

RICARDO AUGUSTO GONÇALVES

**INVESTIGAÇÃO DA USINABILIDADE DAS LIGAS DE
ALUMÍNIO DA SÉRIE 6XXX**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2012

RICARDO AUGUSTO GONÇALVES

**INVESTIGAÇÃO DA USINABILIDADE DAS LIGAS DE ALUMÍNIO DA
SÉRIE 6XXX**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA.**

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva

UBERLÂNDIA – MG

2012

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU , MG, Brasil

G635i Gonçalves, Ricardo Augusto, 1986-
2012 Investigação da usinabilidade das ligas de alumínio da série
6xxx / Ricardo Augusto Gonçalves. - 2012.
124 f. : il.

Orientador: Márcio Bacci da Silva.

Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Usinagem - Teses. 3. Ligas de
alumínio-magnésio-silício - Usinabilidade - Teses. I. Silva, Márcio
Bacci da, 1964- II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica pela oportunidade de realizar este curso.

Ao CNPQ pelo apoio financeiro.

À CBA – Companhia Brasileira do Alumínio - pelo fornecimento das ligas de alumínio

Aos colegas do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem pelo apoio e contribuição direta no trabalho desenvolvido, principalmente Daniel Fernandes da Cunha, Igor César Pereira, Marcelo do Nascimento Sousa, Márcio Aurélio da Silva e Ledan Naves Oliveira Sobrinho.

Aos amigos e técnicos de laboratório Eurípedes Balssanufu Alves, Lázaro Henrique Alves Vieira, Rodrigo César Martins e Ângela Maria da Silva Andrade pelo apoio na montagem e realização dos experimentos.

Ao meu orientador Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva por ser a maior fonte de inspiração e por estar sempre à disposição e empenhado para que o trabalho fosse desenvolvido da melhor maneira.

Ao Prof. Dr. Álisson Rocha Machado e ao Prof. Dr. Éder Costa do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem por sempre estarem dispostos a ajudar.

Ao Prof. Dr. Cleudmar Amaral de Araújo pela realização dos ensaios de tração.

Aos meus pais José Ricardo e Eudulemia, meu irmão Reinaldo e minha noiva Daryane Cotrim Espindola por todo carinho e apoio para que eu conseguisse vencer mais esta etapa de minha vida.

GONÇALVES, R. A. **Investigação da Usinabilidade das Ligas de Alumínio da Série 6XXX**. 2012. 107 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Resumo

Devido à grande utilização das ligas de alumínio e o enorme salto da sua participação no mercado, as empresas produtoras necessitam de mais conhecimento à cerca do comportamento destas ligas durante os processos de fabricação a fim de fornecer mais dados técnicos aos seus clientes. Dentro dos diversos processos de fabricação a usinagem aparece como um dos processos mais utilizados na indústria. Este trabalho tem como principal objetivo investigar a usinabilidade no torneamento cilíndrico externo de cinco ligas de alumínio-magnésio-silício da série 6XXX (6082, 6351, 6005A, 6063 e 6061) em termos das três componentes da força de usinagem, rugosidade, grau de recalque e forma do cavaco utilizando ferramenta de metal duro da classe N. Seguindo um planejamento estatístico foi verificado o efeito dos parâmetros de corte: velocidade de corte, avanço e profundidade de corte. Os resultados mostram que em geral, as forças de corte na usinagem da liga 6082 são maiores. Em termos de rugosidade, os melhores resultados foram obtidos com a liga 6063, que também apresenta maiores graus de recalque. Os cavacos formados na usinagem das ligas têm, geralmente, a forma helicoidal curto e arco solto. Este trabalho mostra diferenças na usinagem das cinco ligas gerando dados importantes aos fabricantes e à indústria que utiliza estas ligas de alumínio.

Palavras chave: Usinabilidade. Ligas alumínio-magnésio-silício. Força de usinagem. Rugosidade. Grau de recalque.

GONÇALVES, R. A. **Investigation of the Machinability of Aluminum Alloys of the 6XXX Series**. 2012. 107 f. M. Sc. Dissertation, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Abstract

Due the wide use of the aluminum alloys and their large participation in the market, the producers need more knowledge about the alloys behavior in manufacturing process to provide more technical data for his clients. In this scenario the machining is one of the most use processes in the industry. This work has as the main purpose to investigate the machinability in turning of five aluminum-magnesium-silicon alloys of the 6XXX series (6082, 6351, 6005A, 6063 and 6061) in terms of the three components of machining force, surface roughness, chip thickness ratio and chip shape using carbide tools of the N class. Following a statistic planning it was check the effect of cutting parameters: cutting speed, feed rate and depth of cut. The results showed that usually the cutting forces in machining 6082 alloy were higher. In terms of roughness, the best results were achieved with 6063 alloy, which also had higher chip thickness ratio. The chips formed in machining of the alloys usually had the short helical and loose arc forms. This research showed the differences when machining the five alloys generating important data for manufacturers and industry that uses this aluminum alloys.

Keywords: Machinability. Aluminum-magnesium-silicon alloys. Machining force. Surface roughness. Chip compression ratio.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2.1 - Principais áreas produtoras de bauxita. (Fonte: < http://www.aluminiumleader.com/images/content/serious/industry/map_en.jpg >) | 4 |
| Figura 2.2 - Produção mundial de alumínio primário em 2010. (Fonte: A sustentabilidade da indústria brasileira do alumínio / Confederação Nacional da Indústria. Associação Brasileira de Alumínio. – Brasília: CNI, 2012) | 5 |
| Figura 2.3 - Produção brasileira de Alumínio no de 2010 (Fonte: ABAL – Associação Brasileira de Alumínio) | 5 |
| Figura 2.4 - Fluxo da cadeia de produção do alumínio primário (Fonte: ABAL) | 6 |
| Figura 2.5 - Aplicações do alumínio (Fonte: < abal.org.br >, < aluminium.matter.org.uk > e < aluminiumleader.com >) | 8 |
| Figura 2.6 - Participação dos principais segmentos consumidores em 2010 (Fonte: ABAL) | 9 |
| Figura 2.7 - Relação entre sucata recuperada e consumo doméstico – 2005 (Fonte: The Aluminum Association, cálculo ABAL) | 11 |
| Figura 2.8 - Proporção de material reciclado em atividades industriais no Brasil – 1993 – 2008 (Fonte: ABAL) | 11 |
| Figura 2.9 - Principais elementos de liga e classificação das ligas de alumínio (Fonte: ASM, SPECIALTY HANDBOOK – Aluminum and aluminum alloys – ASM International, 1993) | 13 |
| Figura 2.10 - Solubilidade sólida de equilíbrio binário como uma função da temperatura para os elementos de liga mais frequentemente adicionados ao alumínio. (METALS HANDBOOK, 1992) | 20 |
| Figura 2.11 - Diagrama Mg x Si para as principais ligas da série 6XXX (Fonte: < www.eaa.net >) | 21 |
| Figura 2.12 - a) Vértice rico em alumínio do diagrama ternário Al-Mg-Si; b) Diagrama pseudo-binário Al-Mg ₂ Si (MARTINS, 2008) | 22 |
| Figura 2.13 - Efeito do conteúdo de Mg e Si em ligas Al-Mg ₂ Si no limite de resistência à tração (HANDBOOK OF ALUMINUM, 1996) | 23 |
| Figura 2.14 - Precipitados em forma de bastonetes em ligas Al-Mg ₂ Si (HANDBOOK OF ALUMINUM, 1996) | 24 |

| | |
|---|----|
| Figura 2.15 - Diagrama esquemático das zonas GP de diferentes ligas de alumínio (Fonte: <www.eaa.net>) | 25 |
| Figura 2.16 - Diagrama da formação do cavaco (TRENT; WRIGHT, 2000) | 30 |
| Figura 2.17 - Classes de cavacos: a) cavaco contínuo; b) cavaco contínuo com APC; c) cavaco descontínuo (FERRARESI, 1970) | 31 |
| Figura 2.18 - Formas de cavacos produzidos na usinagem dos metais (ISO 3685, 1993) | 32 |
| Figura 2.19 - Efeito do avanço e da profundidade de corte na forma dos cavacos (SMITH, 1989 - Adaptado por ABRÃO; COELHO; DA SILVA; MACHADO; 2009) | 33 |
| Figura 2.20 - Formas do cavaco formado em várias ligas de alumínio no corte a seco (KAMIYA; TAKOU, 2007) | 35 |
| Figura 2.21 - Ângulo de cisalhamento em função do grau de recalque (KRONENBERG, 1966) | 36 |
| Figura 2.22 - Áreas de aderência e escorregamento na interface cavaco-ferramenta (TRENT; WRIGHT, 2000) | 37 |
| Figura 2.23 - (a) Micrografia de um cavaco de aço ABNT 1050; (b)- Ampliação da região indicada em a; (c)- Ampliação da região indicada em b (RIBEIRO; GONÇALVES, 2010) | 38 |
| Figura 2.24 - Microdureza na zona de fluxo de uma raiz de cavaco de aço ABNT 1050 usinado com $v_c = 75$ m/min, $f = 0,138$ mm/rot e $a_p = 1,5$ mm (RIBEIRO; GONÇALVES, 2010) | 39 |
| Figura 2.25. Imagem da área de contato cavaco-ferramenta, mostrando as diferentes condições de atrito (KILIC; RAMAN, 2006) | 40 |
| Figura 2.26 - Imagens de MEV modificadas da área de contato cavaco-ferramenta após o corte de AL-2024 à $v_c = 470$ m/min com diferentes avanços e profundidades de corte (KILIC; RAMAN, 2006) | 41 |
| Figura 2.27 - Esquema da aresta postiça de corte. (TRENT, 1963) | 42 |
| Figura 2.28 - Aresta postiça de corte na usinagem de uma liga de alumínio à $v_c = 87,6$ m/min (RIBEIRO; GONÇALVES, 2010) | 43 |
| Figura 2.29 - Força de usinagem e suas componentes para o processo de torneamento (Fonte: <http://www.moldesinjecaoplasticos.com.br/fundusinagem.asp>) | 44 |
| Figura 2.30 - Força de corte versus velocidade de corte no processo de fresamento frontal em alta velocidade da liga de alumínio A356 ($f_z = 0.8$ mm/dente; $a_p = 2$ mm; $a_e = 35$ mm) (KISHAWY; DUMITRESCU; ELBESTAWI, 2004) | 45 |
| Figura 2.31 – Força de corte versus velocidade de corte na usinagem da liga de alumínio 6351 com diferentes quantidades de silício utilizando avanço de 0,2 m/rot e profundidade de corte de 2 mm (CUNHA, 2012) | 45 |

| | |
|---|----|
| Figura 2.32 - Forças na ferramenta versus velocidade de corte para a usinagem de magnésio e alumínio (WILLIAMS, SMART E MILNER)..... | 46 |
| Figura: 2.33 – Potência requerida para o torneamento de diversos materiais..... | 47 |
| Figura 2.34 - Parâmetro de rugosidade Rz (ROSA, 2005)..... | 48 |
| Figura 2.35 - Qualidade superficial em função da velocidade de corte na usinagem do alumínio (JOHNE, 1994)..... | 49 |
| Figura 2.36 - Variação típica da rugosidade da superfície (SREEJITH, 2007)..... | 50 |
| Figura 2.37 - Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte (DEARNLEY; TRENT, 1982)..... | 51 |
| Figura 2.38 - Visão esquemática dos mecanismos de desgaste da ferramenta em função de condições tribológicas e de corte (LIST ET AL, 2005)..... | 53 |
| Figura 2.39 - Progresso do desgaste de flanco (SREEJITH, 2007)..... | 53 |
| Figura 2.40 - Zonas de geração de calor em usinagem (MACHADO; DA SILVA, 2004)..... | 54 |
| Figura 2.41 - Comparação das temperaturas durante a furação de ligas de alumínio com 0% de chumbo na B319 e com 0,17% de chumbo na B319(Pb). Cada pico corresponde a um furo (DASCH ET AL, 2008)..... | 55 |
| Figura 3.1 - Barras extrudadas cedidas pela CBA..... | 58 |
| Figura 3.2 - Corpos de prova..... | 58 |
| Figura 3.3 - Durômetro Universal Wolpert..... | 61 |
| Figura 3.4 - Esquema de medição de dureza..... | 61 |
| Figura 3.5 - Corpos de prova para ensaio de tração..... | 62 |
| Figura 3.6 - Microscópio Metalúrgico Risitec..... | 62 |
| Figura 3.7. Torno Revolution RV220..... | 63 |
| Figura 3.8. Ferramenta de corte..... | 64 |
| Figura 3.9. Esquema de medição de força..... | 65 |
| Figura 3.10. Rugosímetro Mitutoyo SJ-201p..... | 65 |
| Figura 3.11. Esquema de medição da rugosidade da superfície..... | 66 |
| Figura 3.12. Paquímetro digital 6" Zaas precision..... | 66 |
| Figura 4.1 - Dureza Vickers para as cinco ligas de alumínio da série 6XXX..... | 68 |
| Figura 4.2 - Curvas tensão x deformação das ligas de alumínio da série 6XXX..... | 70 |
| Figura 4.3 - Limite de resistência à tração para as cinco ligas de alumínio da série 6XXX...71 | 71 |
| Figura 4.4 - Micrografias com aumento de 100x das amostras das ligas de alumínio: a) 6082, b) 6351, c) 6005A, d) 6061 e e)6063..... | 72 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.5 - Micrografias com aumento de 400x das amostras das ligas de alumínio: a) 6082, b) 6351, c) 6005A, d) 6061 e e)6063..... | 73 |
| Figura 4.6 - Força de corte (N) versus velocidade de corte (m/min)..... | 74 |
| Figura 4.7 - Força de corte (N) versus velocidade de corte (m/min) para baixas velocidades de corte..... | 75 |
| Figura 4.8 - Força de corte para as cinco ligas com $vc = 100$ m/min, $f = 0,185$ mm/rot e $ap = 1,5$ mm..... | 76 |
| Figura 4.9 - Força de avanço (N) versus velocidade de corte (m/min)..... | 79 |
| Figura 4.10 - Força passiva (N) versus velocidade de corte (m/min)..... | 80 |
| Figura 4.11 - Força de corte (N) x f (mm/rot)..... | 80 |
| Figura: 4.12 - Força de avanço (N) versus avanço (mm/rot)..... | 81 |
| Figura 4.13 - Força passiva (N) versus avanço (mm/rot)..... | 82 |
| Figura 4.14 - Força de corte (N) versus profundidade de corte (mm)..... | 82 |
| Figura 4.15 - Força de avanço (N) versus profundidade de corte (mm)..... | 83 |
| Figura 4.16 - Força passiva (N) x ap (mm)..... | 84 |
| Figura 4.17 - Ferramenta de corte utilizada nos ensaios mostrando o ângulo de inclinação de 10° | 84 |
| Figura 4.18 - Rugosidade Rq em função da velocidade de corte..... | 85 |
| Figura 4.19 - Rugosidade Rq para as cinco ligas de alumínio da série 6XXX na $vc = 500$ m/min, $f = 0,185$ mm/rot e $ap = 1,5$ mm..... | 85 |
| Figura 4.20 - Força de corte versus tempo para as cinco ligas de alumínio da série 6XXX nas condições de corte $vc = 500$ m/min, $f = 0,185$ mm/rot e $ap = 1,5$ mm..... | 86 |
| Figura 4.21 - Rugosidade Ra versus avanço..... | 88 |
| Figura 4.22 - Rugosidade Rq versus profundidade de corte..... | 88 |
| Figura 4.23 - Grau de recalque em função da velocidade de corte..... | 89 |
| Figura 4.24 - Grau de recalque em função do avanço..... | 90 |
| Figura 4.25 - Grau de recalque em função da profundidade de corte..... | 90 |
| Figura 4.26. Cavacos obtidos na usinagem das cinco ligas de alumínio com $f = 0,185$ mm/rot, $ap = 1,5$ mm e diferentes velocidades de corte..... | 94 |
| Figura 4.27. Cavacos obtidos na usinagem das cinco ligas de alumínio com $vc = 400$ m/min, $ap = 1,5$ mm e diferentes avanços..... | 95 |
| Figura 4.28. Cavacos obtidos na usinagem das cinco ligas de alumínio com $vc = 400$ m/min, $f = 0,185$ mm/rot e diferentes profundidades de corte..... | 96 |
| Figura 4.29 – Superfície deformada elástica e plasticamente (KONG et al, 2006)..... | 98 |
| Figura 4.30 – Força de corte (N) versus tempo (s) para a liga 6005A..... | 98 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.31 - Detalhe dos pares de valores (força de corte(N) ; tempo(s))..... | 99 |
| Figura 4.32 – Função exponencial gerada a partir da curva força de corte(N) versus tempo(s) para a liga 6005A..... | 100 |
| Figura 4.33 – Intervalo de tempo calculado gasto na usinagem com força de corte de 30 N até 10 N para as cinco ligas de alumínio da série 6XXX..... | 101 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 2.1 – Propriedades físicas típicas do alumínio (ABAL)..... | 8 |
| Tabela 2.2 - Classificação das ligas de alumínio..... | 14 |
| Tabela 2.3 - Limites de composição química e densidade do alumínio e das ligas de alumínio trabalháveis (NBR 6834, 2000)..... | 18 |
| Tabela 2.4 - Propriedades físicas típicas das ligas de alumínio. (METALS HANDBOOK, 1992)..... | 18 |
| Tabela 2.5 - Propriedades mecânicas típicas das ligas de alumínio (METALS HANDBOOK, 1992)..... | 18 |
| Tabela 3.1. Ligas de alumínio e quantidade dos principais elementos de liga..... | 57 |
| Tab. 3.2. Níveis de variação dos parâmetros de corte do planejamento composto central.. | 59 |
| Tabela 3.3. Planejamento composto central..... | 60 |
| Tabela 3.4: Dimensões e ângulos da ferramenta de corte..... | 64 |
| Tabela 4.1 - Dureza Vickers ao longo do diâmetro nas diferentes ligas de alumínio ensaiadas..... | 68 |
| Tabela 4.2 – Quadro de ANOVA para os resultados de Dureza Vickers..... | 69 |
| Tabela 4.3 – Valores de p para a diferença entre médias da dureza das ligas de alumínio.. | 69 |
| Tabela 4.4 – Valores de p para a diferença entre as médias de dureza das diferentes regiões de medição..... | 70 |
| Tabela 4.5 - Coeficientes da regressão múltipla para a força de corte..... | 77 |
| Tabela 4.6 - Coeficientes da regressão múltipla para a rugosidade Rq..... | 87 |
| Tabela 4.7. Coeficientes da regressão múltipla para o grau de recalque..... | 91 |

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

6XXX - Família de ligas de alumínio em que os principais elementos de liga são o magnésio e o silício

ABAL - Associação Brasileira do Alumínio

ap - Profundidade de corte

APC - Aresta postiça de corte

ASM - American Society of Metals.

Bastões β' - Precipitados que tem dimensões até cerca de 20x20x500 nm

CBA - Companhia Brasileira de Alumínio

CFC - Estrutura cristalina cúbica de face centrada

CVD - Processo de deposição por vapor químico

f - Avanço

Fc - Força de corte

Ff - Força de avanço

Fp - Força passiva

Fu - Força de usinagem

f_z - Avanço por dente

h - Parte de material não deformado que vai se tornar cavaco

h' - Espessura do cavaco

HB - Dureza Brinell

HV - Dureza Vickers

IACS - International Annealed Copper Standard

ISO - International Standard Organization

LRT - Limite de resistência à tração

MEV - Microscópio eletrônico de varredura

Mg₂Si – Silicato de magnésio (Precipitado responsável pelo endurecimento das ligas da série 6XXX)

MQF - Mínima quantidade de fluído

PCD - Diamante policristalino

ppm - Partes por milhão

R_a - Desvio médio aritmético

R_c - Grau de recalque

rot – Rotação

R_q - Desvio médio quadrático

R_t - Altura total do perfil

R_z - Rugosidade média

T4 - Estado solubilizado e envelhecido naturalmente

T6 - Estado solubilizado e envelhecido artificialmente

v_c - Velocidade de corte

Zonas GP - Zonas de Guinier-Preston

\varnothing - Ângulo de cisalhamento teórico

γ_o - Ângulo de saída

SUMÁRIO

| | |
|---|------|
| Resumo | v |
| Abstract | vi |
| LISTA DE FIGURAS | vii |
| LISTA DE TABELAS | xii |
| LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS | xiii |
| CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO | 1 |
| | |
| CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 3 |
| 2.1. O Alumínio | 3 |
| 2.1.1. <i>Histórico</i> | 3 |
| 2.1.2. <i>Produção</i> | 4 |
| 2.1.3. <i>Propriedades</i> | 6 |
| 2.1.4. <i>Aplicações</i> | 8 |
| 2.2. As Ligas de Alumínio..... | 12 |
| 2.2.1. <i>Influência dos principais elementos de liga</i> | 14 |
| 2.2.2. <i>Ligas da série 6xxx</i> | 17 |
| 2.2.3. <i>Diagrama de fases</i> | 20 |
| 2.2.4. <i>Endurecimento das ligas</i> | 23 |
| 2.2.5. <i>Tratamentos térmicos</i> | 25 |
| 2.3. Usinabilidade..... | 28 |
| 2.4. Formação do cavaco | 29 |
| 2.4.1. <i>Generalidades</i> | 29 |
| 2.4.2. <i>Grau de Recalque</i> | 35 |
| 2.4.3. <i>Condições de interface cavaco-ferramenta</i> | 37 |
| 2.4.4. <i>Aresta postiça de corte (APC)</i> | 41 |
| 2.5. Força de Usinagem | 43 |
| 2.6. Acabamento Superficial..... | 47 |
| 2.7. Ferramentas de corte | 50 |

| | |
|--|------------|
| 2.8. Desgaste de ferramentas | 51 |
| 2.9. Temperatura de corte | 54 |
| 2.10. Fluido de corte..... | 55 |
| CAPÍTULO III - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL | 57 |
| 3.1. Planejamento estatístico | 59 |
| 3.2. Ensaio de caracterização do material | 60 |
| 3.2.1. Ensaio de dureza | 60 |
| 3.2.2. Ensaio de tração | 61 |
| 3.2.3. Análises de microestrutura..... | 62 |
| 3.3. Ensaio de usinagem | 63 |
| 3.3.1. Equipamentos utilizados no torneamento..... | 63 |
| 3.3.2. Ensaio de força | 64 |
| 3.3.3. Ensaio de rugosidade..... | 65 |
| 3.3.4. Medição de espessura de cavaco e cálculo de grau de recalque..... | 66 |
| CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÕES | 67 |
| 4.1. Ensaio de caracterização dos materiais..... | 67 |
| 4.1.1. Resultados de Dureza..... | 67 |
| 4.1.2. Resultados de Tração..... | 70 |
| 4.1.3. Microestrutura..... | 71 |
| 4.2. Resultados de Medição das Forças de Corte | 74 |
| 4.2.1. Efeito da Velocidade de Corte..... | 74 |
| 4.2.2. Efeito do Avanço..... | 80 |
| 4.2.3. Efeito da Profundidade de corte..... | 82 |
| 4.3. Resultados de Rugosidade..... | 84 |
| 4.4. Resultados de Grau de Recalque..... | 89 |
| 4.5. Resultados de Forma do Cavaco | 92 |
| 4.6. Resultados de Recuperação Elástica | 97 |
| CAPÍTULO V - CONCLUSÃO | 102 |
| Proposta para trabalhos futuros | 103 |
| CAPÍTULO VI - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 104 |

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

O alumínio é um dos materiais metálicos mais utilizados na indústria metal-mecânica. Sua utilização aumentou bastante devido às pesquisas relacionadas à área aeronáutica e automobilística. Leveza, boa condutividade, resistência e boa usinabilidade são algumas das propriedades deste material que melhoraram sua participação no mercado. Além disso, a preocupação ambiental atual vê com muito bons olhos a utilização do alumínio devido a sua alta capacidade de reciclagem, o que representa uma importante economia de energia na produção do mesmo e diminuição da quantidade de metal depositado no meio ambiente. De acordo com o IDS (Indicadores de Desenvolvimento Sustentável) e o IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) em 2008 dentre os materiais recicláveis, o campeão absoluto no Brasil é o alumínio, com 91,5% da matéria prima utilizada na indústria vindo de alumínio reciclado. O Brasil possui a terceira maior reserva do minério bauxita, mais importante na produção do alumínio, e ao lado de Estados Unidos, China e Canadá, é um dos maiores produtores de alumínio primário no mundo tendo produzido um total de 1536,2 mil toneladas no ano de 2010 segundo a ABAL-Associação Brasileira do Alumínio.

As ligas de alumínio da série 6XXX, bastante utilizadas em estruturas soldadas, equipamentos rodoviários, arquitetura e decoração têm como principais elementos de liga o magnésio e o silício. A proporção de Mg e Si visa a formação da fase Mg_2Si , formando ligas tratáveis termicamente. O teor de silício normalmente aumenta a abrasividade do material, enquanto o magnésio aumenta a resistência mecânica sem diminuir a ductilidade (ASM HANDBOOK, 1992).

Devido à grande utilização das ligas de alumínio e o enorme salto da sua participação no mercado, as empresas produtoras necessitam de mais conhecimento à cerca do comportamento destas ligas durante os processos de fabricação a fim de fornecer

mais dados técnicos aos seus clientes. Dentro dos diversos processos de fabricação a usinagem aparece como um dos processos mais utilizados na indústria.

O objetivo principal deste trabalho é a avaliação da usinabilidade de cinco ligas de alumínio da série 6XXX. A usinabilidade será avaliada em termos da força de usinagem, rugosidade da peça usinada, grau de recalque e forma do cavaco durante um processo de torneamento cilíndrico. Também serão buscadas explicações sobre o comportamento das ligas na usinagem em função de sua composição, microestrutura, tratamento térmico e propriedades mecânicas. As diferentes ligas de alumínio avaliadas foram 6351, 6005 A, 6082, 6063 e 6061, as quais possuem distintas composições químicas de elementos de liga.

Este trabalho está dividido em cinco capítulos, incluindo este. No capítulo II é apresentada uma revisão bibliográfica sobre o tema. No capítulo III é apresentada a metodologia e todos os equipamentos utilizados. No capítulo IV são apresentados os resultados e discussões. No capítulo V são apresentadas as conclusões e propostas para trabalhos futuros.

Os resultados obtidos mostram diferenças na usinabilidade das cinco ligas de alumínio em termos de força de corte, rugosidade e grau de recalque.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. O Alumínio

2.1.1. Histórico

Alumínio, o segundo elemento metálico mais abundante na terra, tornou-se um concorrente econômico em aplicações de engenharia recentemente no final do século XIX (METALS HANDBOOK, 1992).

Segundo a ABAL – Associação Brasileira de Alumínio, apesar de sua recente utilização na forma isolada que conhecemos, existem relatos de que há sete milênios os persas e 30 séculos mais tarde os egípcios e babilônios utilizavam argila contendo óxido de alumínio (alumina) na produção de vasos, potes e artefatos variados.

Em 1809 acontece a primeira obtenção do que até então mais se aproximava do alumínio. Humphrey Davy foi o mentor da descoberta, fundindo ferro na presença de alumina. Mais tarde em 1821 o francês P. Berthier descobre um minério avermelhado, que contém 52% de óxido de alumínio, perto da aldeia de Lês Baux, no sul da França. É a descoberta da bauxita, o minério mais comum de alumínio. Já em 1825 o físico dinamarquês Hans Christian Oersted consegue isolar o alumínio de outra maneira, a partir do cloreto de alumínio na forma como é conhecido hoje. E em 1854 ocorre a primeira obtenção do alumínio por via química, realizada por Henry Saint-Claire Deville. Finalmente em 1886 torna-se público o processo de obtenção de alumínio por meio da redução eletrolítica da alumina dissolvida em banho fundido de criolita. Esse procedimento foi desenvolvido separadamente pelo norte-americano Charles Martin Hall e pelo francês Paul Louis Toussaint Héroult, que o descobriram e o patentearam quase simultaneamente. Esse processo ficou conhecido como Hall-Héroult e foi o que permitiu o estabelecimento da indústria global do alumínio (ABAL).

2.1.2. Produção

A bauxita, principal matéria-prima na produção do alumínio não possui uma distribuição homogênea na crosta terrestre. Existem apenas sete áreas ricas em bauxita: África Ocidental e Central (principalmente, Guiné), América do Sul (Brasil, Venezuela e Suriname), Caribe (Jamaica), Oceania e Ásia Meridional (Austrália, Índia), China, no Mediterrâneo (Grécia, Turquia) e os Montes Urais (Rússia) conforme a Fig. 2.1.



Figura 2.1 - Principais áreas produtoras de bauxita. (Fonte: <http://www.aluminiumleader.com/images/content/serious/industry/map_en.jpg>. Acesso em 05/10/11 as 14:11h)

Na produção de alumínio primário a China aparece como o grande produtor devido às suas grandes reservas de bauxita e enorme crescimento industrial e econômico. Além da China, Rússia, Canadá e EUA aparecem como os maiores produtores de alumínio conforme a Fig. 2.2.

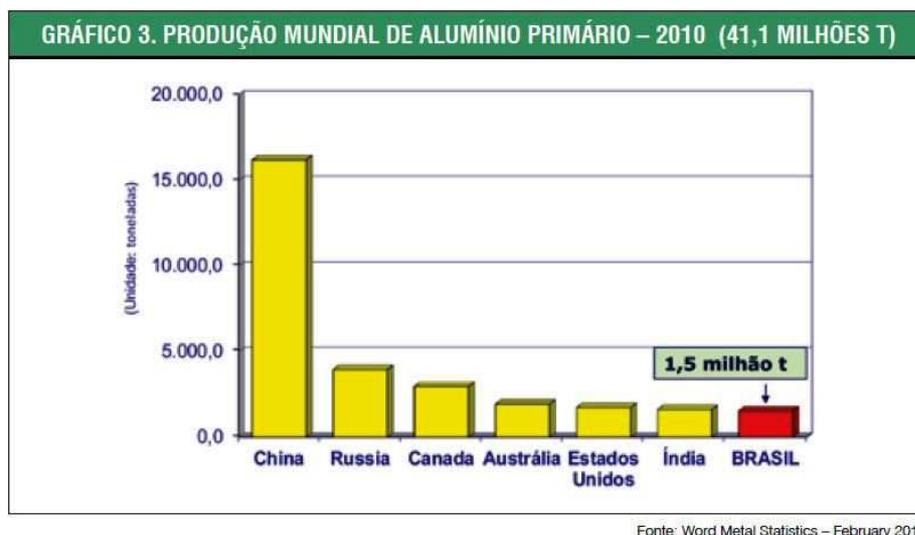


Figura 2.2 - Produção mundial de alumínio primário em 2010. (Fonte: A sustentabilidade da indústria brasileira do alumínio / Confederação Nacional da Indústria. Associação Brasileira do Alumínio. – Brasília: CNI, 2012)

O alumínio, devido às suas excelentes qualidades, tem tomado lugar importante em aplicações de engenharia, tornando-se o metal não-ferroso mais produzido na indústria metal-mecânica. Dados da Associação Brasileira do Alumínio mostrados na Fig. 2.3 revelam que só no Brasil, no ano de 2010, foi produzido um total de 1536,2 mil toneladas de alumínio.

Unidade: 1000 t

| Empresas | 2009 | | 2010 | | Variação 2010/2009 (%) | |
|---|--------------|----------------|--------------|----------------|------------------------|------------|
| | Dezembro | Jan-Dez | Dezembro | Jan-Dez | Dezembro | Jan-Dez |
| Albras (PA) | 37,5 | 453,8 | 38,7 | 451,2 | 3,2 | -0,6 |
| Alcoa | 27,8 | 325,8 | 29,7 | 350,2 | 6,8 | 7,5 |
| Poços de Caldas (MG) | 5,5 | 65,3 | 7,6 | 88,2 | 38,2 | 35,1 |
| São Luís (MA) | 22,3 | 260,5 | 22,1 | 262,0 | -0,9 | 0,6 |
| BHP Billiton (MA) | 15,0 | 173,5 | 14,7 | 173,3 | -2,0 | -0,1 |
| Votorantim Metais - Companhia Brasileira de Alumínio (SP) | 40,2 | 471,3 | 38,7 | 472,0 | -3,7 | 0,1 |
| Novelis | 8,2 | 100,3 | 5,3 | 89,5 | -35,4 | -10,8 |
| Ouro Preto (MG) | 4,1 | 48,2 | 4,2 | 48,6 | 2,4 | 0,8 |
| Aratu (BA) | 4,1 | 52,1 | 1,1 | 40,9 | -73,2 | -21,5 |
| Valesul (RJ) | 0,0 | 10,2 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Total | 128,7 | 1.534,9 | 127,1 | 1.536,2 | -1,2 | 0,1 |

Figura 2.3 - Produção brasileira de Alumínio no ano de 2010 (Fonte: ABAL – Associação Brasileira de Alumínio)

O alumínio não é encontrado diretamente em estado metálico na crosta terrestre. Sua obtenção depende de etapas de processamento até chegar ao estado em que o vemos normalmente. O processo de obtenção do alumínio primário divide-se em três etapas: mineração, refinaria e redução (ABAL). A Fig. 2.4 apresenta um esquema da produção de alumínio primário.



Figura 2.4 - Fluxo da cadeia de produção do alumínio primário (Fonte: ABAL)

O alumínio e suas ligas podem ser fundidos e conformados por praticamente todos os processos conhecidos. As formas fabricadas do alumínio e suas ligas podem ser divididas em dois grupos: produtos padronizados e produtos de engenharia. Os produtos padronizados incluem folhas, chapas, vergalhões, barras, fios, tubos e formas estruturais. Os produtos de engenharia são aqueles projetados para aplicações específicas e incluem perfis extrudados, forjados, fundidos, estampados, partes de metalurgia do pó, partes usinadas e compósitos de matriz de metal (METALS HANDBOOK, 1992).

2.1.3. Propriedades

Uma das características mais marcantes do alumínio é a sua versatilidade. A gama de propriedades físicas e químicas que pode ser desenvolvida desde o alumínio puro até as ligas mais complexas é notável. As propriedades do alumínio que fazem deste metal e suas ligas o mais econômico e atrativo para uma ampla variedade de utilização são aparência, leveza, capacidade de fabricação, propriedades físicas, propriedades mecânicas e resistência à corrosão (METALS HANDBOOK, 1992).

Segundo Rollason (1973) o alumínio tem como principais propriedades características de interesse para o uso em engenharia:

1. Leveza: seu peso específico é apenas 2,7 g/cm³ comparado com 7,8 para o aço e 8,9 para o cobre. Por esta razão o metal é usado consideravelmente na forma de ligas para partes aerospaciais e automotivas, para estruturas de todos os tipos. No último caso a extrema leveza das ligas permite um volume muito maior a ser utilizado para um determinado peso, com um aumento resultante na rigidez. Para partes recíprocas de alta velocidade, como pistões, o uso de ligas de alumínio leva a um melhor balanceamento, atrito reduzido, baixas cargas de rolamento e resulta em uma economia considerável de energia requerida para vencer a inércia de partes móveis.
2. A condutividade elétrica é cerca de 60% da do cobre, mas peso por peso é um melhor condutor que o cobre e é usado para cabos em geral.
3. Elevada condutividade térmica, sendo usado em componentes de trocadores de calor. No caso de pistões, a alta condutividade permite o uso de maiores taxas de compressão.
4. Sua resistência à corrosão é útil em fábricas de produtos químicos para o tratamento de ácido nítrico concentrado, e indústrias de alimentos para panelas e utensílios; enquanto folhas de alumínio são usadas em embalagens; ligas são usadas para fins marítimos e de construção.

O alumínio é não ferromagnético, uma propriedade de importância em indústrias elétricas e eletrônicas. É não inflamável, o que é importante em aplicações envolvendo tratamento ou manipulação de materiais explosivos ou inflamáveis. O alumínio é também não tóxico e é rotineiramente utilizado em embalagens para alimentos e bebidas. Ele tem uma aparência atrativa no seu acabamento natural que pode ser lustroso e brilhante (METALS HANDBOOK, 1992).

O alumínio puro é relativamente dúctil e de baixa resistência – ele tem uma resistência à tração de no máximo 90 N/mm² na condição recozida – e para a maioria dos fins de engenharia é usado na forma de liga. A resistência de muitas ligas de alumínio pode ser aumentada pelo endurecimento por precipitação, procedendo a uma taxa de resistência por massa da mesma ordem dos aços de alta resistência (HIGGINS, 1977).

Algumas propriedades do alumínio são listadas na Tab. 2.1 a seguir.

Tabela 2.1 – Propriedades físicas típicas do alumínio (ABAL).

| Propriedades físicas típicas | Alumínio | Aço | Cobre |
|--|---------------------|-----------------------|-----------------------|
| Densidade (g/cm ³) | 2,70 | 7,86 | 8,96 |
| Temperatura de fusão (°C) | 660 | 1500 | 1083 |
| Módulo de elasticidade (MPa) | 70000 | 205000 | 110000 |
| Coefficiente de dilatação térmica (L/°C) | 23.10 ⁻⁶ | 11,7.10 ⁻⁶ | 16,5.10 ⁻⁶ |
| Condutividade térmica a 25° (Cal/cm/°C) | 0,53 | 0,12 | 0,94 |
| Condutividade elétrica (%IACS) | 61 | 14,5 | 100 |

2.1.4. Aplicações

Devido às suas excelentes propriedades discutidas acima, o alumínio têm vasta aplicação. Sua utilização é dividida em cinco segmentos principais:

- Transporte
- Construção civil
- Eletricidade
- Embalagens
- Bens de consumo

Algumas das principais aplicações do alumínio são mostradas na Fig. 2.5.



