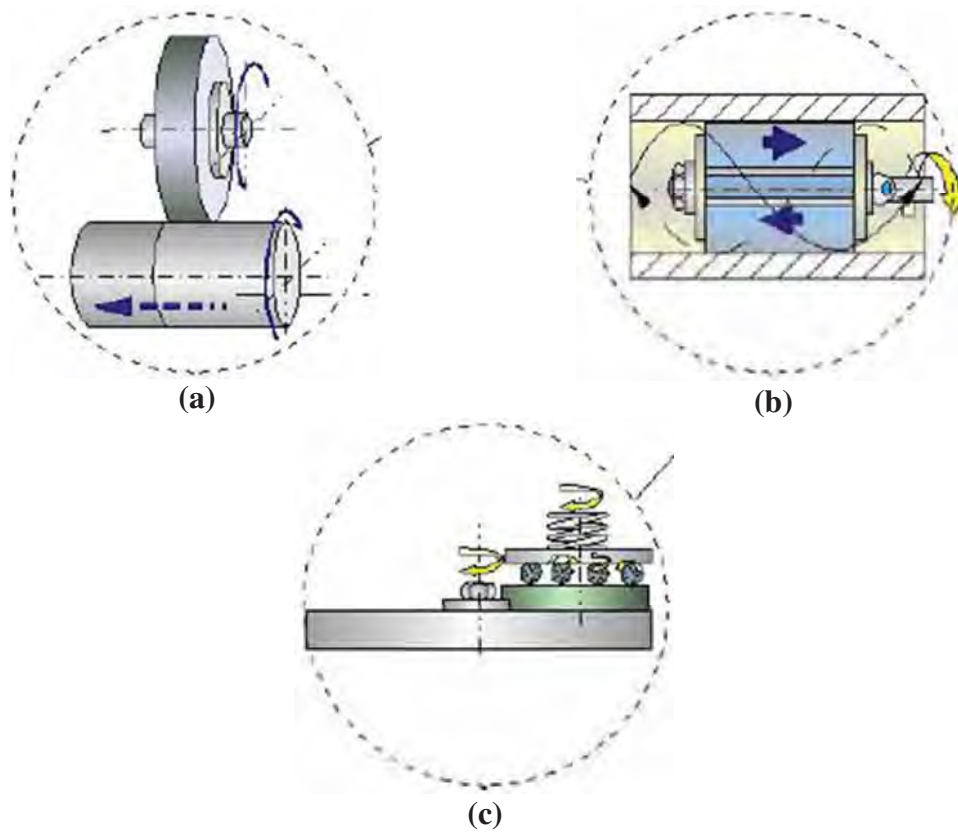


Figura 11: Exemplos de operações de usinagem com ferramentas de geometria não definida; retificação (a), brunimento (b) e lapidação (c).

É importante frisar que para o estudo em questão, leva-se adiante a utilização da operação de usinagem por torneamento, de forma mais específica.

2.2.3. Características do processo de usinagem por torneamento

2.2.3.1. Características gerais do processo de usinagem por torneamento

Na Figura 12 estão representadas as partes construtivas da ferramenta de corte de geometria definida:

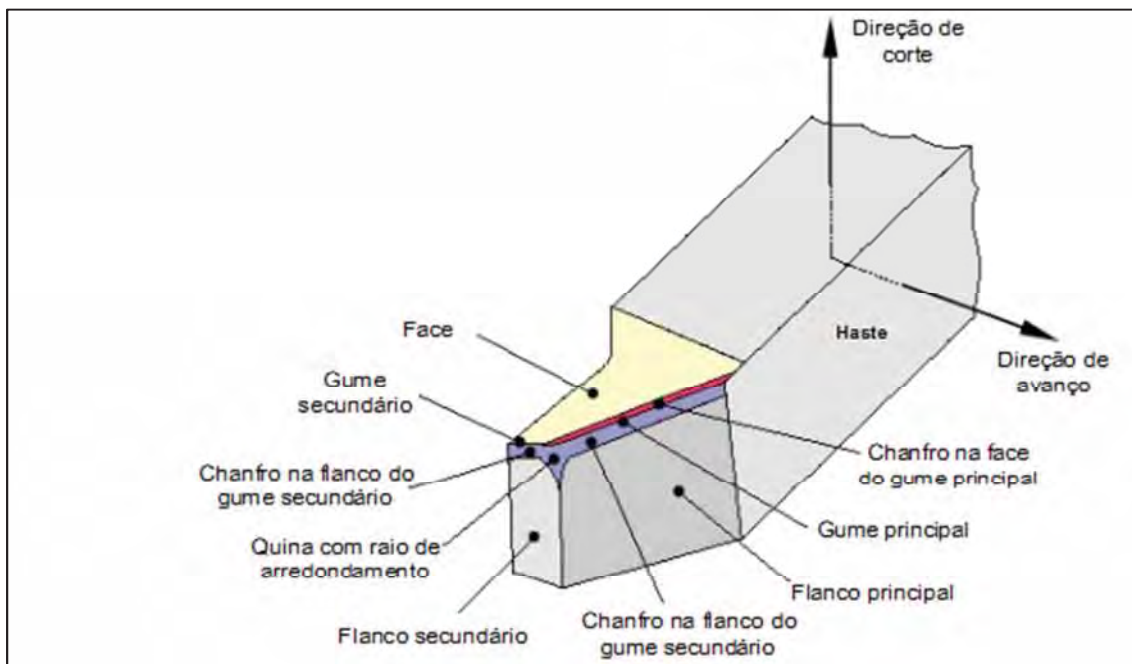


Figura 12: Geometria da ferramenta de corte por torneamento e suas principais características (UFSC, 2004)

Na figura 13 está representada a cunha de corte de uma ferramenta em torneamento:

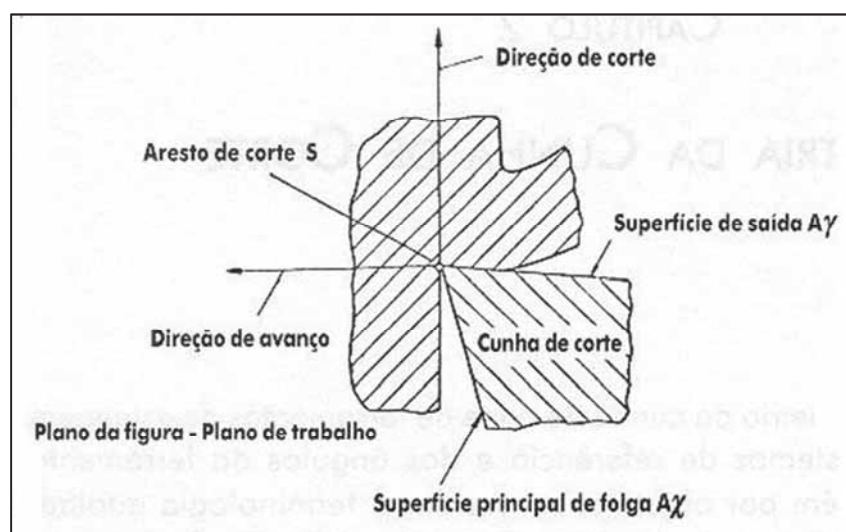


Figura 13: Detalhe da cunha de corte e da peça usinada

De acordo com Stoeterau (2007), durante o processo de usinagem por torneamento, deve-se levar em consideração diversos fatores que atuam como limitantes do processo, bem como certas grandezas, conforme Figuras 14 e 15:

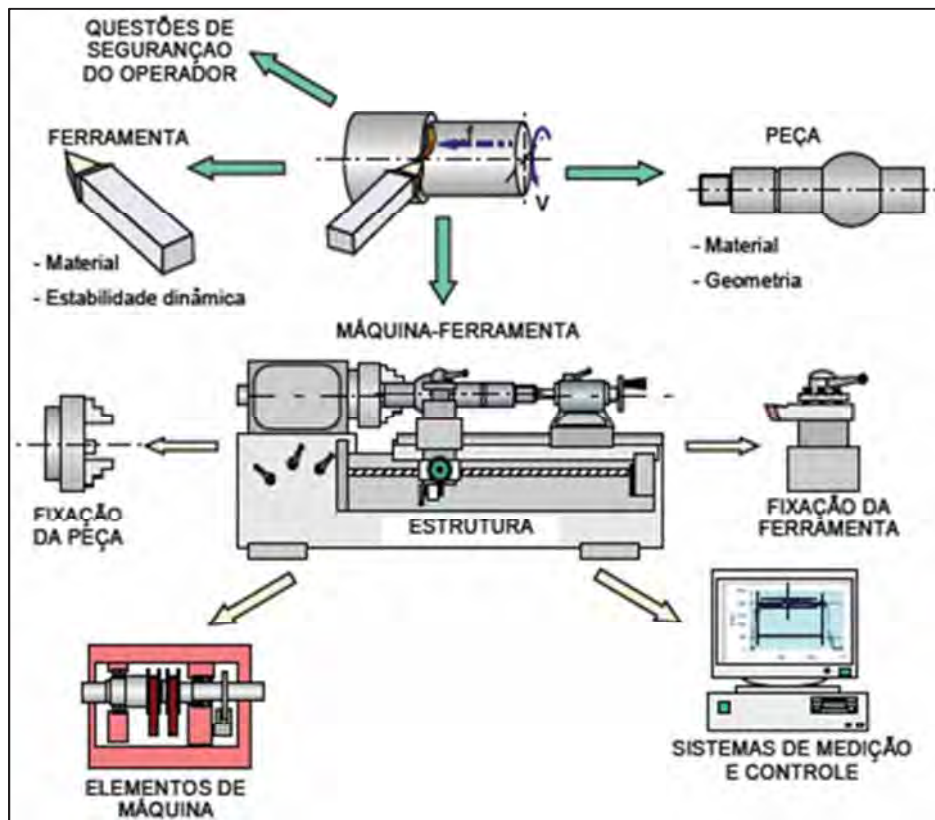


Figura 14: Limitantes do processo de usinagem por torneamento (STOETERAU, 2007).

