UNIFEI-UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM

ENGENHARIA DE MATERIAIS

MESTRADO PROFISSIONAL

José Francisco de Oliveira

ESTUDO DO FRESAMENTO DE ACABAMENTO DA LIGA DE ALUMÍNIO AERONÁUTICO 7075-T6

Itajubá, Outubro de 2015

UNIFEI-UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM

ENGENHARIA DE MATERIAIS

MESTRADO PROFISSIONAL

José Francisco de Oliveira

ESTUDO DO FRESAMENTO DE ACABAMENTO DA LIGA DE ALUMÍNIO AERONÁUTICO 7075-T6

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais-Mestrado Profissional.

Área de Concentração: Metais

Orientador: Prof. Dr. João Roberto Ferreira

Itajubá, Outubro de 2015

Oliveira, José Francisco de.
Estudo do fresamento de acabamento da liga de alumínio aeronáutico 7075-T6 / José Francisco de Oliveira – Itajubá - MG, UNIFEI, 2015.
115p.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá, 2015.
Orientador: Prof. Dr. João Roberto Ferreira.

1. Liga de alumínio aeronáutico 7075 T6 2. Fresamento de acabamento
3. Rugosidade (R_a)

UNIFEI-UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM

ENGENHARIA DE MATERIAIS

MESTRADO PROFISSIONAL

José Francisco de Oliveira

ESTUDO DO FRESAMENTO DE ACABAMENTO DA LIGA DE ALUMÍNIO AERONÁUTICO 7075-T6

Dissertação aprovada por banca examinadora em 08 de Outubro de 2015, conferindo ao autor o título de **Mestre em Engenharia de Materiais – Mestrado Profissional.**

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Durval Uchôas Braga (UFSJ)
Prof. Dr. Gilbert Silva (UNIFEI)
Prof. Dr. João Roberto Ferreira (UNIFEI)

Itajubá, Outubro de 2015

AGRADECIMENTOS

Inicialmente a Deus, por me proporcionar mais esta vitória, pelas oportunidades colocadas em minha vida e por sua presença constante.

A minha família, pelo apoio, preocupação, ansiedade, paciência, nervosismo, alegria, ou seja, por fazerem parte da minha história. Em especial minha esposa Luíza e aos meus filhos Sofia e Gabriel.

Ao meu orientador Prof. Dr. João Roberto Ferreira, pelos conselhos, direcionamentos e incentivos, nos meus bons e não tão bons momentos. Este apoio foi essencial e determinante para a conclusão deste trabalho. Obrigado pela oportunidade de trabalharmos juntos.

Ao prof. Luiz Fernando Barca, pelo auxílio na elaboração dos Planejamentos experimentais, pelas sugestões e orientações.

Ao prof. Dr. Gilbert Silva, pelo auxílio na elaboração, sugestões e orientações.

Ao Prof. Dr. Geovani Rodrigues, por ir direto ao que importa, sem rodeios, com competência, pela ajuda intelectual e prática.

A UNIFEI e ao Programa de Pós-Graduação de Mestrado Profissional em Engenharia de Materiais pela oportunidade oferecida para aprimorar meus conhecimentos e crescimento profissional.

Aos meus colegas de mestrado que comigo estiveram e partilharam das mesmas lutas e pelo incentivo.

A direção do LNA pela confiança depositada e fornecimento de recursos e materiais, pois sem essa ajuda este trabalho não seria possível.

A todos os professores que ora não estão citados, mas que também foram importantes para o meu crescimento acadêmico e fazem parte desta vitória.

Aos técnicos dos laboratórios de Metalurgia e Materiais da UNIFEI Jonas, Marquinhos e Toninho pela ajuda na preparação das amostras e realização das análises de microscopia ótica e MEV.

Trabalhar com dedicação e prazer naquilo que gosta. Ser ético, humilde e respeitar os colegas. Buscar estar tecnicamente preparado, aceitar desafios e mobilidades, procurando montar o cavalo quando passa arreado, pois ele pode não passar de novo.

Engenheiro Eletricista Manoel Zaroni - Diretor Presidente da Tractebel Energia

Soli Deo Glória

RESUMO

OLIVEIRA, J. F. 2015. **Estudo do fresamento de acabamento da liga de alumínio aeronáutico 7075-T6**, 115p, Dissertação-Mestrado em Engenharia de Materiais. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá – MG.

Nos últimos anos o Brasil tem feito grande investimento em pesquisa científica na área de astronomia, que vive um desenvolvimento tecnológico muito significativo, com vários projetos nacionais e internacionais. Com isto aumentou a demanda por projetos e desenvolvimento de instrumentos auxiliares utilizados nos telescópios. Esta pesquisa apresenta um estudo do fresamento de acabamento da liga de alumínio aeronáutico 7075-T6, usando o projeto de experimentos. O foco central é o resultado da rugosidade obtida através do fresamento de topo num centro de usinagem (CNC). Para os ensaios de usinagem foram utilizados dois tipos de insertos intercambiáveis, sendo um com geometria de raio normal e outro com a geometria alisadora (*Wiper*). Os fatores envolvidos foram: velocidade de corte, raio, avanço por dente, sentido de corte e um sistema de Lubri-refrigeração com jorro. A profundidade de corte e a penetração de trabalho foram mantidas constantes. O alumínio 7075 recebido foi submetido a um tratamento térmico de solubilização e envelhecimento para receber a têmpera T6. Também para atingir os objetivos será feita a caracterização da microestrutura para avaliar o processo de tratamento térmico. Os resultados e análise mostram que o tratamento obteve resposta satisfatória. O comportamento da rugosidade da peça em função dos parâmetros de corte foi analisado através dos resultados obtidos de um Planejamento Fatorial Completo. A combinação de insertos com geometria de raio normal com o inserto de geometria alisadora (*Wiper)* proporcionou-se valores baixos e uniformes de rugosidades Ra.

Palavras-chaves: Liga de alumínio 7075 T6, fresamento de acabamento, rugosidade (R_a)

ABSTRACT

OLIVEIRA, J. F. 2015. **Study of finishing and milling of the aeronautical aluminum 7075-T6 alloy**, 2015, 115p, Master-Master in Materials Engineering Federal University of Itajubá, Itajubá - MG.

In recent years, Brazil has made a great investment in scientific research on the astronomy field, which stands on a very significant technological development including several national and international projects. Thus, the demand for development projects and auxiliary instruments e used in telescopes has been increased. This Research presents Study of finishing and milling of the aeronautical aluminum 7075-T6 alloy using the Design of Experiments (DOE). The main focus is the result of the surface roughness on the and milling obtained by a machining center (CNC). It was used two types of inserts for machining tests: one had normal radius geometry, and the other, the *Wipe*r geometry. The factors involved were cutting speed, normal and Wiper radius, feed per tooth, cutting direction and a cooling system with gushing. The axial and radial depth of cut were carried out constant. The 7076 T6 aluminum alloy was subjected as supplied to a solubilization heat treatment and aging to achieve T6 temper grade. Also, to achieve the goals was made the microstructure was characterized in order to evaluate the process of heat treatment. The results of analysis, characterization of the microstructure and hardness showed that treatment achieved satisfactory response. The surface roughness behavior as a function of cutting parameters was analyzed through the results of a Full Factorial Design. The combination of normal and *Wiper* geometries inserts provided a uniform distribution and low values of roughness Ra.

Key-words: 7076 T6 aluminum alloy, finishing milling, surface roughness

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Sentido de laminação dos corpos de prova 9
Figura 2.2 - Metalografia do alumínio 7075 T6 - Orientação R - Estrutura do grão intermediário 9
Figura 2.3 - Metalografia do alumínio 7075 T6-Orientação S-Estrutura do grão uniforme e arredondada 10
Figura 2.4 - Metalografia do alumínio 7075 T6-Orientação T- Estrutura do grão alongada 10
Figura 2.5 - Diagrama de fases esquemático de uma liga metálica bi-componente apresentando as temperaturas de solubilização, têmpera e envelhecimento 12
Figura 2.6 - Diagrama de solubilização e envelhecimento - Liga de Alumínio 13
Figura 2.7 - Exemplos de fresamento vertical com fresas de topo 14
Figura 2.8 - Esquema do fresamento frontal 15
Figura 2.9 - Posicionamento da aresta de corte 17
Figura 2.10- Forças e deslocamentos no fresamento concordante 18
Figura 2.11 - Detalhe da distribuição e balanço da ferramenta-Fonte 21
Figura 2.12 -Variação do ângulo de saída do cavaco com a v_C -AL7075-T6 23
Figura 2.13 - Variação do ângulo de cisalhamento com a v_C-AL7075-T6 23
Figura 2.14 - Zonas de cisalhamento no processo de corte ortogonal 25
Figura 2.15 - Distribuição típica de temperaturas na região de corte 26
Figura 2.16 - Gráfico temperatura x velocidade de corte 27
Figura 2.17 - Porcentagem de calor na região de corte 27
Figura 2.18 - temperatura de corte ferramenta-peça para diferentes materiais 28
Figura 2.19 - Curvas de perda de dureza em função da temperatura para diferentes materiais de ferramenta 29
Figura 2.20 - Perfil da peça: Rugosidade + Ondulações 33
Figura 2.21 - Elementos de uma superfície usinada 34
Figura 2.22 - Fatores que influenciam na rugosidade 34
Figura 2.23 - Redução da rugosidade superficial com o aumento da velocidade de corte 35
Figura 2.24 - Conceito de linha média 36
Figura 2.25 - Percurso de medição de rugosidade R_a 37
Figura 2.26 - Rugosidade média R_a 38
Figura 2.27 - Diversos perfis com mesma rugosidade R_a 38