Figura 2.5 - Aplicações do alumínio (Fonte: <abal.org.br>, <aluminium.matter.org.uk> e <aluminiumleader.com>)

As diferentes participações do alumínio nos principais segmentos consumidores podem ser resumidas na Fig. 2.6:

Participação dos Principais Segmentos Consumidores - 2010

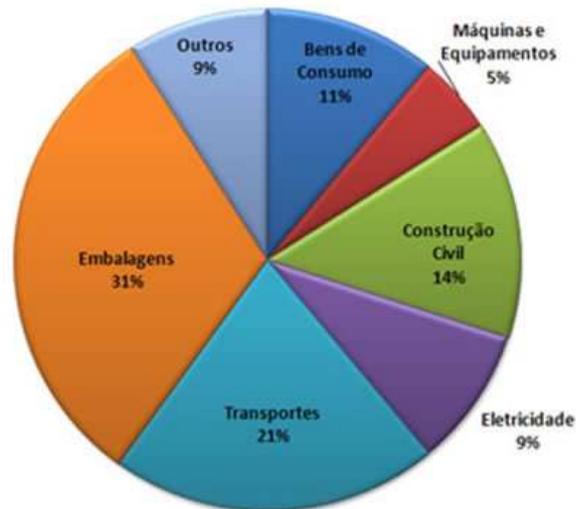


Figura 2.6 - Participação dos principais segmentos consumidores em 2010 (Fonte: ABAL)

No setor de transporte uma das principais utilizações do alumínio é na produção de automóveis. Por ser um material bem mais leve que os outros metais ele diminui muito o peso final do automóvel. Segundo a ABAL a utilização do alumínio pode representar uma redução de 400 Kg no peso de um carro médio (com cerca de 1200 Kg). Blocos, cabeçotes, carcaças de câmbio e radiadores feitos de alumínio são mais leves e aumentam o desempenho do carro. A cada 10% na redução do peso do automóvel implicam em um aumento de 5 a 10% na eficiência do combustível. Desta forma, diminui o consumo de combustíveis e a emissão de gases poluentes. Além disso, a utilização do alumínio na carroceria de um automóvel significa ganho na segurança dos passageiros devido à maior resistência ao impacto e a colisões. Ele é usado ainda na produção das rodas, pois além de ser um material dúctil permitindo design avançado e inovador, permite bom acabamento superficial, garantindo ótimo visual. Outra grande aplicação do alumínio é na produção de aeronaves, sendo utilizado nas asas, fuselagem, janelas e também trens de pouso. Isso se deve à sua já citada leveza acompanhada de considerável resistência mecânica. De acordo com a ABAL o alumínio representa cerca de 80% do peso de uma aeronave. O alumínio também está presente na produção de bicicletas, navios, motos, caminhões, ônibus e trens.

Devido à grande durabilidade e excelente resistência à corrosão, o alumínio também é fortemente utilizado na construção civil. Janelas, telhas, portas, entre outros são grandes

exemplos. Assim, o alumínio proporciona durabilidade e conforto desde construções simples como pequenas casas, como em grandes galpões de estruturas metálicas.

O alumínio na forma de fios e cabos também é largamente utilizado em instalações elétricas, tanto em redes domésticas quanto em grandes redes de distribuição. O material possui boa condutividade elétrica e térmica e, além disso, seu baixo peso significa facilidade de instalação e manutenção.

Por fim, as embalagens e bens de consumo feitos de alumínio enchem as prateleiras de supermercados garantindo segurança e praticidade aos consumidores. Devido à sua resistência à corrosão e capacidade de isolamento contra luz, umidade e impurezas externas, o alumínio é utilizado em embalagens de alimentos, bebidas, remédios, cosméticos, painéis e bandejas.

Além de suas inúmeras propriedades que permitem diversas aplicações em vários setores de produção, um fator importante coloca o alumínio em lugar de destaque frente aos outros metais, sua capacidade de reciclagem. Por ser 100% reciclável, a utilização do alumínio representa menos lixo depositado no meio ambiente e também menos energia na sua própria produção. A Fig. 2.7 mostra o Brasil entre os cinco países que tem maior relação entre a sucata recuperada e consumo doméstico em 2005, ficando acima da média mundial. Já a Fig. 2.8 apresenta a proporção de material reciclado em atividades industriais no período de 1993 a 2008, na qual é clara a liderança da reciclagem das latas de alumínio. Desta forma, o alumínio é um grande aliado das indústrias na busca de desenvolvimento mais sustentável, ajudando assim a preservação do meio ambiente para as futuras gerações.

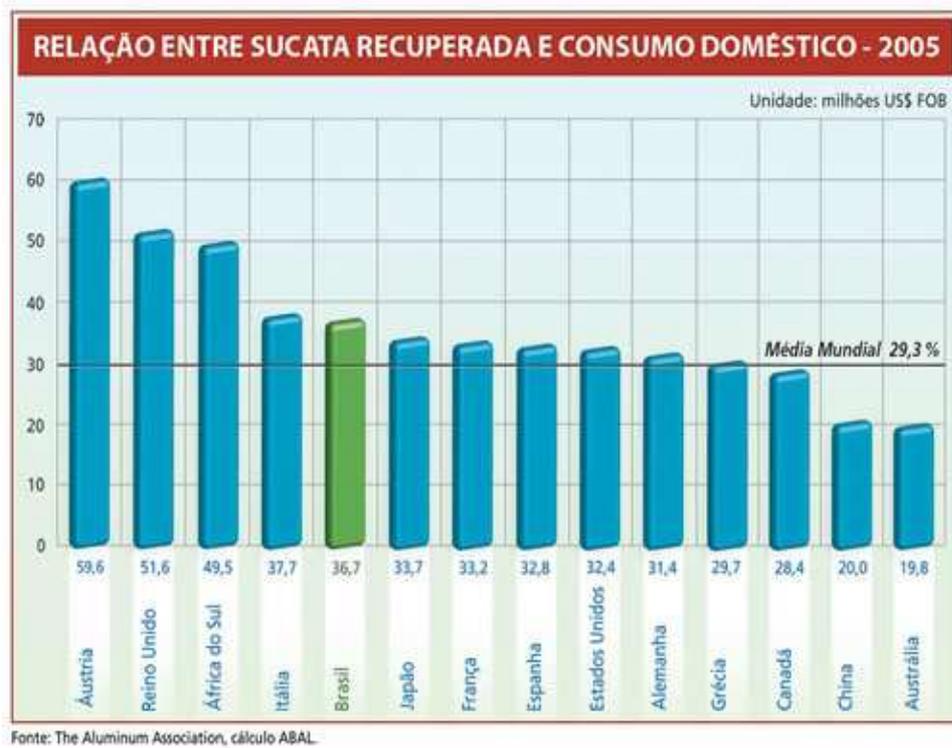


Figura 2.7 - Relação entre sucata recuperada e consumo doméstico – 2005 (Fonte: The Aluminum Association, cálculo ABAL)

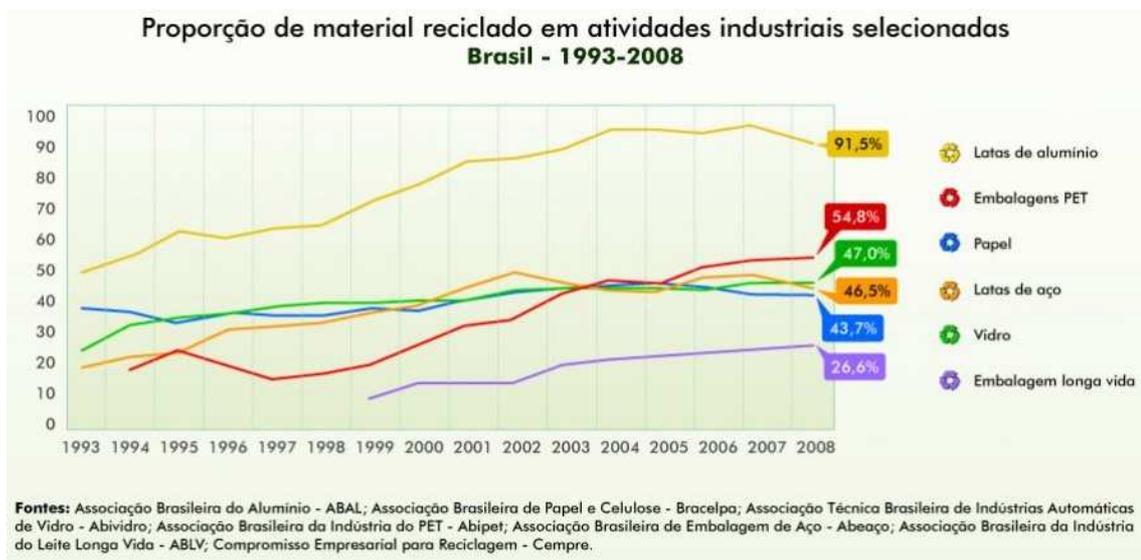


Figura 2.8 - Proporção de material reciclado em atividades industriais no Brasil – 1993 – 2008 (Fonte: ABAL)

2.2. As Ligas de Alumínio

O alumínio fundido dissolve outros metais e substâncias metalóides como o silício (que atua como metal). Quando o alumínio se resfria e se solidifica, alguns dos constituintes da liga podem ser retidos em solução sólida. Isto faz com que a estrutura atômica do metal se torne mais rígida. Com o intuito de aumentar a resistência para fins de engenharia o alumínio é mais utilizado na forma de ligas nas quais vários elementos de liga podem ser adicionados ao metal. Mais de 300 composições de liga são comumente reconhecidas, e muitas variações adicionais tem sido desenvolvidas internacionalmente e nas relações fornecedor/consumidor (METALS HANDBOOK, 1992).

O grande alcance das ligas oferece à indústria uma grande variedade de combinações de resistência mecânica, resistência à corrosão e ao ataque de substâncias químicas, condutividade elétrica, usinabilidade, ductilidade, formabilidade, entre outros benefícios (ABAL).

Segundo a ABAL a função de cada elemento da liga se altera de acordo com a quantidade dos elementos presentes na liga e com a sua interação com outros elementos. Em geral, podemos dividir os elementos entre:

- Elementos que conferem à liga a sua característica principal (resistência mecânica, resistência à corrosão, fluidez no preenchimento de moldes, etc.);
- Elementos que têm função acessória, como o controle de microestrutura, de impurezas e traços que prejudicam a fabricação ou a aplicação do produto, os quais devem ser controlados no seu teor máximo.

A norma NBR6834 define e classifica as várias composições químicas do alumínio e das ligas de alumínio, fixando um sistema de designação em função do seu processo e da sua aplicação.

Os principais elementos de liga das ligas de alumínio incluem combinações dos seguintes elementos:

- Cobre (Cu);
- Magnésio (Mg);
- Silício (Si);
- Manganês (Mn);
- Zinco (Zn).

De acordo com o produto, as ligas de alumínio podem ser divididas em dois grupos (SPECIALTY HANDBOOK, 1993):

- LIGAS CONFORMADAS OU TRABALHADAS (*wrought alloys*) – ligas destinadas à fabricação de produtos semi-acabados, como laminados planos (placas, chapas e folhas), laminados não planos (tarugos, barras e arames) perfis extrudados e componentes forjados.
- LIGAS FUNDIDAS (*cast alloys*) – ligas destinadas à fabricação de componentes fundidos.

Somando-se as ligas conformadas e as ligas fundidas, existem mais de 600 ligas reconhecidas industrialmente.

De acordo com a Fig. 2.9 estes dois grupos se subdividem em:

- LIGAS NÃO TRATÁVEIS - Não são endurecidas por meio de tratamento térmico.
- LIGAS TRATÁVEIS TERMICAMENTE – São endurecidas por meio de tratamentos térmicos.

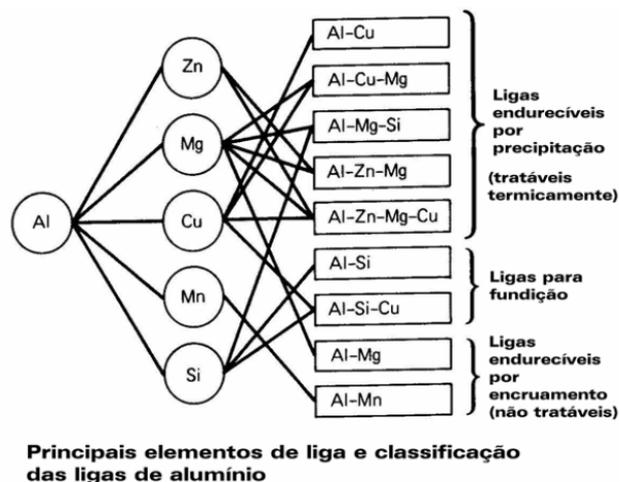


Figura 2.9 - Principais elementos de liga e classificação das ligas de alumínio (Fonte: ASM Specialty Handbook – Aluminum and aluminum alloys, 1993)

As ligas são classificadas segundo a *The Aluminum Association Inc.* como mostrado na Tab. 2.2.

Tabela 2.2 - Classificação das ligas de alumínio

| Série | Elementos de liga principais |
|-------|------------------------------|
| 1XXX | Alumínio puro |
| 2XXX | Cu |
| 3XXX | Mn |
| 4XXX | Si |
| 5XXX | Mg |
| 6XXX | Mg, Si |
| 7XXX | Zn |
| 8XXX | Sn, Li, Fe, Cu, Mg |
| 9XXX | Reservado para uso futuro |

2.2.1. Influência dos principais elementos de liga

A função dos principais elementos de liga é apresentada a seguir por ordem alfabética. É importante ressaltar que é difícil precisar a influência de cada elemento de liga em separado, pois a interação dos mesmos causa diferentes modificações nas propriedades do alumínio. De acordo com o Metals Handbook (1992) os principais elementos de liga e seus maiores efeitos são:

Chumbo (Pb): Normalmente presente apenas como um elemento vestigial no alumínio comercialmente puro, o chumbo é adicionado em um nível de cerca de 0,5% com a mesma quantidade do bismuto em algumas ligas (2011 e 6262) para melhorar a usinabilidade. Adições de chumbo pode ser um incômodo ao fabricante, pois tende a segregar durante a fundição. Além disso, compostos de chumbo são tóxicos.

Cromo (Cr): Ocorre como uma pequena impureza no alumínio puro comercial (5 a 50 ppm). O cromo é uma adição comum a vários grupos de ligas como alumínio-magnésio, alumínio-magnésio-silício, alumínio-magnésio-zinco, em que é adicionado em quantidades não superiores a 35%. O cromo tem uma baixa taxa de difusão e forma uma fase bem dispersa em produtos conformados. A fase dispersa inibe a nucleação e o crescimento de grão. Assim, o cromo é usado para controlar a estrutura dos grãos, para evitar o crescimento de grão em ligas alumínio-magnésio, e para prevenir a recristalização em ligas alumínio-magnésio-silício e alumínio-magnésio-zinco durante trabalho à quente ou tratamento térmico. As estruturas fibrosas que se desenvolvem reduzem a suscetibilidade à

corrosão sob tensão e melhora a tenacidade. Além disso, o cromo em solução sólida e como uma fase bem dispersa aumenta ligeiramente a resistência das ligas.

Cobre (Cu): Ligas alumínio-cobre contendo de 2 a 10% de Cu, geralmente com outras adições, forma uma importante família de ligas. Ambas ligas de alumínio-cobre conformadas ou fundidas respondem a tratamento térmico por solução e subsequente envelhecimento com aumento na resistência e dureza e diminuição do alongamento. O aumento de resistência é máximo entre 4 e 6% de Cu, dependendo da influência de outros constituintes presentes.

Ferro (Fe): É a impureza mais comum encontrada no alumínio. Ele tem uma alta solubilidade no alumínio fundido e é, portanto facilmente dissolvido em todos os estágios de fundição da produção. A solubilidade do ferro no estado sólido é muito baixa (0,04%) e, portanto, a maioria do ferro presente no alumínio acima desta quantidade aparece como uma segunda fase intermetálica em combinação com o alumínio e frequentemente outros elementos.

Magnésio (Mg): é o principal elemento de liga nas ligas da série 5xxx. Sua solubilidade sólida máxima é 17,4%, mas o teor de magnésio nas ligas conformadas atuais não excede 5,5%. O magnésio precipita preferencialmente nos contornos de grão como uma fase altamente anódica (Mg_5Al_3 ou Mg_5Al_8), a qual produz suscetibilidade à fratura intergranular e corrosão sob tensão. Ligas conformadas contendo até 5% de Mg adequadamente fabricadas são estáveis sob condições normais de utilização. A adição de magnésio marcadamente aumenta a resistência do alumínio sem diminuir a ductilidade. Resistência à corrosão e soldabilidade são boas.

Magnésio-Silício (Mg-Si): Ligas conformadas do grupo 6xxx contém até 1,5% de magnésio e silício numa taxa aproximada para formar Mg_2Si , que é, 1,73:1. A máxima solubilidade do Mg_2Si é 1,85%, e ela diminui com a temperatura. Precipitação sobre envelhecimento ocorre pela formação de zonas Guinier-Preston (devido à descoberta destas zonas por dois cientistas, Guinier e Preston, em 1938) e uma precipitação muito fina. Ambos conferem um aumento na resistência dessas ligas, embora não tão grande como no caso das ligas 2xxx ou 7xxx.

Manganês (Mn): é uma impureza comum no alumínio primário, no qual sua concentração normalmente varia de 5 a 50 ppm. Ele diminui a resistividade. O Manganês aumenta a resistência tanto em solução sólida ou como uma fase intermetálica finamente precipitada. Ele não tem efeito adverso na resistência à corrosão. O manganês tem uma solubilidade sólida bastante limitada no alumínio na presença de impurezas normais, mas permanece em solução quando utilizado molde frio, assim a maior parte de manganês adicionado é substancialmente retido em solução, mesmo em grandes lingotes. Como uma

adição, é usado para aumentar a resistência e para controlar a estrutura do grão. O efeito do manganês é aumentar a temperatura de recristalização para promover a formação de estrutura sobre trabalho a quente. Como um precipitado disperso é efetivo em retardar a recuperação e em prevenir o crescimento de grão. O precipitado de manganês aumenta a temperabilidade de ligas tratáveis termicamente.

Níquel (Ni): a solubilidade sólida do níquel no alumínio não excede 0,04%. Acima desta quantidade, está presente como um intermetálico insolúvel, geralmente em combinação com o ferro. O níquel (até 2%) aumenta a resistência do alumínio puro, mas reduz sua ductilidade. Ligas binárias alumínio-níquel não são muito usadas, mas o níquel é adicionado em ligas alumínio-cobre e alumínio-silício para melhorar a dureza e resistência à temperaturas elevadas e reduz o coeficiente de expansão. O níquel promove corrosão pitting em ligas diluídas como a 1100. É limitado em ligas para uso em reator atômico, devido à sua alta absorção de nêutrons, mas em outras áreas é uma adição desejável juntamente com o ferro para melhorar a resistência à corrosão contra vapor à alta pressão.

Silício (Si): depois do ferro, é a impureza em maior nível no alumínio comercial eletrolítico (0,01 a 0,15%). Em ligas conformadas, o silício é usado com o magnésio em níveis até 1,5% para produzir Mg_2Si em ligas tratáveis termicamente da série 6xxx. Ligas de alumínio-silício de alta pureza possuem até 3% de Si, sendo a faixa mais crítica de 0,17 a 0,8%. Adições de silício (0,5 a 4,0%) reduzem a tendência de fratura em ligas alumínio-cobre-magnésio. Pequenas quantidades de magnésio adicionadas a qualquer liga contendo silício a tornará tratável termicamente, mas o inverso não é verdadeiro, pois o excesso de magnésio acima do requerido para formar Mg_2Si nitidamente reduz a solubilidade sólida deste composto. Modificação do silício pode ser alcançada através da adição de sódio em ligas eutécticas e hipoeutécticas e pelo fósforo em ligas hipereutécticas. Até 12% de Si é adicionado em ligas conformadas usadas como revestimento para chapas de brazagem. Ligas contendo cerca de 5% de Si adquirem uma cor preta quando anodizadas e são usadas para propósitos ornamentais.

Titânio (Ti): quantidade de 10 a 100 ppm de Ti são encontradas no alumínio comercialmente puro. O titânio prejudica a condutividade elétrica do alumínio, mas seu nível pode ser reduzido pela adição de boro ao metal fundido para formar TiB_2 insolúvel. O titânio é usado principalmente no refino de grão de ligas fundidas e lingotes de alumínio. Quando usado isolado, o efeito do titânio diminui com o tempo mantido no estado fundido e com refusão repetida. O efeito de refinamento de grão é aprimorado se o boro está presente no metal fundido ou se ele é adicionado como uma liga mestre contendo boro largamente combinado como TiB_2 . O titânio é uma adição comum a arame de solda, ele refina a estrutura da solda e previne trincas da solda. É normalmente adicionado isolado ou com

TiB₂ durante a fundição de chapas ou lingotes extrudados para refinar a estrutura fundida e prevenir trincas.

Zinco (Zn): as ligas de alumínio-zinco são conhecidas há muitos anos, porém, trincas sofridas à quente por ligas fundidas e a suscetibilidade à fratura por corrosão sob tensão das ligas conformadas encurtaram seu uso. Esforços para superar as limitações apontadas têm sido bem sucedidos, e essas ligas a base de alumínio-zinco estão sendo cada vez mais utilizadas. A presença do zinco no alumínio aumenta seu potencial de resistência à corrosão, portanto, seu uso em revestimento de proteção (7072) e em ânodos de sacrifício.

2.2.2. Ligas da série 6xxx

Ligas da série 6xxx contêm silício e magnésio aproximadamente nas proporções requeridas para a formação do silicato de magnésio (Mg₂Si), assim tornando-as tratáveis termicamente. Apesar de não ser tão resistente quanto as ligas das séries 2xxx e 7xxx, ligas da série 6xxx tem boa conformabilidade, soldabilidade, usinabilidade e resistência a corrosão, com média resistência mecânica. Ligas neste grupo podem ser conformadas na tempera T4 (tratada termicamente por solução, mas não por precipitação) e endurecidas após a conformação às propriedades do T6 (solubilizada e envelhecida artificialmente) pelo tratamento térmico por precipitação. As utilizações incluem aplicações arquitetônicas, quadros de bicicleta, equipamentos de transporte, grades de ponte e estruturas soldadas (METALS HANDBOOK, 1992).

A Tab. 2.3 apresenta os limites de composição química e densidade do alumínio e das ligas de alumínio trabalháveis da série 6XXX utilizadas neste trabalho de acordo com a norma NBR 6834, 2000. É importante ressaltar que normalmente as indústrias produtoras de alumínio possuem suas próprias faixas de composição química que se enquadram nesta classificação geral.

Tabela 2.3 - Limites de composição química e densidade das ligas de alumínio trabalháveis da série 6XXX (NBR 6834, 2000).

| Designação | Densidade (g/cm ³) | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Zn | Ti | Outros cada | Outros total | Alumínio mínimo |
|------------|--------------------------------|----------|------|-----------|----------|----------|-----------|------|------|-------------|--------------|-----------------|
| 6005A | 2,70 | 0,6-0,9 | 0,35 | 0,10 | 0,10 | 0,40-0,6 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,05 | 0,15 | Restante |
| 6061 | 2,70 | 0,40-0,8 | 0,7 | 0,15-0,40 | 0,15 | 0,8-1,2 | 0,04-0,35 | 0,25 | 0,15 | 0,05 | 0,15 | Restante |
| 6063 | 2,70 | 0,20-0,6 | 0,35 | 0,10 | 0,10 | 0,45-0,9 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,05 | 0,15 | Restante |
| 6082 | 2,70 | 0,7-1,3 | 0,50 | 0,10 | 0,40-1,0 | 0,6-1,2 | 0,25 | 0,20 | 0,10 | 0,05 | 0,15 | Restante |
| 6351 | 2,71 | 0,7-1,3 | 0,50 | 0,10 | 0,40-0,8 | 0,40-0,8 | - | 0,20 | 0,20 | 0,05 | 0,15 | Restante |

As tabelas 2.4 e 2.5 apresentam respectivamente as propriedades físicas e mecânicas típicas de algumas ligas de alumínio da série 6XXX utilizadas no presente trabalho de acordo com o Metals Handbook (1992).

Tabela 2.4 - Propriedades físicas típicas das ligas de alumínio (METALS HANDBOOK, 1992).

| Liga | Coefficiente médio de expansão térmico(μm/m.°C) | Faixa aproximada de fusão (°C) | Têmpera | Condutividade térmica a 25° (W/m.°C) | Condutividade elétrica a 25° (Equal volume) | Resistividade elétrica a 25° (Ω.mm ² /m) |
|------|---|--------------------------------|---------|--------------------------------------|---|---|
| 6005 | 23,4 | 610-655 | T5 | 190 | 49 | 0,035 |
| 6061 | 23,6 | 580-650 | T6 | 167 | 43 | 0,040 |
| 6063 | 23,4 | 615-655 | T6 | 200 | 53 | 0,033 |
| 6351 | 23,4 | 550-650 | T6 | 176 | 46 | 0,038 |

Tabela 2.5 - Propriedades mecânicas típicas das ligas de alumínio (METALS HANDBOOK, 1992).

| Liga e Têmpera | Limite de Resistência à Tração (MPa) | Limite de escoamento (MPa) | Alongamento em 50 mm (%) Espessura da amostra 1,6 mm | Dureza HB | Limite de Resistência ao cisalhamento (MPa) | Resistência à fadiga (MPa) | Módulo de elasticidade (GPa) |
|----------------|--------------------------------------|----------------------------|---|-----------|---|----------------------------|------------------------------|
| 6061-T6 | 310 | 275 | 12 | 95 | 205 | 95 | 69 |
| 6063-T6 | 240 | 215 | 12 | 73 | 150 | 70 | 69 |
| 6351-T6 | 310 | 285 | 14 | 95 | 200 | 90 | 69 |

De acordo com o METALS HANDBOOK (1992), as ligas da série 6XXX têm as principais aplicações como apresentado a seguir:

- 6005: Perfis extrudados e tubos para aplicações comerciais que requerem maior resistência que os da liga 6063. Escadas e antenas de TV estão entre os produtos mais comuns.
- 6061: Caminhões, torres, canoas, carros ferroviários, mobiliário.
- 6063: Tubulação, grades, mobiliário, extrudados arquitetônicos, assoalho de caminhão e trailer, portas, janelas, irrigação.
- 6351: Estruturas extrudadas usadas em veículos rodoviários e ferroviários, tubulação para água, óleo ou gasolina.

Em grande parte das aplicações é necessário aumentar a resistência mecânica das ligas de alumínio. Os dois métodos mais comuns para o aumento da resistência de ligas de alumínio são (METALS HANDBOOK, 1992):

- Constituintes de segunda fase dispersos ou elementos em solução sólida e trabalho a frio da liga (ligas não tratáveis termicamente);
- Dissolver os elementos de liga em solução sólida e precipitá-los como partículas submicroscópicas coerentes (ligas tratáveis termicamente ou endurecíveis por precipitação).

Os elementos mais comumente presente em ligas de alumínio comerciais para fornecer aumento de resistência especialmente quando combinado com endurecimento por deformação por trabalho a frio ou com tratamento térmico, ou ambos são cobre, magnésio, manganês, silício e zinco (METALS HANDBOOK, 1992).

A Fig. 2.10 apresenta a solubilidade destes elementos de liga no alumínio. Todos eles apresentam solubilidade significativa e essa solubilidade aumenta com o aumento da temperatura. Dos elementos de maior interesse para as ligas da série 6xxx, o Mg depois do Zn é um dos elementos que possui uma maior solubilidade no alumínio (acima de 10% em peso) e o silício possui solubilidade bem menos significativa mas maior que 1% em peso.

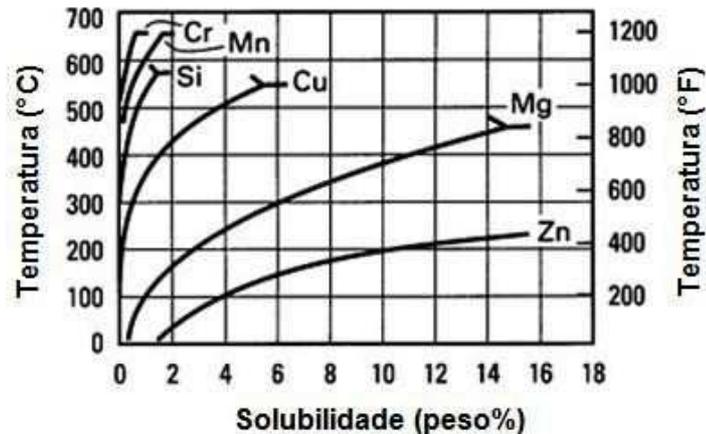


Figura 2.10 - Solubilidade sólida de equilíbrio binário como uma função da temperatura para os elementos de liga mais frequentemente adicionados ao alumínio. (METALS HANDBOOK, 1992)

Com a diminuição da temperatura, o limite de solubilidade diminui. Este decréscimo de concentrações consideráveis à elevadas temperaturas para relativamente baixas concentrações à baixas temperaturas é uma característica fundamental que fornece a base para aumentar substancialmente a dureza e a resistência das ligas de alumínio por tratamento térmico por solução e subseqüentes operações de envelhecimento por precipitação (METALS HANDBOOK, 1992).

2.2.3. Diagrama de fases

As ligas a serem estudadas neste trabalho pertencem à série 6xxx, na qual os principais elementos de liga são Si e Mg. Desta forma, para um maior entendimento sobre as propriedades e desempenho destas ligas é preciso um maior conhecimento sobre a interação de tais elementos na microestrutura das ligas de alumínio. A Fig. 2.11 apresenta, em termos esquemáticos, a quantidade destes dois elementos na composição das principais ligas da série 6xxx.

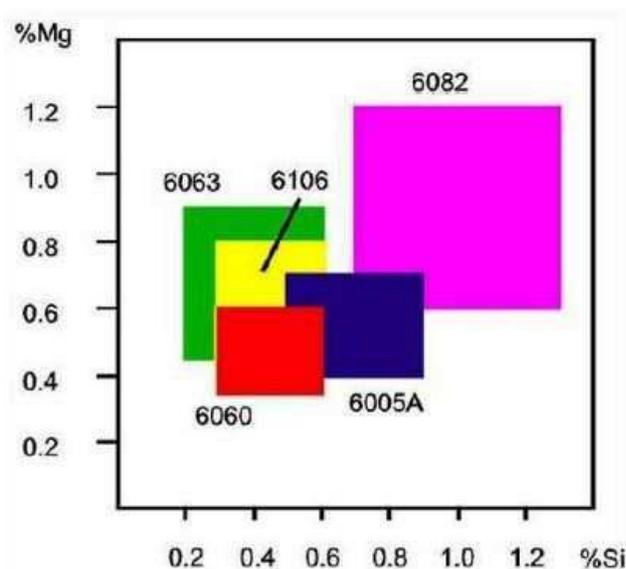


Figura 2.11 - Diagrama Mg x Si para as principais ligas da série 6XXX (Fonte: <www.eaa.net>)

A microestrutura da liga de alumínio vai depender da quantidade dos principais elementos de liga presentes. As fases podem então ser caracterizadas em função da porcentagem dos elementos através dos diagramas de fases. Os diagramas de fases são representações gráficas das fases presentes num sistema, a várias temperaturas, pressões e composições. Uma fase é uma região do sistema que é distinta, encontrando-se separada das restantes fases por interfaces. Por norma, cada fase possui uma composição e uma estrutura cristalina características (MARTINS, 2008). Segundo o METALS HANDBOOK (1992), os diagramas de fase dão uma indicação de quais fases são termodinamicamente estáveis em uma liga e quais podem ser esperadas presentes por um longo tempo quando uma peça é sujeita a uma temperatura particular.

Nos diagramas de fases ternários, as composições são geralmente indicadas usando como base um triângulo equilátero. As composições do sistema ternário são representadas nesta base, colocando os componentes puros em cada um dos vértices do triângulo. As composições binárias são representadas sobre os três lados do triângulo (MARTINS, 2008).

Quando ao sistema binário Al-Si se adiciona Mg, forma-se o sistema pseudobinário Al-Mg₂Si (Mg:Si=1,73) como mostrado na Fig. 2.12a, em que o precipitado Mg₂Si é o responsável pelo endurecimento da liga. Em ligas com excesso de silício, o teor em peso de Mg₂Si pode ser calculado pela Eq. 2.1 (HANDBOOK OF ALUMINUM, 1996).

$$\% \text{Mg}_2\text{Si} = 1,578 \times \% \text{Mg}$$

(Eq. 2.1)

O sistema pseudo-binário, representado na Fig.2.12b, tem o ponto eutético à 595°C e uma máxima solubilidade sólida de 1,85% em peso de Mg₂Si. O silício disponível para a formação de Mg₂Si é afetado pela presença de Mn e Fe na liga, e é expresso por (HANDBOOK OF ALUMINUM,1996):

$$\text{Si (disponível para Mg}_2\text{Si)} = \% \text{ Si} - \frac{1}{4} (\% \text{ Fe} + \% \text{ Mn}) \quad (\text{Eq. 2.2})$$

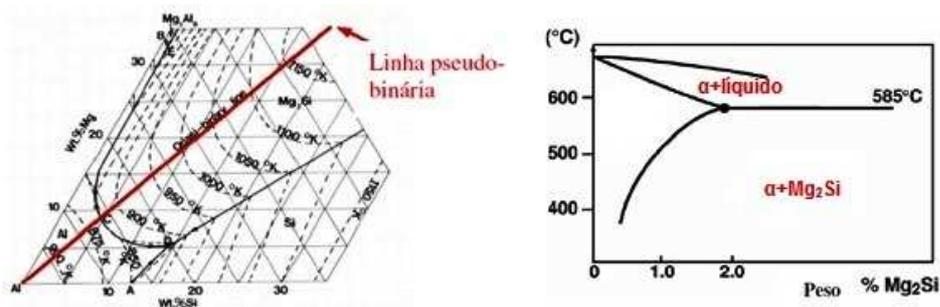


Figura 2.12 - a) Vértice rico em alumínio do diagrama ternário Al-Mg-Si; b) Diagrama pseudo-binário Al-Mg₂Si (MARTINS, 2008)

As ligas Al-Mg₂Si podem ser divididas em três grupos. No primeiro grupo, a quantidade total de magnésio e silício não excede 1,5%. Estes elementos estão numa taxa quase equilibrada. Típica deste grupo é a liga 6063, amplamente utilizada para seções arquitetônicas extrudadas. Esta liga, facilmente extrudada, nominalmente contém 1,1% de Mg₂Si. Sua temperatura de tratamento térmico por solução, de pouco mais de 500 °C, e sua baixa temperabilidade são de tal forma que esta liga não necessita de um tratamento por solução separado depois da extrusão, mas pode ser temperada ao ar na prensa e envelhecida artificialmente a fim de atingir resistência moderada, boa ductilidade, e excelente resistência à corrosão (METALS HANDBOOK Vol.2, 1992).

O segundo grupo nominalmente contém 1,5% ou mais de magnésio+silício e outras adições como 0,3% de Cu, a qual aumenta a resistência na têmpera T6. Elementos como manganês, cromo e zircônio são usados para controlar a estrutura do grão. Ligas deste grupo, como a liga estrutural 6061, alcança resistência de cerca de 70 MPa maiores que as do primeiro grupo na têmpera T6. Ligas do segundo grupo requerem uma maior temperatura de tratamento por solução que o primeiro grupo e sensibilidade à têmpera. Portanto, elas geralmente requerem um tratamento por solução separado, seguido de uma rápida têmpera e envelhecimento artificial (METALS HANDBOOK Vol.2, 1992).

O terceiro grupo contém uma quantidade de Mg_2Si superior aos dois primeiros, mas com um substancial excesso de silício. Um excesso de 0,2% de Si aumenta a resistência de uma liga contendo 0,8% de Mg_2Si em cerca de 70 MPa. Grandes quantidades de excesso de silício são menos benéficas. Excesso de magnésio, entretanto, é um benefício apenas em baixos conteúdos Mg_2Si devido ao magnésio baixar a solubilidade do Mg_2Si . Em ligas com excesso de silício, a segregação de silício para os contornos causa fratura nos contornos de grão em estruturas recristalizadas. Adições de manganês, cromo, ou zircônio neutralizam o efeito do silício prevenindo a recristalização durante o tratamento térmico. Ligas comuns deste grupo são 6351, 6082, 6005A e as ligas mais recentemente introduzidas 6009 e 6010. Adições de chumbo e bismuto a uma liga dessa série (6262) melhoram a usinabilidade. Esta liga tem uma melhor resistência à corrosão que a 2011, que também é usada como uma liga de livre corte (METALS HANDBOOK, 1992).