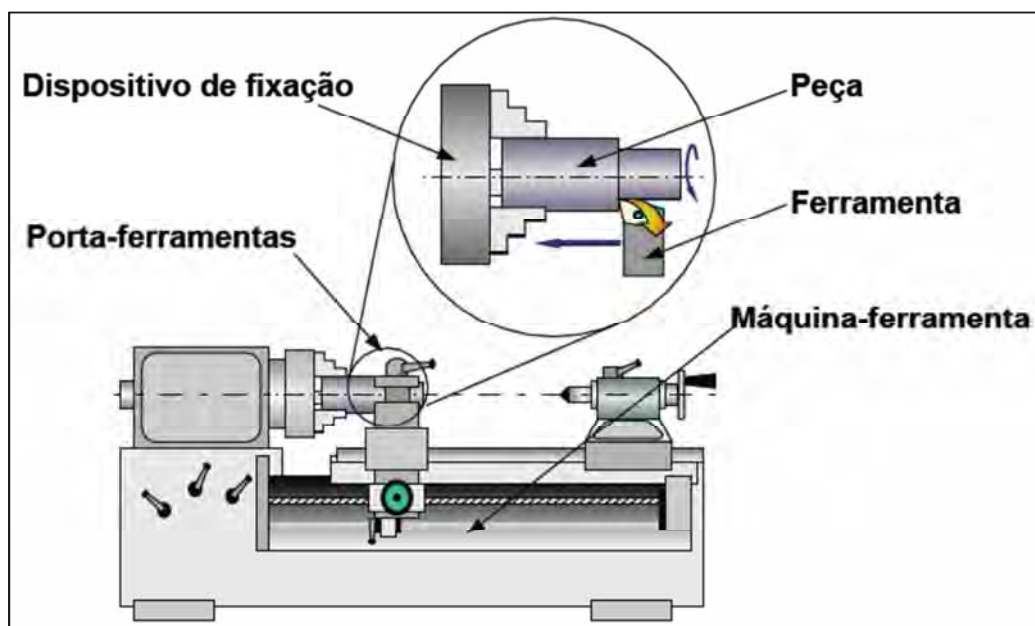


Figura 15: Grandezas relevantes no processo de usinagem por torneamento (STOETERAU, 2007).

Onde,

- Peça – tudo aquilo que irá sofrer uma operação de usinagem
- Dispositivo de fixação – local onde será fixada a peça
- Ferramenta – tudo o que realiza uma operação de usinagem
- Porta-ferramenta – dispositivo destinado a fixar a ferramenta
- Máquina-ferramenta – elemento que proporcionará os movimentos, velocidade, avanço e a força necessária ao processo de usinagem.

2.2.3.2. Estudo acerca dos principais parâmetros quantitativos do processo de usinagem por torneamento para o estudo em questão

2.2.3.2.1. Velocidade de corte

Para a velocidade de corte tem-se as grandezas relacionadas abaixo:

- Velocidade de corte v_c (c = cutting);
- Velocidade de avanço v_f (f = feed); e
- Velocidade efetiva v_e (e = effective)

De forma que,
$$V_e = \sqrt{V_f^2 + V_c^2} \quad (2)$$

Na figura 16 estão esquematizadas as velocidades envolvidas no processo de torneamento:

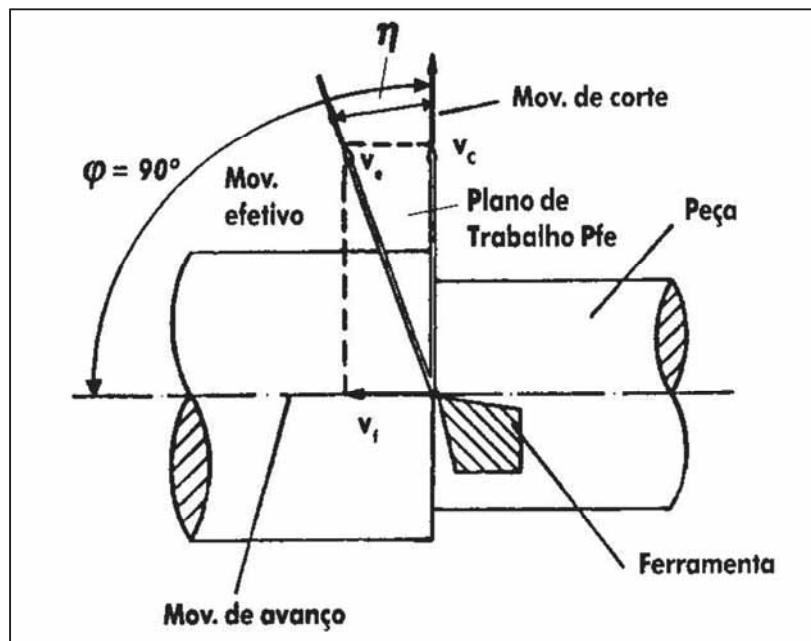


Figura 16: Velocidade de corte v_c , de avanço v_f e efetiva v_e no torneamento.

Onde ϕ (direção de avanço) é o ângulo formado entre a direção de corte e a direção de avanço. Este ângulo para torneamento longitudinal e furação é constante e igual a 90° .

A velocidade de corte para todos os processos de usinagem com ferramenta ou peça rotativa é calculada por:

$$v_c = \pi d_m \cdot n \quad (3)$$

A velocidade de avanço é calculada por:

$$v_f = z \cdot f_z \cdot n \quad (4)$$

Onde:

d_m = diâmetro médio correspondente à *camada de corte*;

n = rotação;

z = número de arestas cortantes;

f_z = avanço por aresta cortante.

2.2.3.2.2. Avanço

O avanço f é o movimento da ferramenta por volta ou curso, medido no plano de trabalho, na direção de avanço (fig. 7). Quando a ferramenta tem mais do que uma aresta cortante, o avanço é calculado por:

$$f = f_z \cdot z \quad (5)$$

Onde:

f_z = avanço por aresta;

z = número de arestas.

2.2.3.2.3. Rugosidade

2.2.3.2.3.1. Rugosidade média (R_a)

Rugosidade Média (R_a): É a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas dos afastamentos dos pontos do perfil de rugosidade, em relação à linha média, dentro do percurso de medição l_m . R_a pode ser calculada pela Equação 6:

$$Ra = \frac{1}{L} \int_0^L |y| dx = \frac{A}{L}$$

(6)

ou, aproximadamente pela Equação 7:

$$Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|$$

(7)

Onde n é o número de ordenadas consideradas. A ABNT recomenda o parâmetro Ra para avaliação da rugosidade (em μm). A Figura 17 mostra Ra, esquematicamente:

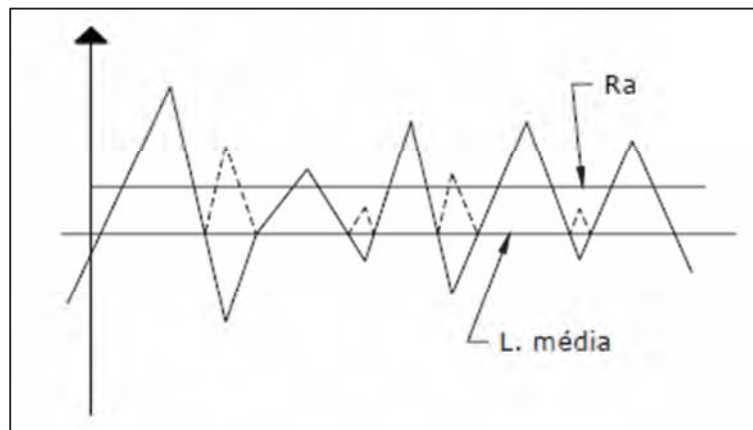


Figura 17: Rugosidade média (Ra) (UFPE MECANICA, 2011)

2.2.3.2.3.2. Rugosidade Máxima (Rmax) e Total (Ry)

Rugosidade máxima (Rmáx): É o maior valor das rugosidades parciais Z_i , que se apresenta no percurso de medição l_m .

A norma DIN 4762 (de 1984) indica um parâmetro semelhante ao Rmáx para medição de rugosidade superficial na Alemanha e é designada por Ry. Ry é a máxima distância pico-vale, dentro do comprimento de avaliação. A figura 18 demonstra claramente a diferença entre essas duas grandezas, no entanto, vale ressaltar que o padrão utilizado neste trabalho é o Ry, não o Rmax.

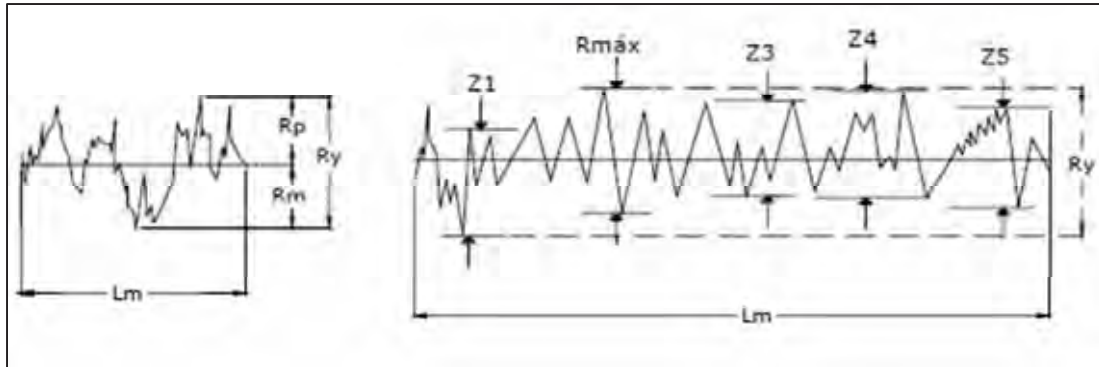


Figura 18: Rugosidades máxima $R_{máx}$ e R_y (UFPE MECANICA, 2011)

2.2.3.2.4. Comprimento de corte

O comprimento de corte pode ser definido como o comprimento de cavaco a ser retirado, medido na superfície de corte, segundo a direção normal à direção de corte .