Figura 2.28 - Exemplos de gráfico dos efeitos principais 43
Figura 2.29 - Exemplo do diagrama de Pareto 44
Figura 2.30 - Regiões de rejeição e aceitação de Ho p/uma distribuição F 45
Figura 3.1 - Centro de usinagem VEKER 47
Figura 3.2 - Cabeçote com insertos para o fresamento de topo 48
Figura 3.3 - Inserto com geometria de raio normal (N) R390-11 T3 08E-NL H13A 49
Figura 3.4 - Inserto com geometria alisadora *WIPER* (W) 49
Figura 3.5 - Tarugo liga 7075 preparado com dimensões 102x202x250 mm 50
Figura 3.6 - **C**orpo de prova alumínio 7075 T6 e suas dimensões 50
Figura 3.7 - Espectrômetro de emissão ótica 51
Figura 3.8 - Forno e câmara de ensaio climático para envelhecimento 52
Figura 3.9 - Detalhes do tratamento de solubilização - têmpera e envelhecimento 53
Figura 3.10 - Durômetro Mitutoyo 54
Figura 3.11 - Ilustração da orientação do grão em relação à amostra no tarugo laminado 55
Figura 3.12 - Amostras para análise 55
Figura 3.13 - MEV - Microscópio Eletrônico de Varredura 56
Figura 3.14 - Rugosímetro portátil Mitutoyo Surftest 201 56
Figura 3.15 - Aparelho microscópio 57
Figura 3.16 - Detalhes da montagem e usinagem dos corpos de prova 60
Figura 3.17 - Acabamento com inserto com geometria de raio normal e *Wiper* 61
Figura 4.1 - Microscopia óptica da amostra do alumínio no estado recebido 62
Figura 4.2 - Microscopia óptica da amostra do alumínio no estado solubilizado-temperado 63
Figura 4.3 - Microscopia óptica da amostra do alumínio no estado envelhecido 63
Figura 4.4 - Análise no MEV - a) contraste por SE1; b) contraste por BSE, com ataque 65
Figura 4.5 - Análise no MEV/EDS a) contraste por SE1; b) Mapeamento composicional por EDS 66
Figura 4.6 - Análise no MEV, em modo BSE, de amostra envelhecida 67
Figura 4.7 - Análise no MEV/EDS a) contraste por SE1; b) Mapeamento composicional por EDS 68
Figura 4.8 - Espectro obtido por EDS de amostra envelhecida 68
Figura 4.9 - Comparativo entre os parâmetros na rugosidade (R_a) 71
Figura 4.10 - Características do visual das superfícies fresadas com insertos normais (N) 72
Figura 4.11 - Características do visual das superfícies fresadas com insertos normais e Wiper (NW) 73

Figura 4.12- Comparativo entre os ensaios com insertos normais e com insertos normais e *Wiper* 74
Figura 4.13 - Gráfico de Pareto dos efeitos principais e interações para R_a [μm] 76
Figura 4.14 - Gráficos dos efeitos principais para a resposta R_a [μm] 77
Figura 4.15 - Gráfico de efeito das interações para R_a [μm] 78
Figura 4.16 - Análise de resíduos para R_a 79
Figura 4.17 - Gráfico de Pareto dos efeitos principais e interações para Ra [μm] 81
Figura 4.18 - Análise de resíduos para R_a 82
Figura 4.19 - Boxplots para comparação da dureza entre blocos 1 e bloco 2 83
Figura 4.20 - Gráfico de Pareto dos efeitos principais e interações para R_a [μm] 87
Figura 4.21 - Gráficos dos efeitos principais para a resposta R_a [μm] 87
Figura 4.22 - Gráfico de efeito das interações para R_a [μm] 88

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Propriedades físicas do alumínio, cobre, aço ABNT 371 e do plástico 5
Tabela 2.2 - Classificação do alumínio e suas ligas 6
Tabela 2.3 - Propriedades químicas do alumínio 7075 7
Tabela 2.4 - Propriedades físicas do alumínio 7075 -T6 7
Tabela 2.5 - Propriedades mecânicas do alumínio 7075 -T6 7
Tabela 2.6 - Fases intermetálicas da liga Al 7075 7
Tabela 2.7 - Aplicação das fresas de acordo com o tipo de passes 20
Tabela 2.8 - Efeito médio das variáveis nas rugosidades R_a e R_z. 24
Tabela 2.9 - Efeito médio quando se combina duas variáveis nas rugosidades R_a e R_z 24
Tabela 2.10 - Comprimento da amostragem *cut-off* 37
Tabela 2.11 - Características das classes e desvios da rugosidade R_a 39
Tabela 2.12 - Simbologia de triângulos, as classes e os valores de R_a (rugosidade média) ... 40
Tabela 2.13 - Características fundamentais das principais técnicas do projeto e análise de experimentos 42
Tabela 3.1 - Planejamento Fatorial Completo 2^4 58
Tabela 3.2 - Planejamento Fatorial Completo 2^4 disposto aleatoriamente 59
Tabela 4.1 - Composição química do material 7075 no estado recebido (% em peso) 62
Tabela 4.2 - Característica da dureza da liga 7075 no estado recebido, solubilizado e envelhecido artificialmente 64
Tabela 4.3 - Fração mássica, em análise por EDS, de elementos químicos da amostra envelhecida ..... .69
Tabela 4.4 - Descriminação dos elementos 69
Tabela 4.5 - Rugosidade R_a e R_z para as diversas corridas experimentais 70
Tabela 4.6 - Análise da variância para rugosidade média (Ra) – Modelo completo 75
Tabela 4.7 - Análise da variância para rugosidade média (Ra) – comparação 2 blocos - Réplicas 80
Tabela 4.8 - Teste T-Emparelhado-Comparação 2 blocos 82
Tabela 4.9 - Planejamento Fatorial Completo 2^3 83
Tabela 4.10 - Planejamento Fatorial Completo 2^3 disposto aleatoriamente 84
Tabela 4.11 - Análise da Variância para rugosidade média (Ra) – Modelo completo 85
Tabela 4.12 - Análise da Variância para rugosidade média (Ra) – Modelo reduzido 85
Tabela 4.13 - Comparação entre os ajustes completos e modelos reduzidos 86

LISTA

Símbolos/Abreviaturas/Siglas		Unidade
ABAL	Associação Brasileira do Alumínio	[-]
ALCOA	Companhia de Alumínio da América	[-]
ae	Penetração de trabalho	[mm]
ap	Profundidade de corte	[mm]
APC	Aresta Postiça de Corte	[-]
BSE	Elétrons Retroespalhados	[-]
C	Sentido de Corte Concordante	[-]
CCD	Dispositivo de Carga Acoplada	[-]
C/D	Sentido de Corte Concordante e Discordante	[-]
D	Sentido de Corte Discordante	[-]
CFC	Cúbica de Face Centrada	[-]
CIMM	Centro de Informação Metal Mecânica	[-]
CNC	Comando Numérico Computadorizado	[-]
CST	Corrosão Sob Tensão	[-]
Cut-off	Comprimento de amostragem	[mm]
EDS	Espectroscopia de Energia Dispersiva	[-]
f	Avanço por revolução	[mm/rev]
fz	Avanço por dente	[mm/dente]
HSS	Ferramentas de Aço Rápido	[-]
IMBEL	Indústria de Material Bélico do Brasil	[-]
L/D	Comprimento/ Diâmetro	[mm]
LM	Percurso de medição de rugosidade	[µm]
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura	[-]
N	Inserto com geometria de raio normal	[-]
N/W	Combinação de 2 insertos com geometria de raio normal + 1 inserto com geometria alisadora *WIPER*	[-]
OPU	Solução de Sílica Coloidal	[-]
PCBN	Nitreto de Boro Cúbico Policristalino	[-]
PCD	Diamante Policristalino	[-]

Ra	Rugosidade média	[µm]
RPM	Rotações Por Minuto	[rot/min]
R_Sq (adj)	Coeficiente de determinação ajustado	[-]
Rz	Rugosidade de profundidade média	[µm]
R_t	Rugosidade total	[µm]
SE	Elétrons Secundários do tipo I	[-]
Solvus	Linha limite de solubilidade no estado sólido	[-]
T6	Tratamento de solubilização e precipitação artificialmente	[-]
T7	Tratamento de solubilização e estabilização por tratamentos de superenvelhecimento	[-]
Vc	Velocidade de corte	[m/min]
Vf	Velocidade de avanço	[mm/min]
z	Número de dentes	[-]
WIPER	Tipo de inserto alisadora	[-]