O efeito do conteúdo de Mg e Si no limite de resistência à tração de ligas Al- Mg_2Si é apresentado na Fig. 2.13.

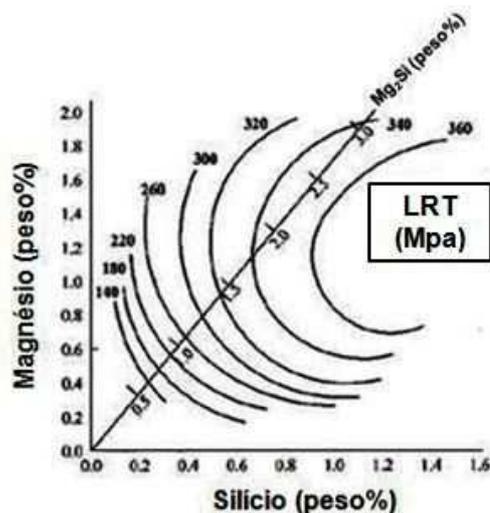


Figura 2.13 - Efeito do conteúdo de Mg e Si em ligas Al- Mg_2Si no limite de resistência à tração (HANDBOOK OF ALUMINUM, 1996)

2.2.4. Endurecimento das ligas

O objetivo predominante no projeto das ligas de alumínio é o aumento da resistência, dureza e resistência ao desgaste, fluência, relaxação de tensão ou fadiga. Efeitos nestas propriedades são específicos para as diferentes combinações de elementos de liga, seus diagramas de fase e para as microestruturas e subestruturas que elas formam como resultado da solidificação, histórico termo-mecânico, tratamento térmico e/ou trabalho a frio (METALS HANDBOOK, 1992).

As ligas Al-Mg₂Si são normalmente envelhecidas à cerca de 170 °C e o processo completo de precipitação é o mais complexo de todas as ligas de alumínio endurecidas por envelhecimento. A sequência de precipitação tem sido assunto de significativa discussão e pesquisa e indicam a sequência, SSSS (solução supersaturada) - aglomerados independentes de Mg e Si - co-aglomerados de Si e Mg - zonas GP - fase rica em Si - β' - Mg₂Si (HANDBOOK OF ALUMINUM, 1996). A Fig. 2.14 apresenta os precipitados (β') em forma de bastonete em ligas Al-Mg-Si.

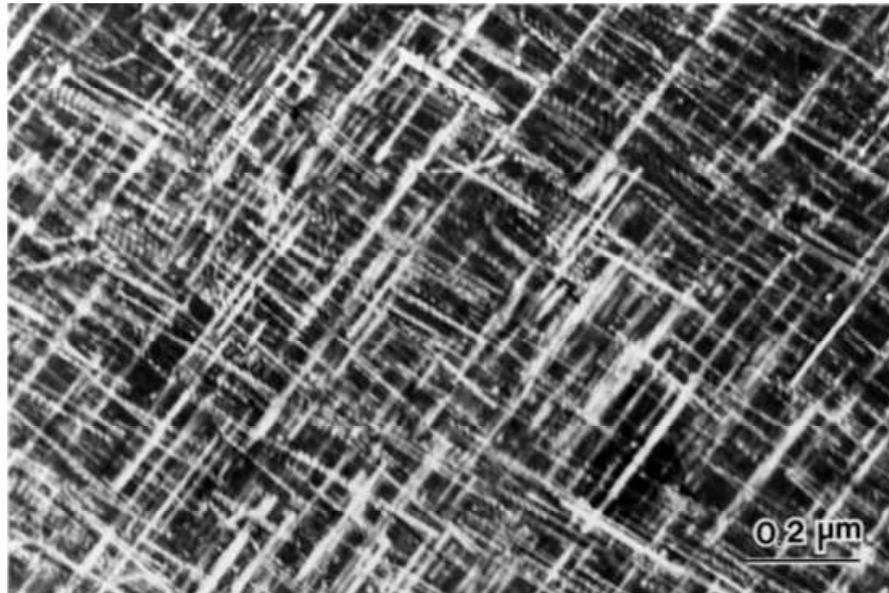


Figura 2.14 - Precipitados em forma de bastonetes em ligas Al-Mg₂Si (HANDBOOK OF ALUMINUM, 1996).

O primeiro estágio de precipitação envolve duas distintas reações de aglomeração. Aglomerados de Mg foram encontrados no estado temperado de uma liga Al-0,65% em peso de Mg-0,72% em peso de Si. Os aglomerados de Si se formam de maneira extremamente rápida após a têmpera, dentro do primeiro minuto de envelhecimento artificial à 200°C, e afeta estágios subseqüentes da precipitação. O excesso de Si reduz a solubilidade de Mg₂Si, aumenta a taxa de precipitação, e aumenta a densidade de zonas GP (HANDBOOK OF ALUMINUM, 1996).

As zonas GP (Guinier-Preston) são placas tendo uma espessura de uma camada atômica, ou seja, 2,5 nm, e um comprimento de cerca de 30 nm, e são formadas aleatoriamente na matriz e também heterogeneamente nas discordâncias na matriz. Zonas GP consistem em arranjo alternado de colunas de átomos de Mg e Si ao longo da direção $\langle 100 \rangle_{\alpha}$, com uma composição química de Mg:Si = 1, ou seja, na proporção de um para um. Estas zonas são apenas parcialmente coerentes, em contraste das zonas GP

completamente coerentes, as quais são característica comum da maioria das ligas de alumínio envelhecidas. As zonas GP podem existir sobre uma ampla faixa de temperatura (até 260°C), e sua estabilidade é bem alta (HANDBOOK OF ALUMINUM, 1996). As zonas GP são ilustradas pelo esquema apresentado na Fig. 2.15.

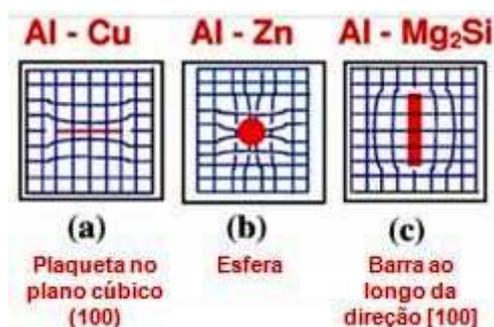


Figura 2.15 - Diagrama esquemático das zonas GP de diferentes ligas de alumínio (Fonte: <www.eaa.net>)

Todo o mecanismo de precipitação e da formação das fases (zonas GP, β' , β) está descrito no HANDBOOK OF ALUMINUM (1996).

2.2.5. Tratamentos térmicos

Como já discutido anteriormente, as ligas de alumínio conformadas são divididas em dois grupos: tratáveis termicamente e não tratáveis termicamente. A série 6XXX de maior interesse neste trabalho se encontra no grupo de ligas tratáveis termicamente. Os vários tratamentos térmicos disponíveis visam o endurecimento da liga aumentando sua resistência para aplicações mecânicas em engenharia. A norma que classifica as têmperas dos produtos de alumínio e suas ligas é a NBR 6835. A têmpera é uma condição aplicada ao metal ou liga, por meio de deformação plástica a frio ou de tratamento térmico, propiciando-lhe estrutura e propriedades mecânicas características. A expressão não tem qualquer ligação com a usada nos produtos de aço (material tratado termicamente para aumentar suas propriedades mecânicas) (ABAL). De acordo com a norma as têmperas são classificadas de acordo com os processos a que se submetem os produtos, da seguinte forma:

- “F” – como fabricada: aplica-se aos produtos obtidos através de processos de conformação em que não se emprega qualquer controle especial sobre as condições térmicas ou de encruamento. Não se especificam limites para as propriedades mecânicas;

- "O" - recozida: aplica-se aos produtos acabados, no estado em que apresenta o menor valor de resistência mecânica;
- "H" - encruada: aplica-se aos produtos em que se aumentou a resistência mecânica por deformação plástica a frio e que podem ou não ser submetidos a um recozimento complementar para produzir amolecimento parcial ou a um processo de estabilização. É utilizado para as ligas não tratáveis termicamente. A letra "H" deverá sempre ser seguida de dois ou mais dígitos;
- "W" - solubilizado: aplica-se somente a algumas ligas, as quais envelhecem naturalmente à temperatura ambiente após o tratamento de solubilização. Esta classificação é especificada somente quando o período de envelhecimento natural, após o resfriamento brusco, é indicado. Por exemplo: "W" ½ hora;
- "T" - tratada termicamente: aplica-se aos produtos que sofrem tratamento térmico com ou sem deformação plástica complementar, que produz propriedades físicas estáveis e diferentes das obtidas com "F", "O" e "H". A letra "T" deve ser seguida por um ou mais dígitos que indicam a seqüência dos processos básicos realizados: tratamentos térmicos ou deformações plásticas.

A partir desta classificação, cada grupo de tratamentos possui suas subdivisões. Como as barras de alumínio utilizadas no trabalho sofreram o tratamento térmico T6, a seguir é apresentada a subdivisão do grupo de tratamentos térmicos "T". Os números de 1 a 10 que seguem a letra T indicam seqüências específicas de tratamentos básicos:

- T1 - resfriado bruscamente após um processo de conformação a uma temperatura elevada e envelhecido naturalmente até uma condição substancialmente estável: aplica-se aos produtos que não sofrem deformação plástica a frio depois de resfriados bruscamente, após um processo de conformação a uma temperatura elevada, ou nos quais o efeito do encruamento, devido ao endireitamento, pode ser desprezado ao serem fixados os limites para as propriedades mecânicas;
- T2 - resfriado bruscamente após um processo de conformação a uma temperatura elevada, encruado e envelhecido naturalmente até uma condição substancialmente estável: aplica-se aos produtos que, depois de resfriados bruscamente após um processo de conformação a alta temperatura, sofrem deformação plástica a frio, a fim de aumentar a sua resistência mecânica, ou nos quais o efeito do encruamento, devido ao endireitamento, é levado em consideração ao serem fixados os limites para as propriedades mecânicas;
- T3 - solubilizado, encruado e envelhecido naturalmente até uma condição substancialmente estável: aplica-se 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;

- T4 - solubilizado e envelhecido naturalmente até uma condição substancialmente estável: aplica-se 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 para as propriedades mecânicas;
- T5 - resfriado bruscamente após um processo de conformação a uma temperatura elevada e depois envelhecido artificialmente: aplica-se aos produtos que não sofrem deformação plástica a frio, depois de resfriados bruscamente após um processo de conformação a uma temperatura elevada, ou nos quais o efeito do encruamento, devido ao endireitamento, pode ser desprezado ao serem fixados os limites para as propriedades mecânicas;
- T6 - solubilizado e depois envelhecido artificialmente: aplica-se 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 para as propriedades mecânicas;
- T7 - solubilizado e sobre-envelhecido: aplica-se aos produtos que são estabilizados, depois do tratamento térmico de solubilização, continuando o processo de envelhecimento além do ponto de maior resistência mecânica, a fim de se controlar alguma característica especial, como, por exemplo, a estabilidade dimensional ou a resistência à corrosão sob tensão;
- T8 - solubilizado, encruado e depois envelhecido artificialmente: aplica-se aos produtos que sofrem deformação plástica a frio, após o tratamento térmico de solubilização para aumentar a sua resistência mecânica, ou nos quais o efeito do encruamento, devido ao endireitamento, é levado em consideração ao serem fixados os limites para as propriedades mecânicas;
- T9 - solubilizado, envelhecido artificialmente e depois encruado: aplica-se aos produtos que sofrem deformação plástica a frio para aumentar a sua resistência mecânica, após o envelhecimento artificial;
- T10 - resfriado bruscamente após um processo de conformação a uma temperatura elevada, encruado e depois envelhecido artificialmente: aplica-se aos produtos que sofrem deformação plástica a frio para aumentar a sua resistência mecânica, ou nos

quais o efeito do encruamento, devido ao endireitamento, é levado em consideração ao serem fixados os limites para as propriedades mecânicas.

Tratamento térmico, no sentido lato, traduz-se por qualquer arrefecimento ou aquecimento da liga com o propósito de alterar as suas propriedades mecânicas, a sua estrutura metalográfica, ou estado de tensão de um produto. Contudo, quando este termo é aplicado ao alumínio e suas ligas, é restrito a operações específicas com a finalidade de aumentar a resistência ou a dureza das ligas para trabalho mecânico, tratáveis termicamente (MARTINS, 2008). Dentre os principais tratamentos térmicos realizados no alumínio estão:

- Homogeneização;
- Solubilização;
- Envelhecimento;
- Recozimento pleno;
- Recozimento parcial;
- Estabilização.

2.3. Usinabilidade

O termo usinabilidade não é fácil de ser definido, e às vezes é erroneamente interpretado e utilizado como sendo puramente uma propriedade de um material ao ser usinado. Porém, existem diversas variáveis envolvidas durante um processo de usinagem. Entre elas estão, o material da ferramenta utilizado, a geometria da mesma, as condições de corte, a atmosfera do processo de usinagem (uso ou não de fluido de corte), o processo de usinagem em questão, etc. Desta forma, Trent e Wright (2000) sugerem que a usinabilidade não é uma propriedade, mas o modo do material se comportar durante a usinagem. Em termos gerais a usinabilidade pode ser definida como sendo uma grandeza que indica a facilidade ou dificuldade de se usinar um material. A usinabilidade pode ser avaliada através de um ou mais critérios como os citados a seguir:

- Vida da ferramenta;
- Taxa de metal removido;
- Forças de corte
- Acabamento superficial;
- Forma do cavaco;
- Temperatura, etc.

Comparado a outros materiais, o alumínio é fácil de usinar. Entretanto, considerando a ampla faixa de ligas disponíveis, é necessário entrar em detalhes acerca das características da usinagem das ligas de alumínio (JOHNE, 1994). Nos próximos itens algumas características relacionadas à usinabilidade serão definidas.

2.4. Formação do cavaco

2.4.1. Generalidades

A usinagem é um dos processos de fabricação mais utilizados na indústria. E a sua característica principal é a produção de uma peça acabada por meio da retirada de material (cavaco) pela imposição de uma força mecânica. Este processo envolve elevados níveis de deformação e geração de calor na interface cavaco-ferramenta. Desta forma, o entendimento do processo de formação do cavaco é de grande importância para a compreensão global do processo de usinagem.

Segundo Ferraresi (1970) em geral, a formação de cavaco, nas condições normais de usinagem é um processo periódico composto por quatro etapas e se processa da seguinte forma:

- a) Durante a usinagem, devido à penetração da ferramenta na peça, uma pequena porção de material (ainda solidária à peça) é recalcada contra a superfície de saída da ferramenta.
- b) O material recalcado sofre uma deformação plástica, a qual aumenta progressivamente, até que as tensões de cisalhamento se tornem suficientemente grandes, de modo a se iniciar um deslizamento (sem que haja com isto uma perda de coesão) entre a porção de material recalcado e a peça. Este deslizamento se realiza segundo os planos de cisalhamento dos cristais da porção de material recalcada. Durante a usinagem, estes planos instantâneos irão definir certa região entre a peça e o cavaco, dita região de cisalhamento. Para facilitar o tratamento matemático dado à formação do cavaco, esta região é assimilada a um plano, dito simplesmente plano de cisalhamento. Este plano é tomado quanto possível paralelo aos planos de cisalhamento dos cristais dessa região e é definido pelo ângulo de cisalhamento ϕ .
- c) Continuando a penetração da ferramenta em relação à peça, haverá uma ruptura parcial ou completa na região de cisalhamento, dependendo naturalmente da ductilidade do material e das condições de usinagem. Para os materiais altamente deformáveis, a ruptura se realiza somente nas imediações da aresta

cortante, o cavaco originado é denominado cavaco contínuo. Para os materiais frágeis se origina o cavaco de cisalhamento ou ruptura.

- d) Prosseguindo, devido ao movimento relativo entre a ferramenta e a peça, inicia-se um escorregamento da porção de material deformada e cisalhada (cavaco) sobre a superfície de saída da ferramenta. Enquanto tal escorregamento ocorre, uma nova porção de material (imediatamente adjacente à porção anterior) está se formando e cisalhando. Esta nova porção de material irá escorregar sobre a superfície de saída da ferramenta, repetindo novamente o fenômeno.

A Fig. 2.16 a seguir apresenta um desenho esquemático da formação do cavaco. Neste processo, todo o volume de metal removido é plasticamente deformado, e assim uma grande quantidade de energia é necessária para formar o cavaco e para movê-lo através da face da ferramenta. No processo, duas novas superfícies são formadas, a nova superfície da peça (OA na figura) e a superfície inferior do cavaco (BC) (TRENT; WRIGHT, 2000).

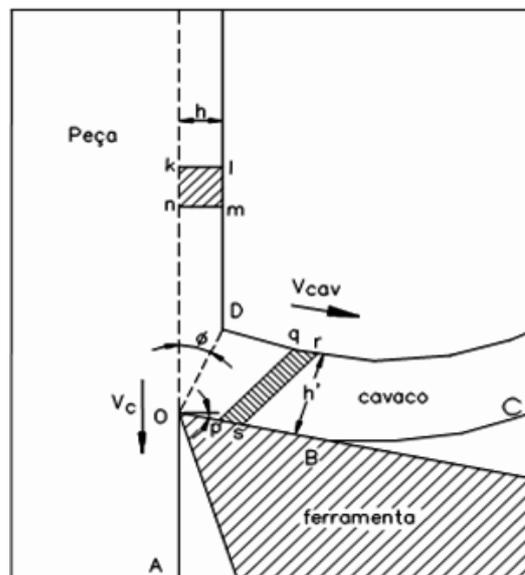


Figura 2.16 - Diagrama da formação do cavaco (TRENT; WRIGHT, 2000)

Morfologicamente, os cavacos podem ser contínuos, descontínuos e segmentados, embora esta classificação varie com a literatura. A Fig. 2.17 a seguir apresenta os tipos mais comuns de cavacos, segundo Ferraresi (1970). Em geral, cavacos contínuos aparecem durante a usinagem de materiais dúcteis, enquanto os descontínuos surgem em consequência da formação de um fluxo de elementos de cavacos quebrados em pedaços durante a usinagem de materiais frágeis. Existem várias vantagens em produzir cavacos curtos. A quebra do cavaco pode ocorrer naturalmente durante a sua formação, como no

caso da usinagem de bronze e ferro fundido, ou sua quebra pode ser conseguida pelos quebra-cavacos (MACHADO et al., 2009).

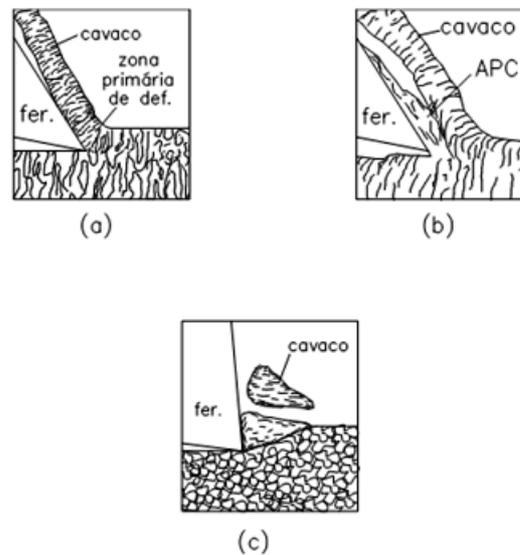


Figura 2.17 - Classes de cavacos: a) cavaco contínuo; b) cavaco contínuo com APC; c) cavaco descontínuo (FERRARESI, 1970).

Os cavacos contínuos são formados na usinagem de materiais dúcteis, como aços de baixa liga, alumínio e cobre. Nesse caso, o metal cisalha na zona primária de cisalhamento com grandes deformações, no entanto, permanece homogêneo, sem fragmentação.

O tipo de cavaco também está fortemente ligado à tensão normal no plano de cisalhamento, a qual depende do ângulo de cisalhamento θ e das condições da interface cavaco-ferramenta, ou seja, na zona secundária de cisalhamento (DOYLE, 1979).

Os cavacos descontínuos são mais comuns na usinagem de materiais frágeis, como bronze e ferros fundidos cinzentos, uma vez que não são capazes de suportar grandes deformações sem se quebrar. Entretanto, baixas velocidades de corte, ângulo de saída pequeno e grandes avanços também podem produzir cavacos descontínuos em materiais de baixa ductilidade. Com o aumento da velocidade de corte, o cavaco tende a se tornar mais contínuo, pois além de maiores temperaturas e, por conta disso, os materiais se tornarem mais dúcteis, a penetração de “contaminantes” na interface cavaco-ferramenta para reduzir a tensão normal no plano de cisalhamento torna-se mais difícil (MACHADO et al., 2009).

Os cavacos segmentados são caracterizados por grandes deformações continuadas em estreitas bandas entre segmentos com pouco ou quase nenhuma deformação nos seus

interiores. Trata-se de um processo muito diferente verificado na formação do cavaco contínuo. Tal fenômeno pode ser entendido com base nas explicações de Cook (1953), que afirma que a diminuição na resistência mecânica do material por causa do aumento da temperatura (provocado pelas deformações plásticas locais nas bandas de cisalhamento) iguala, ou excede o aumento da resistência mecânica causado pelo endurecimento a frio. Isso é peculiar a certos materiais com pobres propriedades térmicas, como o titânio e suas ligas (MACHADO et al., 2009).

Quanto à forma os cavacos podem ser classificados de acordo com a norma ISO 3685 (1993) conforme a Fig. 2.18.

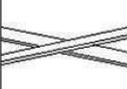
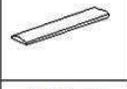
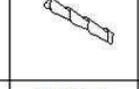
| 1. Cavaco em fita | 2. Cavaco tubular | 3. Cavaco espiral | 4. Cavaco hel. tipo arruela | 5. Cavaco hel. cônico | 6. Cavaco em arco | 6. Cavaco fragmentado | 7. Cavaco em agulha |
|---|---|--|---|---|---|---|---|
|  |  |  |  |  |  |  |  |
| 1. 1 Longo | 2. 1 Longo | 3. 1 Plano | 4. 1 Longo | 5. 1 Longo | 6. 1 Conectado | | |
|  |  |  |  |  |  | | |
| 1. 2 Curto | 2. 2 Curto | 3. 2 Cônico | 4. 2 Curto | 5. 2 Curto | 6. 2 Solto | | |
|  |  | |  |  | | | |
| 1. 3 Emaranhado | 2. 3 Emaranhado | | 4. 3 Emaranhado | 5. 3 Emaranhado | | | |

Figura 2.18 - Formas de cavacos produzidos na usinagem dos metais (ISO 3685, 1993).

O material da peça é o que mais influencia a forma e tipo dos cavacos. Cavacos contínuos, parcialmente contínuos e segmentados podem ser produzidos em qualquer das formas mostradas na figura anterior, dependendo dos parâmetros de corte e do uso de quebra-cavacos. Cavacos do tipo descontínuo, entretanto, só podem ser classificados quanto às formas das lascas, ou em pedaços (MACHADO et al., 2009).

No que se refere aos parâmetros de corte, em geral, um aumento na velocidade de corte, uma redução no avanço, ou um aumento no ângulo de saída tendem a mudar das formas da direita para a esquerda na figura anterior, isto é, produzir cavacos em fitas (ou contínuos, quanto ao tipo). O avanço é o parâmetro mais influente, seguido da profundidade de corte, a afetar a forma do cavaco. A Fig. 2.19 a seguir apresenta o efeito do avanço e da profundidade de corte na forma dos cavacos.

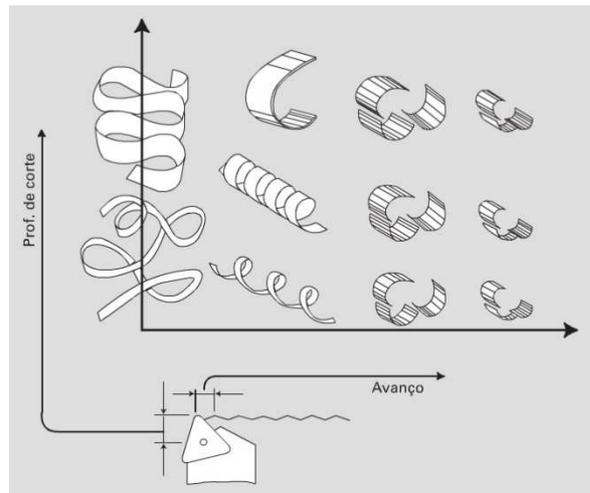


Figura 2.19 - Efeito do avanço e da profundidade de corte na forma dos cavacos (SMITH, 1989 - Adaptado por MACHADO et al., 2009)

Um dos maiores problemas na usinagem do alumínio é o controle do cavaco. Por ser um material dúctil, normalmente os cavacos obtidos são contínuos, de grande espessura, resistentes e difíceis de serem controlados. Devido à sua estrutura CFC, ocorrem maiores deformações antes da ruptura do metal.

Em operações de usinagem como furação, alargamento ou rosqueamento, um projeto especial da ferramenta se torna necessário a fim de facilitar a remoção dos cavacos, minimizar rebarbas e evitar o entupimento dos canais. Normalmente são utilizados maiores ângulos de saída e quebra-cavacos.

Alguns elementos como chumbo (Pb), bismuto (Bi), estanho (Sn) e antimônio (Sb) podem ser adicionados à algumas ligas de alumínio para promover a quebra do cavaco. Dasch et al. (2009) em seus estudos introduziram pequenas quantidades de Pb, Bi, In e Sn em uma liga Al-Si hipoeutética e por meio de microscopia eletrônica verificaram que uma pequena camada de alumínio enriquecida por estes aditivos cobriram a broca, a qual acredita ser a principal fonte de redução do atrito e melhora na evacuação do cavaco. Porém, devido ao impacto adverso ao meio-ambiente, a adição de Pb têm sido restrita, pois este material é tóxico.

A forma do cavaco e sua capacidade de quebra são grandemente influenciadas pelo tipo da liga de alumínio utilizado e suas propriedades. A liga de alumínio 2011 é uma liga de alta resistência e de corte fácil a qual apresenta excelente usinabilidade. Os cavacos formados são quebrados mais facilmente permitindo portanto, um excelente controle do cavaco, em adição à uma excelente qualidade superficial e baixas taxas de desgaste da ferramenta. Ligas como a 2024-T4 e 2017-T4 tendem a produzir cavacos contínuos, assim necessitando do uso de quebra cavaco na ferramenta de corte. Insertos com revestimento

de diamante por CVD com quebra cavaco são ideais para garantir um alto grau de controle de cavaco nestes materiais. Ligas como a 6061-T6 e 5056-H38 são comparativamente mais difíceis de usinar e produzem cavacos resistentes que são difíceis de quebrar. Ligas mais dúcteis como a 5052, 3003 e 1100 tendem a produzir cavacos mais moles, necessitando assim, de seleção cuidadosa de quebra-cavacos e revestimentos de ferramenta (HANDBOOK OF ALUMINUM, 1996).

Kamiya e Yakou (2007) avaliaram a capacidade de quebra do cavaco em várias ligas de alumínio conformadas. Nas ligas, Al_2Cu , Al_6Mn , Mg_2Si , compostos do sistema Al-Fe-Si e Si eutético foram observados como partículas de segunda fase. A capacidade de quebra do cavaco das ligas contendo Al_2Cu ou Si foi superior daquelas contendo Mg_2Si ou Al-Fe-Si. Esta tendência foi mais proeminente na usinagem a seco do que na usinagem utilizando fluido de corte. As partículas de segunda fase de Al_2Cu e Si nestas ligas fraturaram durante o processo de usinagem, supostamente atuando como a causa da quebra do cavaco. A Fig. 2.20 a seguir apresenta as formas de cavaco obtidas na usinagem a seco das várias ligas de alumínio, onde é possível observar a maior capacidade de quebra do cavaco nas ligas A2017, A4032 e Al-12%Si.

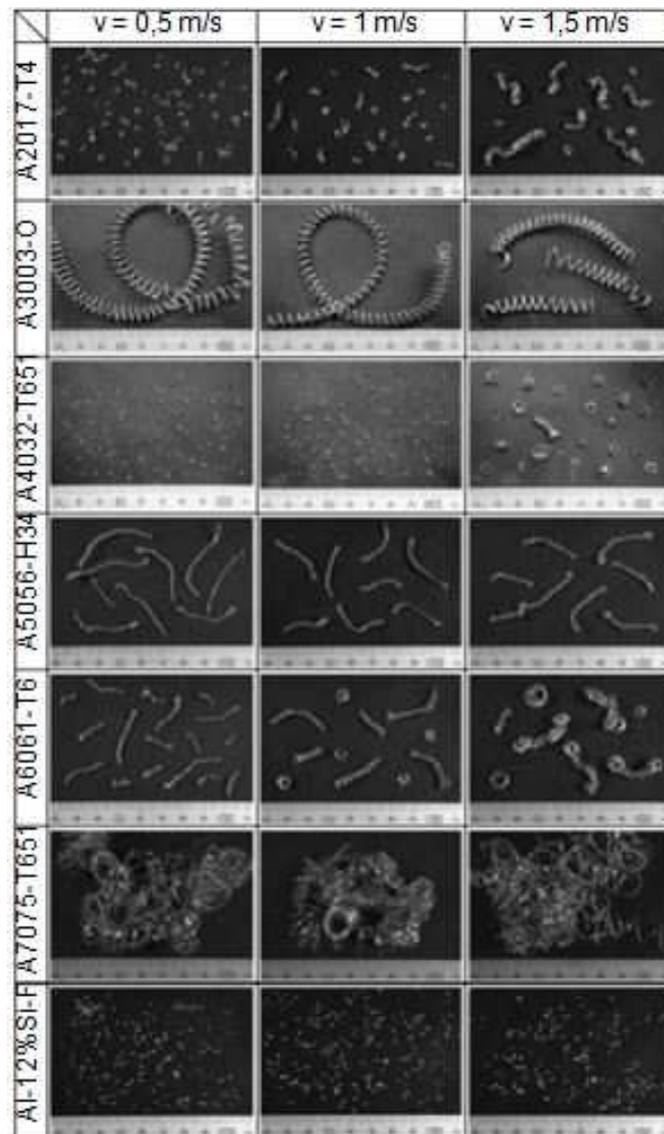


Figura 2.20 - Formas do cavaco formado em várias ligas de alumínio no corte a seco (KAMIYA; TAKOU, 2007).

2.4.2. Grau de Recalque

A quantidade de deformação sofrida pelo material antes da formação do cavaco pode ser medida através a relação entre a espessura antes do corte e após o corte. Esta relação é conhecida como grau de recalque (Eq. 2.3):

$$R_c = \frac{h'}{h} \quad \text{Eq. (2.3)}$$

Onde h' representa a espessura do cavaco e h é a parte de material não deformado que será cortado e que podem ser vistos na Fig. 2.16 da formação do cavaco.

Com o grau de recalque é possível obter o ângulo de cisalhamento teórico (Fig. 2.16) que é função também do ângulo de saída da ferramenta (γ_0) como mostra a Eq.(2.4).

$$\operatorname{tg}\phi = \frac{\cos\gamma_0}{R_c - \operatorname{sen}\gamma_0} \quad \text{Eq. (2.4)}$$

Como esse ângulo de saída normalmente é definido em função do material a ser usinado, a dependência maior do ângulo de cisalhamento fica por conta do grau de recalque. Como há restrição na superfície de saída da ferramenta por onde o cavaco deve escoar, conseqüentemente existe uma desaceleração do volume de material a ser transformado em cavaco. Desta forma, a espessura do cavaco é sempre menor antes de ele se formar, o que resulta em um grau de recalque sempre maior que a unidade. Admite-se também que o volume do material não se modifica durante a formação do cavaco. Ao contrário do que possa parecer, o grau de recalque não é facilmente obtido, pois o cavaco não possui uma espessura uniforme: ele é formado por lamelas justapostas com extremidades irregularmente conformadas, porém, nos casos em que é possível sua correta estimativa, pode-se encontrar o ângulo do plano de cisalhamento (MACHADO et al., 2009). A Fig. 2.21 apresenta a variação do ângulo de cisalhamento teórico em função do grau de recalque.

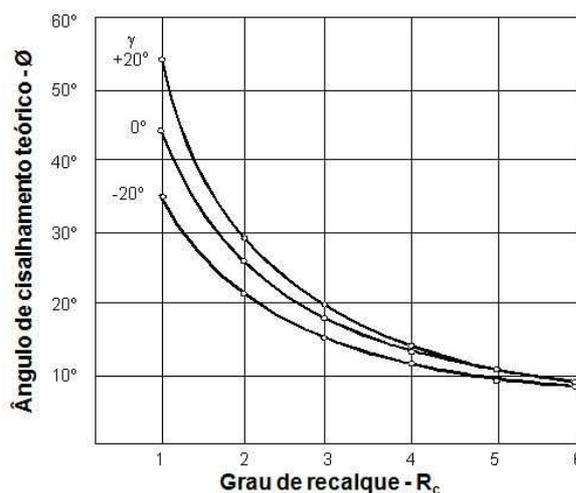


Figura 2.21 - Ângulo de cisalhamento teórico em função do grau de recalque (KRONENBERG, 1966)

O ângulo de cisalhamento então pode também ser utilizado como um importante indicador da deformação sofrida pelo material durante a usinagem. A deformação por sua vez dependerá das restrições ao deslizamento do cavaco pela superfície de saída da

ferramenta, ou seja, as condições de atrito da interface cavaco-ferramenta. Além disso, dependerá das propriedades do material da peça como a ductilidade e resistência mecânica por ele apresentada.

2.4.3. Condições de interface cavaco-ferramenta

O atrito em usinagem tem sido investigado por diversos pesquisadores, mas uma descrição precisa das condições na interface ainda não está disponível. No entanto, é importante descrever as condições da interface cavaco-ferramenta, pois elas afetam muitas variáveis como o projeto da ferramenta, seleção do material da ferramenta e seleção dos parâmetros de corte. Com um modelo preciso das condições de interface é também possível determinar a distribuição de tensão e de temperatura, e o desgaste da ferramenta mais eficientemente. Economia na usinagem será obtida com a melhoria da usinabilidade através da correta seleção do material da peça, ferramenta e condições de corte. Além disso, conhecer as condições de contato entre cavaco e ferramenta permite conhecer as condições da formação do cavaco (KILIC; RAMAN, 2006).

Segundo Trent e Wright (2000) o movimento do material do cavaco sobre a superfície da ferramenta não pode ser adequadamente descrito usando os termos deslizamento e atrito como eles são comumente entendidos por dois motivos:

1. Não deve haver uma simples relação entre as forças normal e paralela à superfície da ferramenta.
2. A força paralela à superfície da ferramenta não é independente da área de contato, mas ao contrário, a área de contato entre a ferramenta e o material da peça é um parâmetro muito importante no corte de metais.

Desta forma, Trent (1963) identificou duas zonas que compõem a interface cavaco-ferramenta. São elas a zona de aderência (seizure zone) e a zona de escorregamento (sliding zone) conforme o esquema presente na Fig. 2.22.

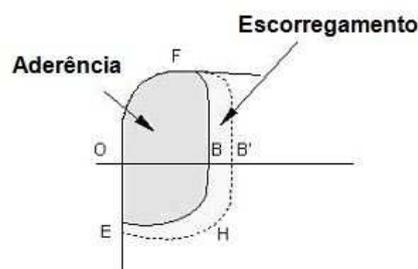


Figura 2.22 - Áreas de aderência e escorregamento na interface cavaco-ferramenta (TRENT; WRIGHT, 2000).

Trent (1963) em seus estudos obteve resultados que evidenciaram o contato absoluto ao longo de uma grande porção da interface cavaco-ferramenta à qual ele denomina de zona de aderência. Nesta porção, onde a área real de contato é igual à área aparente, as leis de Coulomb sobre o atrito não se aplicam. Sob tais condições, o movimento na interface ocorre por cisalhamento dentro do material do cavaco. Uma zona de cisalhamento intenso é formada bem próxima, mas não necessariamente na interface, que foi denominada “zona de fluxo” (flow zone) (TRENT, 1963). O material do cavaco permanece estacionário no contato com a ferramenta. Na zona de fluxo que pode variar sua espessura entre 0,01 a 0,1 mm, existe um gradiente de velocidade e à medida que se afasta da ferramenta o material adquire a velocidade real de saída do cavaco. Na Fig. 2.23 tem-se a micrografia de um cavaco de aço ABNT 1050 com ampliação máxima de 1000x, para $v_c = 73,5$ m/min e $f = 0,169$ mm/rot, tendo em destaque a zona de fluxo.