2.2.3.3. Estudo acerca dos principais parâmetros qualitativos do processo de usinagem por torneamento para o estudo em questão

Nesse tópico são abordados três importantes parâmetros do estudo presente neste trabalho e, portanto, qual a relevância dos mesmos. Desta forma, espera-se poder contribuir de maneira satisfatória com os conhecimentos aqui obtidos acerca da liga de Al em questão.

2.2.3.3.1. Características mais relevantes e importância em se estudar a variável “rugosidade”

Segundo Palma (2008), já se sabe muito bem atualmente sobre as influências da rugosidade nas características dos produtos. Um exemplo clássico sobre estas influências está na vida em fadiga dos materiais; a resistência à fadiga é diminuída quando o material apresenta maiores níveis de rugosidade.

Desta forma, na indústria aeronáutica, por exemplo, onde as ligas de alumínio - de maneira geral - apresentam grande aplicabilidade, o parâmetro rugosidade torna-se de extrema importância, uma vez que quando aplicadas em componentes estruturais de aeronaves, as peças de alumínio sofrem grande influência do processo de fadiga.

Adicionalmente, de acordo com Callister (2007), durante as operações de usinagem, pequenos arranhões e ranhuras são invariavelmente introduzidos na superfície da peça por ação de corte da ferramenta. Estas marcações de superfície pode limitar a vida de fadiga. O autor (Callister, 2007) acrescenta que foi observado que a melhoria do acabamento de superfície por polimento melhora a vida de fadiga significativamente.

Dentre os fatores que influenciam na rugosidade superficial das peças, destacam-se a geometria da ferramenta de corte, o avanço, a deformação plástica do material processado e a vibração da ferramenta de corte. Desta forma, para redução nas irregularidades superficiais, faz-se necessário reduzir o avanço e trabalhar com pequenos ângulos de inclinação para a ferramenta de corte – as quais devem ter suas pontas arredondadas (Lopes, 2006).

2.2.3.3.2. Características mais relevantes e importância em se estudar as formas de cavaco

Em todos os processos de usinagem com ferramentas de corte, seremos contemplados com a presença dos cavacos em função da remoção de material. A partir desse fato, podemos, de maneira visual e palpável, identificar a conformidade do processo, pois o cavaco pode ser considerado um meio de comunicação entre a máquina-ferramenta e o operador ou técnico responsável pelo processo de usinagem, ou seja, em um lote de produção com número elevado de peças ou não, pode-se determinar logo no início da fabricação se as condições de usinagem estão adequadas a partir do cavaco resultante e também com base na verificação de um simples cavaco, pode-se também no meio da cadeia produtiva identificar a hora de fazer a troca da aresta cortante de uma ferramenta quando a mesma for cambiável.

Nas usinagens feitas em torno CNC, o cavaco é sem dúvida um aliado da produtividade, qualidade, segurança e desempenho. Porque possui uma relação direta entre a peça e a ferramenta, de modo que a escolha adequada da ferramenta, a velocidade de corte, a profundidade de corte e a escolha do fluido de corte, aliados ao cavaco, podem reduzir drasticamente o tempo de usinagem, o custo de produção e aumentar consideravelmente a lucratividade. (OLIVEIRA, 2011)

A Figura 19 esquematiza regiões da formação do cavaco durante a operação de torneamento:

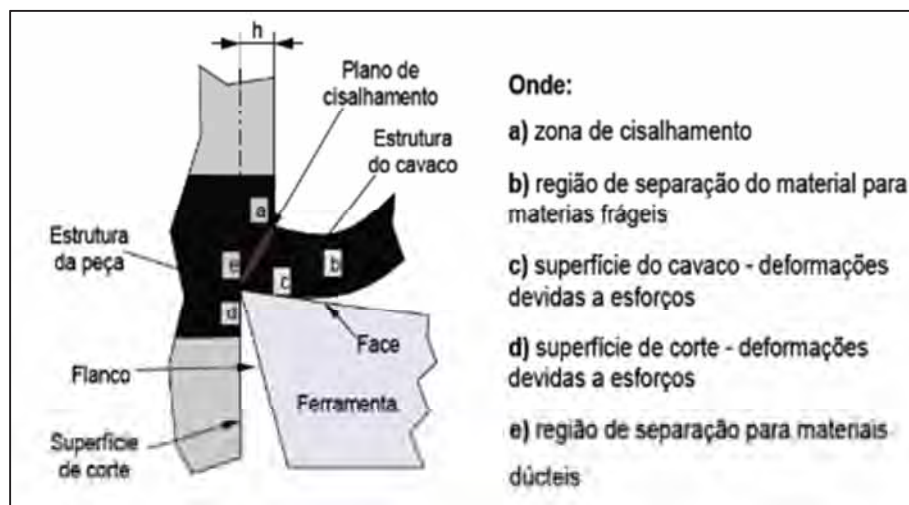


Figura 19: Regiões da formação do cavaco, (OLIVEIRA, 2011)

Os cavacos podem ser classificados em helicoidais, fitas, espiral ou, ainda, lascas ou pedaços. A Figura 20 exemplifica os diversos tipos de cavacos e as suas respectivas favorabilidade ao processo de usinagem:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
FITA		HÉLICE					OUTROS		
FITA	EMARANHADO	HÉLICE PLANA	HÉLICE OBLÍQUA	HÉLICE LONGA	HÉLICE CURTA	HÉLICE ESPIRAL	ESPIRAL	VÍRGULA	ARRANCA DOS
									
desfavorável		médio		favorável		médio			

Figura 20: Classificação dos cavacos (OLIVEIRA, 2011)

- Cavacos helicoidais: considerado o tipo mais apropriado de cavaco. Sua formação ocorre sempre a altas velocidades de corte, caracterizando alta remoção de material.
- Cavacos tipo espiral: também considerados um tipo de cavaco favorável, ocorrem principalmente quando existe na ferramenta de corte a presença de quebra cavaco.

- Cavacos tipo fita: de forma geral, a formação deste tipo de cavaco pode ser considerada a mais problemática, pois além de apresentar uma aresta de corte bastante afiada – o que pode vir a causar danos a integridade física do operador, este tipo de cavaco apresenta certa tendência em causar paradas no processo produtivo, enrolando-se na peça, na ferramenta ou na placa do torno, sendo que, em alguns casos, a formação deste tipo de cavaco pode causar, inclusive, a quebra da ferramenta de corte.
- Cavaco tipo lasca/ pedaços: ocorre devido irregularidades no material, ângulo de efetivo de corte pequeno, velocidades de corte pequenas, altas profundidades de corte, sendo preferível quando se dispõe de pouco espaço para a realização da operação de torneamento.

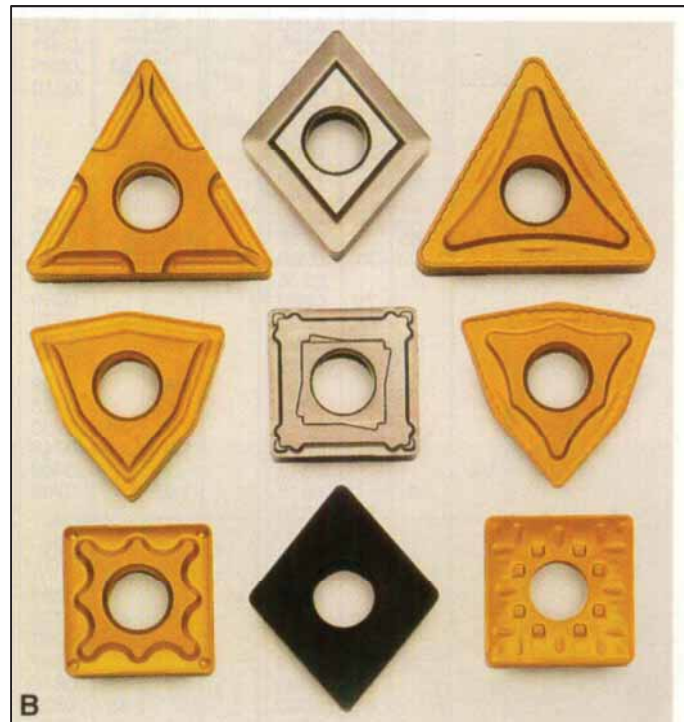


Figura 21: Exemplos de quebra-cavaco (UFRGS, 2011).

2.2.4. Materiais para ferramentas de corte

De forma objetiva, visando-se demonstrar o que realmente será levado aos experimentos pertinentes a este estudo, serão abordadas a seguir características relevantes ao tipo específico de ferramenta de corte para a aplicação em questão.

Desta forma, vale ressaltar que, conforme proposto inicialmente, o experimento baseia-se na utilização de ferramenta de metal duro sem cobertura. Informações complementares estão dispostas nas seções subsequentes.