SUMÁRIO

Capítulo1 1

INTRODUÇÃO 1

1.1 Objetivo 2

1.2 Estrutura da Dissertação 2

Capítulo 2 4

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 4

2.1 Alumínio e a Liga Aeronáutica 7075 T6 4

2.1.1 Classificação e aplicações do alumínio conforme suas propriedades 5

2.1.2 Nomenclatura das ligas conformadas 5

2.1.3 Série 7 XXX 6

2.1.4 A Liga 7075 6

2.1.5 Fases intermetálicas 7

2.1.6 Estrutura do alumínio 7075 T6 7

2.1.7 Tratamentos térmicos para ligas de alumínio 9

2.1.8 Nomenclatura dos estados de endurecimento 11

2.1.9 Solubilização 11

2.1.10 Têmpera 12

2.1.11 Precipitação 13

2.2 Processo de Fresamento 14

2.2.1 Escolha da fresa para operações de superfícies planas 15

2.2.2 Escolha do diâmetro da fresa 15

2.2.3 Número de dentes 18

2.2.4 Fresamento da liga de alumínio 22

2.3 Geração e Distribuição de Calor no Processo de Fresamento de Topo 25

2.3.1 Fontes de geração de calor em usinagem 25

2.3.2 Distribuição do calor gerado no processo de corte 26

2.4 Fluidos de Corte 28

2.4.1 Funções dos fluidos de corte 29

2.4.2 Os fluidos de corte como refrigerante 29

2.4.3 Os fluidos de corte como lubrificante 30

2.4.4 Classificação dos fluidos de corte 31

2.4.5 Óleos integrais 31
2.4.6 Fluidos miscíveis em água 31
2.4.7 Emulsões 32
2.5 Rugosidade 32
2.5.1 Fatores influentes na rugosidade 34
2.5.2 Medição da rugosidade 36
2.5.3 Parâmetros de rugosidade média (R_a) 37
2.5.4 Indicação da rugosidade R_a pelos números de classe NBR 8404/1984 39
2.5.5 Simbologia, equivalência e processos de usinagem 39
2.6 Projeto e Análise de Experimentos (DOE) 40
2.6.1 Planejamento Fatorial Completo 43
2.6.2 Diagrama de Pareto 44
2.6.3 Análise de Variância (ANOVA) 45

Capítulo 3 47

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL 47

3.1 Máquina CNC 47
3.2 Ferramenta de Corte 48
3.3 Fluido de Corte 49
3.4 Material da Peça 50
3.5 Análise Química 51
3.6 Tratamento Térmico do Material 51
3.7 Ensaio de Dureza 53
3.8 Metalografia Microscópica/Preparação do Material 54
3.9 Análise no Microscópio Eletrônico (MEV) 55
3.10 Instrumentos de Medição 56
3.11 Análise Microscópica do Aspecto Visual 57
3.12 Câmera Digital 58
3.13 Planejamentos Experimentais 58
3.13.1 Definição dos Parâmetros 58
3.13.2 Procedimentos para realização dos ensaios de usinagem 60

Capítulo 4 62

RESULTADOS E DISCUSSÕES 62

4.1 Caracterizações das Amostras do Material (recebido, solubilizado e envelhecido) 64
4.1.1 Análise no MEV/EDS da liga7075 Conforme Recebido 63
4.1.2 Análise no MEV/EDS da liga 7075 Envelhecida 66
4.2 Resultados Experimentais de Rugosidades 70
4.2.1 Análise Aspecto Visual da Superfície Usinada 71
4.3 Análise de Variância 74
4.3.1 Análise Fatorial 76
4.3.2 Análise dos Resíduos 79
4.4 Análise da Variância (ANOVA)-Comparação dos Dois Blocos-Réplicas 79
4.5 Teste T - Emparelhado para os 2 Blocos 82
4.6 Planejamentos Experimental 2^3 83
4.6.1 Análise Fatorial 86

Capítulo 5 89
CONCLUSÕES 89

Capítulo 6 90
SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS 90

Capítulo 7 91
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 91

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Geralmente, o alumínio está associado a outros metais, como o zinco, cobre, magnésio, entre outros, resultando em determinadas ligas que oferecem inúmeras vantagens sobre o alumínio puro, pois tem suas propriedades mecânicas melhoradas, melhor resistência à corrosão, etc. (ABAL, 2007). O alumínio e suas ligas, além de estarem entre os metais mais utilizados, estão em constante desenvolvimento e também entre os mais versáteis em termo de processo de fabricação para as mais diversas aplicações. Outra qualidade a ser destacada é o seu peso, que pode ser reduzido em até 60% em comparação a outros metais, (CAVALCANTE, 2010).

Uma das principais ligas da atualidade é a Al 7075. Esta liga possui a maior resistência dentre todas as ligas de alumínio. A têmpera T6 apresenta resistência típica de 572 MPa, a qual é maior do que muitos aços doces. Devido a sua alta resistência é utilizada em estruturas sob altas tensões. As aplicações incluem acessórios aeronáuticos, aeroespaciais e de defesa, como engrenagens e eixos, componentes de mísseis, componentes de válvula reguladora de pressão, chaves e vários outros componentes (ALCOA, 2012). O LNA - Laboratório Nacional de Astrofísica vinculado ao Ministério da Ciência e Tecnologia dedica-se ao projeto e fabricação de instrumentos auxiliares para telescópios nacionais e internacionais, fazendo uso intensivo da liga 7075 T6.

O alumínio é um bom exemplo de material que possui excelente usinabilidade quando levamos em conta a vida da ferramenta, potência, força e temperatura de corte, entre outros. Tendo nos processos de usinagem o objetivo de obter peças com qualidade dimensional e superficial, sendo muito importante que todos os recursos de fabricação estejam disponíveis, os materiais da peça devem estar sem defeitos de fundição ou de qualquer processamento, a ferramenta deve apresentar uma geometria adequada, e a máquina deva ser potente, rígida e precisa, para atender a qualidade solicitada nos componentes (MACHADO et al., 2009).

O alumínio pode ser usinado a seco, entretanto as ligas conformadas com alto teor de cobre necessitam de fluido de corte com alto poder de refrigeração. O alumínio é um material extremamente fácil de deformar, possui uma estrutura cúbica de face centrada (CFC), seu módulo de elasticidade é baixo e sua ductilidade é alta, tendo a predisposição de formar aresta postiça de corte (APC) (WEINGAERTNER e SCHROETER, 1991).

Na fabricação de peças em largas escalas, especialmente no processo de usinagem por fresamento, tem-se uma preocupação de encontrar novos procedimentos visando resultados

com redução de tempos/custos de fabricação e melhor qualidade final da peça. Para isso recorrem–se às mudanças de parâmetros de corte e geometria da ferramenta para atender a essas necessidades. Essas modificações quando aplicadas nos processos de fresamento precisam atender as especificações de tolerâncias e acabamento da peça (WRUBLAK et al., 2008). Atualmente, o fresamento de topo é um dos processos mais empregados nas indústrias aeronáuticas e automobilística, pois possui alta taxa de remoção de material, produz superfícies de qualidade e precisão dimensional, além da alta flexibilidade das máquinas onde a peça pode ser movimentada em três ou mais eixos lineares ou giratórios (SANDVIK-COROMANT, 2011).

Neste contexto, esta pesquisa pretende estudar o fresamento de uma liga de alumínio aeronáutico com uma fresa de topo com ângulo de posição de 90 graus usando insertos com raio ponta normal e alisador *WIPER*. A técnica de projetos de experimentos (DOE) será utilizada como ferramenta para investigar a influência dos parâmetros de corte na rugosidade da peça.

1.1 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo principal verificar a influência das condições de corte no processo de fresamento de acabamento da liga de alumínio 7075-T6, onde será utilizada uma combinação dos parâmetros velocidade de corte (v_c), avanço por dente (f_z), sentido de corte e raio, com um sistema de lubri-refrigeração por jorro.

Para se alcançar os objetivos também será feita a caracterização da microestrutura, dureza para avaliar o processo de tratamento térmico e análise do aspecto visual da superfície da peça de Al 7075. O comportamento da rugosidade da peça em função dos parâmetros de corte será analisado com auxílio do software estatístico Minitab através dos resultados obtidos de um planejamento fatorial completo.

1.2 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação possui a seguinte estrutura:

O Capítulo 1 – Apresenta um resumo das considerações iniciais, introdução, justificativa e objetivo referente ao tema principal da dissertação.

O Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica fornece informações gerais dos estudos de diversos autores que envolvem o processo de usinagem por fresamento de topo, usinabilidade

de materiais, destacando neste trabalho o alumínio, o seu tratamento térmico e a rugosidade final que é o objetivo central desse estudo.

O Capítulo 3 – Procedimento experimental, é uma breve descrição das ferramentas estatísticas e contem todas as informações disponíveis para o planejamento, execução, coletas dos dados, como também a descrição das técnicas empregadas.

O Capítulo 4 – Apresenta a análise dos resultados coletados nos ensaios da experimentação, interpretando e gerando comentários para a formação de uma conclusão final do trabalho efetuado.

O Capítulo 5 – Apresenta as principais conclusões deste trabalho.

Finalmente o Capítulo 6 – Apresenta as sugestões para trabalhos futuros e sugere alguns estudos baseado nas conclusões apresentadas desta dissertação.

Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Alumínio e a Liga Aeronáutica 7075 T6

A produção de alumínio e as suas aplicações têm aumentado visivelmente. É muito utilizado em vários ramos da indústria, como exemplo no ramo aeronáutico, automobilístico, naval e alimentício. A sua produção comercial já data de mais ou menos 150 anos e encontra-se em oito macros regiões do planeta. O Brasil além de fazer parte deste grupo, possui a terceira maior jazida de bauxita, é o quinto maior produtor de alumina, o sexto em alumínio primário e está na quinta posição na exportação do alumínio primário, comercializando o metal com os grandes produtores mundiais (ABAL, 2007).

O alumínio é um metal não ferroso, que se caracteriza pela razão resistência-peso e seu ponto de fusão ocorre em torno de 660ºC. É muito utilizado para a produção de peças fundidas devido as seguintes características: sua densidade é aproximadamente 2,70 g/cm^3, tem boa resistência à corrosão, condutividade térmica e elétrica (SHIGLEY et al., 2005).