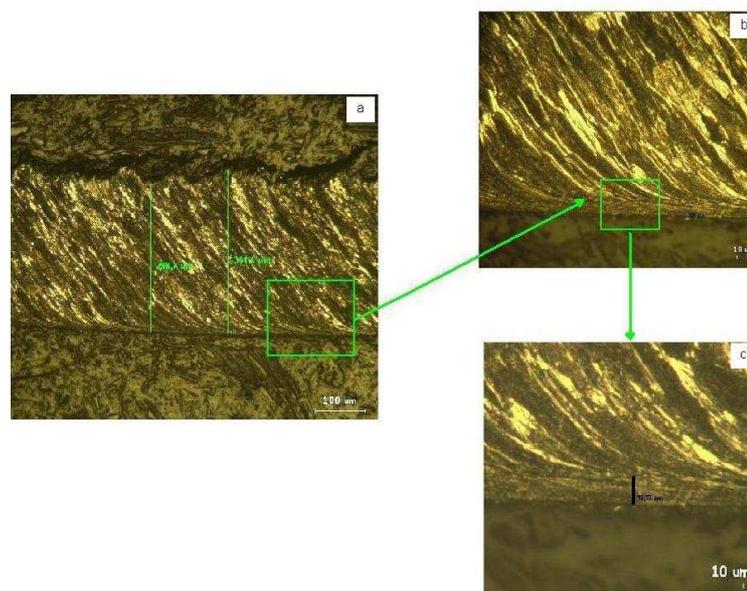


Figura 2.23 - (a) Micrografia de um cavaco de aço ABNT 1050; (b)- Ampliação da região indicada em a; (c)- Ampliação da região indicada em b (RIBEIRO; GONÇALVES, 2010).

A intensa deformação que ocorre na zona de fluxo pode ser verificada com o grande aumento da microdureza nesta região causada pelo encruamento do material e pela sua diminuição ao longo da espessura do cavaco ao se distanciar da zona de fluxo conforme a Fig. 2.24. Além disso, esta zona de fluxo tende a diminuir de tamanho com o aumento da velocidade de corte e aumentar com o aumento do avanço. Outra consideração importante é que materiais dúcteis como alumínio que possuem altos graus de deformação tendem a apresentar maiores dimensões da zona de fluxo (RIBEIRO; GONÇALVES, 2010).

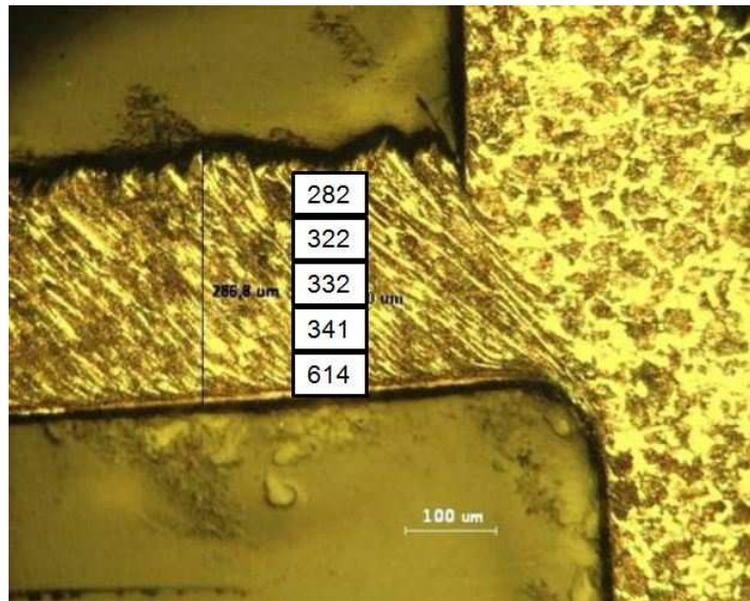


Figura 2.24 - Microdureza na zona de fluxo de uma raiz de cavaco de aço ABNT 1050 usinado com $v_c = 75$ m/min, $f = 0,138$ mm/rot e $a_p = 1,5$ mm (RIBEIRO; GONÇALVES, 2010)

As “condições de aderência” devem ser assumidas como inevitáveis para a usinagem de praticamente todos os materiais (exceto alguns de corte fácil), e utilizando-se qualquer tipo de ferramenta de corte. Altas tensões de compressão, grandes quantidades e altas taxas de deformação, que provocam altas temperaturas na interface cavaco-ferramenta, bem como a pureza do material da peça em contato com a ferramenta, promovem ligações atômicas nessa interface, causando aderência (TRENT, 1988a, 1988b, 1988c).

No contato cavaco-ferramenta, além das condições de aderência também estão presentes condições de escorregamento. Nesta região a área real é bem menor que a área aparente, o que implica que nesta condição as leis de atrito de Coulomb são aplicáveis. A zona de fluxo de intensa deformação então é suprimida. A presença de condições de escorregamento na periferia da área de contato cavaco-ferramenta se deve às baixas tensões de compressão atuando nessas regiões (MACHADO et al., 2009).

Kilic e Ramam (2006) em seus estudos investigaram as condições na interface cavaco-ferramenta na usinagem de ligas de alumínio. Segundo suas investigações a dinâmica do atrito é diferente em diferentes condições de corte. Aresta postíça de corte (APC), zonas de aderência e de escorregamento diferem de acordo com as variáveis de corte, material da peça e geometria de corte. Mesmo materiais idênticos usinados com diferentes condições de corte apresentam diferentes condições de contato na interface. Nas baixas velocidades de corte a zona total de contato pode ser tratada como aderência. Com o aumento da velocidade de corte, a região de contato mostra três zonas separadas para as

ligas de alumínio conforme a Fig. 2.25. A zona de aderência I é próxima à aresta de corte. Ela é seguida por uma zona de escorregamento, e o restante da região é descrita por uma zona de aderência II.

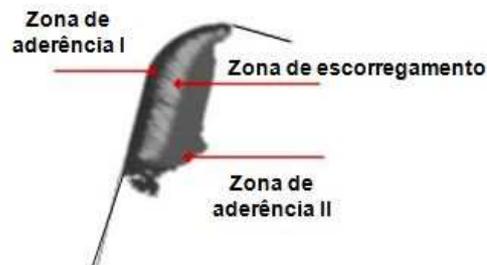


Figura 2.25. Imagem da área de contato cavaco-ferramenta, mostrando as diferentes condições de atrito (KILIC; RAMAN, 2006)

As áreas das diferentes zonas são dinâmicas em natureza e sua magnitude é função da velocidade de corte, avanço, profundidade de corte e tempo de corte. A Fig. 2.26 a seguir apresenta as condições na interface cavaco-ferramenta para diferentes avanços e profundidades de corte, segundo Kilic e Raman (2006).

| $N = 1250 \text{ rpm}$ | $f = 0,071 \text{ mm/rev}$ | $f = 0,198 \text{ mm/rev}$ | $f = 0,325 \text{ mm/rev}$ |
|-------------------------|--|--|--|
| $a_p = 0,51 \text{ mm}$ | $A_c = 0,0362 \text{ mm}^2$  | $A_c = 0,1010 \text{ mm}^2$  | $A_c = 0,1658 \text{ mm}^2$  |
| $a_p = 1,27 \text{ mm}$ | $A_c = 0,0902 \text{ mm}^2$  | $A_c = 0,2517 \text{ mm}^2$  | $A_c = 0,4128 \text{ mm}^2$  |
| $a_p = 2,03 \text{ mm}$ | $A_c = 0,1441 \text{ mm}^2$  | $A_c = 0,4019 \text{ mm}^2$  | $A_c = 0,6598 \text{ mm}^2$  |
| $a_p = 2,79 \text{ mm}$ | $A_c = 0,1981 \text{ mm}^2$  | $A_c = 0,5524 \text{ mm}^2$  | $A_c = 0,9068 \text{ mm}^2$  |

Figura 2.26 - Imagens de MEV modificadas da área de contato cavaco-ferramenta após o corte de AL-2024 à $v_c = 470 \text{ m/min}$ com diferentes avanços e profundidades de corte (KILIC; RAMAN, 2006)

2.4.4. Aresta postiça de corte (APC)

Quando se usina materiais com mais de uma fase na microestrutura, uma camada encruada na superfície de saída da ferramenta passa a atuar como uma nova superfície de saída. Este processo pode se repetir até que uma porção de material encruado e aderido na superfície de saída da ferramenta passa a atuar como um prolongamento da ferramenta,

deslocando a zona de cisalhamento secundária e evitando o contato do cavaco com a ferramenta. Este material aderido à ferramenta é denominado aresta postiça de corte (APC) e três fatores são determinantes para sua existência: aderência, segunda fase no material usinado e encruamento.

Na interface, a primeira camada do material da peça que se une à ferramenta por meio de ligações atômicas é endurecida a frio, aumentando assim, seu limite de escoamento e, por conseguinte, a tensão de cisalhamento torna-se insuficiente para romper tais ligações. As deformações, então, continuam nas camadas superiores adjacentes, mais afastadas da interface, até que estejam também encruadas o suficiente (MACHADO et al., 2009). Além disso, a existência de segunda fase no material será importante na formação de microtrincas que favorecerão o processo de formação da APC (MILOVIK; WALLBANK, 1983)

Outros autores tem uma visão um pouco diferente da APC. Segundo Trent e Wright (2000) a APC não é um corpo separado de metal durante a operação de usinagem, mas sim como mostrado na Fig. 2.27, ela é uma estrutura dinâmica, sendo construída por sucessivas camadas grandemente encruadas sob condições extremas de deformação. Desta forma, é um fator de preocupação, pois apesar dela existir de forma estável, também apresenta uma fase instável. Assim, quando atinge um tamanho crítico, parte desta APC pode ser levada pelo cavaco, mas também pode se aderir à superfície usinada, representando perda na qualidade superficial da peça, e ainda arrancar material da superfície de saída da ferramenta implicando no seu desgaste.

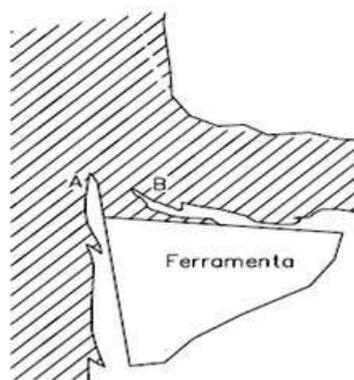


Figura 2.27 - Esquema da aresta postiça de corte (TRENT, 1963)

A APC ocorre mais comumente em velocidades de corte intermediárias, deslizamento pode ocorrer em velocidades extremamente baixas e a zona de fluxo em altas velocidades. O real intervalo de velocidade no qual a APC existe depende da liga sendo usinada e do avanço (TRENT; WRIGHT, 2000). Boothroyd (2006) afirma que a APC

usualmente ocorre quando se usina materiais dúcteis em baixas velocidades de corte. Assim, na usinagem de ligas de alumínio, material dúctil, a APC é uma preocupação. A Fig. 2.28 apresenta uma aresta postiça de corte na usinagem de uma liga de alumínio à velocidade de corte de 87,6 m/min.

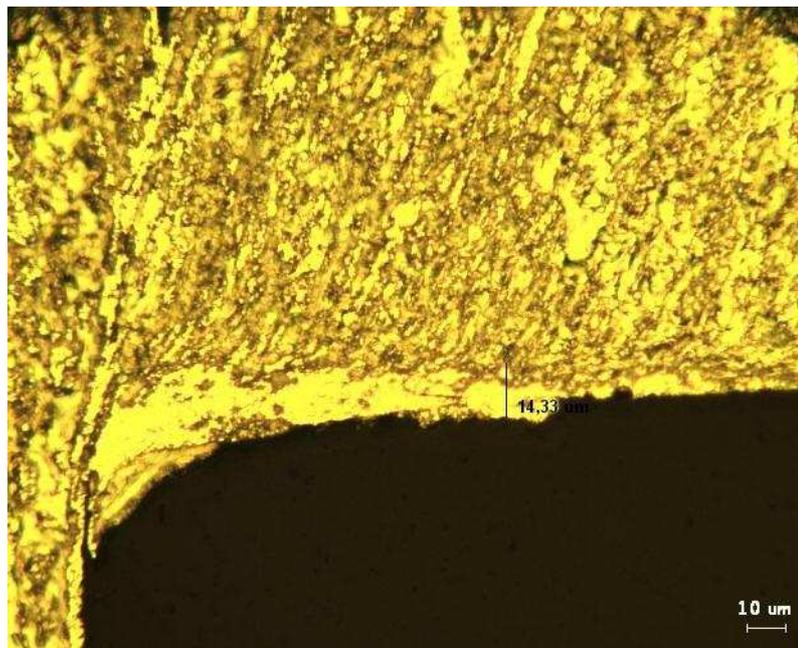


Figura 2.28 - Aresta postiça de corte na usinagem de uma liga de alumínio à $v_c = 87,6$ m/min (RIBEIRO; GONÇALVES, 2010)

Segundo o Metals Handbook (1992) a APC pode ser minimizada usando fluídos de corte efetivos e empregando ferramentas com a superfície livre de marcas de retificação e riscos. No entanto, o efeito do fluído de corte na formação da APC não é aceito por alguns autores. Da Silva (1998), por exemplo, discute o efeito do fluído de corte na rugosidade e sugere que a ação do fluído se restringe à aresta secundária de corte, sem no entanto, considerar que o fluído penetra na interface para eliminar ou minimizar a APC.

2.5. Força de Usinagem

As forças atuando na ferramenta são um aspecto importante em usinagem. Para a área de fabricação de ferramentas de usinagem, um conhecimento das forças é necessário para a estimação da potência requerida e para o projeto de elementos da máquina-ferramenta, porta-ferramentas e fixações, adequadamente rígidos e livres de vibração (TRENT; WRIGHT, 2000).

A Fig. 2.29 apresenta um esquema mostrando a força de usinagem F atuando numa operação de torneamento e suas componentes de acordo com direções conhecidas.

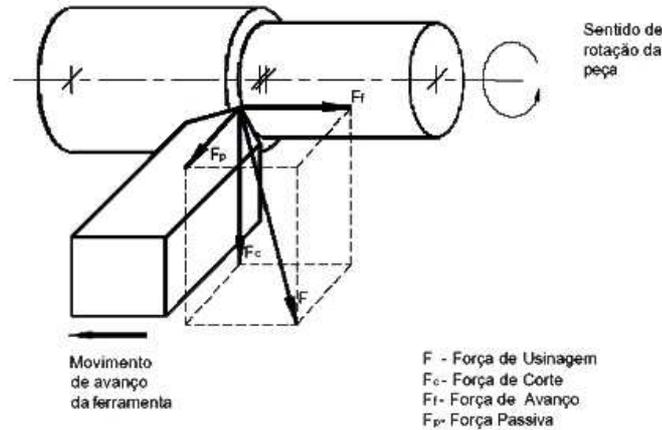


Figura 2.29 - Força de usinagem e suas componentes para o processo de torneamento
(Fonte: <<http://www.moldesinjecaoplasticos.com.br/fundusinagem.asp>>)

As três componentes da força (F) de usinagem são:

- Força de corte (F_c): é a projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, na direção de corte, dada pela velocidade de corte.
- Força de avanço (F_r): é a projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, na direção de avanço, dada pela velocidade de avanço.
- Força passiva (F_p): é a projeção da força de usinagem perpendicular ao plano de trabalho.

A força de corte (F_c) é normalmente a de maior valor entre as três componentes da força de usinagem no processo de torneamento, sendo a principal componente da potência de usinagem para dimensionamento do principal motor na seleção, ou projeto de máquinas-ferramentas. Esta força pode ser influenciada por diversos fatores como o material da peça, material e geometria da ferramenta, condições de interface cavaco-ferramenta, área da seção de corte, velocidade de corte, condições de lubrificação e refrigeração, desgaste da ferramenta, entre outros. A Fig. 2.30 apresenta a variação da força de corte com a velocidade de corte em diferentes atmosferas de usinagem, na usinagem da liga de alumínio A356.

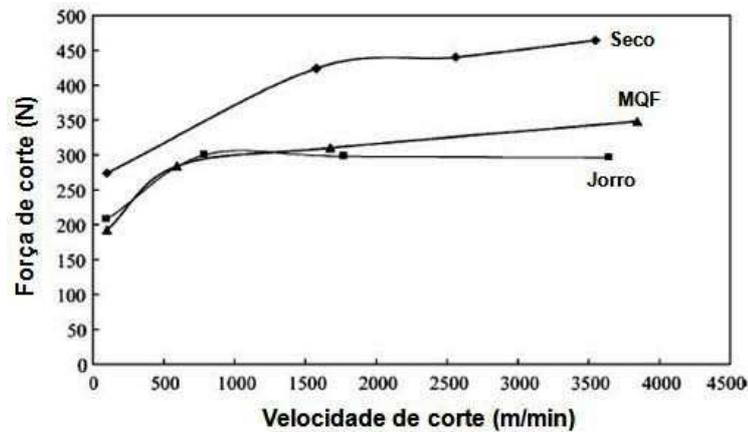


Figura 2.30 - Força de corte versus velocidade de corte no processo de fresamento frontal em alta velocidade da liga de alumínio A356 ($f_z = 0.8$ mm/dente; $a_p = 2$ mm; $a_e = 35$ mm) (KISHAWY; DUMITRESCU; ELBESTAWI, 2004).

Já na Fig. 2.31 são apresentadas curvas da força de corte em função da velocidade de corte no torneamento da liga de alumínio 6351 com diferentes quantidades de silício. Nos ensaios foram utilizados avanço de 0,2 mm/rot e profundidade de corte de 2 mm. Os menores valores de força de corte foram obtidos na usinagem da liga com 1,2 % de silício.

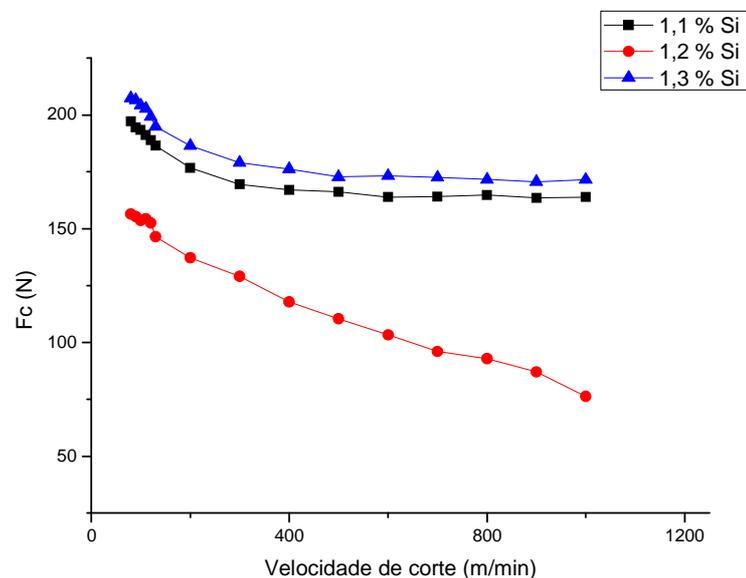


Figura 2.31 – Força de corte versus velocidade de corte no torneamento da liga de alumínio 6351 com diferentes quantidades de silício utilizando avanço de 0,2 m/rot e profundidade de corte de 2 mm (CUNHA, 2012)

Quando se usina a maioria dos metais puros comerciais, as forças são altas, isto é verdade para o ferro, níquel, cobre, alumínio, entre outros. Nestes metais, a área de contato entre cavaco e superfície de saída é grande, o ângulo de cisalhamento é pequeno e cavacos grossos e resistentes se formam à baixas velocidades. Por estas razões, metais puros são notoriamente difíceis de usinar (TRENT; WRIGHT, 2000).

A grande área de contato está associada com a alta ductilidade destes metais puros, mas a razão não é completamente entendida. A liga de um metal puro normalmente aumenta seu limite de escoamento, mas frequentemente reduz as forças na ferramenta porque o comprimento de contato na superfície de saída se torna menor (TRENT; WRIGHT, 2000). Isto pode ser verificado através da Fig. 2.32. Comparando as curvas das forças de corte e avanço do alumínio puro em relação à liga de alumínio, as forças na ferramenta são menores para a liga que para o metal puro durante todo o intervalo de velocidade de corte, e a diferença é maior em baixas velocidades.

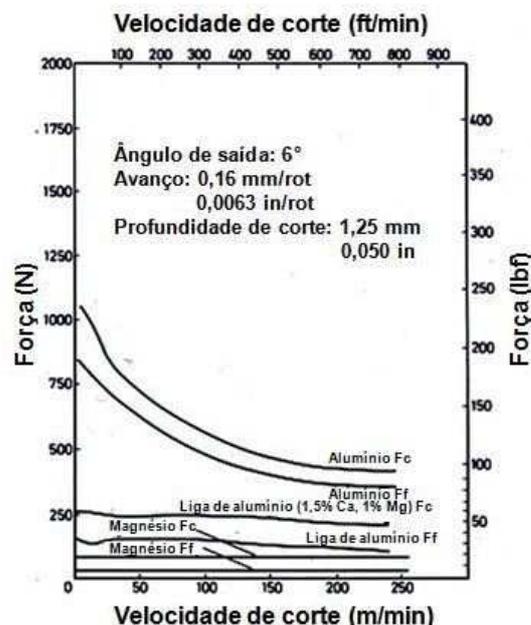


Figura 2.32 - Forças na ferramenta versus velocidade de corte para a usinagem de magnésio, alumínio e ligas de alumínio (WILLIAMS, SMART E MILNER, 1970)

A potência de usinagem resulta da soma das potências em função de cada componente da força de usinagem e suas respectivas velocidades. Assim, somente as componentes de corte e avanço contribuem para a potência de usinagem (TRENT; WRIGHT, 2000).

A Fig. 2.33 apresenta a potência requerida no corte em função da dureza do material. As ligas de alumínio em relação aos outros materiais apresentam menor potência

requerida, necessitando maior potência apenas que a usinagem do magnésio. Neste caso o fator mais influente é a dureza e também a resistência do material. Vale lembrar que quando se fala em usinabilidade outro fator como a ductilidade do material entra em questão como será discutido posteriormente.

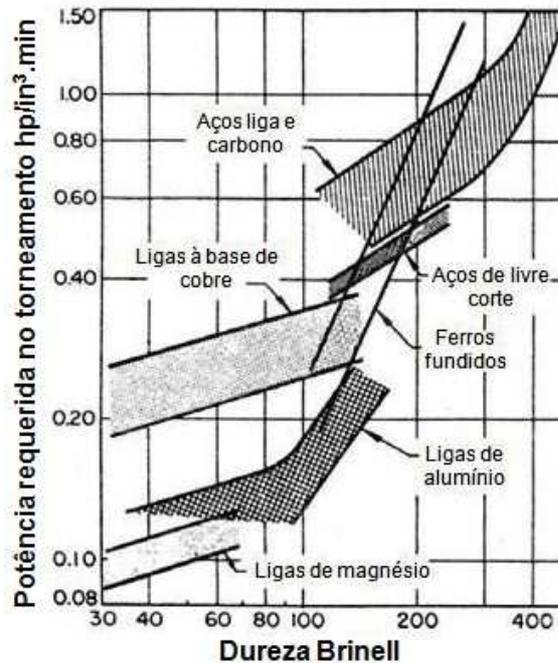


Figura: 2.33 – Potência requerida para o torneamento de diversos materiais

2.6. Acabamento Superficial

Com o aumento da tecnologia e a necessidade de maior qualidade das peças produzidas por diversos processos de fabricação para a utilização em engenharia e na área industrial em geral, o acabamento superficial se torna um fator determinante já que influencia no funcionamento de diversos dispositivos.

A condição final de uma superfície usinada é resultado de um processo que envolve deformações plásticas, ruptura, recuperação elástica, geração de calor, vibração, tensões residuais e, as vezes, reações químicas. Todos esses fatores podem ter efeitos diferentes na nova superfície, assim, o termo integridade superficial é utilizado para descrever a qualidade de uma superfície e, portanto, engloba um grande número de alterações sofridas por ela (MACHADO et al., 2009).

A integridade superficial pode ser dividida em acabamento e alterações superficiais. Um dos fatores mais utilizados para caracterizar o acabamento de uma superfície é a rugosidade. A rugosidade de uma superfície é composta de irregularidades finas ou de erros

microgeométricos resultantes da ação inerente ao processo de corte (marcas de avanço, aresta postiça de corte, desgaste da ferramenta etc.). Em muitos casos, a rugosidade é utilizada como parâmetro de saída para controlar um processo de usinagem. De fato, a rugosidade de uma superfície depende de vários parâmetros, como máquina-ferramenta, propriedades do material da peça, geometria e material da ferramenta, e operação de usinagem (MACHADO et al., 2009).

A rugosidade pode ser medida por vários parâmetros como o (R_a) desvio aritmético médio, (R_q) desvio médio quadrático, (R_t) altura total do perfil, (R_z) altura máxima do perfil, entre outros. A Fig. 2.34 ilustra a definição do parâmetro R_z .

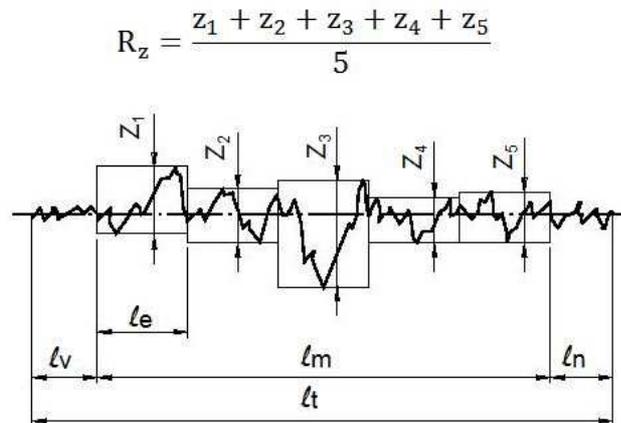


Figura 2.34 - Parâmetro de rugosidade R_z (ROSA, 2005)

Em geral, quanto maior a resistência e a dureza da liga conformada a ser usinada, mais lisa é a superfície produzida (JOHNE, 1994), esta regra se aplica pelo menos para as ligas de alumínio.

A pureza do material usado é de suma importância para ligas de alumínio que são usinadas para resultar em superfícies extremamente lisas ($R_t < 0,1 \mu\text{m}$). Para cumprir estas condições, os materiais de alumínio conformados usados devem ter uma microestrutura extremamente uniforme, livre de heterogeneidades e impurezas (JOHNE, 1994).

Além do próprio material a ser usinado, as condições de corte tem grande influência na rugosidade. A velocidade de corte, por exemplo, é um parâmetro de usinagem importante o qual influencia a qualidade superficial. Em geral, a rugosidade é inversamente proporcional à velocidade de corte. À baixas velocidades de corte a rugosidade produzida aumenta drasticamente, devido à formação de aresta postiça de corte. A região de baixas velocidades de corte deve, como uma regra, ser evitada.

Ainda segundo Johnne (1994) baseado nos fatores que afetam a qualidade superficial, a operação de usinagem do alumínio pode ser definida em quatro regiões separadas, conforme a Fig. 2.35:

- Região I: Devido à aresta postiça de corte, a qualidade superficial é insatisfatória, a ação de corte sendo substituída por rasgamento. Esta região deve ser evitada.
- Região II: Diminuição da rugosidade da superfície com o aumento da velocidade de corte.
- Região III: Aumenta a influência de interferências, ou seja, trepidação da ferramenta e vibrações da máquina em uma região a qual é de outra forma adequada para a usinagem do alumínio. Assim, para obter os melhores resultados, as máquinas usadas precisam ser especialmente projetadas para o alumínio.
- Região IV: Pobre qualidade superficial causada por cavacos virtuais. Estes cavacos virtuais são uma acumulação de material sendo trabalhado e o qual adere à superfície da ferramenta, assim riscando a nova superfície usinada.

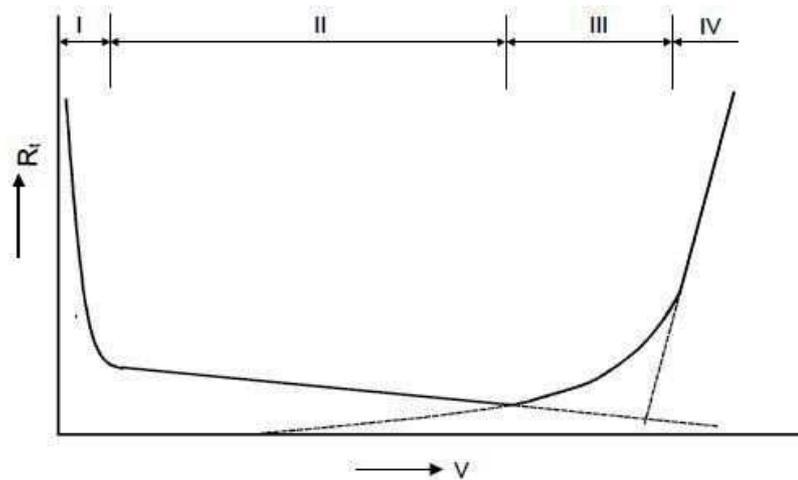


Figura 2.35 - Qualidade superficial em função da velocidade de corte na usinagem do alumínio (JOHNE, 1994)

Sreejith (2007) em seus estudos observou a importância da utilização de fluido de corte para a melhora da rugosidade na usinagem da liga de alumínio 6061. É possível observar que todas as condições utilizando fluido de corte resultaram em melhor acabamento superficial segundo a Fig. 2.36.

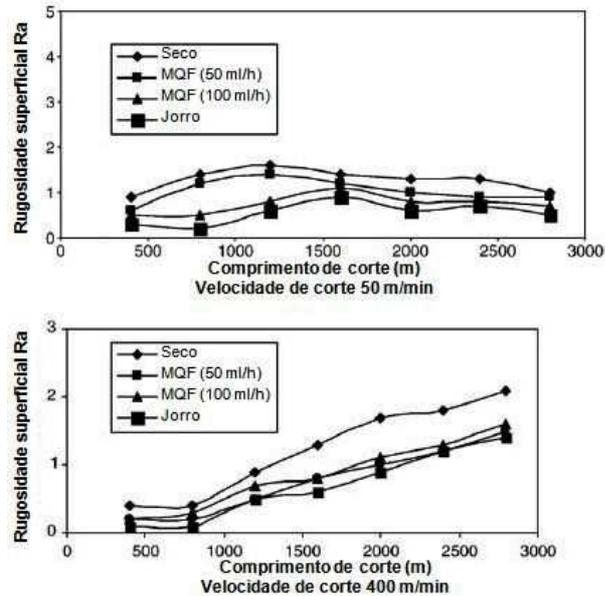


Figura 2.36 - Variação típica da rugosidade da superfície (SREEJITH, 2007)

2.7. Ferramentas de corte

O alumínio e suas ligas são considerados de excelente usinabilidade, desta forma três materiais são normalmente utilizados como ferramenta de corte.

- Aço rápido (HSS): pode ser utilizado em velocidades de corte de até 300 m/min dependendo da liga;
- Metal duro (classe N): velocidades de corte normalmente entre 600 e 800 m/min;
- PCD (Diamante policristalino): velocidades de corte podem atingir 4500 m/min ou superiores.

O aço rápido é geralmente satisfatório para a usinagem de todas as ligas de alumínio, mas as ligas de alto silício, as quais são bastante abrasivas devem ser usinadas com ferramentas de metal duro ou diamante, a menos que sejam pequenas corridas (METALS HANDBOOK, 1992).

Um melhor acabamento é obtido quando se utiliza metal duro em função das maiores velocidades de corte por causa da maior dureza da ferramenta comparada ao aço-rápido. Ferramentas de metal duro são particularmente úteis para a usinagem de ligas de alto silício, muitas das quais não podem ser usinadas satisfatoriamente sob condições produtivas. A principal vantagem oferecida pelo metal duro na usinagem de ligas de alumínio é o grande aumento na velocidade de corte comparado ao aço rápido, e o dobro ou mais de taxa de metal removido. Revestimentos, os quais têm provado ser bastante

vantajoso para a usinagem de muitos aços, aparentemente não produzem nenhum benefício na usinagem de ligas de alumínio. De fato, revestimentos depositados por CVD têm efeito prejudicial no acabamento superficial da superfície de saída da ferramenta (METALS HANDBOOK, 1992).

O PCD (diamante policristalino) é um desenvolvimento mais recente e que tem um maior efeito em muitas operações de usinagem de alumínio. Pelo fato de ser policristalino não pode produzir uma aresta com acabamento tão bom quanto ao diamante monocristalino. Porém devido à orientação dos cristais serem randômica, sua resistência ao impacto é alta (METALS HANDBOOK, 1992). Desta forma, as velocidades de corte que podem ser utilizadas na usinagem do alumínio com esta ferramenta são elevadas. Normalmente a velocidade de corte máxima é limitada pela capacidade da máquina ferramenta.

2.8. Desgaste de ferramentas

Mesmo na usinagem de materiais de boa usinabilidade, como algumas ligas de alumínio, a ferramenta de corte sofrerá um desgaste que vai determinar o momento de sua troca. Entender a forma e os mecanismos envolvidos no processo é importante e pode indicar as condições de corte e ferramentas mais adequadas para determinado processo.

Quanto à forma, o desgaste nas ferramentas de corte pode ser classificado em (de acordo com a Fig.2.37):

- Desgaste de cratera (região A).
- Desgaste de flanco (região B).
- Desgaste de entalhe (regiões C e D).

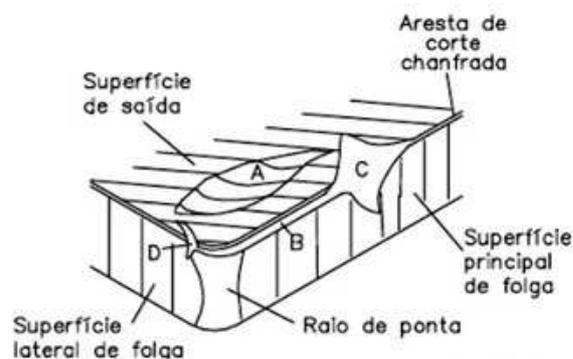


Figura 2.37 - Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte (DEARNLEY; TRENT, 1982)

Quanto à forma normalmente o desgaste encontrado nas ferramentas durante a usinagem do alumínio é o desgaste de flanco.

Entre os principais mecanismos de desgaste atuantes nas ferramentas de corte estão a abrasão, adesão, difusão e oxidação. No caso do alumínio e suas ligas que têm ponto de fusão de 659°C a temperatura não deve ser um grande problema para a ferramenta de corte. Desta forma, mecanismos de desgaste diretamente ativados pela temperatura não devem estar presentes (exceto talvez em algumas ligas Al-Si), portanto adesão e abrasão devem ser os mais prováveis mecanismos de desgaste presentes.

A adesão ou *attrition* ocorre, geralmente, a baixas velocidades de corte, nas quais o fluxo de material sobre a superfície de saída da ferramenta se torna irregular. A aresta postiça de corte pode aparecer, e na sua presença o processo tem natureza menos contínua, principalmente se ela for instável. Sob tais condições, fragmentos microscópicos são arrancados da superfície da ferramenta e arrastados junto ao fluxo de material adjacente à interface (MACHADO et al., 2009).

A abrasão na usinagem pode ocorrer por dois tipos: a dois e a três corpos. No caso da abrasão a dois corpos, as partículas abrasivas são precipitados duros (óxidos, carbonetos, nitretos ou carbonitretos) que, se pertencentes ao material da peça ou do cavaco, desgastam a ferramenta. No caso da abrasão a três corpos, as partículas abrasivas podem pertencer a ambos, peça e cavaco, que se desprendem por *attrition* e são mergulhadas no fluxo de material.

Segundo Johne (1994) os fatores mais influentes no desgaste das ferramentas de corte são:

- Flúidos de corte: refrigeração suficiente pode reduzir o desgaste da ferramenta, quando a temperatura for suficiente para afetar a resistência mecânica da ferramenta;
- Avanço e profundidade de corte: o desgaste da ferramenta tende a aumentar com o aumento da seção transversal do cavaco. Além disso, a ferramenta vai estar sujeita a maiores esforços e, talvez, maiores vibrações;

Além destes fatores, a velocidade de corte talvez seja a mais influente. A velocidade de corte influencia o desgaste, pois quanto maior a velocidade durante o corte, maior a geração de calor na interface cavaco-ferramenta acelerando algumas formas de desgaste.

List et al. (2005) ao usinar uma liga Al-Cu (2024) com ferramenta de corte de metal duro sem revestimento encontrou como principais mecanismos de desgaste adesão e abrasão. Segundo os autores, o desgaste adesivo se deveu principalmente a aresta postiça de corte e uma camada aderida, conforme discutido anteriormente, que ocorrem à baixas velocidades de corte. Em condições de corte mais severas, quando a temperatura é maior,

os mecanismos de desgaste envolvem ação química e difusão, como mostra o esquema da Fig. 2.38.

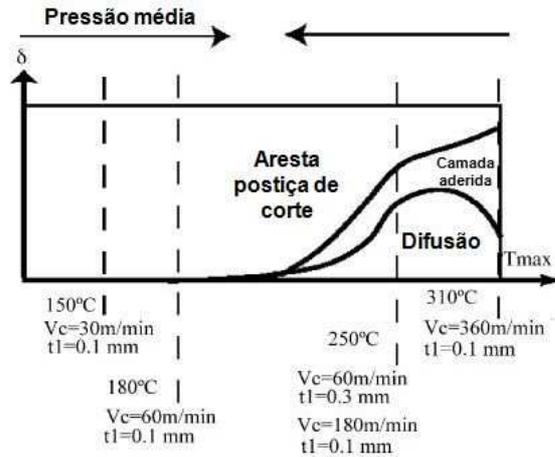


Figura 2.38 - Visão esquemática dos mecanismos de desgaste da ferramenta em função de condições tribológicas e de corte (LIST et al., 2005)

A Fig. 2.39 a seguir apresenta a progressão do desgaste de flanco na usinagem de uma liga de alumínio 6061 em diferentes atmosferas de corte, ressaltando a importância do fluido de corte. Os experimentos foram realizados utilizando insertos de metal duro revestidos de diamante e com profundidade de corte e avanço de 1 mm e 0,15 mm/rot, respectivamente.