2.2.4.1. Metal duro

De acordo com Amorim (2003), a norma ISO 513/1975 classifica os metais duros em três grupos, designados pelas letras P, M e K, também designados por um código de cores (em ordem, azul, amarelo e vermelho). A classificação dentro de um grupo ou de outro é feita de acordo com a aplicação do metal duro, uma vez que a variedade de composições químicas e processos de fabricação torna difícil a padronização baseada em outras características. Dentro de cada grupo, ainda há uma classificação usando números.

Segue abaixo o agrupamento que, de acordo com Ferraresi (1988) e Amorim (2003), conforme citado anteriormente, a ISO propõe para a classificação dos metais duros:

- Grupo P – compreendendo os tipos ou classes empregados na usinagem de metais e ligas ferrosas que apresentam cavacos longos e dúcteis (cavaco contínuo);
- Grupo M – compreendendo as classes que se empregam na usinagem de metais e ligas ferrosas de cavacos tanto longos como curtos;
- Grupo K – compreendendo as classes que se destinam à usinagem de metais e ligas ferrosas que apresentam cavacos curtos (cavaco de ruptura) e materiais não metálicos (FERRARESI, 1988).

De forma especial, deve-se ressaltar o grupo K, que, conforme Amorim (2003), além de ter sido o primeiro tipo de metal duro desenvolvido - sendo composto basicamente por carbonetos de tungstênio aglomerados por cobalto, devido à baixa resistência dos metais duros à difusão em altas temperaturas, as ferramentas deste grupo não são recomendadas para a usinagem de metais dúcteis, sendo sua área de aplicação restrita a usinagem de materiais frágeis, que formam cavacos curtos (ferros fundidos e latões), metais não ferrosos, como alumínio, cobre, titânio e níquel, não necessariamente de cavacos curtos e madeira.

Desta forma, portanto, sabe-se que o tipo de ferramenta ideal para o presente estudo é ferramenta de corte de classe K, dadas suas características citadas

anteriormente, bem como se pode fazer uma escolha mais refinada da ferramenta a ser utilizada partindo-se da interpretação das informações contidas na figura a seguir:

DESIGNAÇÃO ISO	DUREZA E RESIST. AO DESGASTE	TENACIDADE
P 01 P 10 P 20 P 25 P 30 P 40 P 50	↑	↓
M 10 M 20 M 30 M 40	↑	↓
K 01 K 05 K 10 K 20 K 30 K 40	↑	↓

Figura 22: Classificação dos tipos de metal duro, segundo a norma ISO (FERRARESI, 1988).

2.3. A usinabilidade das ligas de alumínio

2.3.1. Conceito de usinabilidade

Muitas vezes, mesmo que o fator usinabilidade não seja tratado diretamente com esta palavra ou sequer mencionado, lidaremos com diversas características da liga que de uma forma ou de outra estão intimamente atreladas a este conceito. Desta forma, é interessante que primeiramente seja feita uma introdução ao conceito de usinabilidade, a fim de que se entenda como alguns fatores podem influenciá-la e também para que se tenha uma boa noção de como ela pode englobar a avaliação experimental que será mostrada.

Segundo Diniz et al. (2008), a usinabilidade pode ser definida como o grau de dificuldade em se usinar um determinado material, sendo esta relativa quando se fala de uma ou de outra característica tomada como parâmetro para o material a ser trabalhado; sendo assim um material pode ter um valor de usinabilidade baixo em certas condições de usinagem e um valor maior em outras condições de usinagem.

Desta forma, existem critérios que definem se o material possui ou não uma boa usinabilidade. O grau de usinabilidade é definido a partir de grandezas mensuráveis inerentes ao processo como a vida da ferramenta, o acabamento superficial da peça, os esforços de corte, a temperatura de corte, a produtividade, as características do cavaco, ou ainda, segundo Stoeterau (2007), a abrasividade.

Segundo Diniz et al. (2008), para a mensuração da usinabilidade do material em questão pode-se recorrer aos seguintes métodos:

- **Curta duração quando o ensaio é baseado na vida da ferramenta** – onde são usadas condições forçadas de usinagem e/ou materiais de ferramentas pouco resistentes ao desgaste, a fim de que a vida da ferramenta termine rapidamente e o ensaio possa ser realizado em curto espaço de tempo;

- **Curta duração quando o ensaio não é baseado na vida da ferramenta** – onde são tomados como parâmetro fatores como força de usinagem ou rugosidade da peça;

- **Longa duração** – o método mais aceito para mensuração da usinabilidade, consiste no acompanhamento da usinagem do material a ser analisado comparado à usinagem de um material padrão. A usinagem deve ocorrer até o fim da vida da ferramenta, ou até um determinado valor de desgaste da mesma. O I.U (índice de usinabilidade) do material ensaiado pode ser calculado com a relação entre a velocidade

em que este é a velocidade na qual um material tomado como padrão demoram ou 20 minutos ou 60 minutos para esgotar a vida de uma determinada ferramenta, conforme Equação 1 para o caso de 20 minutos:

$$I.U = \frac{V_{c20 \text{ (material ensaiado)}}}{V_{c20 \text{ (material padrão)}}} \quad (1)$$

Na Tabela 4, exemplo de comparação da usinabilidade de uma liga de alumínio com outros materiais:

Tabela 7: Comparação da usinabilidade de uma liga de alumínio com outros materiais (ASM - American Society for Metals, 1989)

Ligas	Condições (a)	Usinabilidade (b)
Liga de alumínio 2017	STA	300
B1112 Aço resulfurizado	HR	100
1020 Aço Carbono	CD	70
Aço 4340	A	45
Titânio	A	40
302 Aço Inoxidável	A	35
Ti-5Al-2,5Sn	A	30
Ti-6Al-4V	A	22
Ti-6Al-6V-2Sn	A	20
Ti-6Al-4V	STA	18
HS25 (Base - Co)	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

2.3.2. Fatores que influenciam na usinabilidade das ligas de alumínio

Segundo Diniz et al. (2008), as ligas de alumínio, de forma geral, apresentam boa usinabilidade.

Entretanto, ainda de acordo com Diniz et al. (2008), com relação aos critérios de usinabilidade baseados na rugosidade da peça e na característica do cavaco, não se pode dizer que o alumínio tenha usinabilidade alta, pois em condições normais de usinagem o acabamento superficial não é satisfatório e o cavaco possui formato alongado. Para se obter bom acabamento superficial, deve-se atentar tanto à velocidade de corte, que deve ser suficientemente alta, bem como à geometria da ferramenta, conforme mostra a figura 4:

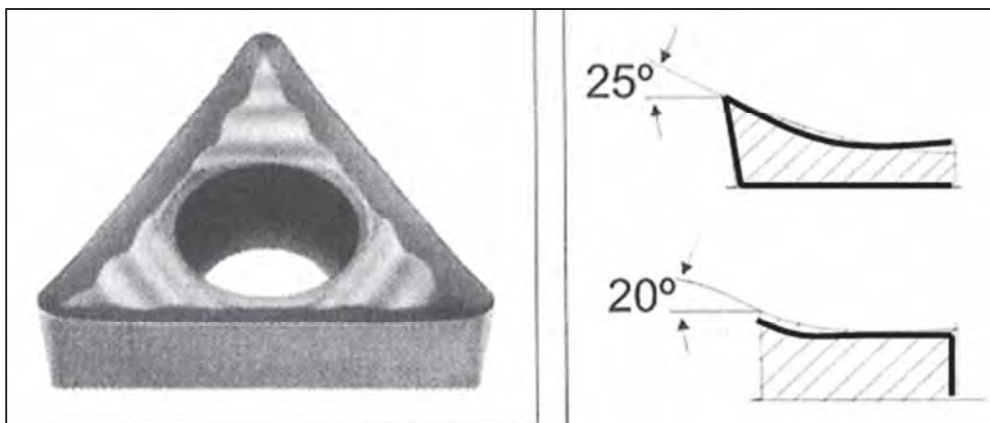


Figura 4: Geometria típica de pastilha para torneamento de ligas de alumínio (ZANGRANDI, 2008).

De acordo com Diniz et al. (2008), outros fatores podem influenciar positiva ou negativamente na usinabilidade das ligas de alumínio, como por exemplo: variação de impurezas, processos de fundição e tratamentos aplicados ao metal.

De forma geral, pode-se dividir os elementos de liga presentes em ligas de alumínio em determinados grupos, os quais, cada um a seu modo, influenciam de alguma maneira a usinabilidade do alumínio (ou não, como no caso do Zn), conforme Tabela 5:

Tabela 8: Elementos de liga e suas influências na usinabilidade do alumínio (DINIZ ET AL., 2008)

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

2.3.3. Usinabilidade da liga de alumínio AA6262E

Segundo Alcoa (2010), a liga AA6262E oferece boa usinabilidade quando usinada usando ferramentas de carbeto em tornos mono fuso ou multi fuso. A liga recebe classificação “B” segundo o sistema de classificação da *Aluminium Association*.

Ao contrário das demais ligas objetos de estudo neste trabalho, para a liga AA6262E somente recomenda-se o uso de quebradores de cavaco ou de técnicas especiais para auxiliar a quebra dos cavacos, esporadicamente – dependendo da necessidade.

2.3.4. Aspectos gerais da liga de alumínio AA7050

De acordo com Ribeiro & Cunha, a liga de alumínio AA7050 baseia-se nos elementos Al, Zn, Mg e Cu e foi desenvolvida pela Alcoa em 1970. Nesta liga, o Zn e o Mg agem acarretando a formação de precipitados e a consequente melhora na resistência à corrosão. O Fe e o Si também aparecem, mas são considerados impurezas, formando fases intermetálicas com o alumínio e outros elementos ligantes.