A Associação Brasileira do Alumínio destaca algumas das principais características do alumínio, por exemplo: leve e com baixa densidade, relativamente fácil de soldar, alta plasticidade, excelente relação resistência/peso, excelente usinabilidade, alta resistência à corrosão, bom condutor térmico, não ferromagnético, não tóxico, alta elasticidade e bom refletor.

Além das características citadas acima o alumínio possui outras importantes vantagens para o seu uso, por exemplo, resistência progressiva a oxidação, pois os átomos em sua superfície associam-se ao oxigênio e formam uma camada protetiva de óxido (alumina). Quando submetido a tratamentos ou combinados a outros elementos de liga, torna-se mais resistente ao meio agressivo. É utilizado em peças decorativas devido à sua superfície, pois quando é preparada pode ficar brilhante e reflexiva.

Na Tabela 2.1 um quadro comparativo para demonstrar as características quando comparadas a outros materiais.

Tabela 2.1-Propriedades físicas do alumínio, cobre, aço ABNT 371 e do Plástico.

Propriedades	Alumínio	Cobre	Aço 371	Plástico
Resistência/Tensão de Ruptura ($N/mm^{2)}$	250	250	40	50
Ductilidade/Alongamento (%)	15	25	20	25
Elasticidade/Módulo de Young (MPa)	70.000	125.000	210.000	3.000
Densidade (g/cm^3)	2.70	8.90	7.80	1.40
Ponto de Fusão (ºC)	660	1080	1500	80
Condutividade Elétrica ($m/Ohm\text{-}mm^2$)	29	55	7	-
Condutividade Térmica (W/m ºc)	200	400	76	0,15
Coeficiente expansão Linear ($x10^{-6}$/ºc)	24	17	12	60-100
Não magnético	Sim	Sim	Não	Sim
Soldável	Sim	Sim	Sim	Sim

Fonte: Adaptado de Suarez, 2008

2.1.1 Classificação e aplicações do alumínio conforme suas propriedades

Ligas **Aplicações**

1XXX Indústrias químicas e elétricas.

2XXX Automotiva - graças a sua elevada resistência mecânica.

3XXX Aplicações arquitetônicas e produtos de uso geral.

4XXX Varetas ou eletrodos de solda e chapas para brasagem.

5XXX Produtos expostos à atmosfera marinha como cascos de barcos.

6XXX Produtos extrudados de uso arquitetônico.

7XXX Componentes estruturais de aeronaves e outras aplicações que necessitam de elevados requisitos de resistência. Esta liga é a que possui a maior resistência mecânica entre as ligas de alumínio (DALMOLIM, 2010).

2.1.2 Nomenclatura das ligas conformadas

A estrutura das ligas de alumínio possui em sua composição, além do metal base, vários outros elementos considerados componentes, que formam a liga ou impurezas. Os principais elementos que determinam as características da liga são: cobre, silício, magnésio,

zinco e manganês. Outros elementos como cromo, níquel, vanádio, boro, prata, chumbo, bismuto, zircônio e lítio são adicionados à liga básica e concede propriedades especiais, por exemplo: resistência à corrosão sob tensão, controle de recristalização e usinabilidade. Além desses elementos, existem as impurezas ferro, titânio, sódio, estrôncio e antimônio, os quais fazem parte da liga, mas devem ter a sua participação controlada. A presença de um elemento em uma determinada liga pode ser benéfica ou nociva (WEINGAERTNER e SCHROETER, 1991). A Tabela 2.2 indica a classificação do alumínio normatizada pela Associação Brasileira do Alumínio.

Tabela 2.2-Classificação do alumínio e suas ligas

Designação	**Componentes majoritário da liga**
1XXX	Nenhum
2XXX	Cobre
3XXX	Manganês
4XXX	Silício
5XXX	Magnésio
6XXX	Magnésio e silício
7XXX	Zinco e magnésio
8XXX	Outros

2.1.3 Série 7 XXX

O elemento principal da liga é o zinco, adicionado na proporção de 1 a 8 %, mas quando se acrescenta magnésio, obtém-se uma liga termicamente tratável e com resistência mecânica elevada e tenacidade. Frequentemente, cobre e cromo são adicionados em pequenas quantidades. A composição básica das ligas da série 7XXX são alumínio e zinco. As ligas de alumínio são desenvolvidas com a finalidade de aprimorar algumas características mecânicas e para aplicações específicas (ABAL, 2009).

2.1.4 A Liga 7075

A liga 7075, a princípio, foi empregada em produtos com espessuras finas-laminadas ou extrudadas, mesmo com taxas de resfriamento elevadas, tensões residuais não eram encontradas e *CST*- C*orrosão sob tensão* não era problema (ASTM / HANDBOOK, 2003). Mas o problema de casos de *CST* surgiram com frequência quando começou a fabricação de peças com dimensões maiores, por exemplo, peças com grandes forjamentos, extrusões que eram sujeitas a tensões residuais ou em cargas. Essas tensões induzidas em peças da liga de alumínio, quando sujeito a tratamentos térmicos podem produzir *CST*. O problema surge por causa de altas tensões, sendo assim necessário o tratamento térmico T6 para alívio de tensões

e diminuição dos problemas de *CST* associado a tensões de resfriamento em peças com tratamento a quente (VOGT, 1998).

Entre todas as ligas de alumínio, a 7075 é a que possui maior resistência mecânica. A resistência típica da têmpera T6 está entre 572 Mpa, o que é muito além do que alguns aços doces. Por isso é muito utilizada em estruturas sob altas tensões. Sua aplicação envolve várias áreas, por exemplo: engrenagens e eixos, componentes aeronáuticos, componentes de mísseis e etc. Nas Tabelas 2.3, 2.4 e 2.5 estão algumas informações principais da liga de Alumínio 7075 e 7075 T6.

Tabela 2.3-Propriedades químicas do alumínio 7075

Composição química %								
Mg	Fe	Cu	Mn	Al	Cr	Zn	Ti	Outros
2,10-2,90	0,50	1,20-2,00	0,30	87,10-91,40	0,18-0,28	5,10-6,10	0,20	0,05-0,15

Fonte: (ALCOA, 2010)

Tabela 2.4-Propriedades físicas do alumínio 7075 -T6

Propriedades físicas	
Densidade	2,81 g/Cm^3
Módulo de elasticidade	73.000 Mpa
Ponto de fusão	475-640ºC

Fonte: (ALCOA, 2010)

Tabela 2.5-Propriedades mecânicas do alumínio 7075 -T6

Propriedades mecânicas	
Limite de resistência	559 Mpa
Limite de escoamento	495 Mpa
Alongamento	9 a 10 %
Dureza	150 Brinell

Fonte: (ALCOA, 2010)

2.1.5 Fases intermetálicas

Para a formação da liga Al 7075 são adicionados os elementos de liga ao alumínio puro, porém, eles não se dissolvem completamente na matriz em temperatura ambiente, mas formam novas estruturas cristalinas que apresentam uma relação constante entre os números de átomos dos componentes e também características próprias, como uma estrutura cristalina diferente da matriz (FELTRIN, 2004). Estas estruturas cristalinas podem ser denominadas fases intermediárias ou intermetálicas. Suas características podem ser verificadas na Tabela 2.6

Tabela 2.6 - Fases intermetálicas da liga Al 7075

Fase intermetálica	Tipo de estrutura	Densidade (g/cm3)	Temperatura de fusão (°C)
CuMgAl	Hex.	4,13	550
CuMg4Al6	CCC	2,69	475
Cu6Mg2Al5	Cúbico	4,90	710
MgZn2	Hex.	5,20	590
Mg2Zn11	Cúbico	6,12	385
Mg3Zn3Al2	CCC	3,78	530

Fonte: (FELTRIN,2004)

As fases intermetálicas são classificadas em três tipos (RAGHAVAN *et al.*,1985):

- **Constituintes** – Consistem em compostos lnsolúveis ou parcialmente solúveis mesmo em temperaturas mais altas, são de dimensões maiores que os demais e formam-se principalmente como resultado de interações de elementos de liga com impurezas, como Fe e Si;

- **Dispersóides** – Contém tipicamente elementos como Mg, Cu, Zn e Cr, são menores que as fases constituintes, adicionados para o endurecimento do material ou retardamento da solidificação;

- **Precipitados** – formam-se finos e dispersos durante o envelhecimento do metal e são solúveis em altas temperaturas.

2.1.6 Estrutura do alumínio 7075 T6

Na Figura 2.1, MATTOS Jr. (2010) em sua pesquisa mostra os três sentidos de orientação e elas apresentam alterações significativas, com estrutura diferenciada para cada sentido de orientação e cita que os resultados estão de acordo com (ASM/HANDBOOK, 2003).