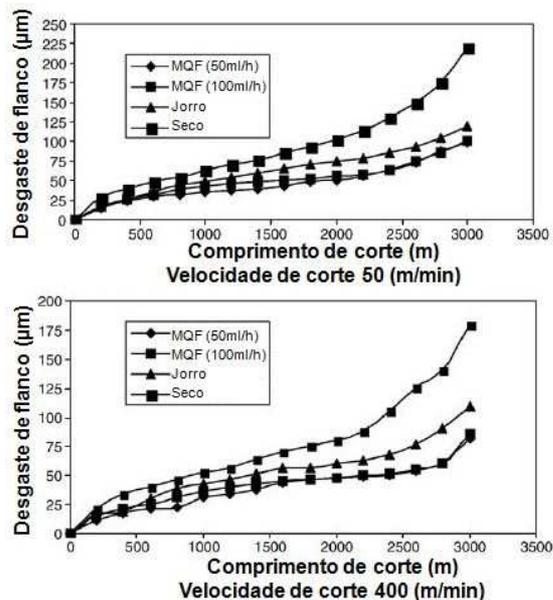


Figura 2.39 - Progresso do desgaste de flanco (SREEJITH, 2007)

2.9. Temperatura de corte

A energia consumida no corte de metais é largamente convertida em calor próximo à aresta de corte da ferramenta, e muitos dos problemas econômicos e técnicos da usinagem são diretamente ou indiretamente causados por esta ação de aquecimento (TRENT; WRIGHT, 2000).

O aquecimento gerado no processo de usinagem tem diversas fontes. A Fig. 2.40 apresenta as principais zonas de geração de calor em usinagem. São elas o atrito entre a peça e a superfície de folga da ferramenta (D), o atrito entre o cavaco que desliza por sobre a superfície de saída da ferramenta (C), deformação gerada no plano de cisalhamento primário (A) e também os grandes níveis de deformações presentes na zona de fluxo encontrada em condições de aderência na interface cavaco-ferramenta (B).

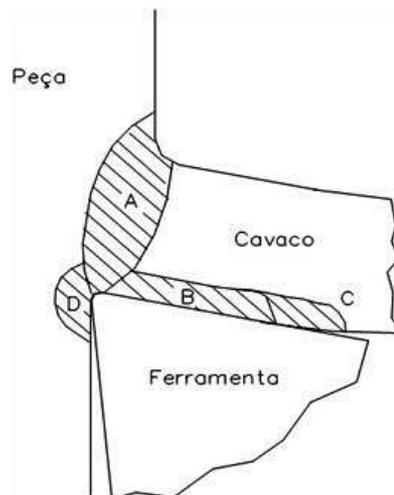


Figura 2.40 - Zonas de geração de calor em usinagem (MACHADO et al., 2009)

O custo da usinagem é bastante dependente da taxa de material removido, e custos podem ser reduzidos pelo aumento da velocidade de corte e/ou do avanço, mas existem limites para a velocidade e avanço à medida que a vida da ferramenta é diminuída excessivamente. Esta não deve ser a maior preocupação quando se usina alumínio e magnésio e algumas de suas ligas. No corte delas existem outros problemas, como a habilidade de controlar grandes quantidades de cavacos se movendo rapidamente, que pode limitar a taxa de material removido (TRENT; WRIGHT, 2000).

Dasch et al. (2008) investigou a furação a seco em placas da liga de alumínio B319 com pequenas quantidades de aditivos de livre-corte. O gráfico da Fig. 2.41 apresenta a medição de temperatura feita durante o processo evidenciando menores valores de temperatura para a liga com adição de chumbo. Foi identificada uma nano camada de

alumínio enriquecido por aditivo na broca revestida, criando assim uma interface sólida lubrificante que auxiliou a evacuação do cavaco e a redução da temperatura. Nestes testes, a temperatura foi adquirida por meio de imagens termográficas tomadas ao lado da placa de alumínio, 2,5 mm a partir do furo utilizando uma câmera infravermelha.

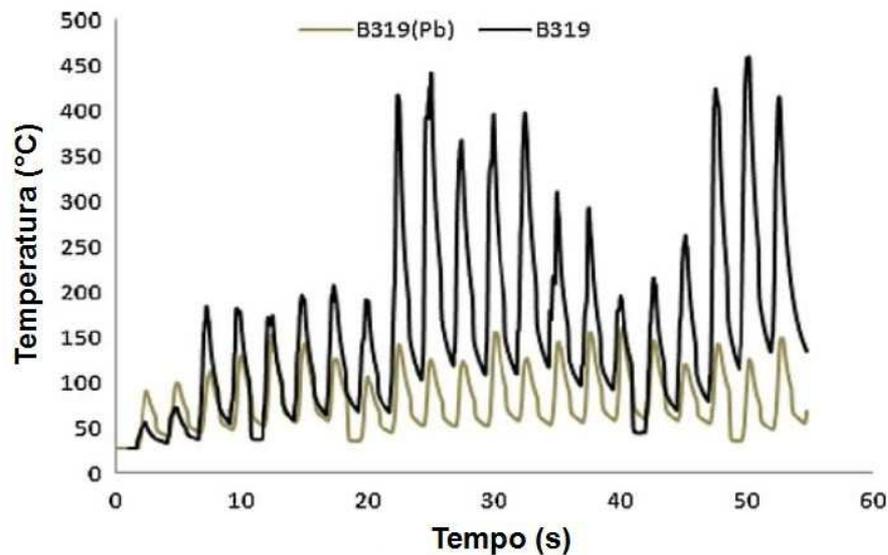


Figura 2.41 - Comparação das temperaturas durante a furação de ligas de alumínio com 0% de chumbo na B319 e com 0,17% de chumbo na B319(Pb). Cada pico corresponde a um furo (DASCH et al., 2008)

2.10. Fluido de corte

Em se tratando de sistemas de manufatura, qualquer esforço para aumentar a produtividade e/ou reduzir custos deve ser considerado. Na usinagem, o uso de fluídos de corte, quando escolhidos e aplicados apropriadamente, traz benefícios como a melhora da qualidade superficial da peça usinada (Fig. 2.36) e menor desgaste da ferramenta (Fig. 2.39). A seleção adequada de um fluído de corte deve recair sobre aquele que possuir composição química e propriedades corretas para lidar com as adversidades de um processo de corte específico. Ele deve ser aplicado usando-se um método que permita sua chegada o mais próximo possível da aresta de corte dentro da interface cavaco-ferramenta, a fim de assegurar que suas funções sejam exercidas adequadamente (MACHADO et al., 2009).

O alumínio, devido ao seu baixo ponto de fusão, amolece sob a geração de calor durante a usinagem a seco resultando em material aderido às ferramentas (DASCH et al.,

2008). Desta forma, normalmente o alumínio é usinado utilizando fluídos de corte, a fim de diminuir a área de contato cavaco-ferramenta, aumentar a vida da ferramenta e também proporcionar a evacuação do cavaco principalmente em processos de furação. Um fluído de corte para o alumínio pode ser uma emulsão de óleo solúvel, óleo mineral ou uma solução química aquosa (METALS HANDBOOK, 1992). Assim, a principal função do fluído de corte na usinagem do alumínio é evitar o empastamento na ferramenta, principalmente em operações de fresamento e furação.

Por outro lado, os fluídos de corte têm muitos efeitos prejudiciais. Muitos dos fluídos utilizados em usinagem contêm constituintes químicos potencialmente prejudiciais ao meio ambiente, são caros de reciclar e difíceis de serem controlados no descarte. Além disso, os custos envolvidos na utilização de fluídos de corte são bastante elevados. Por fim e não menos importante, os fluídos de corte podem representar uma ameaça à saúde do operador. Portanto, a implementação da usinagem sem os refrigerantes (usinagem a seco) diminuiria os custos de fabricação e os impactos causados ao ambiente. No corte a seco, atrito elevado entre a ferramenta e a peça está presente, assim algumas saídas é a utilização de aditivos de livre-corte, revestimento das ferramentas ou a utilização de mínima quantidade de lubrificação (MQL).

CAPÍTULO III

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Este trabalho investiga a usinabilidade de cinco ligas de alumínio da série 6XXX com composições químicas e propriedades distintas. As ligas foram produzidas e cedidas pela Companhia Brasileira do Alumínio (CBA) conforme as especificações de sua linha industrial para a investigação de sua usinabilidade. As ligas e a quantidade dos principais elementos de liga são mostradas na Tab. 3.1.

Tabela 3.1. Ligas de alumínio e quantidade dos principais elementos de liga

| Ligas | Composição Química (%) | | | | |
|--------|------------------------|------|------|------|------|
| | Si | Fe | Cu | Mn | Mg |
| 6005 A | 0,77 | 0,22 | 0,10 | 0,25 | 0,50 |
| 6061 | 0,63 | 0,24 | 0,23 | 0,09 | 0,83 |
| 6063 | 0,43 | 0,19 | 0,01 | 0,02 | 0,51 |
| 6082 | 1,26 | 0,23 | 0,01 | 0,61 | 0,75 |
| 6351 | 0,94 | 0,20 | 0,10 | 0,46 | 0,45 |

Amostras em barras de seção circular foram produzidos pelo sistema de vazamento DC (vazamento vertical) com tecnologia Wagstaff Air Slip Hot Top, com tratamento de homogeneização e resfriamento controlado. Segundo o fabricante, apresentam acabamento superficial liso, isento de óxidos e gases e estrutura metalúrgica refinada o que confere ao tarugo qualidade superior ao processo convencional. Como resultado, é possível aplicar menor pressão de extrusão e maiores velocidades de extrusão e obter rendimento metálico otimizado, além de vida mais longa para as matrizes (http://www.cia-brasileira-aluminio.com.br/pt/produtos_tarugos.php).

Foram utilizadas cinco barras extrudadas, apresentadas na Fig. 3.1, com comprimento de 1000 mm, 254 mm de diâmetro e peso linear de 136,8 kg/m. Todas as amostras passaram pelo tratamento térmico T6, no qual as barras são solubilizadas e envelhecidas artificialmente. Os corpos de prova para os ensaios de usinagem foram preparados com as medidas de 500 mm de comprimento e 210 mm de diâmetro. A Fig. 3.2 mostra uma das barras montada no torno.



Figura 3.1 - Barras extrudadas cedidas pela CBA



Figura 3.2 - Corpos de prova

A usinabilidade das amostras foi avaliada em termos de forças de corte, acabamento superficial e grau de recalque do cavaco. A seguir são apresentados detalhes dos experimentos realizados.

3.1. Planejamento estatístico

Para os ensaios de medição de força, rugosidade e obtenção de cavacos para análise do grau de recalque primeiramente foi feito um planejamento composto central (PCC) para a comparação entre as ligas com os parâmetros de corte variando em cinco níveis como mostrado na Tab. 3.2. Foram realizadas duas réplicas para cada liga a fim de verificar a influência dos parâmetros velocidade de corte (v_c), profundidade de corte (ap) e avanço (f) totalizando 270 testes. Posteriormente, os dados obtidos foram relacionados com valores de dureza e limite de resistência das ligas de alumínio estudadas, por meio de uma regressão múltipla, que gerou um modelo ajustado, mostrando quais variáveis foram mais influentes para cada liga e a sensibilidade de cada resposta em função das variáveis em questão. Para a análise estatística foi utilizado o software Statistica 7.

Tab. 3.2. Níveis de variação dos parâmetros de corte do planejamento composto central

| Variável | $-\alpha$ | 1 | 0 | 1 | α |
|----------|-----------|-------|-------|-------|----------|
| v_c | 187 | 250 | 400 | 550 | 612 |
| ap | 0,79 | 1,00 | 1,50 | 2,00 | 2,21 |
| f | 0,121 | 0,140 | 0,185 | 0,230 | 0,249 |

O fator α foi calculado por meio da Eq. 3.1 e Eq. 3.2.

$$\alpha = \left(\frac{QG}{4}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

$$\text{Onde, } Q = [(G + T)^{1/2} - G^{1/2}]^2 \quad (\text{Eq. 3.2})$$

G: Número de pontos fatoriais ($G = 2^k$), como $k = 3$ (três fatores), $G = 8$.

T: Número de pontos adicionais no PCC ($T = 2k + n_2$), adotando $n_2 = 4$ (pontos centrais), $T = 10$.

Por meio da eq. 3.2 o valor de $Q = 2,016$, e conseqüentemente por meio da eq. 3.1 o valor de α é 1,414.

Desta forma o planejamento composto central é o proposto na Tab. 3.3, com 4 réplicas no ponto central (ensaios 15 a 18).

Tabela 3.3. Planejamento composto central.

| Ensaio | Nível de v_c | Nível de a_p | Nível de f |
|--------|----------------|----------------|--------------|
| 1 | -1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 2 | -1,00000 | -1,00000 | 1,00000 |
| 3 | -1,00000 | 1,00000 | -1,00000 |
| 4 | -1,00000 | 1,00000 | 1,00000 |
| 5 | 1,00000 | -1,00000 | -1,00000 |
| 6 | 1,00000 | -1,00000 | 1,00000 |
| 7 | 1,00000 | 1,00000 | -1,00000 |
| 8 | 1,00000 | 1,00000 | 1,00000 |
| 9 | -1,41421 | 0,00000 | 0,00000 |
| 10 | 1,41421 | 0,00000 | 0,00000 |
| 11 | 0,00000 | -1,41421 | 0,00000 |
| 12 | 0,00000 | 1,41421 | 0,00000 |
| 13 | 0,00000 | 0,00000 | -1,41421 |
| 14 | 0,00000 | 0,00000 | 1,41421 |
| 15 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 16 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 17 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 18 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |

Além do planejamento estatístico foi realizado um teste para verificar o efeito individual da velocidade de corte sobre as componentes da força de usinagem, rugosidade, grau de recalque e forma do cavaco. Foram utilizados vinte e três valores, variando a velocidade de corte de 10 m/min a 900 m/min, e fixados o avanço e profundidade de corte em 1,5 mm e 0,185 mm/rot, respectivamente.

3.2. Ensaio de caracterização do material

Antes dos ensaios de usinabilidade foram obtidas algumas propriedades mecânicas das ligas de alumínio, com o intuito de caracterizar o material a ser usinado e com isso, obter subsídios para discussão sobre o comportamento das ligas na usinagem.

3.2.1. Ensaio de dureza

Foram extraídas amostras das cinco ligas de alumínio com 250 mm de diâmetro e 50 mm de espessura a fim de medir a dureza das mesmas e investigar se existe variação ao longo do diâmetro.

A dureza Vickers foi medida utilizando o durômetro Universal Wolpert, mostrado na Fig.3.3, do Laboratório de Tribologia e Materiais da Universidade Federal de Uberlândia, com uma carga de 40 kg, utilizando um penetrador piramidal de base quadrada em um tempo de ensaio de 30s.



Figura 3.3 - Durômetro Universal Wolpert

Foram realizadas cinco indentações em três regiões ao longo do raio numa faixa de cada uma das cinco ligas de alumínio, conforme a Fig. 3.4.

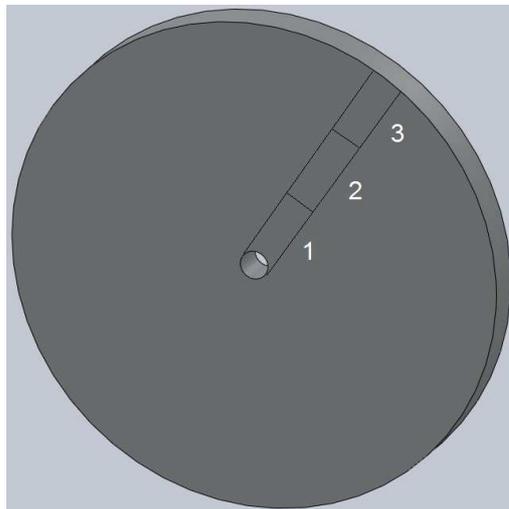


Figura 3.4 - Esquema de medição de dureza

3.2.2. Ensaio de tração

Para cada uma das cinco ligas foram produzidos três corpos de prova com as medidas especificadas pela norma NBR 6152 apresentadas na Fig. 3.5, a fim de caracterizar os materiais quanto ao limite de resistência à tração. Os corpos de prova foram

retirados de uma região transversal ao eixo da barra, ou seja, ao longo do raio. Foi utilizada uma máquina universal de ensaios MTS810 com capacidade de 250 kN, do Laboratório de Projetos Mecânicos da Universidade Federal de Uberlândia.

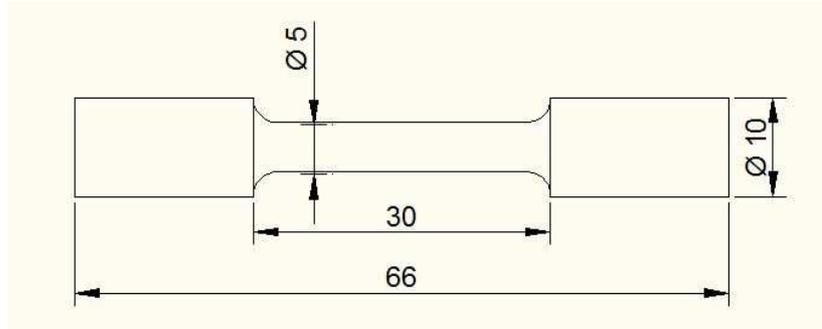


Figura 3.5 - Corpos de prova para ensaio de tração

3.2.3. Análises de microestrutura

Para a análise microestrutural foi utilizada uma amostra de cada liga de alumínio. As amostras foram lixadas com lixas 400, 600 e 1200 em uma lixadeira Arotec APL-4. Posteriormente o polimento foi realizado com óxido de cromo, seguido de pasta de diamante de 1 μm e por fim sílica coloidal 0,04 μm em uma politriz Struers DAP-7. O reagente utilizado no ataque das amostras foi o Keller's (2ml HI, 3 ml HCl, 5 ml HNO₃ e 190 ml H₂O). As amostras foram lixadas, polidas e atacadas no laboratório de Tribologia e Materiais da Universidade Federal de Uberlândia. Foi utilizado o microscópio metalográfico Risitec (Fig. 3.6) do Laboratório de Apoio a Fabricação, da Universidade Federal de Uberlândia, com aumentos de 100 e 400 vezes. As imagens foram adquiridas por uma câmera Pixelink e pelo software Pixelink Capture OEM.



Figura 3.6 - Microscópio Metalúrgico Risitec

3.3. Ensaio de usinagem

3.3.1. Equipamentos utilizados no torneamento

Os ensaios de usinagem foram realizados no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia. Foi utilizado um torno universal eletrônico Revolution RV220, com 8 KW de potência e $RPM_{max} = 2500$, mostrado na Fig. 3.7. Todos os testes foram realizados à seco e na região 3 do esquema de medição de dureza (Fig.3.4), ou seja, na faixa de diâmetro de 165 a 210 mm.



Figura 3.7. Torno Revolution RV220

Foi utilizada ferramenta de corte de metal duro sem revestimento e com quebra-cavaco com especificação ISO DCGT11T304-AL, da Tungaloy mostrada na Fig. 3.8, com os ângulos e medidas especificadas na Tab. 3.4. O suporte utilizado para o inserto tem especificação ISO SDJCR2020K11. Para a usinagem de cada barra foi usada sempre uma nova aresta de corte.

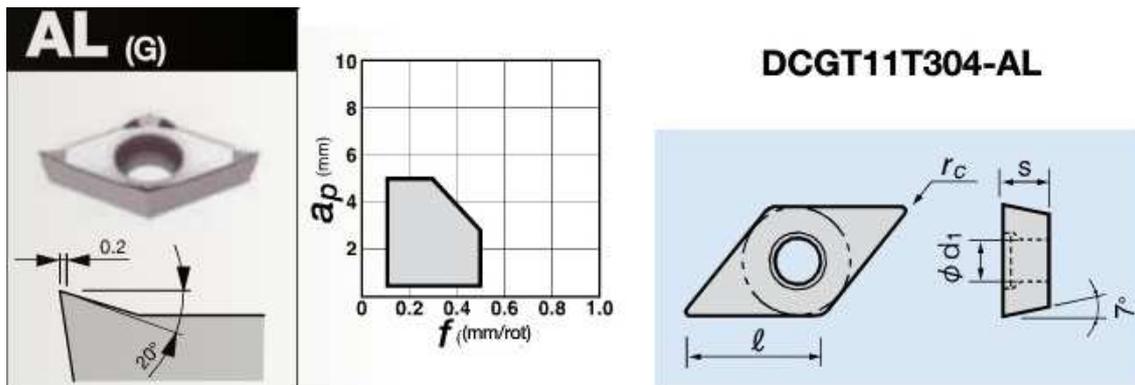


Figura 3.8. Ferramenta de corte

Tabela 3.4: Dimensões e ângulos da ferramenta de corte

| Dimensão/ângulo | |
|--|--------------|
| Raio da ponta (r_c) | 0,4 mm |
| Comprimento da aresta de corte (l) | 11 mm |
| Espessura (s) | 3,97 mm |
| Diâmetro do furo ($\text{Ø}d_1$) | 4,4 mm |
| Ângulo de saída (γ) | 20° positivo |
| Ângulo de ponta (ϵ) | 55° |
| Ângulo de posição (X') | 93° |
| Ângulo de folga | 7° |

3.3.2. Ensaio de força

Para a medição das três componentes da força de usinagem (força de corte, de avanço e passiva) foi utilizado um dinamômetro Kistler modelo 9441B. O dinamômetro é munido de quatro células de carga que possuem cada uma um cristal piezoelétrico. À medida que uma força é aplicada, esse cristal se deforma e gera um sinal elétrico (pC) que é enviado a um amplificador de sinal Kistler modelo 5070, que por sua vez, transforma este sinal elétrico em uma diferença de potencial. Posteriormente, os três sinais do amplificador passam por uma placa da National Instruments BNC-2110 e por fim através de um cartão da National Instruments DAQCard-6024E chega ao computador onde o sinal é capturado pelo programa LabView, utilizando uma taxa de 1kHz. Todo o esquema de medição montado para os testes é apresentado no esquema da Fig. 3.9.

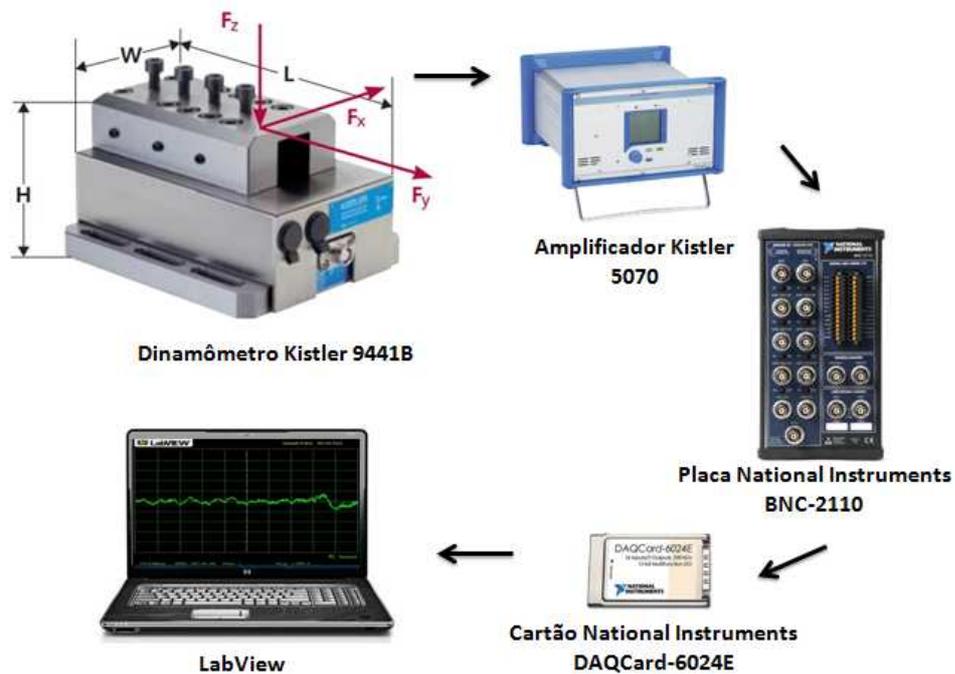


Figura 3.9. Esquema de medição de força

3.3.3. Ensaio de rugosidade

Após a realização dos testes com diferentes condições de corte, a medição da rugosidade da peça usinada foi realizada através de um rugosímetro Mitutoyo SJ-201p de resolução $0,01 \mu\text{m}$ e faixa de medição de $0,01 \mu\text{m} < R_a < 100 \mu\text{m}$ mostrado na Fig. 3.10. A medição de rugosidade foi feita utilizando um Cut-off de $0,8 \text{ mm}$, recomendação de acordo com a ABNT NBR ISO 4287:2002. Foram adquiridos os parâmetros de rugosidade média R_a e média quadrática R_q .



Figura 3.10. Rugosímetro Mitutoyo SJ-201p

Para cada condição de corte foram realizadas três medições de rugosidade, espaçadas em 120° conforme a vista de um corte transversal do tarugo apresentado na Fig.

3.11. Sendo assim, contando com as duas réplicas, a rugosidade média final para cada condição de corte foi obtida a partir de nove medições.

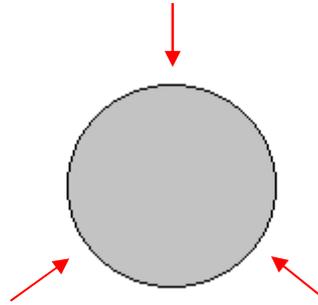


Figura 3.11. Esquema de medição da rugosidade da superfície

3.3.4. Medição de espessura de cavaco e cálculo de grau de recalque

Para a determinação do grau de recalque é preciso conhecer o valor da espessura do cavaco obtido nos ensaios. A medição da espessura do cavaco foi feita utilizando um paquímetro digital 6" Zaas Precision com resolução de 0,01 mm e faixa de medição de 150 mm. Foram realizadas medições em 5 cavacos distintos para cada ensaio, coletando a maior espessura possível, pois a seção do cavaco não é uniforme, captando assim a maior deformação do mesmo. Contando com as réplicas a média final foi obtida através de 15 medidas para cada condição de corte. O paquímetro utilizado é mostrado na Fig. 3.12.



Figura 3.12. Paquímetro digital 6" Zaas precision.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de acordo com o procedimento experimental. Inicialmente são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais, em seguida são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos testes de usinagem, como: forças de corte e rugosidade. Os resultados e discussão das análises dos cavacos são apresentados logo em sequência.

4.1. Ensaio de caracterização dos materiais

4.1.1. Resultados de Dureza

As médias gerais de dureza Vickers para as cinco ligas ensaiadas são mostradas na Fig. 4.1. Apenas a liga 6063 difere das outras ligas, sendo ela a liga de menor dureza (80 HV), já as demais ficam em torno de 89 HV.

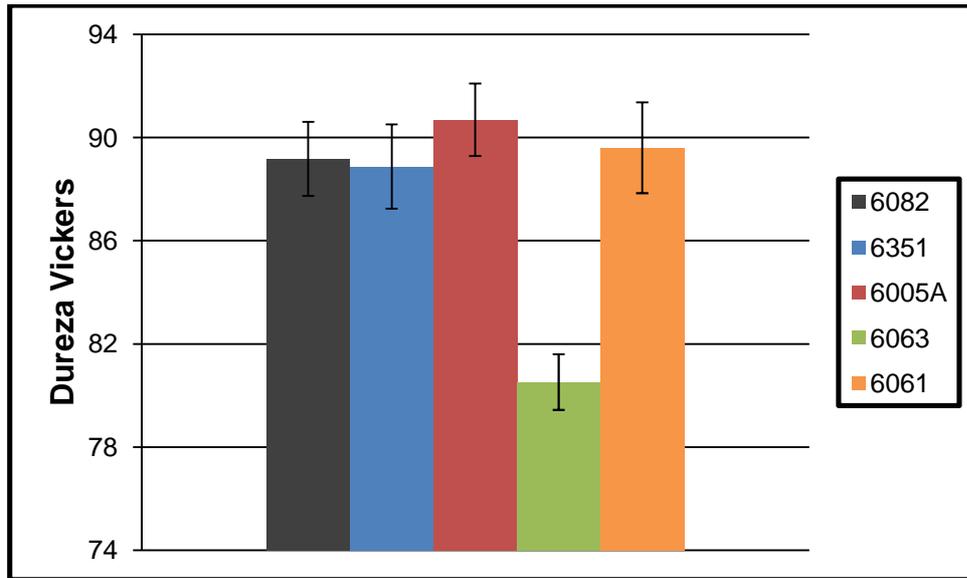


Figura 4.1 - Dureza Vickers para as cinco ligas de alumínio da série 6XXX

Os resultados de dureza média em três regiões diferentes ao longo do diâmetro das barras são apresentados na Tab. 4.1. Na Tab. 4.2 é apresentado um quadro de ANOVA (análise de variância) para os dados de dureza, onde o efeito do tratamento está relacionado com as diferentes ligas de alumínio e o efeito de bloco trata-se das três regiões distintas ao longo do diâmetro. Com 95% de confiança, como $p < 0,05$, é possível afirmar que a dureza de pelo menos uma das ligas é diferente e que pelo menos uma das regiões onde foi medida a dureza teve um valor de dureza diferente. É importante ressaltar que o efeito do tratamento, ou seja, da liga de alumínio ($p = 0,000601$) é maior que o da região ao longo do diâmetro onde foi feita a indentação.

Tabela 4.1 - Dureza Vickers ao longo do diâmetro nas diferentes ligas de alumínio ensaiadas.

| Região | Dureza Vickers | | | | | Média da região |
|--------------------------|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------------|
| | 6082 | 6351 | 6005A | 6063 | 6061 | |
| 1 (Centro) | 87,48 | 85,42 | 88,42 | 80,52 | 86,4 | 85,65 |
| 2 (Intermediário) | 87,44 | 88,6 | 89,8 | 81,18 | 89,4 | 87,28 |
| 3 (Superfície) | 92,62 | 92,62 | 93,86 | 79,88 | 93,02 | 90,40 |
| Média da liga | 89,18 | 88,88 | 90,69 | 80,53 | 89,61 | |

Tabela 4.2 – Quadro de ANOVA para os resultados de Dureza Vickers

| Efeito | Soma Quadrática | Grau de liberdade | Média Quadrática | F | Valor p |
|-------------------|-----------------|-------------------|------------------|-----------|----------|
| Interseção | 115572,9 | 1 | 115572,9 | 388009,73 | 0,000000 |
| Tratamento | 202,8 | 4 | 50,7 | 16,68 | 0,000601 |
| Bloco | 58,3 | 2 | 29,1 | 9,58 | 0,007520 |
| Erro | 24,3 | 8 | 3,0 | | |

Como foi constatado pela análise de variância que pelo menos uma liga possui dureza diferente é preciso realizar alguns testes de hipótese para a diferença entre as médias de dureza das diferentes ligas estudadas. A Tab. 4.3 apresenta os valores de p para o teste de hipótese comparativo realizado entre as ligas duas a duas. Como visto na Fig. 4.1 com 95% de confiança, como $p < 0,05$, apenas a liga 6063 possui estatisticamente uma dureza diferente, no caso, menor que as demais. A diferença entre a dureza média das demais ligas é decorrente do erro experimental. Esta liga tem a menor quantidade de Si e Fe dentre as ligas comparadas neste trabalho.

Tabela 4.3 – Valores de p para a diferença entre médias da dureza das ligas de alumínio

| Diferença entre as médias de dureza nas diferentes ligas | | |
|---|-------------|---------------|
| Liga (a) | Liga (b) | valor p |
| 6082 | 6351 | 0,7914 |
| 6082 | 6005A | 0,1565 |
| 6082 | 6063 | 0,0000 |
| 6082 | 6061 | 0,7166 |
| 6351 | 6005A | 0,1152 |
| 6351 | 6063 | 0,0000 |
| 6351 | 6061 | 0,5609 |
| 6005A | 6063 | 0,0000 |
| 6005A | 6061 | 0,361 |
| 6063 | 6061 | 0,0000 |

Da mesma forma, é preciso fazer o teste de hipótese para a diferença entre as médias de dureza nas diferentes regiões de medição ao longo do diâmetro da barra. Os valores de p são apresentados na Tab. 4.4. Com 95% de confiança, como $p < 0,05$, a dureza na região central é estatisticamente menor que a dureza da região mais próxima à

superfície. Apesar da comprovação estatística que a dureza é diferente entre as regiões, essa diferença é muito pequena, cerca de 5 HV, ou 5% da dureza das ligas de alumínio deste trabalho.

Tabela 4.4 – Valores de p para a diferença entre as médias de dureza das diferentes regiões de medição

| Diferença entre as médias de dureza nas diferentes regiões | | |
|--|------------------|---------|
| Região (a) | Região (b) | valor p |
| 1. Centro | 2. Intermediária | 0,2076 |
| 1. Centro | 3. Superfície | 0,0095 |
| 2. Intermediária | 3. Superfície | 0,0786 |

4.1.2. Resultados de Tração

Após a realização dos ensaios de tração foram obtidas as curvas tensão x deformação para as cinco ligas. A título de exemplificação a Fig. 4.2 apresenta as curvas tensão-deformação de um corpo de prova de cada uma das ligas de alumínio do presente trabalho. Todas as ligas apresentaram regimes elásticos parecidos. Quanto ao regime plástico, a liga 6063 apresentou maior deformação (cerca de 10%) evidenciando sua maior ductilidade em relação às outras ligas. Em contrapartida a liga 6061 foi a que apresentou menor nível de deformação perto de 2,5%.

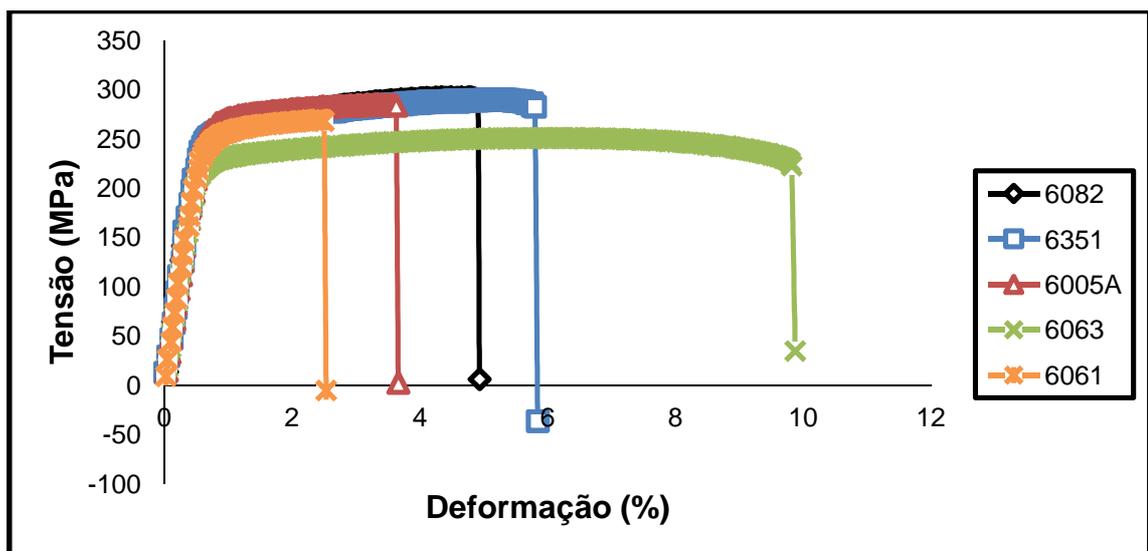


Figura 4.2 - Curvas tensão x deformação das ligas de alumínio da série 6XXX

Na Fig. 4.3 são apresentados os valores médios de limite de resistência à tração para cada liga de alumínio. A liga 6063 foi a que apresentou menor limite de resistência à tração. Esta liga possui porcentagem de Mg+Si baixo, em torno de 0,9%, proporcionando à ela menor resistência mecânica e maior ductilidade (METALS HANDBOOK, 1992). Já a liga 6061 se coloca numa posição intermediária onde o nível dos principais elementos de liga (Mg e Si) fica em cerca de 1,4%, garantindo resistência superior após o envelhecimento em relação à liga anterior (METALS HANDBOOK, 1992). As outras três ligas 6082, 6351 e 6005A são as ligas com excesso de silício em proporções favoráveis à formação da partícula de segunda fase endurecedora das ligas da série 6XXX (Mg_2Si), garantindo à elas maior resistência mecânica (METALS HANDBOOK, 1992). Como a liga 6082 possui maior porcentagem de silício 1,26%, possui também maior excesso de silício, que por sua vez favorece o refinamento das partículas de Mg_2Si e precipitação de Si implicando em maior resistência mecânica. Este excesso de Si poderia ser maléfico uma vez que a segregação de silício para os contornos causa fratura nos contornos de grão em estruturas recristalizadas, porém a adição de 0,61% de Mn neutraliza o efeito do silício, reduzindo o tamanho de grão e inibindo a recristalização durante a solubilização (MARTINS, 2008).