Tabela 9: Composição química (% em peso) da liga 7050 (ALCOA - ALUMINUM COMPANY OF AMERICA, 2011)

Elemento	Nominal (Máx)
Zn	5,7 - 6,7
Cu	2,0 - 2,6
Mg	1,9 - 2,6
Zr	0,08 - 0,115
Fe	0,15
Si	0,12
Mn	0,1
Ti	0,06
Cr	0,04
Al	base

3. Materiais e Métodos

3.1. Procedimento experimental

Realizou-se operação de usinagem por torneamento cilíndrico externo, com ligas de alumínio denominadas AA6262 e AA7050.

Todos os ensaios foram realizados com pastilhas de metal duro que, conforme mencionado anteriormente na seção 2.2.4.1, é o tipo de material de ferramenta mais recomendado para a usinagem das ligas objetos deste estudo. Além disso, as ferramentas não apresentavam cobertura e eram dotadas de quebra cavaco.

Para cada liga de Al realizou-se a operação de torneamento em três passos:

1. Redução do diâmetro do tarugo de 30,0mm para 29,0mm;
2. Redução do diâmetro do tarugo de 29,0mm para 28,0mm;
3. Redução do diâmetro do tarugo de 28,0mm para 27,0mm.

No intermédio entre cada passo mencionado acima, realizou-se a coleta dos cavacos formados para que fosse possível fazer uma análise sobre os tipos e comprimentos dos mesmos em cada etapa de usinagem das ligas. Ainda neste intermédio, realizou-se com o auxílio de um rugosímetro portátil a medição das rugosidades média (R_a) e total (R_y) em três regiões distintas do tarugo, a fim de que fosse possível ter uma melhor representação do comportamento desta variável ao longo dos experimentos, tendo fixados os parâmetros abaixo:

1. Velocidade de corte (V_c) = 300m/min
2. Profundidade de corte (a_p) = 0,5mm
3. Avanço (f) = 0,4mm/volta

Os procedimentos mencionados acima foram realizados para 03 diferentes condições de aplicação do fluido de corte, sendo eles:

1. Usinagem a seco (sem aplicação do fluido);
2. Usinagem com fluido de corte abundante;
3. Usinagem com fluido de corte mediante aplicação da técnica MQF (Mínima Quantidade de Fluido).

Dispôs-se de corpos de prova com comprimentos de usinagem (L_f) variando de 257,0mm a 262,0mm para os ensaios de torneamento tratados no presente estudo.

Com os dados obtidos, foram feitos para melhor análise dos resultados, os gráficos que relacionam ($R_a \times L_c$) e ($R_y \times L_c$), conforme poderá ser verificado mais adiante.

3.2. Equipamentos, ferramentas e materiais utilizados

3.2.1. Equipamentos utilizados

- Máquina Ferramenta: Torno CNC, marca Romi, modelo Centur 30S. Máquina com rotação máxima de 3500rpm, 10kW, disponível no DMT/FEG-UNESP – Guaratinguetá, conforme Figura 23:



Figura 23: Máquina Ferramenta Torno CNC, Marca ROMI, Modelo Centur 30S.

- Rugosímetro Portátil, marca Mitutoyo, modelo SURFTEST-301, com apalpador mecânico e raio de ponta de 5 μ m, conforme Figura 24:



Figura 24: Rugosímetro Portátil, marca Mitutoyo, modelo SURFTEST-301.

3.2.2. Ferramentas utilizadas

- Ferramentas de corte de metal duro sem cobertura, marca SECO, geometria TCGT 16T304F-AL KX.
- Suporte para fixação da ferramenta de corte, também da marca SECO, geometria STCCK2020K16.

3.2.3. Materiais utilizados

- Corpos de prova da liga de Al AA7050, com diâmetro de 30mm e comprimento de 280mm;
- Corpos de prova da liga de Al AA6262, com diâmetro de 30mm e comprimento de 280mm;
- Para fluido de corte nas operações com fluido de corte abundante, utilizou-se o óleo emulsionável de base naftalênica, fornecedor PETROBRAS, denominado Lubrax OP 38 EM.
- Para operações mediante aplicação da técnica de MQF, utilizou-se o fluido integral de corte de base vegetal, fornecedor ITW, tipo LB1000.

3.3. Análise dos resultados

Partindo-se do objetivo proposto para o trabalho, de se estudar o comportamento durante a usinagem de torneamento das ligas AA7050 e AA6262, verificou-se este fato,

aplicando-se aos experimentos três diferentes abordagens no que diz respeito à forma pela qual foi conduzida a aplicação do fluido de corte.

Neste contexto, conforme mencionado anteriormente, utilizou-se da usinagem das ligas em questão primeiramente sem aplicação de fluido; depois com aplicação de fluido em abundância e, por último, com aplicação da técnica de MQF (Mínima Quantidade de Fluido).

No decorrer dos experimentos propostos neste trabalho, foram colhidas amostras dos cavacos formados em cada uma das situações (usinagem a seco, com fluido de corte em abundância e MQF) para posterior análise dos mesmos.

4. Resultados e Discussão

4.1. Comparação entre as rugosidades superficiais obtidas

Durante os intervalos entre as operações de torneamento a seco das ligas 6262 e 7050 – intervalos estes que separavam as reduções de diâmetro realizadas nos tarugos, a peça usinada foi posicionada sobre a bancada do laboratório, onde passou por medidas de rugosidades média (R_a) e total (R_y) com a utilização do rugosímetro portátil mencionado anteriormente.

4.1.1. Rugosidades obtidas para as operações a seco

A Figura 25 relaciona os valores de rugosidade média (R_a) para as ligas estudadas com os comprimentos de corte (L_c) equivalentes, para operações a seco (sem a utilização do fluido refrigerante).

Para a liga 7050 constatou-se uma melhora da rugosidade média com o aumento do comprimento de corte, provavelmente devido à acomodação da aresta de corte:

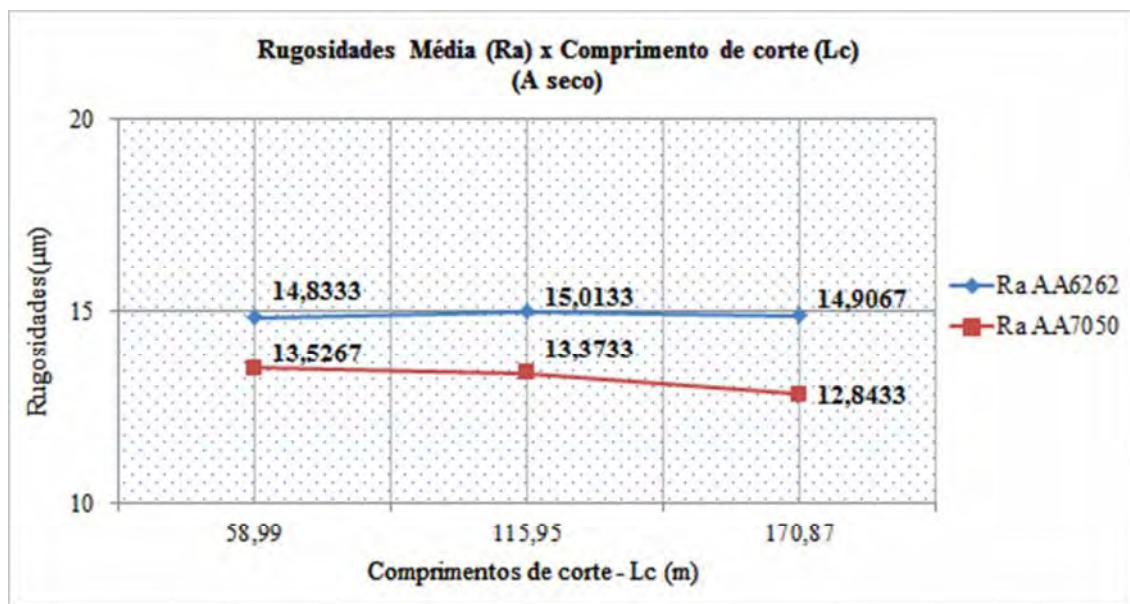


Figura 25: Resultados de rugosidade média (R_a) com relação ao comprimento de corte (L_c) para as ligas AA6262 e AA7050 para a usinagem a seco.

A Figura 26 relaciona os valores de rugosidade total (R_y) para as ligas estudadas com os comprimentos de corte equivalentes, para operações a seco (sem a utilização do fluido refrigerante).

Para este caso, pode-se perceber a mesma tendência apresentada na Figura 25. Constatou-se entretanto uma ligeira vantagem na taxa de melhoria da rugosidade da liga 7050 comparada a 6262, com o aumento do comprimento de corte:

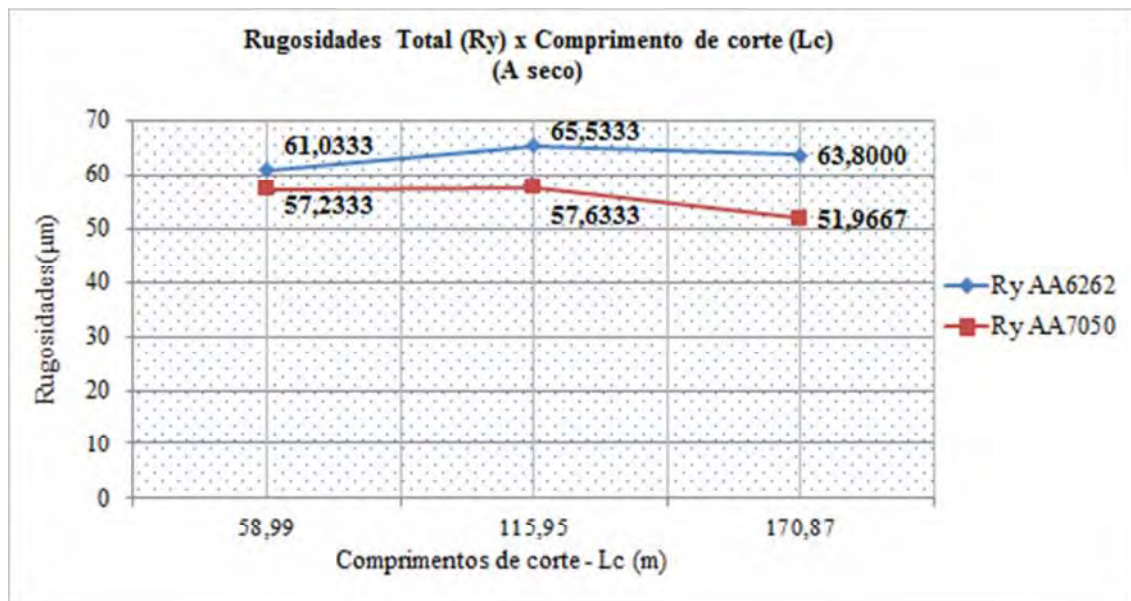


Figura 26: Resultados de rugosidade total (R_y) com relação ao comprimento de corte (L_c) para as ligas AA6262 e AA7050 para a usinagem a seco.