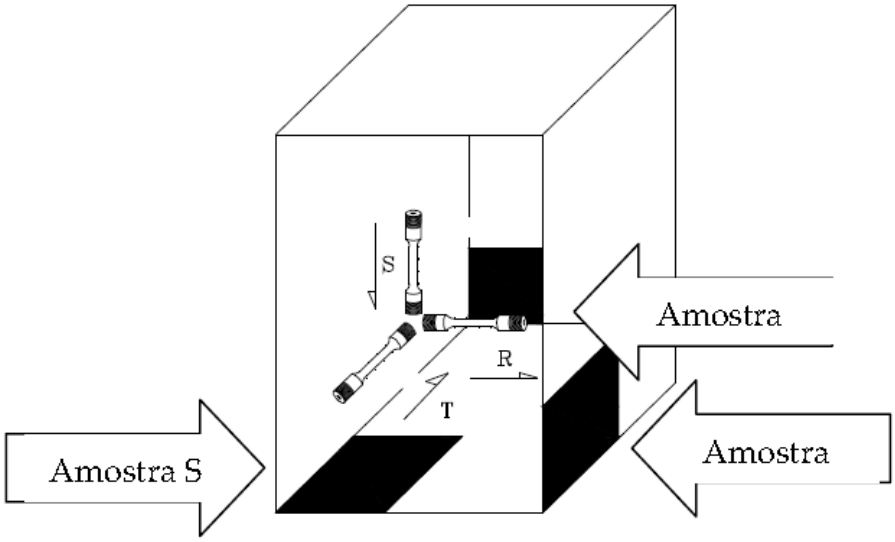


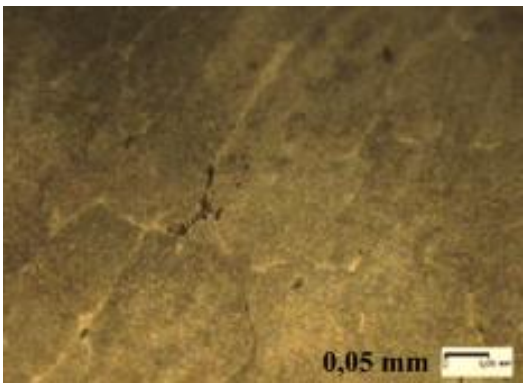
Figura 2.1-Sentido de laminação dos corpos de prova.
Fonte: Dados de pesquisa/PUCMINAS

O alumínio possui estrutura granular, conforme mostra Figuras 2.2, 2.3 e 2.4 e apresenta formatos de grãos alterados em função do tipo de laminação.

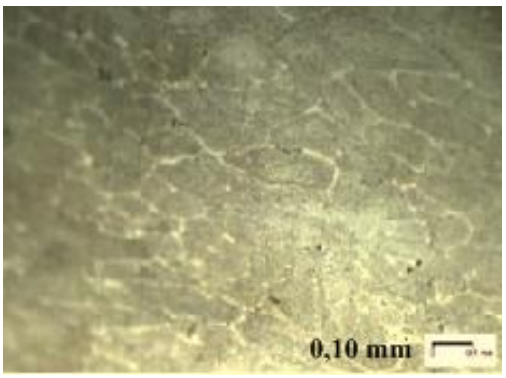
A Figura 2.2 (a) na ampliação de 20x e a Figura 2.2 (b) na ampliação de 10x, mostram os grãos intermediários com a mesma microestrutura do material no sentido de orientação R.

A Figura 2.3 (a), na ampliação de 20x e a Figura 2.3 (b) na ampliação de 10x, os grãos apresentam os formatos mais homogêneos e arredondados com a mesma microestrutura do material no sentido de orientação S.

A Figura 2.4 (a) na ampliação de 20x e a Figura 2.4 (b) na ampliação de 10x, mostram os grãos com formatos mais alongados com a mesma microestrutura do material no sentido de orientação T.

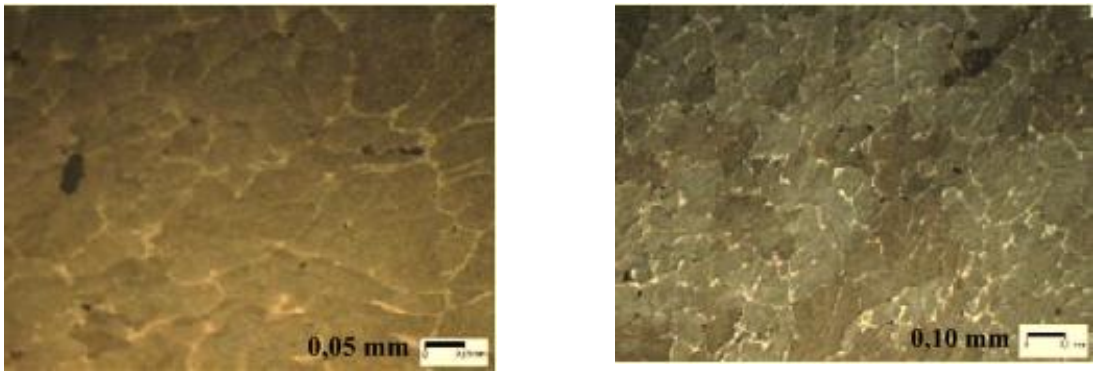


a) 20x



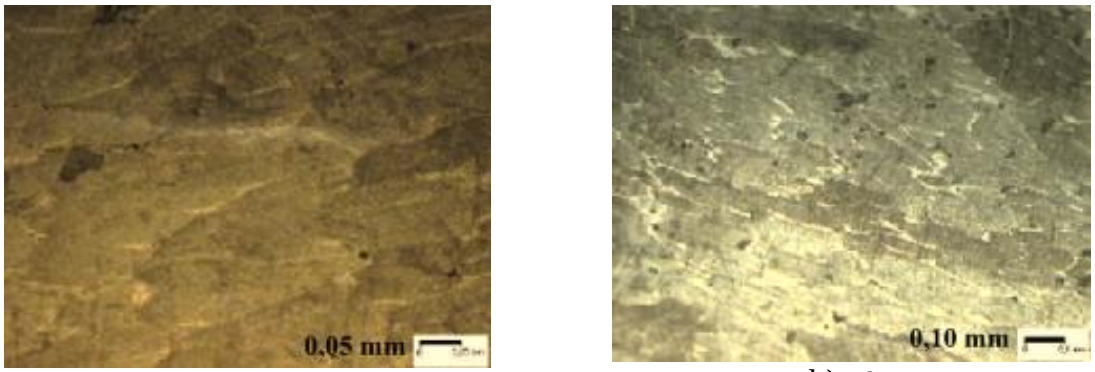
b) 10x

Figura 2.2-Metalografia do Alumínio 7075 T6-Orientação R-Estrutura do grão intermediário.



a) 20x b) 10x

Figura 2.3-Metalografia do alumínio 7075 T6-Orientação S-Estrutura do grão uniforme e arredondada.



a) 20x b) 10x

Figura 2.4-Metalografia do alumínio 7075 T6-Orientação T-Estrutura do grão alongada.
Fonte: MATTOS Jr, (2010)

2.1.7 Tratamentos térmicos para ligas de alumínio

Resumidamente, o tratamento térmico em metais é aquecer e resfriar o material através de situações controladas, com o objetivo de modificar sua microestrutura, resultando também na modificação de suas propriedades, seja ela mecânica, química ou alívio de tensões (ASM INTERNATIONAL, 1991b).

Conforme ASM INTERNATIONAL (1991b), para melhorar as propriedades da liga 7075 existem os tratamentos térmicos de classe: Têmpera T6 e T7 e devem obedecer a três fases para obtê-los.

- Solubilização-*dissolução das fases solúveis;*
- Esfriamento brusco ou têmpera-*obtenção de solução supersaturada*;
- Envelhecimento ou precipitação-*precipitação de soluto pela elevação da temperatura.*

2.1.8 Nomenclatura dos estados de endurecimento

As ligas com sufixo T são relacionadas a materiais que passaram por tratamentos térmicos para que sua resistência fosse melhorada. A nomenclatura T6 refere-se a produtos solubilizados e envelhecidos artificialmente (ABAL, 2009).

T – tratado termicamente

As ligas com tratamento **T** referem-se a produtos que sofreram tratamentos térmicos visando o aumento da resistência. Os tratamentos térmicos têm por objetivo remover ou reduzir as segregações, produzir estruturas estáveis e controlar certas características metalúrgicas tais como: propriedades mecânicas, tamanho de grão, estampabilidade, etc. (ASTM/HANDBOOK, 2003).

Coutinho (1998), explica resumidamente o tratamento térmico de solubilização – têmpera e envelhecimento. Inicialmente o metal é aquecido com temperatura controlada até próximo de 500ºC, esta temperatura depende do tipo de liga. Ocorre uma dissolução dos elementos de liga na solução (*tratamento de solução).* Após o material ter atingido a temperatura especificada, é feito um resfriamento brusco, normalmente em água, pois isto evita que os constituintes se precipitem. Este estado é instável e progressivamente eles se precipitam de maneira extremamente fina (*é visível somente com a utilização de microscópios potentes)*. Através do envelhecimento seja natural ou artificial é que se consegue atingir o máximo efeito de dureza. Esse envelhecimento pode ser natural (*espontâneo, após alguns dias*) ou artificial (*após aquecer o metal por algumas horas a cerca de 175ºC).*

2.1.9 Solubilização

A solubilização é a primeira etapa do tratamento térmico T6 ou T7 e tem como objetivo solubilizar a fase endurecedora e produzir uma solução sólida, mantendo a liga em uma condição metaestável. Isto é conseguido mantendo a temperatura do metal elevada e por um tempo prolongado até que a maior parte dos solutos se dissolvam e resulte em uma solução sólida homogênea ou quase homogênea (ASM INTERNATIONAL, 1991b).