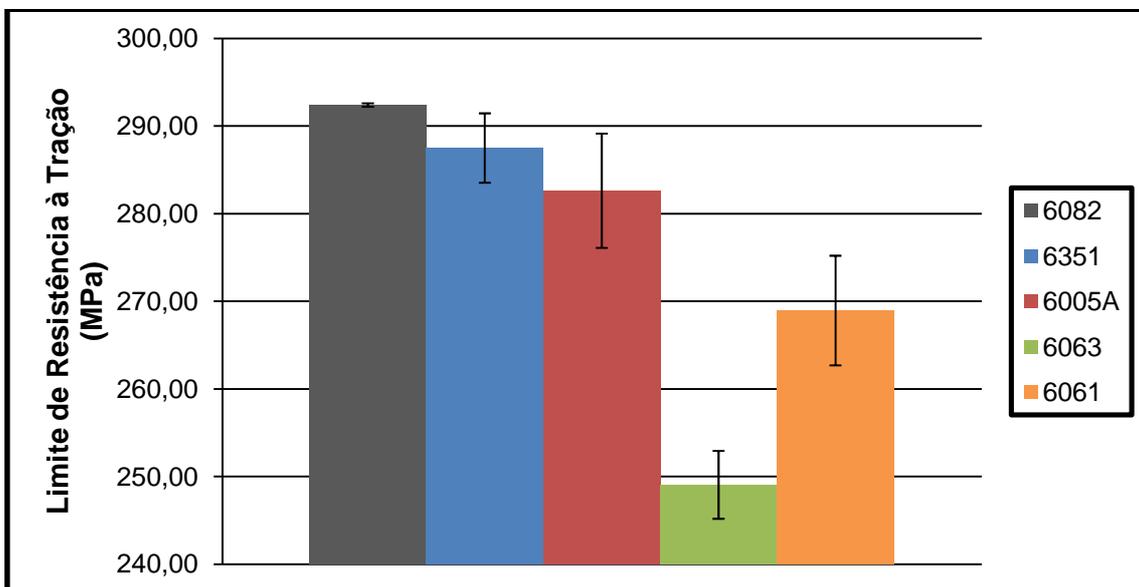


Figura 4.3 - Limite de resistência à tração para as cinco ligas de alumínio da série 6XXX.

4.1.3. Microestrutura

As micrografias das cinco ligas para o aumento de 100x são mostradas na Fig. 4.4. É possível perceber os contornos de grão e também a formação dendrítica dentro dos grãos (indicada pelas setas), característica das ligas de alumínio. Esta microestrutura depende das condições de solidificação nas quais o material foi obtido. Uma alta taxa de solidificação,

que origina estruturas dendríticas finas, forma grãos pequenos e conseqüentemente materiais duros e resistentes. O espaçamento entre os braços das dendritas é um fator de grande importância para as ligas fundidas, pois ocorre uma segregação de soluto resultando na formação de uma segunda fase, estas são barreiras interdendríticas ao movimento de discordâncias. Porém, uma estrutura fina pode ser prejudicial devido à nucleação de poros, problema que não ocorre nas ligas conformadas, pois o trabalho a quente homogeneiza segregações e fecha os poros. A liga 6063 que possui menor quantidade dos principais elementos de liga Mg e Si, apresenta tamanho de grão maior que as demais, conseqüentemente ela é a liga menos resistente e mais dúctil.

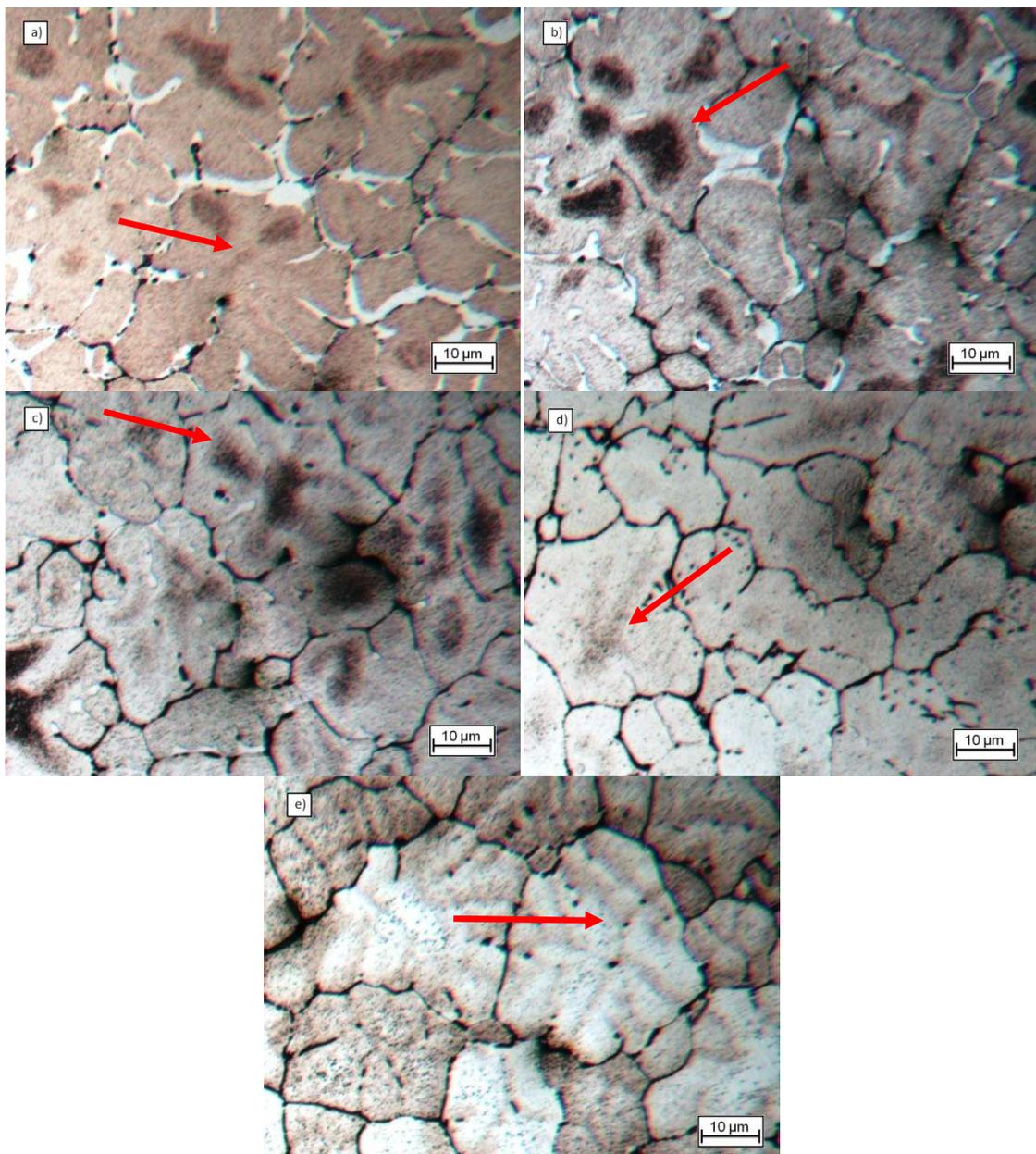


Figura 4.4 - Micrografias com aumento de 100x das amostras das ligas de alumínio: a) 6082, b) 6351, c) 6005A, d) 6061 e e)6063

A Fig. 4.5 apresenta as micrografias das cinco ligas de alumínio com aumento de 400x. É possível perceber o que seria a partícula de segunda fase Mg_2Si que segundo o ASM Metals Handbook Vol.9 (1992) se apresenta no alumínio após o tratamento térmico na forma de partículas finas “chinese script” e partículas dispersas.

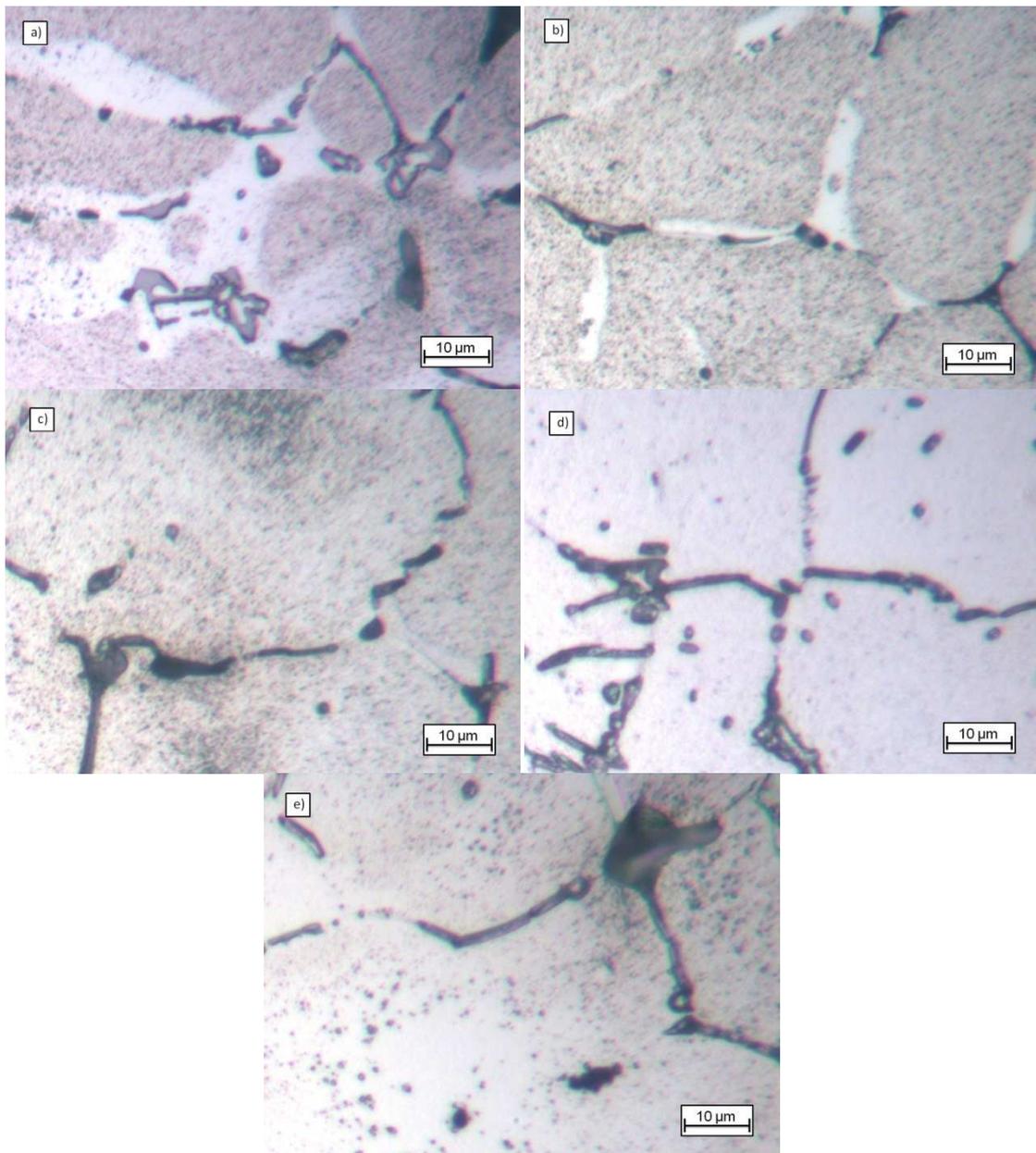


Figura 4.5 - Micrografias com aumento de 400x das amostras das ligas de alumínio: a) 6082, b) 6351, c) 6005A, d) 6061 e e)6063

4.2. Resultados de Medição das Forças de Corte

4.2.1. Efeito da Velocidade de Corte

Foram coletados os dados das três componentes da força de usinagem. Primeiramente na Fig. 4.6 é apresentada a variação da força de corte (F_c) em função da velocidade de corte. É possível observar uma tendência de diminuição da força de corte quando a velocidade de corte aumenta. Esta queda da força é parcialmente causada pelo decréscimo da área de contato cavaco-ferramenta, segundo Machado et al. (2009) e parcialmente pela queda da resistência ao cisalhamento na zona de fluxo, pois a temperatura aumenta com a velocidade de corte (Trent, 2000). Porém esta diminuição não prossegue a partir de velocidades de corte da ordem de 400 m/min, onde a força de corte se mantém em cerca de 175 N para todas as ligas. Possivelmente o aumento de temperatura devido à velocidade de corte tem um limite nessa faixa de velocidade, e a partir daí não ocorre um aumento significativo na geração de calor. Além disso, não existe uma diferença pronunciada na força de corte para as cinco ligas de alumínio ensaiadas à velocidades acima de 200 m/min.

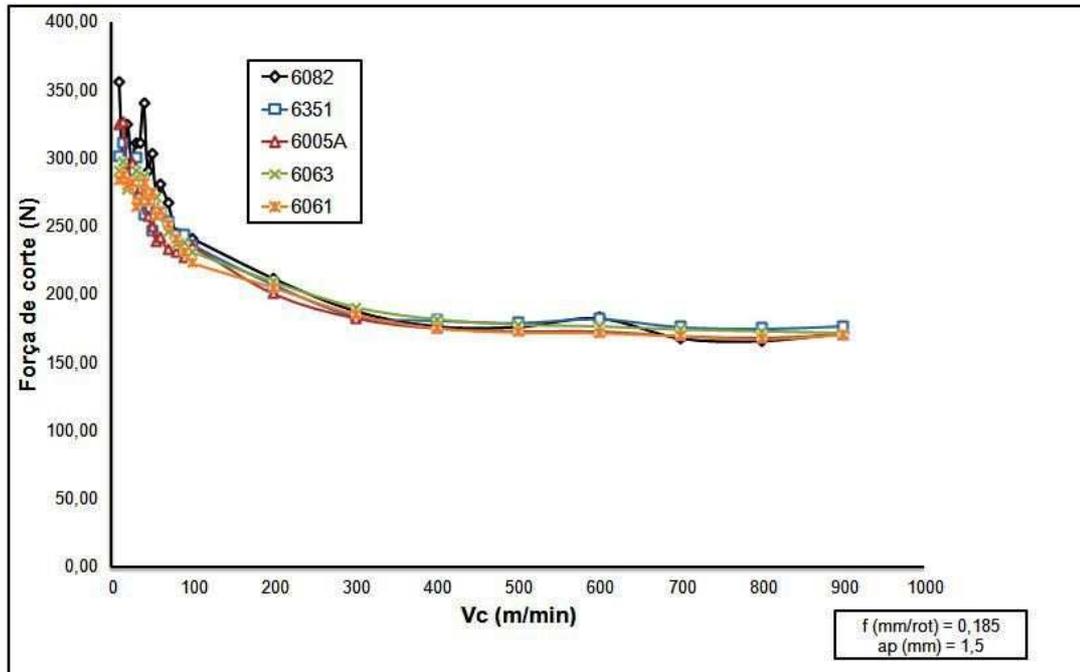


Figura 4.6 - Força de corte (N) versus velocidade de corte (m/min)

Para velocidades de corte menores que 100 m/min é possível observar certa distinção entre os valores da força de corte para as diferentes ligas. Por isso na Fig. 4.7 é apresentada a variação da força de corte para baixas velocidades de corte (de 10 m/min a

200 m/min). Nesta faixa de velocidades de corte percebe-se que a liga 6082 apresenta força de corte maior que as demais, sendo o maior valor da força de corte média de 356,54 N para velocidade de corte de 10 m/min. A liga 6082 é dentre as ligas ensaiadas a de maior resistência mecânica (limite de resistência à tração = 292,40 MPa), isso é conseguido por meio de uma maior quantidade da partícula de segunda fase endurecedora deste tipo de liga (Mg_2Si) em relação às outras ligas, e um substancial excesso de silício. Outra observação importante é a oscilação da força de corte nestas baixas velocidades de corte. O perfil das curvas da força de corte apresenta a possibilidade de existência de aresta postiça de corte (APC), fenômeno encontrado em ligas de alumínio em baixas velocidades de corte (até 120 m/min), que por apresentar períodos de instabilidade pode causar variações da força, porém uma melhor análise será feita adiante por meio dos resultados de rugosidade.

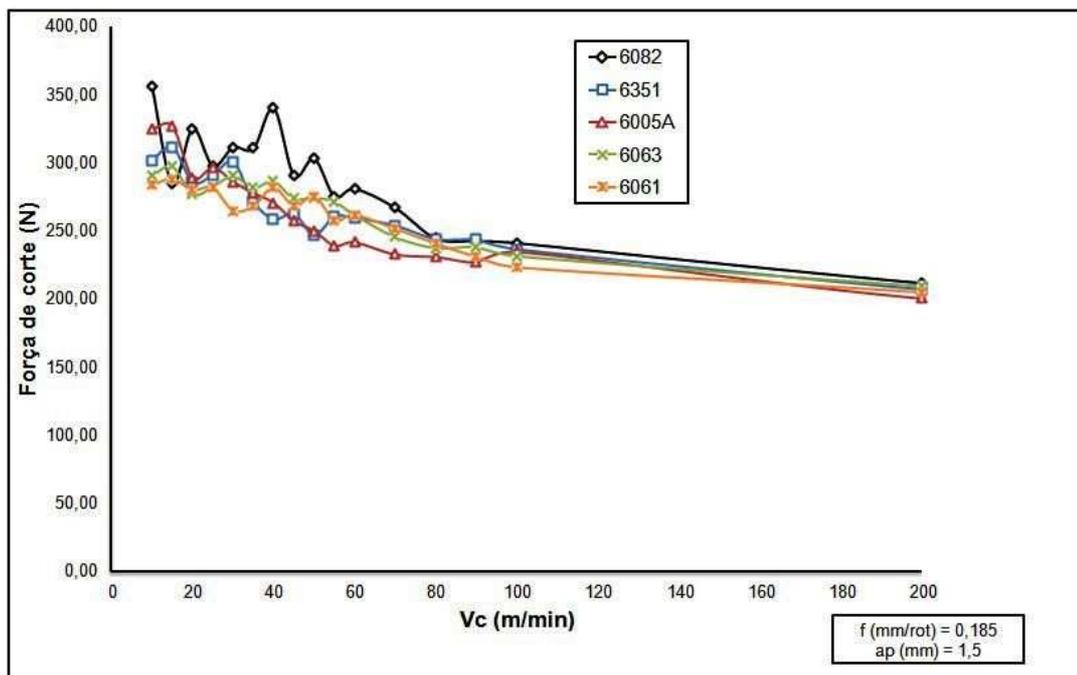


Figura 4.7 - Força de corte (N) versus velocidade de corte (m/min) para baixas velocidades de corte

Como a força de corte é a maior componente da força de usinagem, a fim de visualizar melhor a maior força de corte na usinagem da liga 6082 em baixas velocidades de corte, foi feito um gráfico de colunas contendo o desvio padrão das medidas, apresentado na Fig. 4.8, que evidencia este fenômeno na velocidade de corte de 100 m/min.

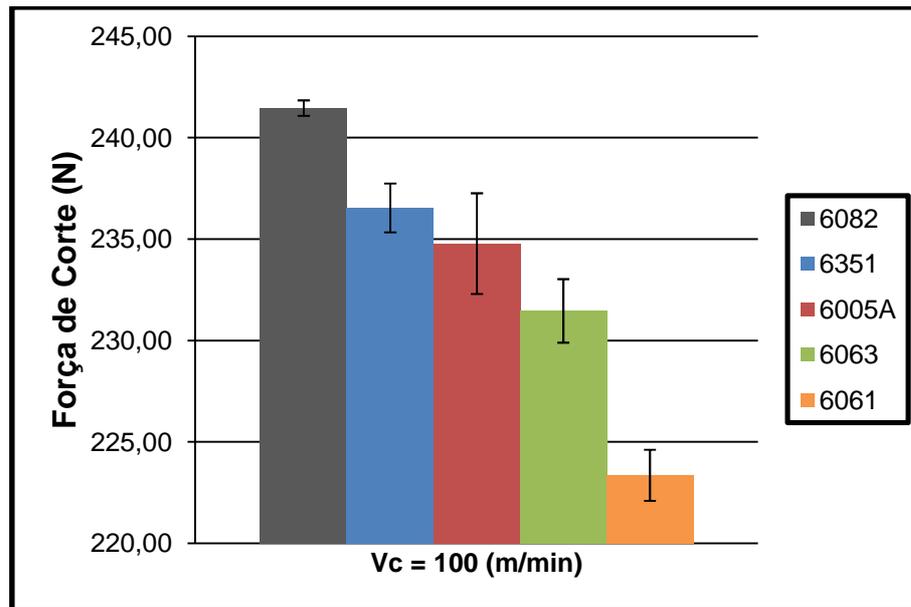


Figura 4.8 - Força de corte para as cinco ligas com $v_c = 100$ m/min, $f = 0,185$ mm/rot e $ap = 1,5$ mm

Para melhor explicar a influência dos parâmetros de corte e das ligas usinadas na força de corte, principal componente da força de usinagem, foi realizada uma regressão múltipla a partir dos ensaios do planejamento composto central para as cinco ligas. A regressão foi feita com cinco parâmetros de entrada, sendo eles os três parâmetros de corte variados (velocidade de corte, profundidade de corte e avanço) e duas propriedades mecânicas das ligas de alumínio (dureza e limite de resistência à tração) tornando possível assim à distinção da influência das diferentes ligas de alumínio da série 6XXX na força de corte durante a usinagem. Na Tab. 4.5 é apresentado o modelo ajustado para a força de corte onde são apresentados os parâmetros que foram significativos a um nível de significância de 10%, sendo que são destacados em vermelho os parâmetros significativos ao nível de significância de 5%. Os parâmetros são significativos ao nível de significância de 5% quando o valor de p é menor que 0,05, e quanto menor o valor de p mais influente é o parâmetro. É importante ressaltar que o modelo foi criado com o intuito de mostrar quais os parâmetros são mais importantes na variação da força de corte e tentar distinguir o comportamento das ligas de alumínio sobre a mesma, e não fazer uma otimização ou previsão a partir do modelo.

Desta forma, é possível notar que a força de corte é mais sensível à profundidade de corte e o avanço, assim como a interação entre eles. O aumento destes dois parâmetros aumenta a área de material a ser cisalhado, aumentando assim a força de corte de maneira

quase linear. A velocidade de corte também foi um fator influente ocasionando a queda da força de corte como visto na Fig. 4.6.

Tabela 4.5 - Coeficientes da regressão múltipla para a força de corte

| Sumário da Regressão para a Variável Dependente: Fc (Regressão Força de corte) | | |
|---|-------------|----------|
| R= 0,98942674 R ² =0,97896527 Ajustado R ² = 0,97647432 F(9,76) =393,01 p | | |
| | Coeficiente | p |
| Interseção | 179,1544 | 0,000000 |
| Vc | -6,6112 | 0,000000 |
| ap | 49,7958 | 0,000000 |
| f | 38,8225 | 0,000000 |
| HV | 4,1758 | 0,061391 |
| LRT | -4,0699 | 0,067437 |
| ap*f | 12,6711 | 0,000000 |
| ap*HV | 3,7812 | 0,013800 |
| ap² | 2,9294 | 0,035779 |
| f² | 2,3303 | 0,081783 |

Quanto aos efeitos da dureza e limite de resistência, são fatores que apresentaram sensibilidade bem menor em relação aos parâmetros de corte. O menor efeito destas propriedades está ligado ao fato dos valores de dureza e limite de resistência das cinco ligas serem bem próximos, assim a distinção entre as forças de corte na usinagem destas diferentes ligas de alumínio é pequena. Outra questão importante para se discutir é a aparente contradição dos efeitos positivo da dureza e negativo do limite de resistência à tração sobre a força. Antes, porém, é preciso lembrar que existem dois fatores que irão influenciar diretamente a força de usinagem. Segundo Trent (1984) a força de corte é diretamente influenciada pelas áreas dos planos de cisalhamento primário e secundário e a resistência ao cisalhamento do material da peça, nos planos de cisalhamento primário e secundário. Como as durezas das ligas são bem parecidas, diferencia-se apenas a liga 6063 menos dura em relação às outras. Então, quando o coeficiente da dureza encontrado na regressão é positivo indica que quanto maior a dureza da liga maior a força de corte, fato que ocorreu em baixas velocidades de corte onde a liga 6082 se destacou por apresentar maior força de corte em relação às demais, o que pode ser visto na Fig. 4.7. Por outro lado, quando se trata da resistência mecânica do material de uma maneira geral, quanto maior a resistência do material a usar, maior a resistência ao cisalhamento nos planos de

cisalhamento e, portanto maior a força de usinagem. Entretanto, baixa resistência pode vir acompanhada de elevada ductilidade e isto pode aumentar a área da seção de corte, influenciando também a força de usinagem (MACHADO et al., 2009). Assim, mesmo se tratando de ligas de alumínio, que normalmente são menos dúcteis do que o metal puro (TRENT, 2000), estas ligas apresentam deformação considerável, e a liga 6063 se destaca com maior deformação entre as ligas ensaiadas como pôde ser visto na Fig. 4.2. Com maior deformação, maior é a área da seção de corte aumentando assim a força de corte, o que justifica o coeficiente negativo do limite de resistência à tração no quadro da regressão.

A Fig. 4.9 mostra a variação da força de avanço com a velocidade de corte para as várias ligas. A força de avanço (F_f) também tende a diminuir com o aumento da velocidade de corte e isso também pode ser explicado pelo aumento da geração de calor e diminuição da resistência do material com o aumento da temperatura. Os valores da força de avanço média são menores comparados à força de corte. Os maiores valores encontrados são de 120 N a 180 N em baixas velocidades de corte e chegam a valores de 25 N a 45 N para as maiores velocidades de corte. Assim como a força de corte, a força de avanço tende a se estabilizar, porém para valores maiores de velocidade de corte, próximos a 900 m/min, ou talvez não estabilize na faixa utilizada neste trabalho. Outro comportamento semelhante entre as forças de avanço e de corte, é que novamente em baixas velocidades de corte (até 100 m/min), a liga 6082 apresenta os maiores valores de força, devido à sua maior resistência mecânica. Porém a partir da velocidade de corte de 200 m/min a liga 6063, liga menos resistente e mais dúctil, é a que apresenta a maior força de avanço. Provavelmente, a partir deste ponto a resistência do material não será o fator mais influente na força, e sim a sua ductilidade ou capacidade de deformação. Como é um material mais dúctil, a área de contato cavaco-ferramenta é maior, e maior é a restrição sofrida pelo material durante a passagem do cavaco por sobre a superfície de saída da ferramenta.

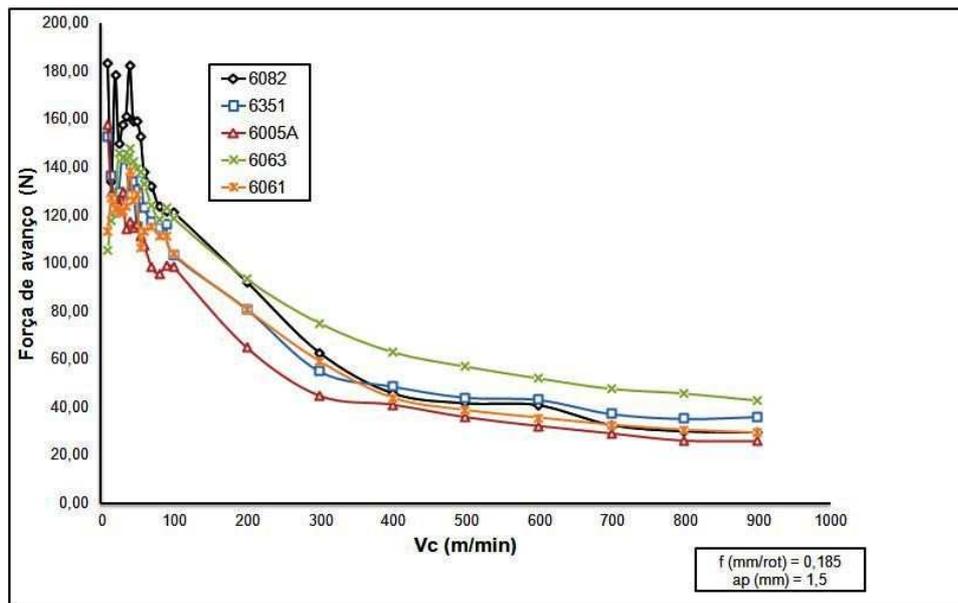


Figura 4.9 - Força de avanço (N) versus velocidade de corte (m/min)

A menor das componentes da força de usinagem é a força passiva. Na Fig. 4.10 é apresentada a variação desta força quando se varia a velocidade de corte. Neste caso a queda da força é mais pronunciada com o aumento da velocidade de corte. Em baixas velocidades de corte a força apresentou valores de 60 a 125 N e em altas velocidades atinge praticamente o valor zero. A força passiva próxima de zero é característica de processos que utilizam ferramenta com ângulo de posição de 90° , ou seja, a componente da força de usinagem na direção perpendicular ao plano de trabalho é próxima de zero. Neste caso a ferramenta utilizada apresenta um ângulo de posição de 93° , bem próxima da de 90° e ângulo de inclinação positivo. Novamente a liga 6082, mais resistente, forneceu maiores valores de força para baixas velocidades de corte. Este comportamento é interessante quando se usina peças com alto índice de esbeltez por exemplo. Neste caso é melhor utilizar altas velocidades de corte para evitar a flexão da peça e, por conseguinte, erros geométricos na peça acabada.

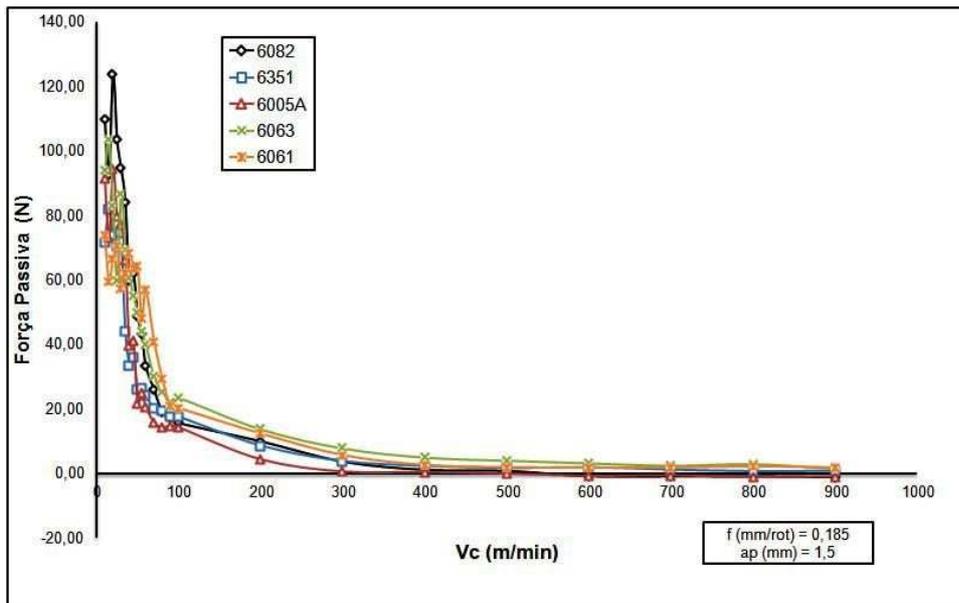


Figura 4.10 - Força passiva (N) versus velocidade de corte (m/min)

4.2.2. Efeito do Avanço

A Fig. 4.11 apresenta a variação da força de corte em função do avanço. O aumento do avanço aumenta a seção da área de material a ser cisalhado, e desta forma, a força de corte aumenta de maneira quase linear. Assim, no menor avanço utilizado ($f=0,121$ mm/rot) as forças durante a usinagem estão em cerca de 130 N e no maior avanço ($f=0,32$ mm/rot) as forças atingem valores de 300 N. Não existe nenhuma diferença pronunciada nos valores da força de corte entre as ligas nos avanços ensaiados.

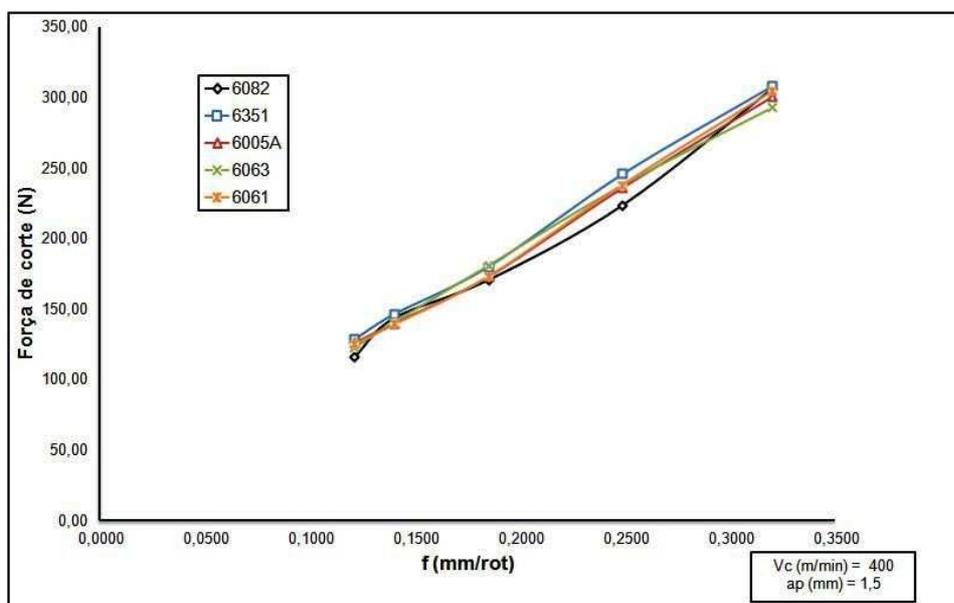


Figura 4.11 - Força de corte (N) x f (mm/rot)

Assim como ocorre na força de corte, a força de avanço aumenta de forma praticamente linear com o avanço de corte, conforme mostra a Fig. 4.12. Porém neste caso, as ligas apresentam comportamentos distintos no valor da força de corte. A liga 6063, mais dúctil, apresentou a maior força de avanço no intervalo de avanços ensaiados. Como visto anteriormente, a força de usinagem é dependente principalmente de dois fatores: áreas dos planos de cisalhamento primário e secundário; e a resistência ao cisalhamento do material da peça, nos planos de cisalhamentos primário e secundário (TRENT, 1984). Neste caso a liga 6063 por possuir uma maior ductilidade está garantindo maiores áreas dos planos de cisalhamento e este fator está se sobrepondo sobre o fator resistência.

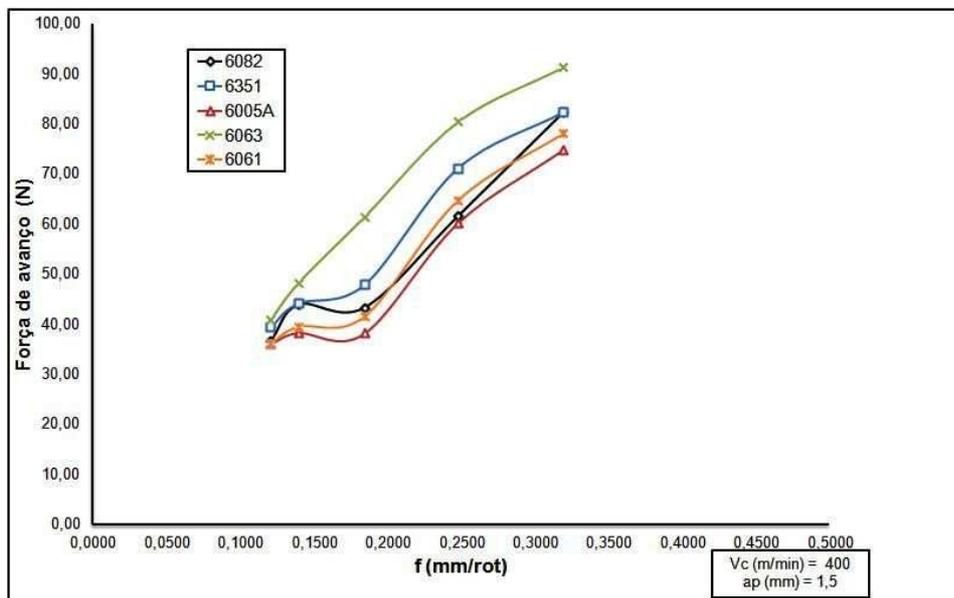


Figura: 4.12 - Força de avanço (N) versus avanço (mm/rot)

Aparentemente a força passiva também tende a aumentar com o aumento do avanço (Fig. 4.13). Como os valores da força passiva são bem inferiores em relação às outras componentes da força de usinagem, a variação também é pequena, não ultrapassando 10N. Novamente neste caso a liga 6063 apresentou maior força por ser a liga mais dúctil. É importante ressaltar um comportamento diferente da força passiva no avanço de $f=0,185$ mm/rot que foge da tendência de aumento da força. Este comportamento deve estar relacionado com a geometria do quebra cavaco, mas não será investigado neste trabalho.