4.1.2. Rugosidades obtidas para as operações com fluido de corte abundante

A Figura 27 relaciona os valores de rugosidade média (R_a) para as ligas estudadas com os comprimentos de corte equivalentes, para operações com fluido de corte abundante.

Neste quesito não se notou diferença entre os comportamentos das duas ligas:

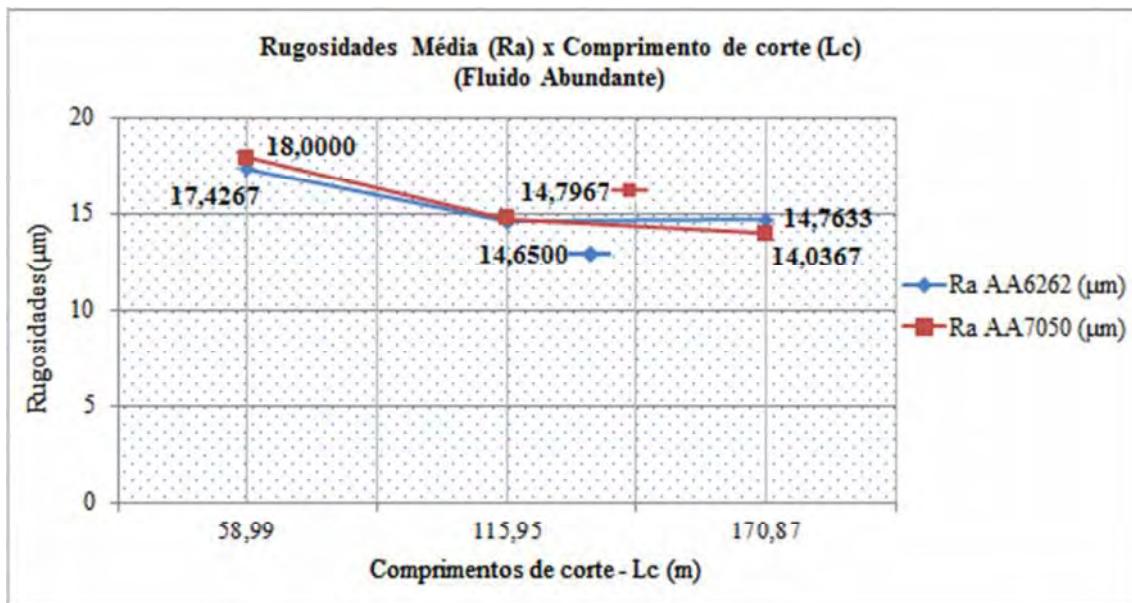


Figura 27: Resultados de rugosidade média (Ra) com relação ao comprimento de corte (Lc) para as ligas AA6262 e AA7050 para a usinagem com fluido de corte abundante.

A Figura 28 relaciona os valores de rugosidade total (Ry) para as ligas estudadas com os comprimentos de corte equivalentes, para operações com fluido de corte abundante.

Nota-se que para a liga 7050 houve melhoria da rugosidade, possivelmente em função da acomodação da aresta de corte. Já para a liga 6262 não houve a mesma percepção:

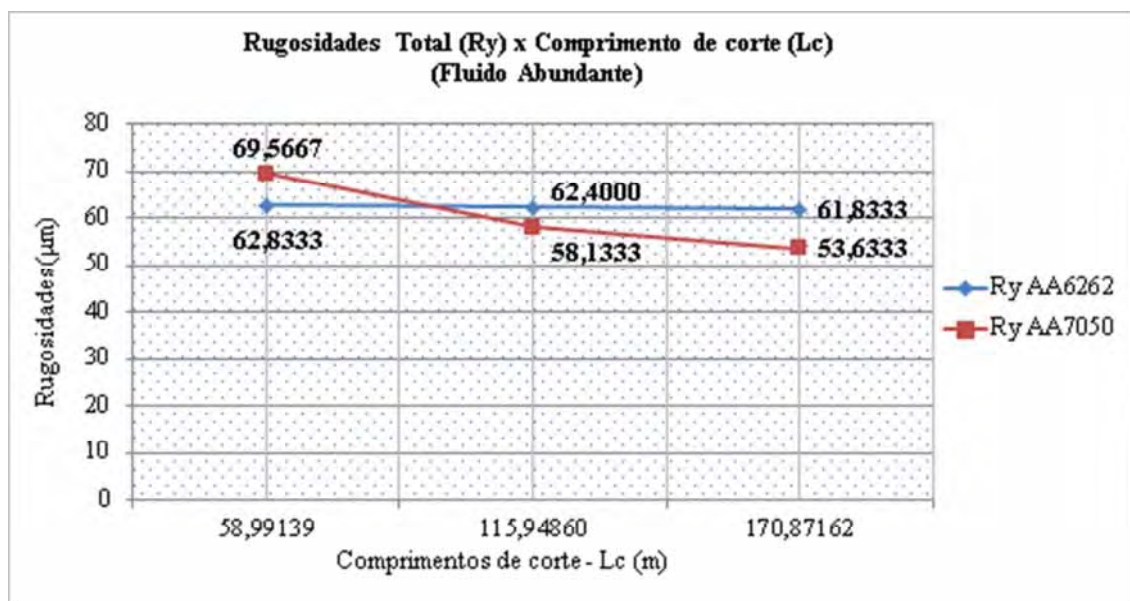


Figura 28: Resultados de rugosidade total (Ry) com relação ao comprimento de corte (Lc) para as ligas AA6262 e AA7050 para a usinagem com fluido de corte abundante.

4.1.3. Rugosidades obtidas para as operações com aplicação de fluido de corte mediante a técnica de MQF (Mínima Quantidade de Fluido)

A Figura 29 relaciona os valores de rugosidade média para as ligas estudadas com os comprimentos de corte equivalentes, para operações mediante aplicação da técnica de MQF.

Constatou-se que os resultados com a liga 6262 foram mais satisfatórios, devido provavelmente a acomodação mais acentuada da aresta de corte permitindo melhorias nos valores de rugosidade. Já para a liga 7050 talvez o aumento da temperatura tenha dificultado o corte em função das deformações:

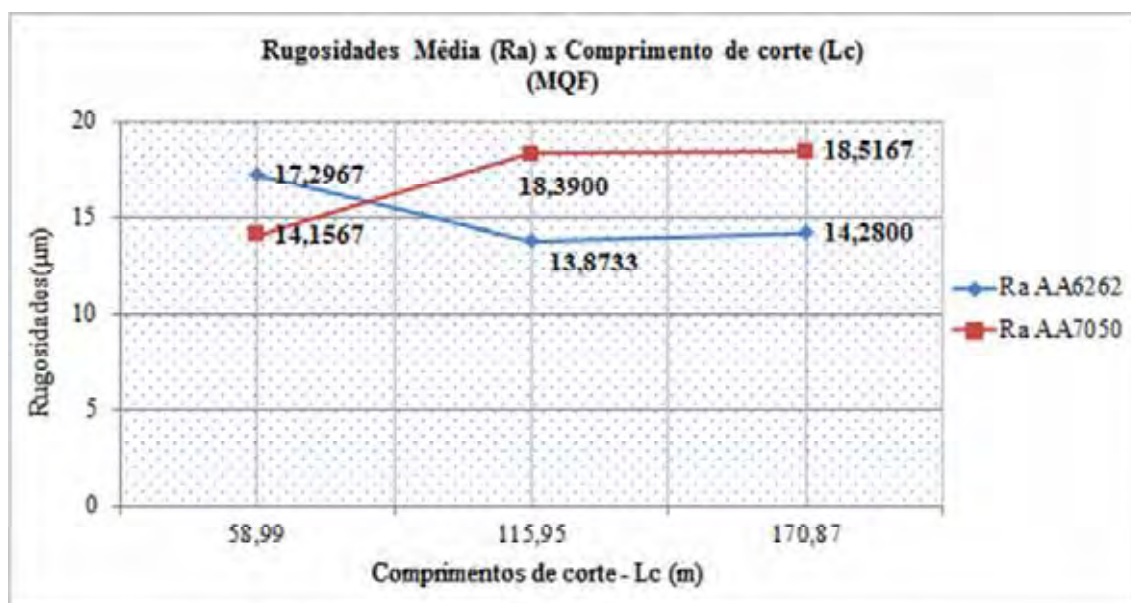


Figura 29: Resultados de rugosidade média (Ra) com relação ao comprimento de corte (Lc) para as ligas AA6262 e AA7050 para a usinagem realizada mediante técnica de MQF.