A Figura 2.5, ilustra muito bem um diagrama de equilíbrio fases de uma liga metálica composta por dois metais, onde podemos supor que a linha C represente a liga em tratamento e as temperaturas T2 e T3 (*baixas temperaturas*) e T1(*temperatura de solubilização e acima da linha solvus*). Em T2 e T3 temos duas fases que são distintas (*α e β*). Se a temperatura for elevada até T1 não teremos a fase β, ela está totalmente dissolvida e não temos uma fase

líquida, pois T1 está abaixo da linha sólida e respectivamente uma solução sólida homogênea da liga.

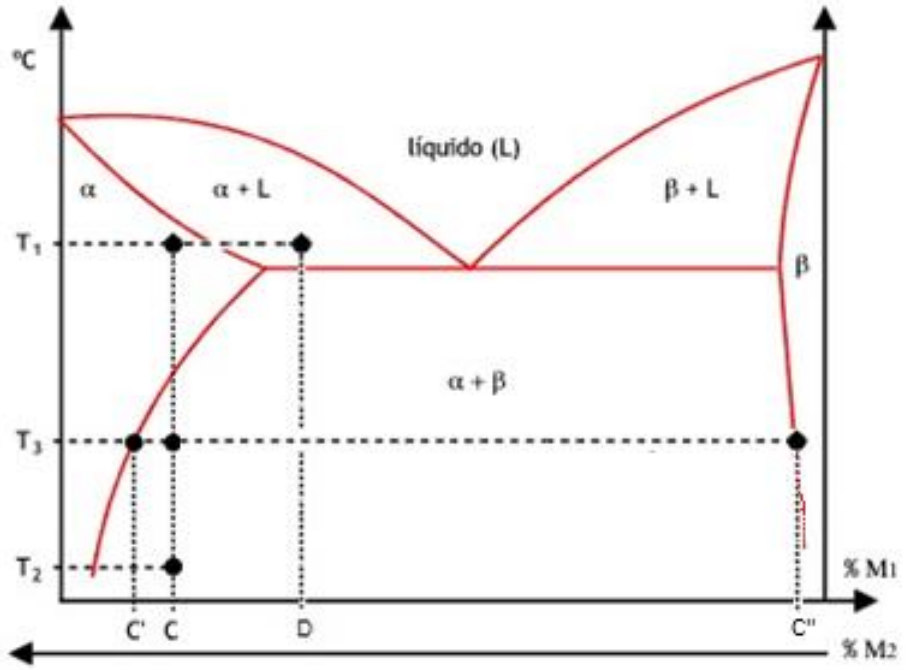


Figura 2.5-Diagrama de fases esquemático de uma liga metálica bi-componente, apresentando as temperaturas de solubilização-tempera e envelhecimento. Adaptado: (**http://www.mspc.eng.br/ciemat/metnfer110.shtml).** Sem autor definido. Acesso em 08 de Novembro de 2013.

2.1.10 Têmpera

Conforme a Figura 2.5 do diagrama de fases se houver um resfriamento natural do material nas temperaturas T1 e T2, a fase β se precipitará tornando a solução heterogênea. Porém se submetermos o material a um resfriamento brusco em água após a solubilização, isto impedirá a difusão de ocorrer, evitando a precipitação e produzindo uma solução supersaturada, homogênea e metaestável (HATCH, 1984).

Neste processo a taxa de resfriamento é muito importante, pois quanto maior, melhor será o resultado da têmpera. A liga 7075 necessita de altas taxas de resfriamento, no mínimo 300ºC/s para que esteja em condições de passar pelo envelhecimento. Para se conseguir esta taxa, as indústrias utilizam o resfriamento em água com temperatura ambiente, porém o tempo de retirada do material do forno e ser submerso em água não deverá exceder 15 segundos (ASM INTERNATIONAL, 1991b). Após estas duas etapas o material estará apropriado para processos de conformação mecânica devido à ausência de precipitados (HATCH, 1984).

2.1.11 Precipitação

O envelhecimento ou precipitação é uma etapa do tratamento térmico onde pequenas partículas de segunda fase se formam uniformemente na matriz e nos contornos de grão. O seu objetivo é a precipitação sob controle da fase endurecedora na matriz antecipadamente solubilizada. Fatores como, temperatura e tempo, tem participação determinante na movimentação dos átomos de cobre que tendem a formar a fase. O envelhecimento em ligas de alumínio é efetuado em temperaturas que aproximam 280 ºC (*no espaço* $\alpha + \theta$), com um intervalo de tempo estabelecido. A combinação entre o tempo e a temperatura é que estipula as características da dispersão da fase θ, conforma a Figura 2.6 (CALLISTER, 2005).

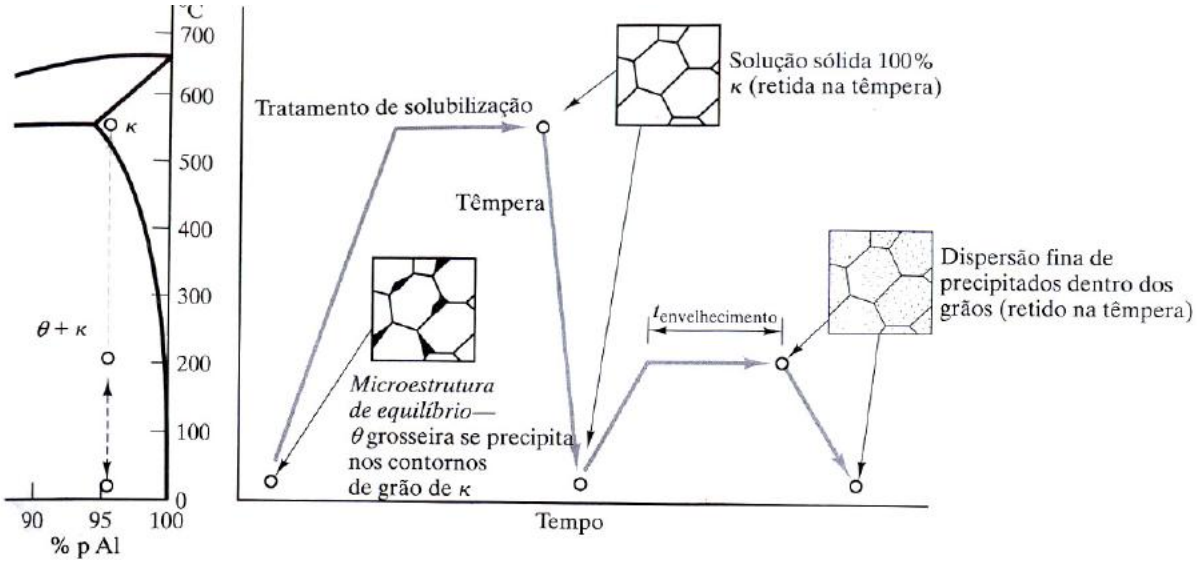


Figura 2.6-Diagrama de solubilização e envelhecimento - Liga de alumínio.

Fonte: CALLISTER (2005).

A precipitação da liga 7075 após a solubilização e têmpera é lenta à temperatura ambiente. Um recurso adequado para melhorar a mobilidade dos átomos de soluto e consequentemente a taxa de precipitação, é elevar a temperatura do material acima da temperatura ambiente, mas abaixo da temperatura de solubilização. Este recurso é chamado de envelhecimento artificial. Concluindo, o tratamento T6 que é feito na liga 7075 busca produzir elevação das propriedades mecânicas, perto da máxima. A temperatura de precipitação deverá estar em torno de 120ºC, por 24 horas (ASM INTERNATIONAL, 1991b).

O objetivo do endurecimento por precipitação é solubilizar fases intermetálicas em altas temperaturas e tempo determinado, precipitando-as frente a um resfriamento brusco e

efetuar o envelhecimento em temperaturas baixas e também com tempo determinado. Para que o tratamento seja aplicado é necessário que estas fases intermetálicas sejam solúveis em temperaturas elevadas, mas que diminuam a sua solubilidade com o decréscimo da temperatura. Por isso, há um limite de quantidades de ligas com endurecimento por precipitação (DIETER, 1981). A liga 7075 é entre outras que obedece estas características (ASM INTERNATIONAL, 1991a).

2.2 Processo de Fresamento

O fresamento apesar da sua complexidade é um dos processos de usinagem mais utilizado nas indústrias, pois possui alta taxa de remoção de material e produção de formas com boa precisão dimensional e geométrica. É empregado na fabricação de superfícies planas, contornos, ranhuras e cavidades, (MARCELINO et al., 2004; DINIZ et al., 2014). A Figura 2.7 mostra algumas operações de usinagem por fresamento de topo.

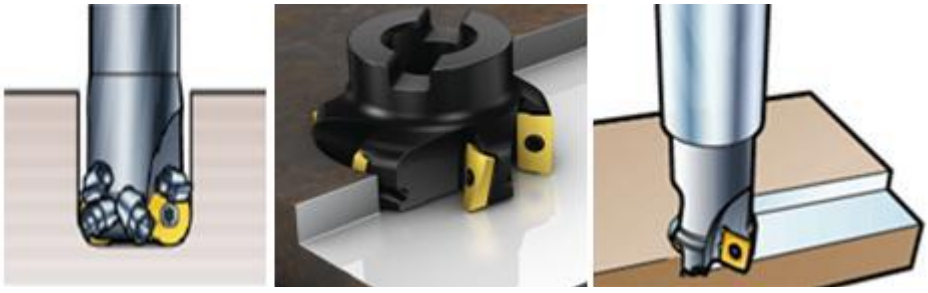


Figura 2.7–Exemplos de fresamento vertical com fresas de topo.
Fonte: Sandvik (2011).