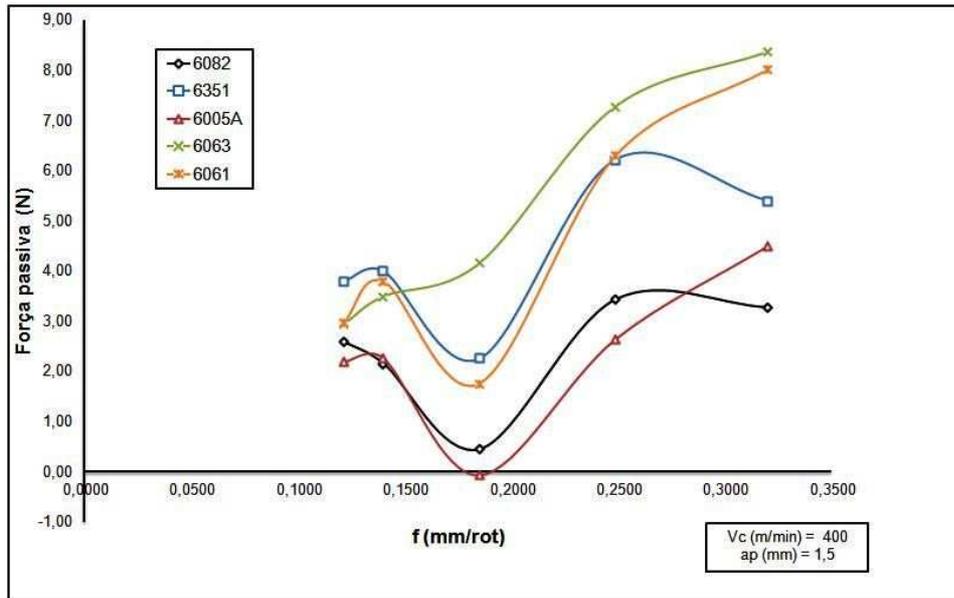


Figura 4.13 - Força passiva (N) versus avanço (mm/rot)

4.2.3. Efeito da Profundidade de corte

Assim como o avanço, o aumento da profundidade de corte aumenta a área dos planos de cisalhamento primário e secundário, causando um aumento quase linear da força de usinagem. A Fig. 4.14 apresenta a variação da força de corte com a profundidade de corte na usinagem das ligas de alumínio da série 6XXX. Na menor profundidade de 0,79 mm a força de corte esteve em cerca de 100 N e na maior profundidade de corte ($a_p = 2,21$ mm) atingiu valores entre 230 e 260 N. Não é possível, no entanto avaliar a diferença no comportamento das forças apresentadas pelas diferentes ligas.

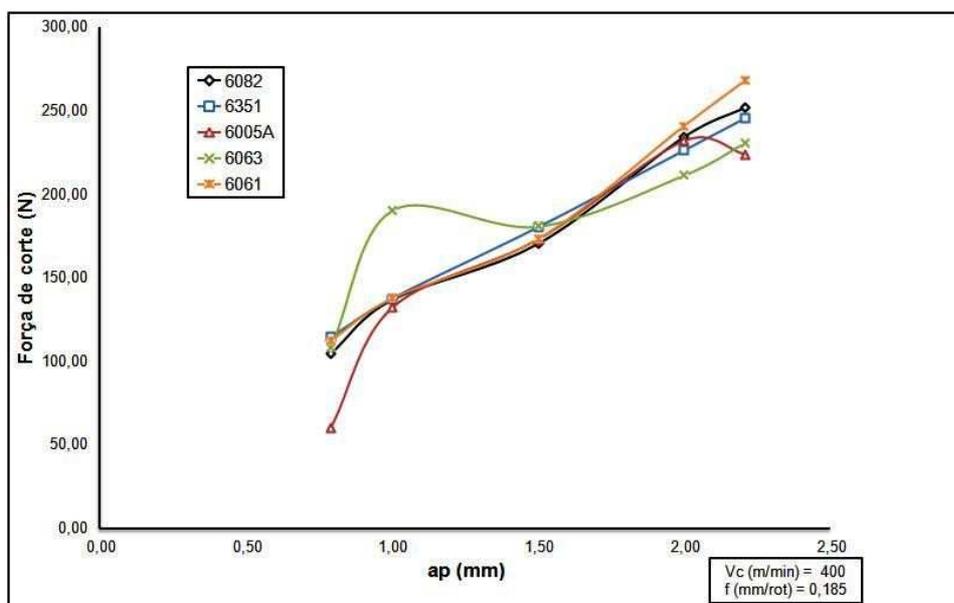


Figura 4.14 - Força de corte (N) versus profundidade de corte (mm)

Assim como a força de corte, a força de avanço também aumenta com o aumento da profundidade, como pode se ver na Fig. 4.15. Neste caso a liga 6063, mais dúctil, apresenta os maiores valores de força de avanço para as três menores profundidades de corte ensaiadas. Já nas maiores profundidades (2 e 2,21mm) a liga 6061 foi a que apresentou maior força de avanço, entre 65 e 75N.

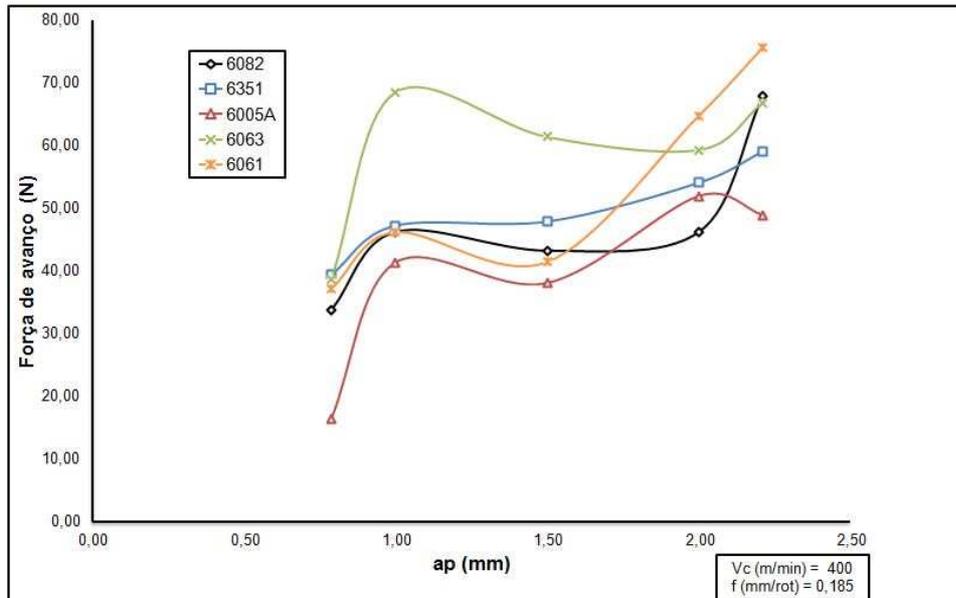


Figura 4.15 - Força de avanço (N) versus profundidade de corte (mm)

A força passiva, ao contrário das demais componentes da força de usinagem, apresentou um decréscimo à medida que se aumentou a profundidade de corte, como mostra a Fig. 4.16, chegando a atingir valores negativos nas profundidades de 2 e 2,21 mm. Este fato pode ser explicado pela geometria da ferramenta, que possui ângulo de inclinação da aresta principal de corte de 10° conforme a Fig. 4.17. Assim, quanto maior a profundidade utilizada, maior o efeito do ângulo de inclinação em diminuir, ou mesmo mudar o sentido desta componente de força.

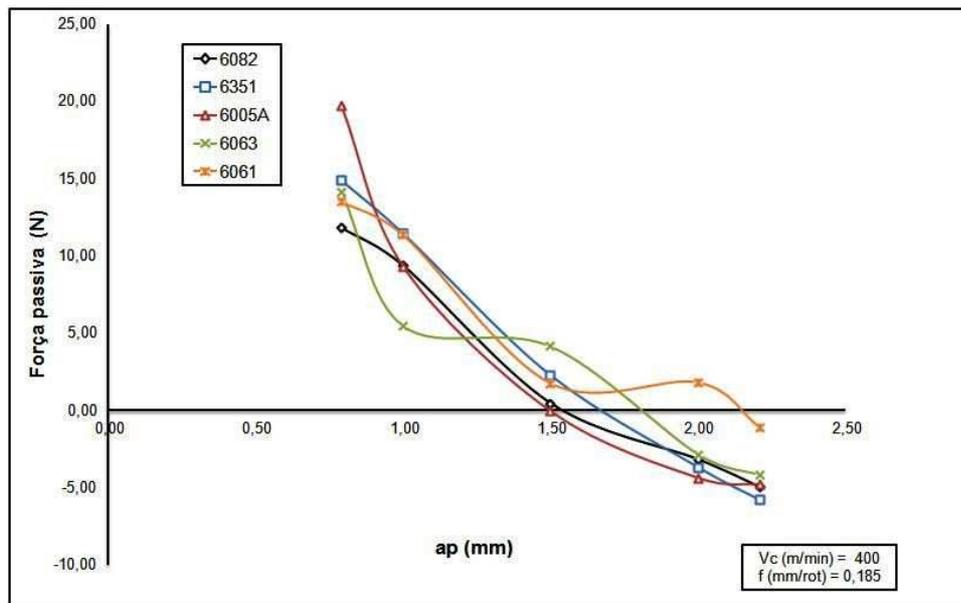


Figura 4.16 - Força passiva (N) x a_p (mm)

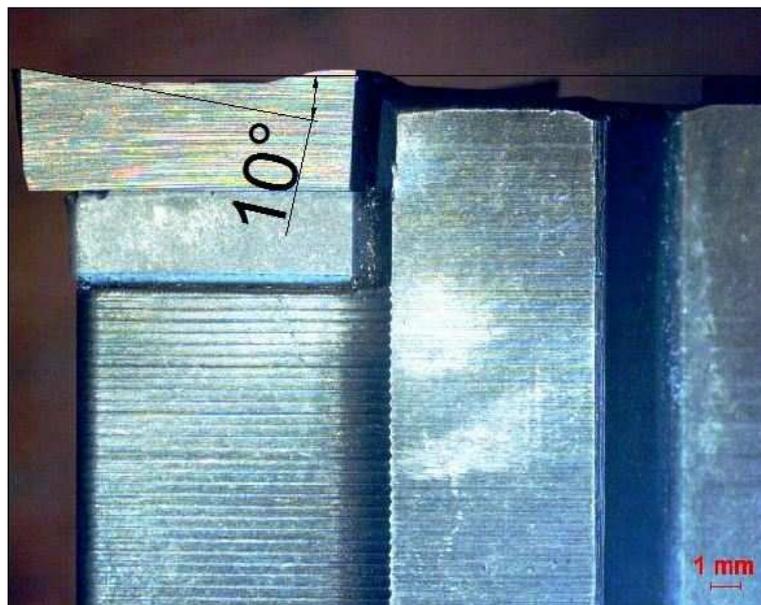


Figura 4.17 - Ferramenta de corte utilizada nos ensaios mostrando o ângulo de inclinação de 10°

4.3. Resultados de Rugosidade

A variação do parâmetro de rugosidade R_q em função da velocidade de corte é mostrada na Fig. 4.18. Segundo Johne (1994), quanto maior a resistência e dureza da liga de alumínio conformada a ser usinada, mais lisa será a superfície produzida. Porém, nos

experimentos realizados, a liga 6063, menos dura e resistente, foi a que apresentou menores valores de rugosidade para praticamente todas as velocidades de corte ensaiadas. Outra observação importante é a de que a esperada queda da rugosidade com o aumento da velocidade de corte não ocorreu.

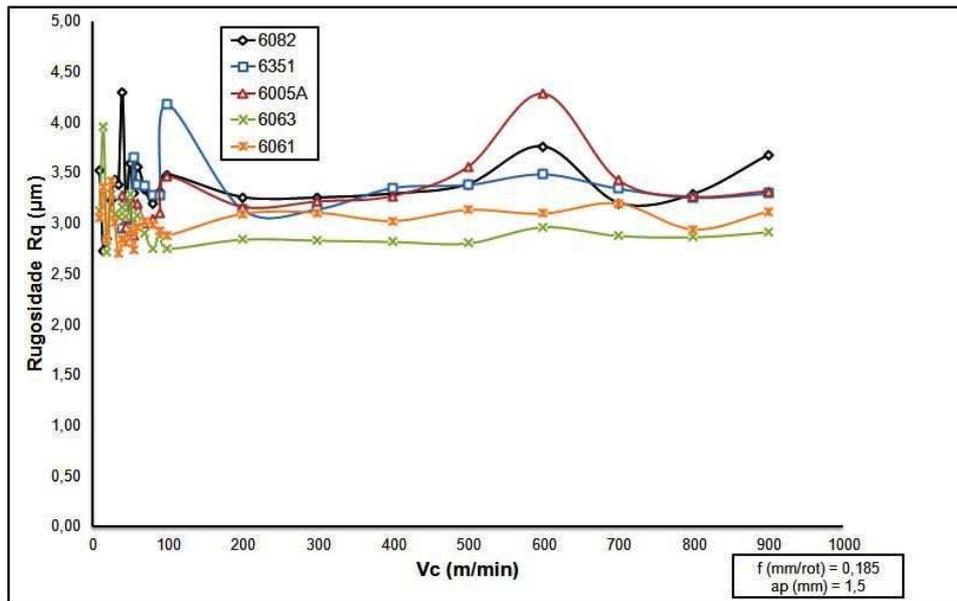


Figura 4.18 - Rugosidade Rq em função da velocidade de corte

A figura 4.19 mostra num gráfico de colunas os valores da rugosidade Rq para as cinco ligas, com os respectivos desvios padrões obtidos, utilizando $v_c = 500$ m/min, $f = 0,185$ mm/rot e $a_p = 1,5$ mm. A liga 6063 claramente apresentou menores valores do parâmetro Rq.

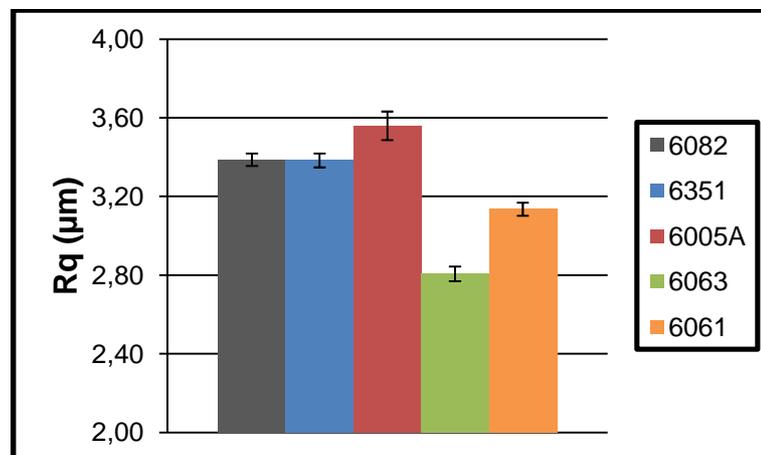


Figura 4.19 - Rugosidade Rq para as cinco ligas de alumínio da série 6XXX na $v_c = 500$ m/min, $f = 0,185$ mm/rot e $a_p = 1,5$ mm

Nas mesmas condições de corte também foi plotada a variação da força de corte em função do tempo (Fig. 4.20) a fim de investigar a menor rugosidade obtida na usinagem da liga 6063. A maior rugosidade encontrada nas outras ligas poderia estar relacionada com possíveis vibrações durante a usinagem das mesmas. Porém ao analisar o sinal de força não se nota maior variação da força das demais ligas sobre a liga 6063, sugerindo que realmente a diferença da rugosidade pode ser em função do material e não de agentes externos.

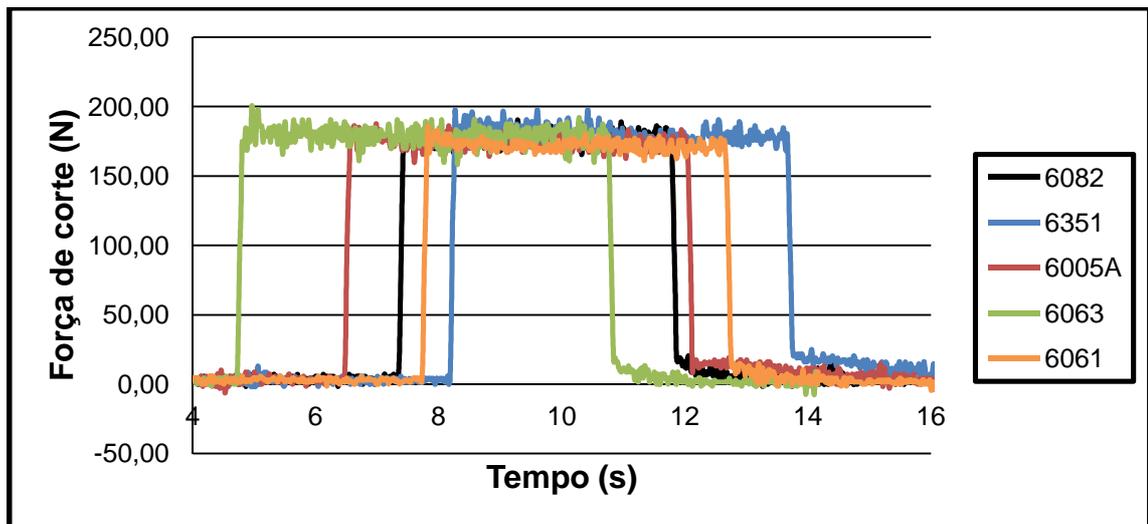


Figura 4.20 - Força de corte versus tempo para as cinco ligas de alumínio da série 6XXX nas condições de corte $v_c = 500$ m/min, $f = 0,185$ mm/rot e $a_p = 1,5$ mm

Assim como feito para a força de corte, também foi realizada uma regressão múltipla para os resultados de rugosidade obtidos nos ensaios do planejamento composto central. A Tab. 4.6 apresenta os coeficientes dos parâmetros para o modelo ajustado da rugosidade R_q . Estão destacados os parâmetros que foram significativos ao nível de significância de 5%. O parâmetro mais significativo foi o avanço, assim como as interações do avanço com os outros parâmetros também foram significativas. Como as durezas das ligas são muito semelhantes, não houve a influência desta variável, porém o limite de resistência se mostrou bastante influente na rugosidade, apresentando coeficiente positivo, ou seja, quanto mais resistente a liga maior a rugosidade. Este fato também pode ser visto no gráfico da Fig. 4.18 onde a liga 6063 com menor limite de resistência foi a que apresentou menor rugosidade, ou seja, melhor acabamento. É bom ressaltar que, apesar deste resultado, a teoria indica o contrário, quanto mais resistente a liga, melhor o acabamento. Isto significa que na faixa de variação dos limites de resistência das ligas estudadas, esta regra não foi obedecida.

Tabela 4.6 - Coeficientes da regressão múltipla para a rugosidade Rq

| Sumário da Regressão para a Variável Dependente: Rq (Regressão Rugosidade Rq) | | |
|---|-------------|----------|
| R= 0,98171920 R ² = 0,96377259 Ajustado R ² = 0,95866359 F(11,78) =188,64 p | | |
| | Coeficiente | p |
| Interseção | 3,117846 | 0,000000 |
| Vc | 0,166482 | 0,000009 |
| ap | 0,166815 | 0,000008 |
| f | 1,548819 | 0,000000 |
| HV | -0,105530 | 0,135691 |
| LRT | 0,294498 | 0,000073 |
| vc*f | 0,177583 | 0,000085 |
| ap*f | 0,157417 | 0,000435 |
| f*HV | -0,277709 | 0,001761 |
| f*LRT | 0,408399 | 0,000009 |
| Vc² | 0,135620 | 0,002206 |
| f² | 0,178843 | 0,000077 |

A rugosidade Ra tem um aumento considerável com o avanço de corte (Fig. 4.21), comportamento este já esperado, pois a altura dos picos e a profundidade dos vales das marcas de avanço tendem a aumentar com o avanço (MACHADO et al., 2009). Novamente a liga 6063 apresentou os melhores resultados de acabamento superficial. Neste gráfico também é mostrada a curva do Ra teórico calculado a partir dos valores do raio de ponta da ferramenta (0,4 mm) e do avanço utilizado em cada ensaio. Normalmente o Ra teórico é menor que o valor real medido nos ensaios, pois não leva em conta possíveis deflexões, vibrações, presença de APC, entre outros. Porém nos avanços maiores o Ra encontrado nos ensaios foi menor que o Ra teórico. Isso pode ter ocorrido devido a rebarbas ou partículas aderidas na superfície usinada que podem preencher os vales da superfície e assim o valor real pode ser inferior que o valor teórico. Estes fenômenos estão relacionados com a região na aresta secundária de corte, onde a ferramenta perde contato com a peça.

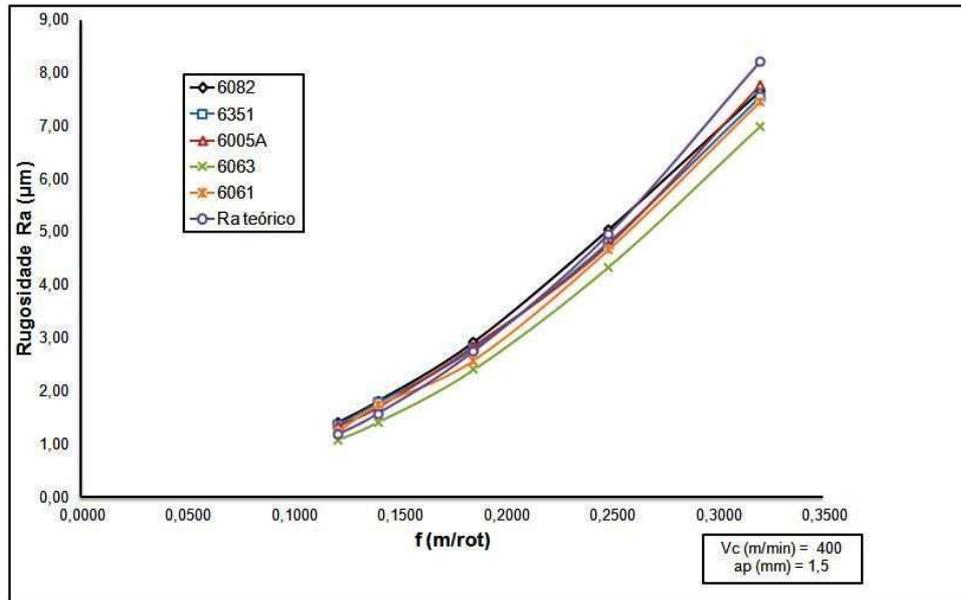


Figura 4.21 - Rugosidade Ra versus avanço

Já no estudo da variação do acabamento em função da profundidade de corte, assim como na variação da velocidade de corte, a liga 6063 foi a que apresentou menores valores de rugosidade da superfície para quase todas as profundidades (Fig.4.22). Não existe, porém variação sensível da rugosidade ao se alterar a profundidade de corte.

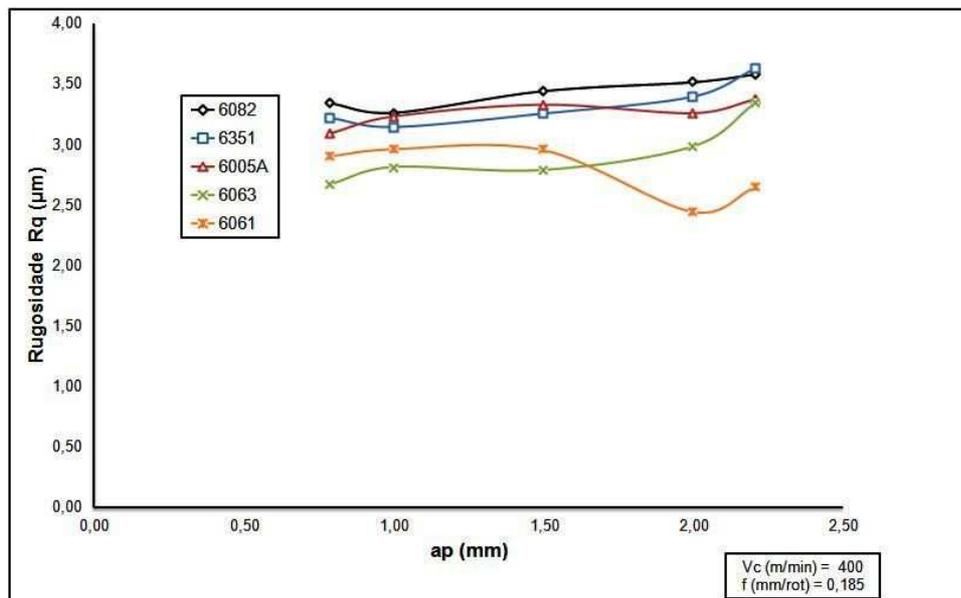


Figura 4.22 - Rugosidade Rq versus profundidade de corte

Apenas nas duas maiores profundidades utilizadas, a rugosidade foi melhor para a liga 6061.

4.4. Resultados de Grau de Recalque

O gráfico apresentado na Fig. 4.23 mostra a variação do grau de recalque com a velocidade de corte. Segundo Machado et al. (2009) o grau de recalque e o ângulo de cisalhamento são bons indicadores da quantidade de deformação dentro da zona de cisalhamento primária. Quanto maior a deformação, maior o grau de recalque. A zona de cisalhamento primária por sua vez depende das condições da interface cavaco-ferramenta, onde está localizada a zona de cisalhamento secundária que influencia diretamente a resistência ao movimento do cavaco e conseqüentemente na deformação sofrida por ele ao passar pela superfície de saída da ferramenta. Sendo assim, os maiores valores do grau de recalque encontrados na liga 6063 estão ligados ao fato desta liga ser mais dúctil, desta forma a área da seção de corte é maior, implicando em maior resistência ao movimento do cavaco. Essa maior resistência gera baixos valores de ângulo de cisalhamento e aumenta o comprimento da zona de cisalhamento primária, aumentando a quantidade de deformação. Além disso, como o aumento da velocidade de corte tende a aumentar a geração de calor e diminuir a resistência do material, favorece o movimento do cavaco por sobre a superfície de saída da ferramenta, assim a quantidade de deformação e conseqüentemente o grau de recalque decresce.

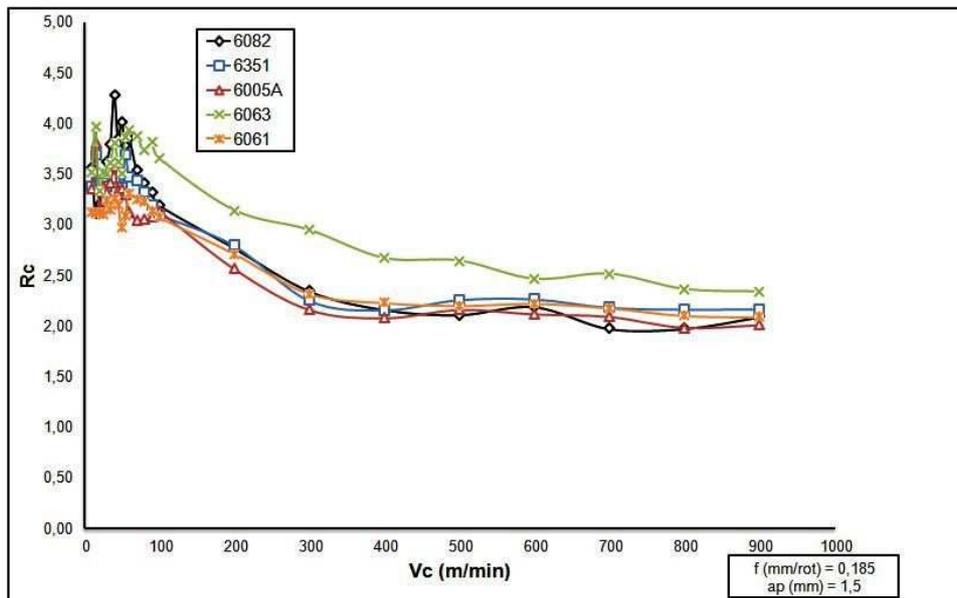


Figura 4.23 - Grau de recalque em função da velocidade de corte

Para a variação do avanço e da profundidade de corte, mostrados nas figuras 4.24 e 4.25 não é possível perceber uma tendência de crescimento ou decréscimo do valor do grau

de recalque, mas novamente a liga 6063, mais dúctil, deforma mais e favorece um grau de recalque maior em relação às outras ligas em quase todos os avanços e em todas as profundidades de corte ensaiadas.

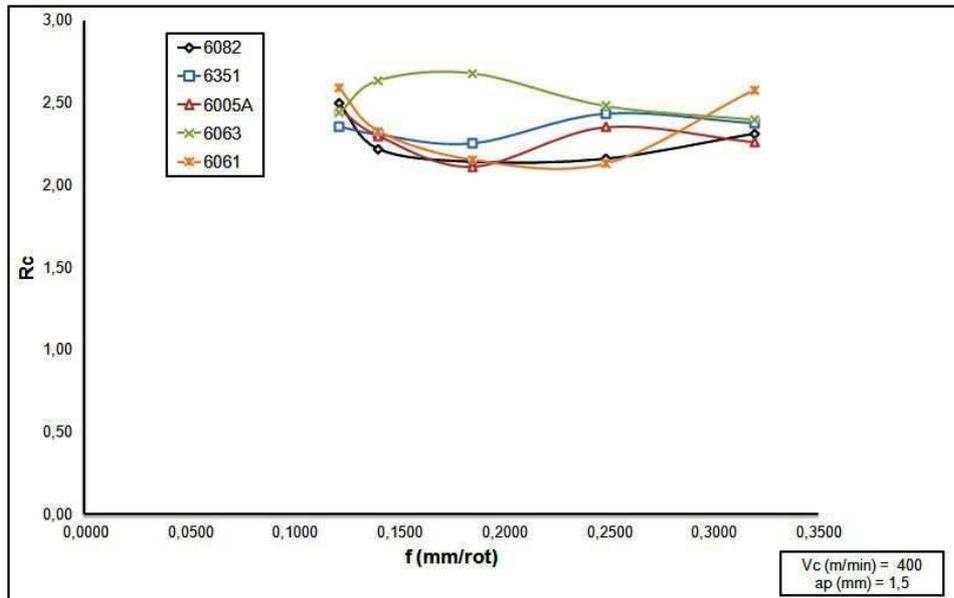


Figura 4.24 - Grau de recalque em função do avanço

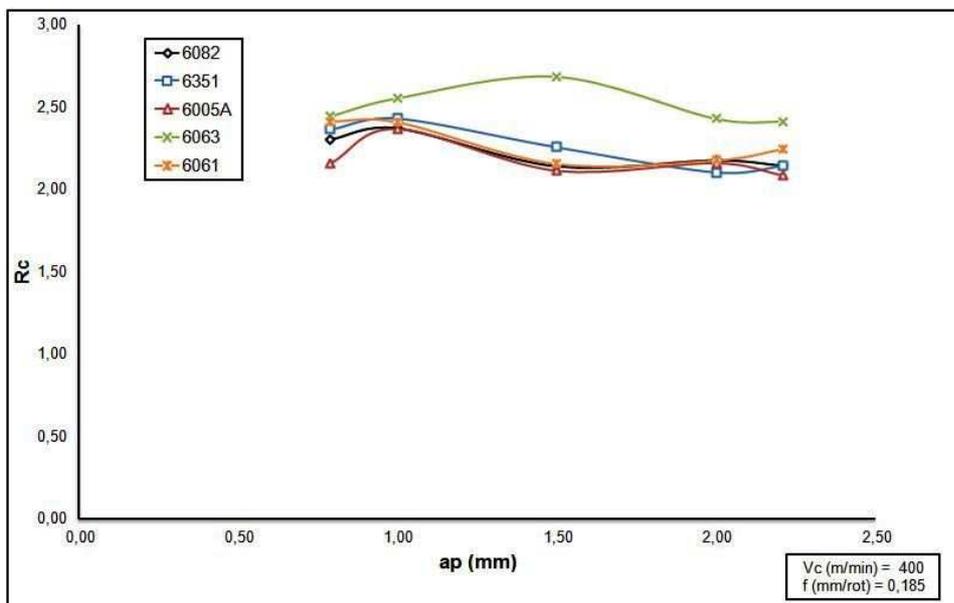


Figura 4.25 - Grau de recalque em função da profundidade de corte

Na tabela 4.7 são mostrados os coeficientes do modelo ajustado para o grau de recalque, onde estão destacados em vermelho os parâmetros que se mostraram significativos ao nível de significância de 5%. Os três parâmetros de corte (velocidade de

corte, profundidade de corte e avanço de corte) foram os mais significativos na variação do grau de recalque, todos implicam em um decréscimo do valor do grau de recalque. Tanto a dureza, quanto o limite de resistência também se mostrou significativo, ou seja, realmente existe diferença nos graus de recalque obtidos para as diferentes ligas de alumínio estudadas. Como o coeficiente da dureza na regressão é negativo, confirma o fato da liga 6063, de menor dureza, apresentar os maiores valores de deformação e conseqüentemente grau de recalque. Já a influência do limite de resistência à tração se mostrou positiva, ou seja, quanto mais resistente a liga maior o grau de recalque, o que apresenta uma contradição em relação aos gráficos de tendência para o grau de recalque mostrado anteriormente. Nestes gráficos a liga 6063, menos resistente e mais dúctil, por se deformar mais, favoreceu maiores valores de grau de recalque. A aparente contradição do coeficiente da resistência se deve ao comportamento da liga 6351, que apesar de ser uma das mais resistentes, apresentou valores de grau de recalque elevados influenciando o modelo. Isso é causado pelo fato da liga 6351, que mesmo possuindo limite de resistência à tração relativamente alto, foi a que apresentou maior taxa de deformação dentre as ligas de maior resistência, implicando em aumento do grau de recalque.

Tabela 4.7. Coeficientes da regressão múltipla para o grau de recalque

| Sumário da Regressão para a Variável Dependente: Rc (Regressão Grau de Recalque Rc) R=0,92716718 R ² = 0,85963898 Ajustado R ² = 0,83758224 F(11,70)=38,974 p | | |
|--|-------------|----------|
| | Coeficiente | p |
| Interseção | 2,571836 | 0,000000 |
| Vc | -0,127795 | 0,000000 |
| ap | -0,048571 | 0,000042 |
| f | -0,076813 | 0,000000 |
| HV | -0,428870 | 0,000009 |
| LRT | 0,171194 | 0,019305 |
| vc*ap | 0,033326 | 0,018596 |
| vc*f | 0,050174 | 0,000522 |
| f*LRT | 0,027303 | 0,118042 |
| Vc² | 0,089823 | 0,000000 |
| f² | 0,086914 | 0,000000 |
| LRT² | -0,310052 | 0,001581 |

4.5. Resultados de Forma do Cavaco

O cavaco formado na usinagem das cinco ligas de alumínio da série 6XXX tem certa facilidade para quebrar. Primeiramente é preciso ressaltar que a ferramenta usada é uma ferramenta específica para o corte de alumínio, com ângulo de saída de 20° e também munida de quebra-cavaco. Além disso, as ligas ensaiadas contêm como principais elementos de liga o silício e magnésio que estão presentes em proporções para formar o Mg_2Si , partícula de segunda fase endurecedora destas ligas. Kamiya e Yakou (2007) investigaram o papel das partículas de segunda fase na quebra do cavaco na usinagem de várias ligas de alumínio. Segundo os autores as ligas que possuíam as partículas de Al_2Cu e Si apresentaram maior fator de quebra que as demais ligas devido à quebra destas partículas. Já as ligas que possuíam a partícula de segunda fase Mg_2Si apresentaram comportamento semelhante. Embora não se pudesse observar a fratura de Mg_2Si , é também pensado ter um efeito como uma causa da quebra dos cavacos.

A Fig. 4.26 apresenta os cavacos obtidos na usinagem das cinco ligas de alumínio com um avanço de 0,185 mm/rot e profundidade de corte de 1,5 mm em diferentes velocidades de corte. Não é possível perceber grande diferença na forma dos cavacos formados pelas diferentes ligas. Cavacos longos normalmente são formados à altas velocidades de corte. Porém, em toda faixa de velocidades ensaiadas (10 a 900 m/min) foram gerados cavacos helicoidais longos apenas em velocidades entre 20 e 40 m/min, possivelmente porque estas velocidades estão fora da faixa indicada pelo fabricante da ferramenta (200 a 1500 m/min) e o quebra-cavaco não é eficiente. Já em velocidades maiores, o quebra-cavaco se mostrou bem eficaz, assim o cavaco encontrado foi helicoidal curto até a velocidade de corte de 200 m/min. A partir desta velocidade os cavacos foram obtidos na forma de arco solto. Os cavacos gerados pela liga 6063 foram os que mais se distinguiram. Apesar de apresentarem a mesma forma, eles possuem maiores dimensões que os das demais ligas em praticamente todas as velocidades de corte.