A Figura 30 relaciona os valores de rugosidade total para as ligas estudadas com os comprimentos de corte equivalentes, para operações mediante aplicação da técnica de MQF.

Constatou-se para esta análise de rugosidade total (R_y) a mesma tendência apresentada na Figura 29 para rugosidade média (R_a):

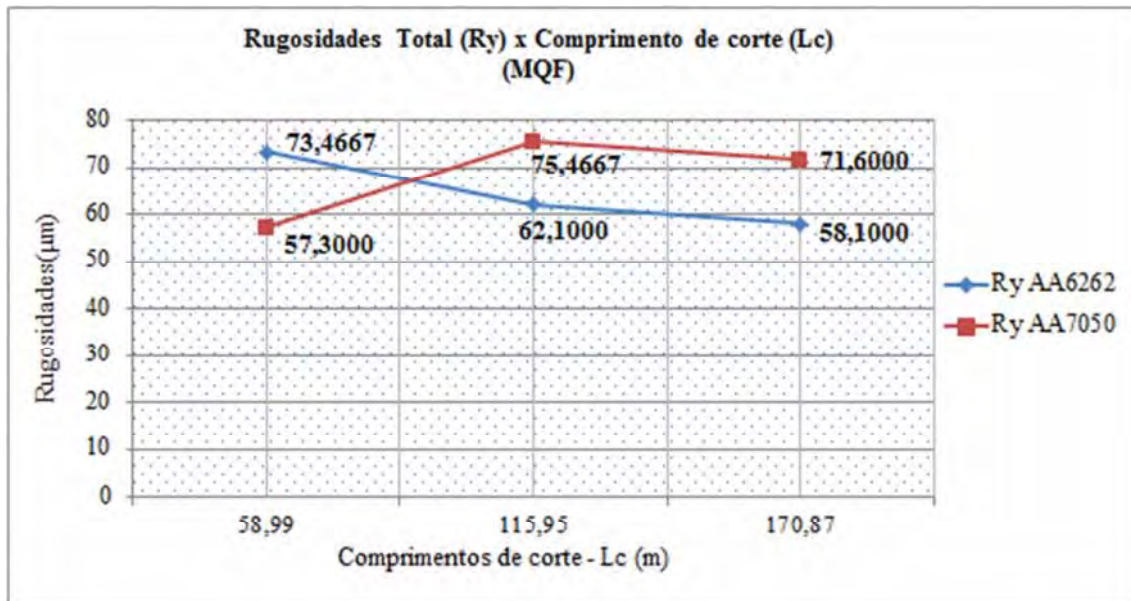


Figura 30: Resultados de rugosidade total (Ry) com relação ao comprimento de corte (Lc) para as ligas AA6262 e AA7050 para a usinagem realizada mediante técnica de MQF.

4.2. Análise dos cavacos gerados durante as operações de torneamento

Durante os ensaios de torneamento a seco, com fluido de corte abundante e MQF foram colhidas amostras dos cavacos para cada redução de diâmetro realizada nos tarugos de alumínio (de 30,0mm para 29,0mm – cavacos iniciais para comprimento de corte $L_c = 59\text{mm}$; de 29,0mm para 28,0mm – cavacos intermediários para comprimento de corte $L_c = 116\text{mm}$ e de 28,0mm para 27,0mm – cavacos finais para comprimento de corte $L_c = 171\text{mm}$).

4.2.1. Análise dos cavacos gerados durante operação a seco

Na Figuras 31 e 32 seguem fotografias dos cavacos referentes as operações de torneamento a seco, para as ligas estudadas. Constatou-se uma ligeira melhora na quebra dos cavacos com o aumento do comprimento de corte, bem como a boa usinabilidade da liga 7050 sob estas condições (com os menores cavacos):



(a) $L_c = 59\text{mm}$



(b) $L_c = 116\text{mm}$

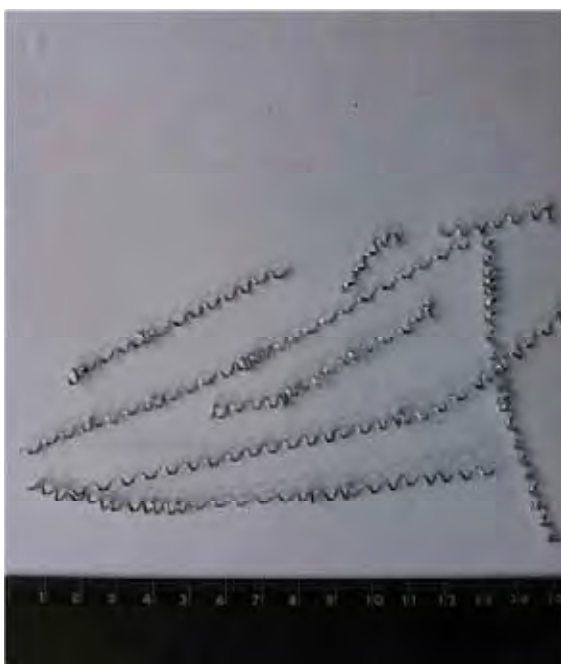


(c) $L_c = 171\text{mm}$

Figura 31: Cavacos obtidos na usinagem a seco para a liga AA7050: (a) cavaco inicial, (b) cavaco intermediário, (c) cavaco final



(a) $L_c = 59\text{mm}$



(b) $L_c = 116\text{mm}$



(c) $L_c = 171\text{mm}$

Figura 32: Cavacos obtidos na usinagem a seco para a liga AA6262: (a) cavaco inicial, (b) cavaco intermediário, (c) cavaco final

4.2.2. Análise dos cavacos gerados durante operação com fluido de corte abundante

Nas Figuras 33 e 34 seguem fotografias dos cavacos referentes as operações de torneamento com fluido de corte abundante, para as ligas estudadas. Com exceção para o caso da liga 6262 no quesito rugosidade total, com o aumento do comprimento de usinagem (L_c) percebeu-se diminuição no tamanho dos cavacos formados, bem como na rugosidade dos materiais e, conforme proposto anteriormente, tal fato deve-se possivelmente a acomodação da aresta de corte.



(a) $L_c = 59\text{mm}$



(b) $L_c = 116\text{mm}$



(c) $L_c = 171\text{mm}$

Figura 33: Cavacos obtidos na usinagem com fluido de corte abundante para a liga AA7050: (a) cavaco inicial, (b) cavaco intermediário, (c) cavaco final



(a) $L_c = 59\text{mm}$



(b) $L_c = 116\text{mm}$



(c) $L_c = 171\text{mm}$

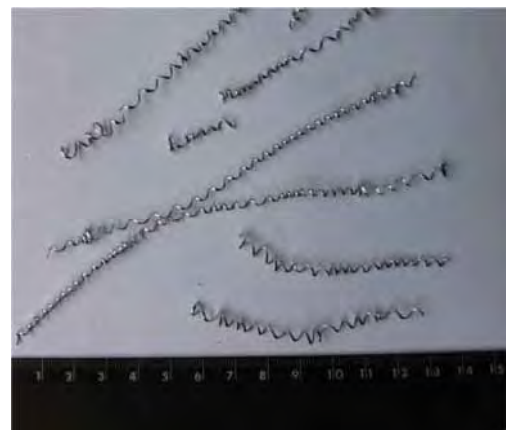
Figura 34: Cavacos obtidos na usinagem com fluido de corte abundante para a liga AA6262: (a) cavaco inicial, (b) cavaco intermediário, (c) cavaco final

4.2.3. Análise dos cavacos gerados durante operação com aplicação de fluido mediante técnica de MQF (Mínima Quantidade de Fluido)

Nas figuras 35 e 36 seguem fotografias dos cavacos referentes as operações de torneamento mediante aplicação da técnica de MQF, para as ligas estudadas. Semelhantemente ao caso das rugosidades extraídas para este experimento mediante MQF sobre as quais constatou-se primeiramente uma grande variabilidade seguida de uma certa constância, verificou-se inicialmente mudança brusca nas formas dos cavacos, o que posteriormente revelou-se uma variável com maior uniformidade. Tal fato deveu-se provavelmente a uma acomodação da aresta de corte (maior para a liga 6262 que apresentou os menores cavacos e os menores valores de rugosidades média (R_a) e total (R_y)):



(a) $L_c = 59\text{mm}$



(b) $L_c = 116\text{mm}$



(c) $L_c = 171\text{mm}$

Figura 35: Cavacos obtidos na usinagem mediante técnica MQF para a liga AA7050: (a) cavaco inicial, (b) cavaco intermediário, (c) cavaco final



(a) $L_c = 59\text{mm}$



(b) $L_c = 116\text{mm}$



(c) $L_c = 171\text{mm}$

Figura 36: Cavacos obtidos na usinagem mediante técnica MQF para a liga AA6262: (a) cavaco inicial, (b) cavaco intermediário, (c) cavaco final

5. Considerações finais

Com relação aos testes realizados, pode-se perceber variações nos comprimentos e formas dos cavacos formados – apesar de serem todos do tipo helicoidal, bem como nas rugosidades médias (R_a) e totais (R_y) das ligas AA7050 e AA6262, quando submetidas aos métodos de usinagem por torneamento a seco, com fluido de corte abundante e mediante técnica de MQF, bem como quando submetidas às sucessivas diminuições em seus diâmetros (passes).

Desde o início dos experimentos, esperava-se que as rugosidades apresentadas pelos materiais não fossem relativamente baixas, visto que se fixou o parâmetro avanço (f) em 0,4mm/rev para todos os ensaios, sendo este valor de avanço típico para operações de desbaste - onde o objetivo não é obter ótimos acabamentos superficiais, mas serve de parâmetro para comparações como é o caso do presente estudo.