Segundo Diniz et al. (2014), o processo de fresamento caracteriza-se principalmente pelos seguintes fatores:

• A ferramenta usada no processo, chamada de fresa, é multicortante, sendo provida de arestas cortantes dispostas simetricamente ao redor de um eixo.
• O movimento de corte é proporcionado pela rotação da fresa ao redor do seu eixo, fazendo com que cada uma das arestas cortantes retire uma porção de material.
• O movimento de avanço é geralmente feito pela própria peça em usinagem, que está fixada na mesa da máquina, o qual obriga a peça a passar sob a ferramenta em rotação, o que lhe dá a forma e as dimensões desejadas.

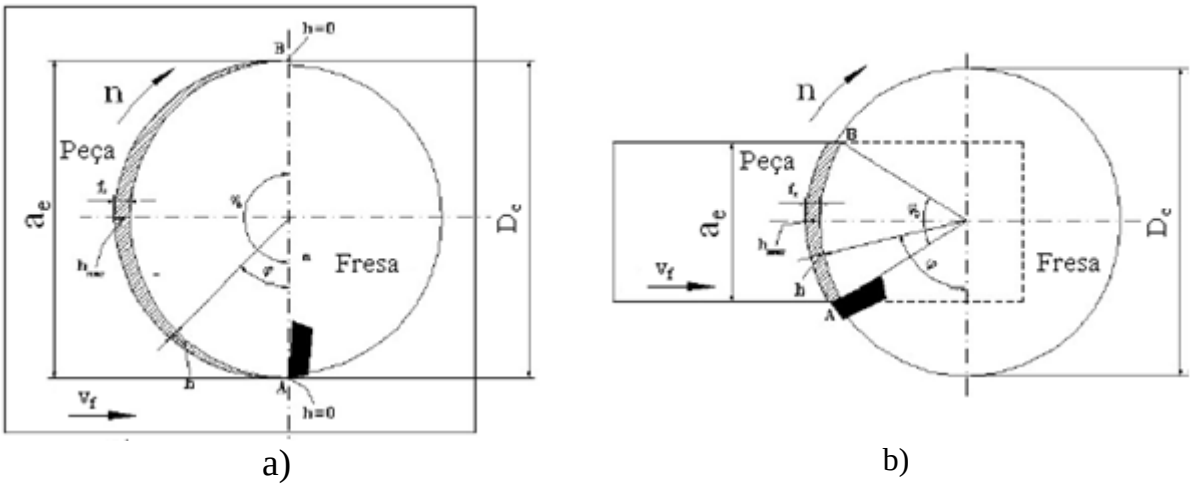
2.2.1 Escolha da fresa para operações de superfícies planas

Segundo Diniz et al. (2014), Sandvik (2011), Camuscu *et al*. (2005), para escolher uma fresa de topo, sugere-se as seguintes etapas:

• Diâmetro da fresa
• Número de dentes da fresa
• Material da pastilha

2.2.2 Escolha do diâmetro da fresa

Segundo Diniz et al. (2014), para a escolha do diâmetro da fresa (D_c), devemos levar em conta a largura da superfície a ser fresada (a_e), conforme a Figura 2.8 (a). Se o diâmetro da fresa for igual ou pouco maior que a largura fresada, haverá valores de espessura de corte (h) muito pequenos na entrada e saída do dente no corte, o que vai gerar muita pressão de corte. De outra forma, se o diâmetro da fresa for muito maior que a largura fresada, haverá uma fresa de custo elevado para aquela superfície, conforme a Figura 2.8 (b) e também o choque do dente da fresa com a peça e a saída do dente do corte pode acontecer de tal maneira que facilite o lascamento e quebra da pastilha.



a) b)

Figura 2.8–Esquema do fresamento frontal.
Fonte: Diniz et al. (2014).

Conforme Diniz et al. (2014), o diâmetro adequado da fresa deve ser próximo do calculado pela Equação 1.

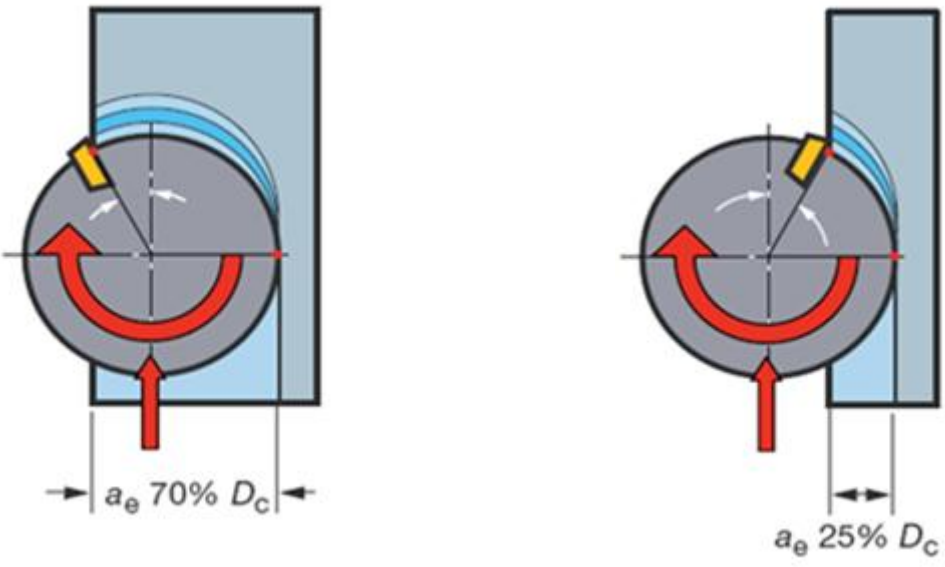
$$D_c = 1{,}3 \times a_e \qquad (1)$$

Quando se utiliza uma fresa com diâmetro menor que a largura fresada e, portanto, deseja-se fazer o corte em várias passadas laterais, é importante que o centro da fresa esteja dentro da largura cortada. A Figura 2.9 (a) ilustra esse caso em que o contato inicial é feito com a parte interior da pastilha, na qual a secção para resistir ao choque é maior (*ângulo de entrada negativo*). Quando a fresa de facear tem seu centro fora da largura da peça, conforme Figura 2.9 (b), o corte começa com a parte extrema da pastilha tocando a peça (*ângulo de entrada positivo*), o que pode causar a quebra da aresta. Assim, deve-se continuar utilizando a Equação 1 para se calcular a relação entre D_c e a_e , diâmetro da fresa (D_c) e penetração de trabalho (a_e).

No entanto, em muitos casos práticos, escolhe-se o diâmetro da fresa com base na largura fresada de uma superfície, mas utiliza-se a mesma fresa para cortar outras superfícies de larguras diferentes. Nesses casos, poderá ser usinada uma superfície com fresa maior que o dobro da largura fresada e, assim, tem-se o centro da fresa fora da superfície fresada. Nessas situações, em geral, pode ser mais adequado que se utilize o sentido de avanço inverso aquele mostrado na Figura 2.9 (a). Assim, ao invés do dente entrar no corte com espessura de corte máxima e sair com espessura igual a zero, conforme a Figura 2.9 (b), denominado corte concordante, ocorre o inverso, denominado de corte discordante, minimizando o choque na entrada do dente (DINIZ et al., 2014).

O corte discordante também tem seus inconvenientes, a espessura de corte aumenta progressivamente de zero até um valor máximo. Inicialmente, quando a aresta toca a peça, ela é forçada para dentro da peça, criando um excessivo atrito, com consequente deformação plástica daquela região da peça, ao invés da formação do cavaco e altas temperaturas.

Além disso, frequentemente o contato é realizado com uma superfície encruada pelo corte anterior com espessura tendendo a zero, causada pelo corte do dente anterior (DINIZ et al. 2014; SANDIVIK, 2011). Quando a pressão da aresta cortante atinge um valor capaz de vencer a tensão de ruptura do material da peça, a ferramenta penetra na peça e, com os movimentos de usinagem, retira uma porção de material (cavaco) em forma de vírgula. Assim, no início da operação de cada dente, a componente da força de usinagem perpendicular ao avanço tende a afastar a ferramenta da peça enquanto que, no fim da operação de um dente, a aresta cortante puxa a peça para o sentido inverso. Essa alternância da componente de força de usinagem produz vibrações indesejáveis, que prejudicam o acabamento superficial e a tolerância da peça fresada (SANDVIK, 2011).



a) b)

Figura 2.9–Posicionamento da aresta de corte.
Fonte: Sandvik (2011).

Segundo Diniz et al. (2014), no fresamento concordante, tais defeitos são sanados, já que a componente da força de usinagem, sendo perpendicular ao avanço, sempre tem o mesmo sentido, isto é, sempre empurra a peça contra a mesa. Porém, ainda existem inconvenientes, como pode ser visto na Figura 2.9 (a), começa discordante, a aresta de corte ao penetrar a peça faz com valor máximo do corte e prossegue até atingir um valor igual a zero (SANDIVIK, 2011). Por isso, nas peças que apresentam uma camada superficial endurecida (*crosta de fundição ou de forjamento, por exemplo*), o contato inicial da aresta cortante se dá em condições desfavoráveis, o que diminui a vida da ferramenta (DINIZ et al., 2014). Também, como já citado, quando o centro da fresa está fora da peça no fresamento frontal ($D_c > 2\ a_e$), o choque do dente da fresa com a peça se dá em condições desfavoráveis, conforme Figura 2.9 (b).