Na Fig. 4.27 são mostradas fotos dos cavacos gerados na usinagem das cinco ligas com velocidade de corte de 400 m/min, profundidade de corte de 1,5 mm e diferentes avanços de corte. Nos primeiros dois avanços utilizados (0,121 e 0,14 mm/rot) prevaleceram os cavacos da forma tubular curto, sendo que para as ligas 6082 e 6005A foi o tubular longo. No avanço intermediário de 0,185 mm/rot para a liga 6063 o cavaco obteve a forma de helicoidal curto, já as demais ligas continuaram com o cavaco tubular curto, mas com menores dimensões. Nos maiores avanços (0,249 e 0,320 mm/rot) os cavacos foram do tipo helicoidal curto, diferenciando-se os da liga 6063 que novamente apresentaram maiores

dimensões. De uma maneira geral com o aumento do avanço o cavaco se quebra mais facilmente.

Os cavacos obtidos com diferentes profundidades de corte são mostrados na Fig. 4.28. A velocidade de corte utilizada foi de 400 m/min e avanço de 0,185 m/min. Na menor profundidade de corte utilizada (0,79 mm) prevaleceu a forma do cavaco helicoidal tipo arruela, longo para a liga 6005A e curto para as demais. Esta forma de cavaco continuou presente na profundidade de 1 mm para as ligas exceto a liga 6063 que se apresentou na forma helicoidal curto nas profundidades de 1 e 1,5 mm. Já as maiores profundidades de corte (2 e 2,21 mm) favoreceu a formação do cavaco em arco conectado e solto.

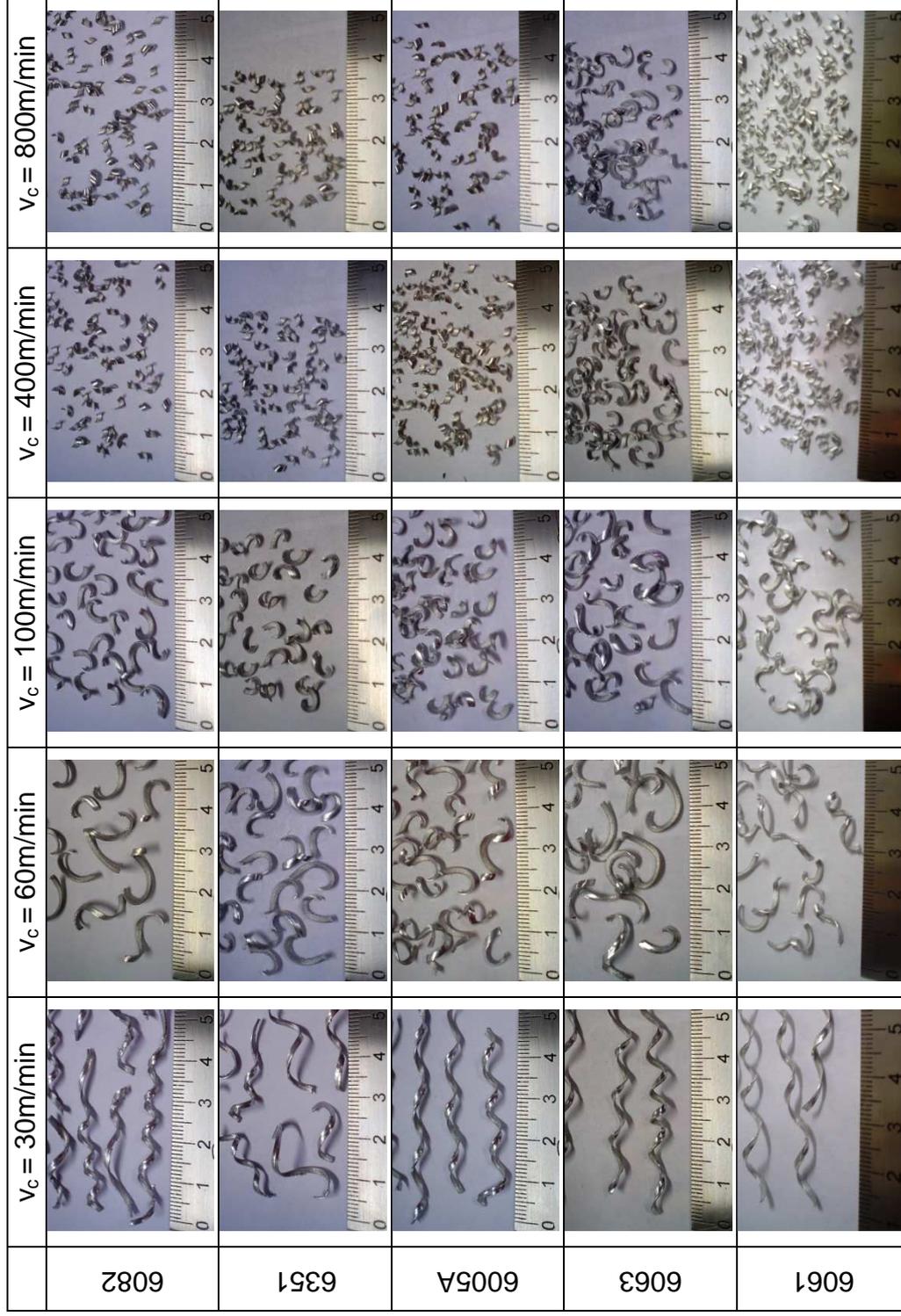


Figura 4.26. Cavacos obtidos na usinagem das cinco ligas de alumínio com $f = 0,185\text{ mm/rot}$, $ap = 1,5\text{ mm}$ e diferentes velocidades de corte

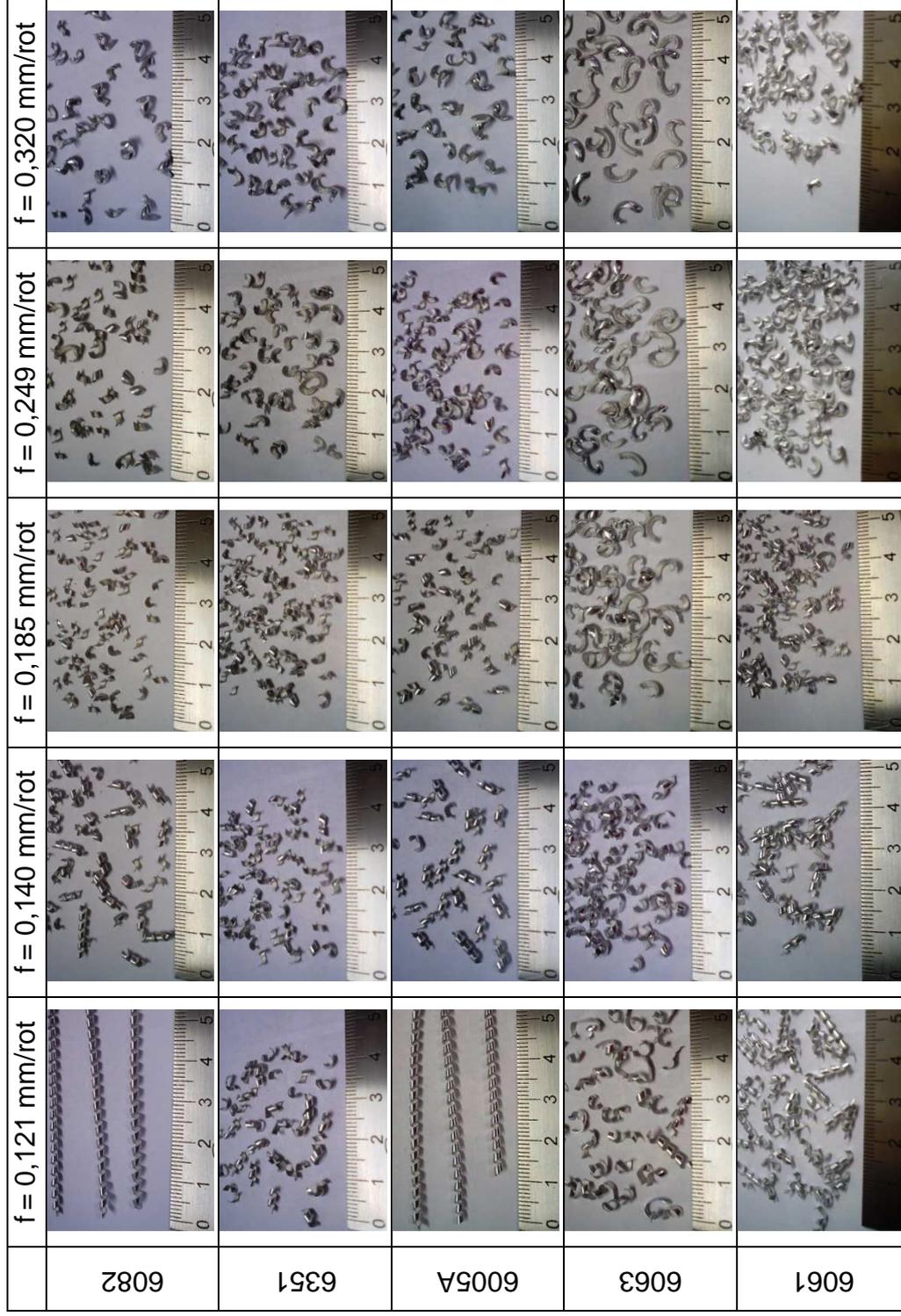


Figura 4.27. Cavacos obtidos na usinagem das cinco ligas de alumínio com $v_c = 400 \text{ m/min}$, $ap = 1,5 \text{ mm}$ e diferentes avanços

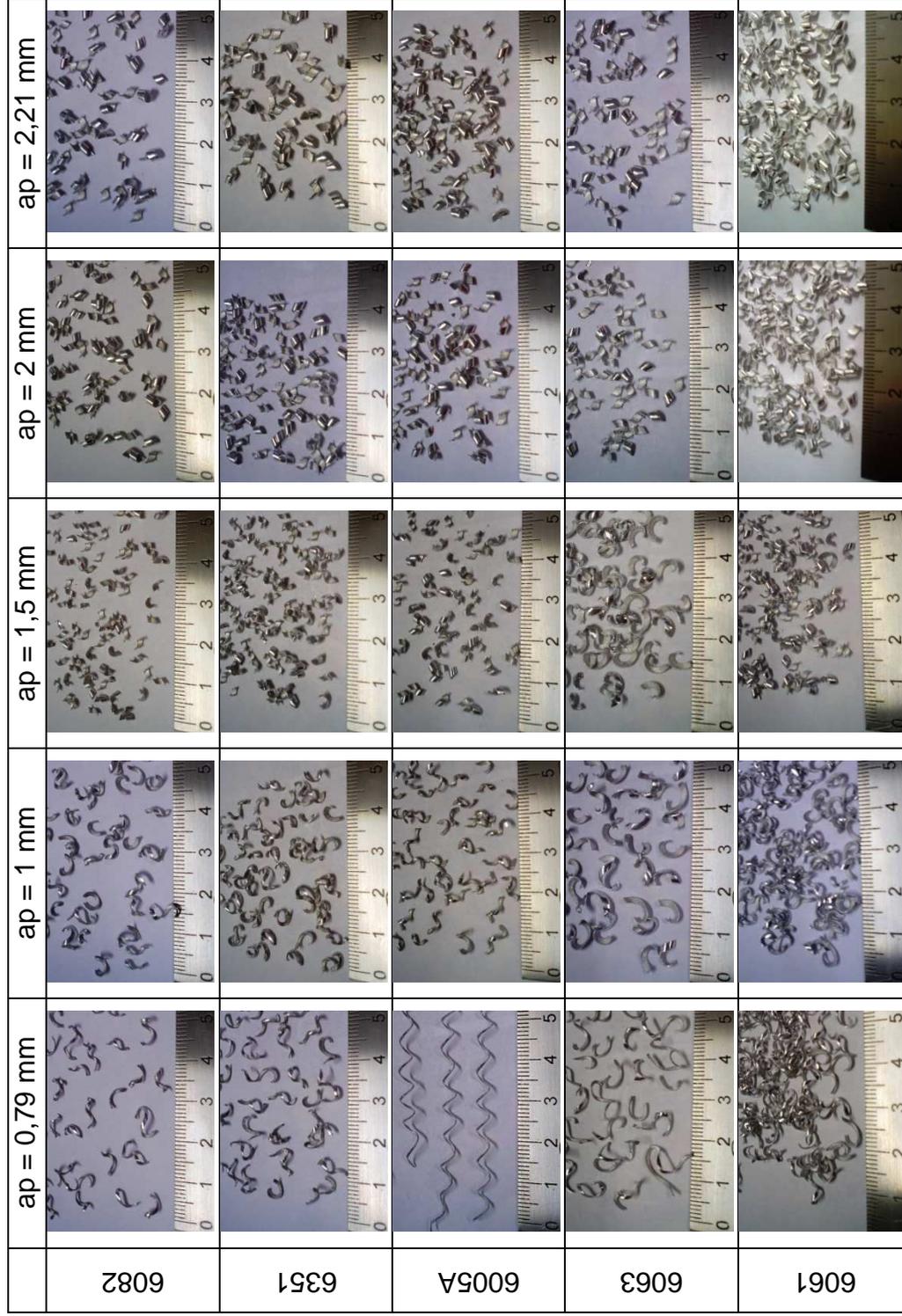


Figura 4.28. Cavacos obtidos na usinagem das cinco ligas de alumínio com $v_c = 400$ m/min, $f = 0,185$ mm/rot e diferentes profundidades de corte

4.6. Resultados de Recuperação Elástica

Durante a realização dos testes previstos no planejamento do presente trabalho foi observado um fenômeno interessante. Ao se interromper o avanço da ferramenta e mantida a rotação da peça no torno, ainda se observava o corte do alumínio. Pequenos valores de força podiam ser mensurados enquanto cavaco na forma de pó se alojava na superfície de saída da ferramenta, evidenciando uma recuperação elástica do material.

Considerando que o material usinado é um material plástico perfeito, poderia haver alguma deformação elástica envolvida no processo. Na verdade, a temperatura obtida na zona de fluxo e a alta taxa de tensão pode afetar o comportamento do material durante o corte. Devido aos elevados valores das taxas de tensão durante a usinagem, não existe nenhum modo de testar um material sob tais condições, pois o comportamento fundamental do material é desconhecido. Entretanto para a maioria dos materiais maleáveis, durante o corte pode se considerar uma deformação elástica, que sugere um contato da superfície usinada com a face lateral da ferramenta, isto significa que a ferramenta precisa penetrar em uma profundidade específica dentro do material antes de começar a cortá-lo, ou seja, existe uma profundidade mínima que dependerá de muitos fatores, mas principalmente das propriedades do material. Para valores menores do que este mínimo o material não cortará, será apenas deformado elasticamente (DA SILVA, 2011).

Portanto esta recuperação elástica do material é um fator de grande interesse em micro-usinagem, onde a profundidade de corte é muito pequena, pois pode causar imperfeições na superfície usinada e conseqüentemente piorar a rugosidade da peça. A Fig. 4.29 mostra a superfície deformada após a usinagem de materiais dúcteis utilizando ferramenta de aresta única de diamante e espessuras de corte muito pequenas. Segundo os autores o material deixado para trás pela superfície de folga se recupera, e esta quantidade de recuperação depende do módulo de elasticidade do substrato. Além disso, esta quantidade de recuperação depende da orientação cristalina dos grãos. Diferentes orientações dos grãos têm quantidades diferentes de recuperação e, conseqüentemente, dá uma superfície ondulada, com deformação elástica e plástica (KONG et al., 2006).

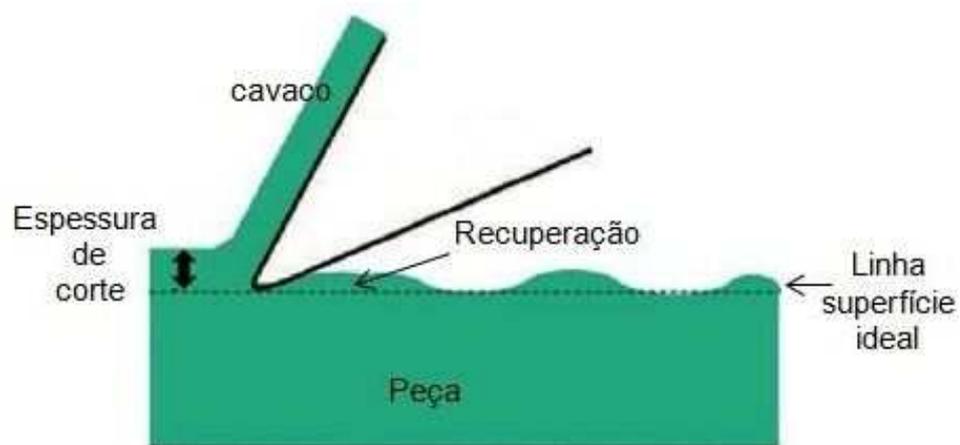


Figura 4.29 – Superfície deformada elástica e plasticamente (KONG et al., 2006)

Assim, foram realizados três testes para cada liga em que se usinava com condições de corte determinadas ($V_c = 60$ m/min, $a_p = 1,5$ mm e $f = 0,1$ mm/rot) durante 10 s e o avanço da ferramenta era interrompido mantendo a rotação da peça (100 rpm) durante os próximos 30 s. Durante os ensaios foi coletada a força de corte, e monitorado o movimento de avanço utilizando o relógio comparador.

Os valores da força de corte foram plotados em função do tempo como mostrado na Fig. 4.30 para a liga 6005A. É possível perceber que no momento em que o avanço da ferramenta é interrompido, a força de corte cai rapidamente até um valor de aproximadamente 40 N. A partir deste ponto a força de corte cai de forma gradativa, levando certo tempo até atingir o valor zero, evidenciando o corte do material devido sua recuperação elástica.

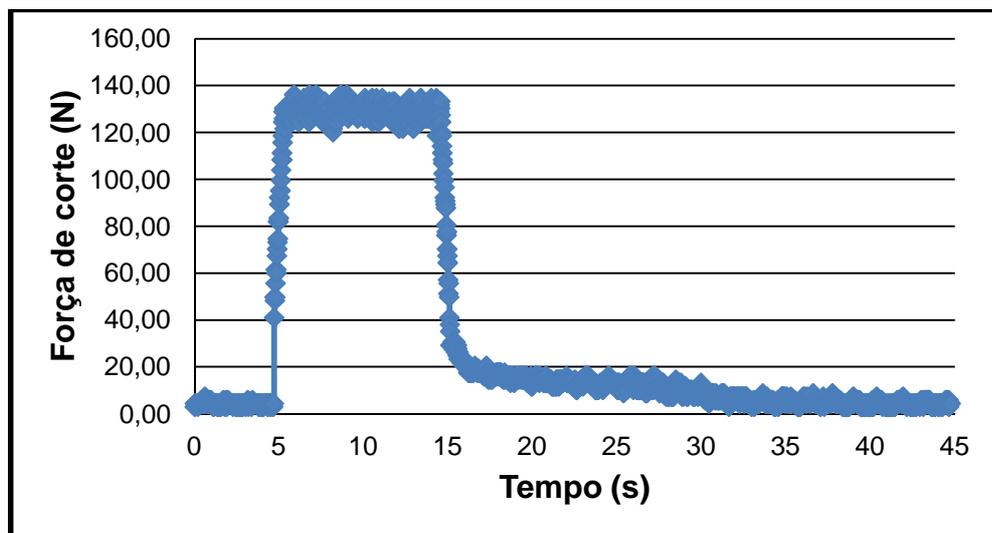


Figura 4.30 – Força de corte (N) versus tempo (s) para a liga 6005A

Uma limitação na comparação entre as curvas força de corte x tempo das cinco ligas é o fato de não ser possível precisar que a usinagem começou e terminou no tempo exato em todos os ensaios. Para tornar possível a comparação entre as ligas foi adotada uma metodologia. Por meio do programa Microsoft Excel 2007, para cada ensaio foram coletados cinco pares de valores (força de corte ; tempo) no intervalo da curva a partir do ponto em que a parte decrescente da força ultrapasse 40 N até próximo de zero. O procedimento é apresentado na Fig. 4.31 para o mesmo ensaio da liga 6005A mostrado na Fig. 4.30.

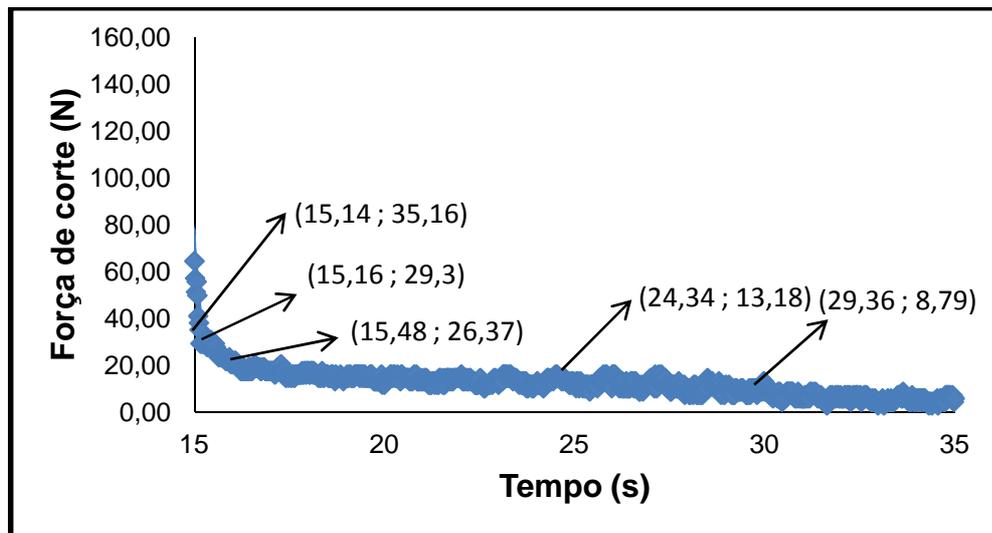


Figura 4.31 - Detalhe dos pares de valores (força de corte(N) ; tempo(s))

De posse destes pontos foi gerada uma função exponencial (Fig. 4.32) que representa de forma satisfatória ($R^2 = 0,9743$) o comportamento da curva real da força de corte em função do tempo para cada ensaio.

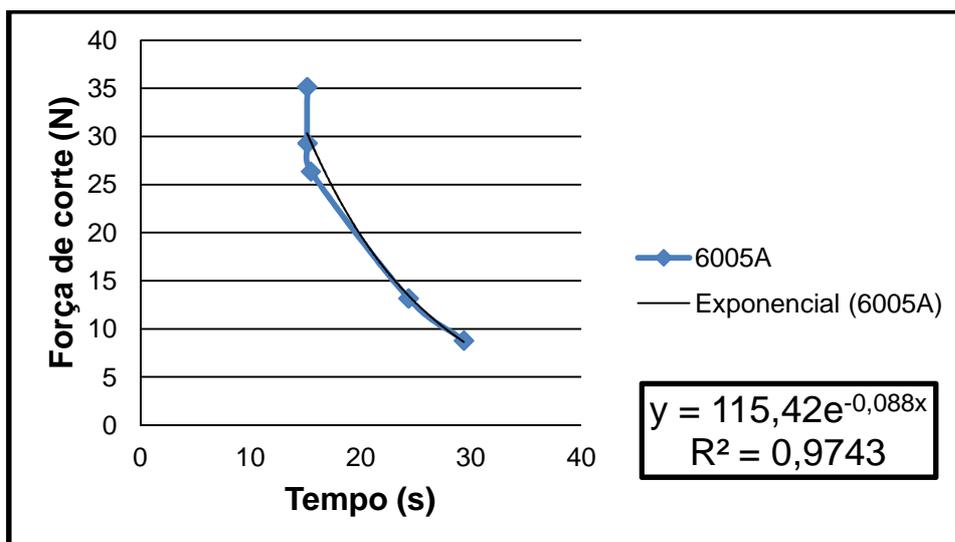


Figura 4.32 – Função exponencial gerada a partir da curva força de corte(N) versus tempo(s) para a liga 6005A

Para comparar o comportamento das diferentes ligas, para cada ensaio foi adotado o seguinte critério. Por meio da equação foi calculado o tempo necessário para uma variação de força de corte constante de 20 N para cada liga, ou seja, um intervalo de tempo que cada liga de alumínio continuou sendo usinada gerando uma força de corte de 30 a 10 N. Estes valores foram escolhidos, pois estão dentro do intervalo de força onde ela apresenta um decréscimo gradual (a partir de 40 N) e maior que zero, eliminando o erro devido à variação da força causada pelo fenômeno cíclico que é a formação do cavaco. Este tempo proporciona um valor de comparação entre o comportamento de recuperação elástica das diferentes ligas de alumínio da série 6XXX.

Os valores de intervalo de tempo obtidos para cada liga e seus respectivos desvios padrões são apresentados na Fig. 4.33. A liga 6351 apresenta o maior intervalo de tempo (20 s) para que a força de corte varie 20 N, ou seja, a força de corte nesta liga decresce a uma taxa de 1 N/s, de forma mais lenta que as demais, evidenciando maior capacidade de recuperação elástica. Comportamento semelhante é apresentado pela liga 6063 que necessita de 16 s para que a força de corte varie 20 N. Nesta liga a força de corte decresce a uma taxa de 1,25 N/s. Porém, os desvios padrões se confundem assim não se pode dizer que há diferença entre os intervalos de tempo destas duas ligas. Já a liga 6082 precisou de cerca de apenas 10 s para que a força de corte variasse 20N. A força de corte para esta liga decresce a uma taxa de 2 N/s, ou seja, de forma mais rápida que as demais ligas, evidenciando menor recuperação elástica. O comportamento das ligas 6061 e 6005A se mostrou semelhante ao da liga 6082. Resumindo, as ligas 6351 e 6063 são as ligas que mais se deformaram elasticamente e plasticamente. A liga 6063 é a liga com menor

quantidade dos elementos de liga Mg e Si apresentando maior taxa de deformação plástica entre as ligas ensaiadas. Já a liga 6351 é a liga que melhor combina alta resistência e deformação.

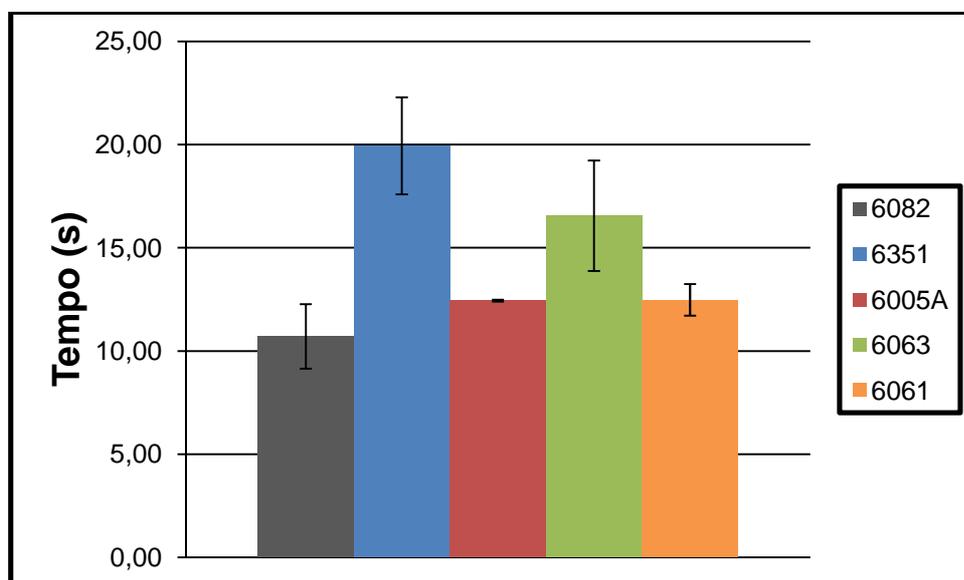


Figura 4.33 – Intervalo de tempo calculado gasto na usinagem com força de corte de 30 N até 10 N para as cinco ligas de alumínio da série 6XXX

CAPÍTULO V

CONCLUSÃO

A investigação acerca da usinabilidade das ligas de alumínio da série 6XXX levou a algumas conclusões importantes sobre o comportamento das mesmas durante os ensaios de torneamento desenvolvidos no presente trabalho.

As ligas estudadas são muito semelhantes em níveis de dureza e resistência mecânica. Diferenciando apenas a liga 6063 com menor dureza e resistência mecânica, e maior deformação.

Em baixas velocidades de corte (menores que 200 m/min) a liga 6082, mais resistente e que possui maior quantidade dos elementos de liga Mg e Si, apresentou maiores valores de força de corte. Nas demais velocidades não se pode observar diferença na força das diferentes ligas.

Maiores forças de avanço foram encontradas para a liga 6063 em velocidades de corte maiores que 200 m/min devido à sua maior capacidade de deformação e conseqüentemente maior ductilidade. O que também favoreceu à esta liga maiores valores de grau de recalque.

A força passiva apresentou valores negativos na usinagem com maiores profundidades de corte (acima de 1,5 mm) para todas as ligas devido à geometria da ferramenta de corte que conta com ângulo de inclinação de 10° positivo.

A liga 6063, mais dúctil, foi a que proporcionou menores valores de rugosidade Rq, ou seja, melhor acabamento superficial em comparação às demais.

O cavaco formado na usinagem das cinco ligas de alumínio tem certa facilidade para quebrar. Cavacos longos foram encontrados apenas em velocidades entre 20 e 40 m/min, fora da faixa indicada para a ferramenta. Para as demais velocidades o quebra-cavacos se

mostrou eficaz e prevaleceram os cavacos de forma helicoidal curto e arco solto. Apenas os cavacos da liga 6063 se diferenciaram das demais ligas, apesar de apresentar a mesma forma eles possuem maiores dimensões.

Proposta para trabalhos futuros

- Investigar a geração de calor no processo a fim de explicar a estabilização nos valores das componentes de força de usinagem em velocidades de corte da ordem de 400 m/min.
- Realizar ensaios de usinagem em barras circulares de menor diâmetro a fim de verificar se a diferença de dureza entre superfície e centro das barras estudadas se transmite em valores diferentes de força de usinagem ou rugosidade.
- Investigar a usinabilidade das ligas de alumínio da série 6XXX com a utilização de fluídos de corte.
- Analisar a superfície inferior dos cavacos encontrados na usinagem das ligas de alumínio para verificar a presença ou não de aresta postiça de corte.

CAPÍTULO VI

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. <<http://www.abal.org.br/aluminio/historia.asp>> acesso em 29/09/2011 as 14:00h.
2. <<http://www.abal.org.br/aluminio/ligas.asp>> acesso 06/10/2011 as 15:01.
3. <http://www.abal.org.br/aluminio/producao_alupri.asp> acesso em 05/10/11 as 15:13h.
4. <<http://www.abal.org.br/aluminio/temperas.asp>> acesso 26/10/11 as 09:58.
5. <http://www.aluminiumleader.com/images/content/serious/industry/map_en.jpg> acesso em 05/10/11 as 14:11h.
6. <<http://www.moldesinjecaoplasticos.com.br/fundusinagem.asp>> acesso em 28/10/11 as 10:30.
7. <www.eaa.net>. Acesso em 06/10/11 as 16:00
8. A sustentabilidade da indústria brasileira do alumínio / Confederação Nacional da Indústria. Associação Brasileira do Alumínio. – Brasília: CNI, 2012. 44 p. (Cadernos setoriais Rio+20).
9. ASM METALS HANDBOOK – Alloy Phase Diagrams, Vol. 03x21, 10^a Edition, 1992. 1741 p.
11. ASM METALS HANDBOOK – Machining, Vol. 16x21, 10^a Edition, 1992. 929p.
12. ASM METALS HANDBOOK – Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, Vol. 02x21, 10^a Edition, 1992. 3470 p.
13. ASM, SPECIALTY HANDBOOK – Aluminum and aluminum alloys – ASM International, 1993
14. BOOTHROYD, G.; KNIGHT, W. A. “Fundamentals of Machining and Machine Tools”, Third Edition, 2006. 573 p.

15. COOK, N. H. "Chip formation in machining titanium". Proc. Symp. on Mach Grinding Titanium. Watertown arsenal, Watertown 72, 31 março 1953, p.1-7. et al. "Discontinuous chip formation". Trans. of ASME, fevereiro 1954, p. 153-162.
16. CUNHA, D. F. da "Influência do Teor de Silício na Usinabilidade da Liga de Alumínio 6351 Avaliada Através da Força de Corte e Acabamento Superficial". 2012. 83 folhas. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
17. DASCH, J. M.; ANG, C. C.; WONG, C. A.; WALDO, R. A.; CHESTER, D.; CHENG, Y. T.; POWELL, B. R.; WINER, A. M.; KONCA, E., "The effect of free-machining elements on dry machining of B319 aluminum alloy", 2009.
18. DA SILVA, M. B. Lubrication in metal cutting under built up edge conditions, Phd thesis, University of Warwick, Inglaterra, 1998.
19. DA SILVA, M. A.; SOUSA M. N.; DA SILVA, M. B., "Análise da força residual na usinagem do aço ABNT 1045", 6º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2011.
20. DEARNLEY, P. A.; TRENT, E. M., 1982, "Wear Mechanisms of Coated Carbides Tools", Metals Technology, vol. 9, February, pp. 60-75.
21. DOYLE, E. D. ET AL. "Frictional interactions between chip and rake face in continuous chip-formations". Proc. R. Soc., série A, v. 366, p. 173-183, 1979.
22. FERRARESI, D. "Usinagem dos Metais", Editora Edgar Blucher Ltda., 1970. 751 p.
23. Fundamentos e Aplicações do Alumínio – Associação Brasileira do Alumínio (ABAL)
24. HANDBOOK OF ALUMINUM, Physical Metallurgy and Processes, Volume 1, 1996. 1309 p.
25. HIGGINS, R. A. – "The Properties of Engineering Materials", 1977.
26. ISO 3685, 1993 Tool-life testing with single-point turning tools.
27. JOHNE, P. – Machining of Products, 1994. 38 p.
28. KAMIYA, M.; YAKOU, T., "Role of second-phase particles in chip breakability in aluminum alloys", 2007.
29. KILIC, D. S.; RAMAN, S., "Observations of the tool–chip boundary conditions in turning of aluminum alloys", 2006.
30. KISHAWY, H. A. et al, "Effect of coolant strategy on tool performance, chip morphology and surface quality during high-speed machining of A356 aluminum alloy", International Journal of Machine Tools & Manufacture 45 (2005) 219–227.
31. KONG, M. C.; LEE, W. B. ; CHEUNG, C. F., TO S., " A study of materials swelling and recovery in single-point diamond turning of ductile materials", Advanced Optics Manufacturing Centre, Department of Industrial and Systems Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Kowloon, Hong Kong, 2006.

32. KRONENBERG, M., "Machining Science and Application". 1 th ed. London: Pergamon Press. 1966, 405 p.
33. LIST, G.; NOUARI, M.; GÉHIN, D.; GOMEZ, S.; MANAUD, J. P.; PETITCORPS, T. L. GIROT, F., "Wear behaviour of cemented carbide tools in dry machining of aluminium alloy", 2005.
34. MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; DA SILVA, M. B. Teoria da usinagem dos materiais – São Paulo: Editora Blucher, 2009. 371 p.
35. MARTINS, M. M. M. – Estudo do comportamento das ligas de alumínio 6061 e 6082, Universidade de Aveiro – Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro, 2008. 130 p.
36. MILOVIK, R.; WALLBANK, J. – "The machining of low carbon free cutting steels with high speed steel tools" The machinability of engineering materials, New York: ASM International, 1983.
37. NBR ISO 4287 - Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade, ABNT, 2002. 18p.
38. NBR 6834 – Alumínio e suas ligas – Classificação, ABNT, 2000. 31p.
39. NBR 6835 – Alumínio e suas ligas – Classificação das têmperas, ABNT, 2000, 6 p.
40. RIBEIRO, R. A. M., GONÇALVES, R. A., "Investigação das Propriedades e Dimensões da Zona de Fluxo na Usinagem dos Metais". 2010. 57 pag. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.
41. ROLLASON, E. C. - Metallurgy for Engineers, 4ª Edition, 1973
42. ROSA, Luiz Carlos, Acabamento de Superfícies – Rugosidade superficial, OMA – Oficina Mecânica para Automação, Unesp, Sorocaba, 2005.
43. SMITH, G.T. "Advanced Machining – The Handbook of Cutting Technology", IFS Publications, 1989, ISBN 1-85423-022-6.
44. SREEJITH, P. S., "Machining of 6061 aluminium alloy with MQL, dry and flooded lubricant conditions", 2007.
45. TRENT, E. M., 1963, "Cutting Steel and Iron with Cemented Carbide Tools – Part II: Conditions of Seizure at the Tool/Work Interface", Journal of the Iron and Steel Institute, Nov. 1963, pp. 923-932.
46. TRENT, E. M., 1988a, "Metal Cutting and the Tribology of Seizure: I-Seizure in Metal Cutting", Wear, vol. 128, pp. 29-46.
47. TRENT, E. M., 1988b, "Metal Cutting and the Tribology of Seizure: II-Movement of Work Material Over the Tool in Metal Cutting", Wear, vol. 128, pp. 47-64.
48. TRENT, E. M., 1988c, "Metal Cutting and the Tribology of Seizure: III-Temperature in Metal Cutting", Wear, vol. 128, pp. 65-81.

49. TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. – Metal Cutting, 4^a Edition, 2000. 446 p.
50. TRENT, EM. “Metal Cutting”. 2nd Edition, Buttherworths, London, 1984, 245 pags, ISBN – 0.408.10856-8.