Observou-se nos experimentos com a liga 6262 que a técnica de MQF, tanto para aplicação do fluido de corte quanto para as formas dos cavacos gerados, é a mais vantajosa, devido esta proporcionar menores valores de rugosidade média (R_a) e total (R_y) além de cavacos com menores comprimentos (maior quebra de cavaco), o que representa uma grande vantagem quando da usinagem desta liga, visto que a aplicação desta técnica implica vantagens de ordem econômica e até mesmo ambiental. Neste caso, foi observado uma contradição com relação as literaturas que dizem ser a aplicação de fluido de corte abundante aquela que proporciona melhores cavacos, uma vez que, conforme constatado, os menores cavacos foram obtidos mediante aplicação da técnica de MQF.

Já no que tange as informações retiradas dos experimentos realizados com a liga 7050, observou-se que a usinagem a seco é a melhor opção quando se fala em termos de rugosidade superficial das peças e formas de cavaco, visto que durante os testes feitos sob esta condição as rugosidades média (R_a) e total (R_y) foram as menores, assim como os cavacos que se apresentaram mais quebradiços. Neste caso, ao contrário do que se esperava, os resultados mediante aplicação de MQF não foram os mais satisfatórios, devido provavelmente a alguma alteração microestrutural na liga, tornando o cavaco mais frágil, em função da presença do Zn e do Cu – que são o que diferenciam esta liga com relação a liga 6262.

6. Conclusões

Pode-se constatar a significativa influência que possuem os parâmetros relacionados a aplicação de fluido de corte durante a operação de usinagem por torneamento com ligas de alumínio.

Nestas condições, pode ser constatado o que segue abaixo:

- Liga 6262: diferentemente do que diz a literatura, os melhores resultados foram obtidos não na usinagem com fluido de corte abundante, mas sim mediante aplicação da técnica de MQF;
- Liga 7050: os melhores resultados foram obtidos na usinagem a seco, devido provavelmente a alterações microestruturais na liga, tornando os cavacos mais frágeis, em função da presença do Zn e do Cu – elementos que diferenciam esta liga da liga 6262.

Ademais, com relação aos cavacos formados, concluiu-se o que segue:

- Liga 6262: melhores cavacos obtidos durante a usinagem por torneamento mediante aplicação de técnica de MQF;
- Liga 7050: melhores cavacos obtidos durante a usinagem por torneamento a seco.

Sabe-se que uma característica intrínseca dos cavacos é a sua alta deformidade. No entanto, por vezes, percebeu-se pequenas diferenças dos mesmos quando comparados a outros provenientes das mesmas condições de estudo (mesmo material, mesmo diâmetro final e mesma condição de aplicação de fluido, sendo fixados os parâmetros mencionados na seção 3.1), o que nos indica que podem ter ocorrido mudanças de ordem estrutural no material, ocasionadas provavelmente pelas altas temperaturas presentes no processo de usinagem, consequentes altas taxas de troca de calor entre o mesmo e o ambiente, bem como pelas altas pressões ou deformações plásticas sofridas pelos mesmos durante o processo.

7. Referências

ABAL - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO (Brasil). **O alumínio:**

alumínio Primário. Disponível em:

http://www.abal.org.br/aluminio/producao_alupri.asp>. Acesso em: 20 jul. 2011.

AEC - THE ALUMINIUM EXTRUDERS COUNCIL. **Alloys:** Effects of Alloying

Elements. Disponível em: <<http://www.aec.org/techinfo/alloys.html>>. Acesso em: 15

nov. 2011.

ALCOA - ALUMINIUM COMPANY OF AMERICA. **Alloy 7050: Plate and Sheet – Best Combination of Properties.** Disponível em:

<http://www.alcoa.com/mill_products/catalog/pdf/alloy7050techsheetrev.pdf>. Acesso em: 5 dez. 2011.

ALCOA - ALUMINUM COMPANY OF AMERICA. **Fundamentos e Aplicações do alumínio.** Disponível em:

<http://www.alcoa.com/brazil/pt/alcoa_brazil/pdfs/fundamentos-Alum%C3%ADnio.pdf>. Acesso em: 3 nov. 2011.

ALCOA - ALUMINUM COMPANY OF AMERICA. **Ligas e Têmperas de Extrusão.**

Disponível em:

<http://www.alcoa.com/brazil/catalog/pdf/Catalogo_Ligas_e_Temperas_final_baixa.pdf>. Acesso em: 2 nov. 2011.

AMORIM, Heraldo. **Processos de Fabricação por Usinagem:** Materiais para Ferramenta de Corte. Disponível em:

<http://www.ufrgs.br/gpfai/download/eng03343_10.pdf>. Acesso em: 11 out. 2011.

BRASIL. Ufpe Mecânica. Nenhuma. **Tolerâncias de acabamento superficial rugosidade:** Parâmetros de avaliação da rugosidade. Disponível em:

<<http://ufpemecanica.files.wordpress.com/2011/07/rugosidade.pdf>>. Acesso em: 02 dez. 2011.

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCODES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. São Paulo: Artliber Editora Ltda, 2008.

ASM - AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Metals Handbook: Machining**. 9. ed. Metal Park, Oh: Asm - American Society For Metals, 1989.

PORTAL DOS MOLDES. **Avarias e Desgastes de Ferramentas de Corte**. Disponível em: <<http://www.moldesinjecaoplasticos.com.br/avarias.asp>>. Acesso em: 3 dez. 2011.

ANTONIONE, C.; MARINO, F.; RIONTINO, G.. **Materials Chemistry and Physics**. New York: Elsevier Sequoia, 1988.

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA, UFRGS - GPFai. **CAVACOS DE USINAGEM**. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/gpfai/download/usinagem_2.pdf>. Acesso em: 3 dez. 2011.

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1988.

BRESCIANI FILHO, Ettore. **Seleção de Metais não Ferrosos**. Campinas: Editora da Unicamp, 1992.

LOPES, Karina Stefania Souza. **Influência dos parâmetros de usinagem à fadiga de aços AISI 4140**. Disponível em: <<http://www.mea.pucminas.br/dissert/071-completo.pdf>>. Acesso em: 1 dez. 2011.

MOREIRA, Marcelo F.. **Ligas de alumínio conformadas: alumínio e suas ligas**. Disponível em: <<http://www.cefet-to.org/~09111212/Mec%E2nica/aluminioconf.pdf>>. Acesso em: 1 dez. 2011.

OLIVEIRA, Vagner Gonçalves de. **A influência do cavaco no processo de usinagem com ferramentas de corte em torno cnc**. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAaamgAG/a-influencia-cavaco-no-processo-usinagem-com-ferramentas-corte-torno-cnc>>. Acesso em: 3 dez. 2011.

PALMA, Ernani Sales. **Determinação de danos de fadiga em vidas super longas (Giga Ciclos)**. Disponível em: <<http://mea.pucminas.br/palma/gigaciclos.pdf>>. Acesso em: 1 dez. 2011.

RIBEIRO, Marcos Valério; CUNHA, Elias Alves da. **USINAGEM DA LIGA DE ALUMÍNIO ASTM AA 7050 POR TORNEAMENTO**. Disponível em: <<http://www.grima.ufsc.br/cobef4/files/011072215.pdf>>. Acesso em: 5 dez. 2011.

SANDVIK. **Manual Técnico de Usinagem**. Sandviken: Elanders, 2005.

SPECTRU INSTRUMENTAL CIENTÍFICO LTDA. **REVESTIMENTOS DUROS RESISTENTES AO DESGASTE DEPOSITADOS POR SOLDAGEM UTILIZADOS NA RECUPERAÇÃO DE ELEMENTOS DE MÁQUINAS**. Disponível em: <<http://www.spectru.com.br/Metalurgia/diversos/soldadesgaste.pdf>>. Acesso em: 3 dez. 2011.

STOETERAU, Rodrigo Lima. **Processos de Usinagem - Fabricação por Remoção de Material**. Disponível em: <<http://www.scribd.com/doc/35754746/Usinagem-Apostila-Toda-Ilustrada-UFSC>>. Acesso em: 3 dez. 2011.

STOETERAU, Rodrigo Lima. **Introdução aos Processos de Usinagem**. Disponível em: <<http://www.lmp.ufsc.br/disciplinas/emc5240/Aula-01-U-2007-1-Introducao.pdf>>. Acesso em: 4 dez. 2011.

STOETERAU, Rodrigo Lima. **Processos de Usinagem**. Disponível em: <<http://www.lmp.ufsc.br/disciplinas/Stoterau/Aula-01-U-2007-1-introducao.pdf>>. Acesso em: 3 dez. 2011.

STOETERAU, Rodrigo Lima. **Usinabilidade dos Materiais e Vida das Ferramentas**. Disponível em: <http://www.lmp.ufsc.br/disciplinas/emc5240/Aula-07-08-U-2007-1-Usinabilidade_e_vida.pdf>. Acesso em: 30 ago. 2011.

WIKIPÉDIA - A ENCICLOPÉDIA LIVRE. **alumínio**. Disponível em:
<<http://pt.wikipedia.org/wiki/alumínio>>. Acesso em: 3 dez. 2011.

CALLISTER, Jr. William D.. **Materials Science and Engineering: an introduction**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2007.

YOSHIKAWA, Daniel Serra. **Efeito de tratamentos de modificação da superfície na resistência à corrosão do alumínio 1050**. 2011. 1 v. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Técnicas Energéticas e Nucleares - Ipen/cnen-sp, São Paulo, 2011.
Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-16062011-142133/publico/2011YoshikawaEfeito.pdf>>. Acesso em: 12 nov. 2011.

ZANGRANDI, Aélcio. **ALUMÍNIO E SUAS LIGAS: FUNDAMENTOS METALÚRGICOS E TECNOLÓGICOS**. Lorena: Ist, 2008.