Outro inconveniente é que a componente da força de usinagem na direção de avanço possui o mesmo sentido de avanço da mesa. A porca do sistema de avanço da máquina, sistema fuso-porca que está preso à mesa, para poder fazer a mesa percorrer em um sentido, tem que fazer força no fuso no sentido oposto, conforme Figura 2.10. Essa força, portanto, também está no sentido oposto da componente da força de usinagem, que tem módulo variável, devido à variação da espessura de corte. Então, a força resultante final sobre o fuso da máquina varia em módulo e em sentido, o que pode gerar vibração (*DINIZ et al.*, 2014). Esse inconveniente pode ser corrigido diminuindo-se as folgas entre fuso e porca, ou utilizando-se fusos de esferas recirculantes, nos quais não exista folga e todo contato entre

fuso e porca seja feito através das esferas. Com isso, em geral, o fresamento concordante possibilita melhor acabamento da superfície da peça, sendo, portanto, preferido em muitos casos (METALS HANDBOOK, 1989; BOOTHROYD et al., 2006; SANDVIK, 2011).

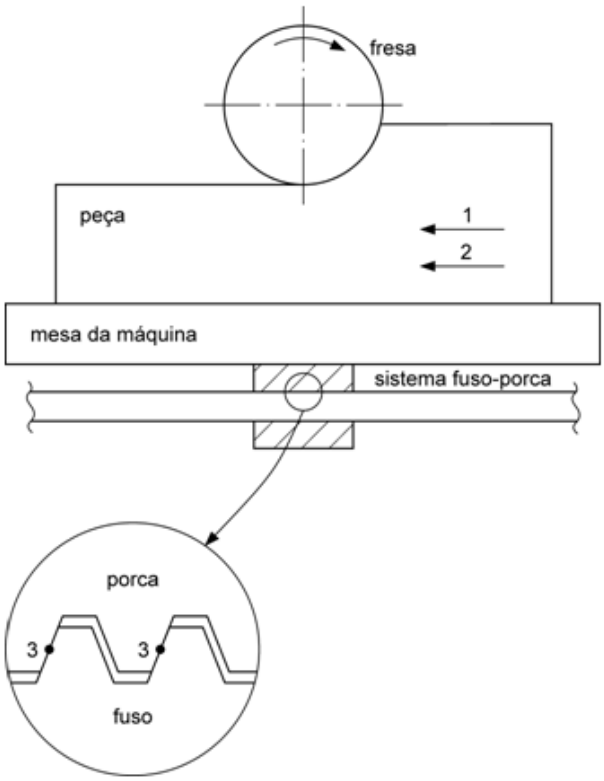


Figura 2.10–Forças e deslocamentos no fresamento concordante. (1) sentido da força de avanço. (2) sentidos do avanço da mesa. (3) pontos de contato entre porca e fuso.
Fonte: Diniz et al. (2008).

Assim, o corte concordante é, em geral, preferível ao corte discordante, quando se tem máquina com fuso de esferas recirculantes e não se tem camada endurecida na peça. Os casos em que a largura fresada é menor que a metade do diâmetro da fresa ($D > 2a_e$) também podem se configurar em exceções, nas quais o corte discordante pode ser mais adequado. Porém, há que se ter em mente que esse tipo de corte tende a gerar mais desgaste na pastilha, enquanto o concordante tende a gerar mais trincas e lascamentos (DINIZ et al. 2014).

2.2.3 Número de dentes

Diferentemente de um torno onde o que usualmente se ajusta na máquina é o avanço, em uma fresadora o que se ajusta é a velocidade de avanço, velocidade da mesa da fresadora. Assim, uma alteração do número de dentes da fresa vai ocasionar uma alteração do avanço

por dente (f_z)[mm/dente], exceto no caso em que a velocidade de avanço da mesa (v_f)[m/min] for alterada na mesma proporção, conforme Equação (2) (DINIZ et al. 2014).

$$V_f = f_z \times z \times n \qquad (2)$$

Onde:

z = número de dentes da fresa
n = rotação da fresa em (rpm)

Segundo Diniz et al. (2014), quando se reduz o número de dentes da fresa sem se alterarem as condições de corte, há um aumento do avanço por dente e consequente aumento da espessura de corte média (hm).

Outros fatores de escolha do número de dentes da fresa são: o material da peça (*materiais de cavacos longos exigem um espaço maior entre insertos*), a largura da superfície fresada é necessário sempre manter no mínimo 2 dentes simultaneamente no corte, para dar estabilidade ao sistema máquina/fresa/dispositivo de fixação-peça, para minimizar a vibração (SANDVIK, 2011). Por outro, não se podem ter muitos dentes, para que o avanço por dente não seja muito pequeno e, com isso, a pressão de corte não seja muito alta. Para o acabamento superficial desejado, quanto menor o avanço por dente e, consequentemente, quanto maior o número de dentes para um determinado avanço por volta, melhor o acabamento superficial da peça.

Assim, pode-se resumir o problema da escolha do número de dentes nas seguintes recomendações (DINIZ et al., 2014; SANDVIK, 2011):

• Fresa de passo largo (*poucos dentes tipo L*): usada frequentemente para desbaste e semi-acabamento de aços e onde a tendência à vibração seja uma ameaça para o resultado da operação.

• Fresa de passo fino, maior número de dentes, os espaços entre dentes é pequeno tipo (M), essa fresa permite alta taxa de remoção de cavaco. Pode-se aumentar a velocidade de avanço, mantendo-a no mesmo nível da fresa de passo grande. Normalmente usada para ferro fundido, devido ao cavaco curto, que se alojam bem nos pequenos espaços entre dentes e para operações em aços. Porém, nesses casos, o volume de cavaco removido fica limitado pelo espaço entre dentes e não se pode realizar desbaste muito pesado. Se o avanço por dente for mantido em níveis baixos, o acabamento da peça fica muito bom e não existe problema de entupimento dos bolsões de armazenamento do cavaco.

• Fresa de passo extrafino, muitos dentes e bolsões de armazenamento do cavaco muito pequenos tipo (H), permite altas velocidades de avanço. Adequada para o corte interrompido de ferro fundido, espessura do cavaco é pequena, o que faz com que o choque com a peça não seja muito forte e para operações de aços com pequena profundidade de usinagem e baixo avanço por dente, o que gera um ótimo acabamento superficial da peça. Também é adequada para o fresamento de materiais em que a velocidade de corte tenha que ser mantida em níveis baixos, como é o caso de ligas de titânio. Relembrando, velocidade de corte baixa, significa rotação baixa. Como a velocidade de avanço, é velocidade da mesa da fresadora, o número de dentes (Z_n) compensa a baixa rotação (n) e o avanço por dente não precisa ser muito reduzido para se conseguir uma razoável velocidade de avanço e, com isso, um razoável volume de remoção de cavaco. A Tabela 2.7 mostra um resumo das aplicações dessas fresas.

Tabela 2.7-Aplicação das fresas de acordo com o tipo de passes (Sandvik, 2011)

Tipo de Fresa	**Aplicação**
Passo Largo	Desbaste e semiacabamento de aço ou onde haja tendência à vibração.
Passo Fino	Corte de ferro fundido e desbaste leve e acabamento de aço.
Passo Extrafino	Corte interrompido de ferro fundido e liga de titânio, acabamento de aço.

Fonte: Sandvick (2011)

Outro ponto importante a destacar é o balanço da ferramenta, conforme Figura 2.11. Ele não deve ser maior do que quatros vezes o diâmetro da ferramenta. Ou seja, se o diâmetro da ferramenta utilizada for de 25 milímetros o balanço será de 100 milímetros.

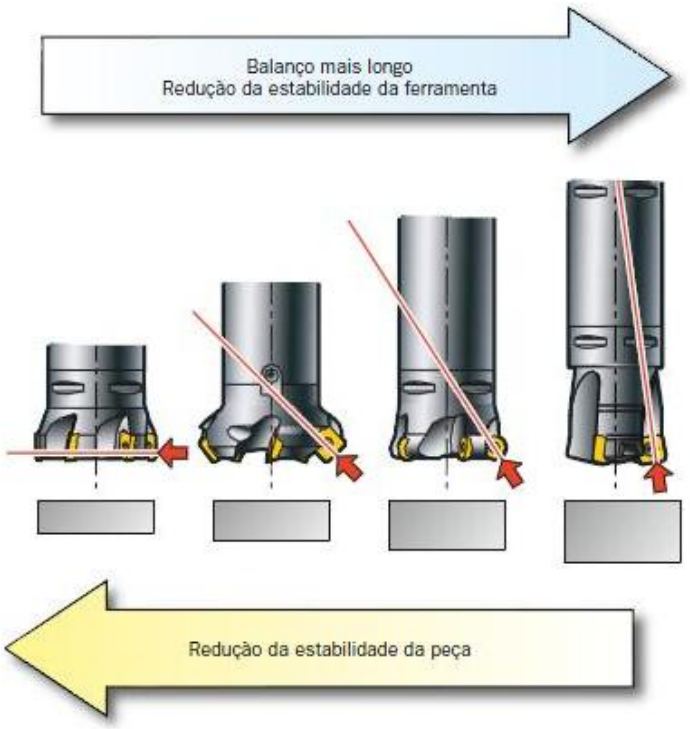


Figura 2.11-Detalhe da distribuição e balanço da ferramenta.

Fonte: Sandvik (2011)

Kecelj et al. (2004), sugere outra forma para o cálculo do balanço, ou seja balanço/diâmetro da ferramenta (*L/D*) muito elevado, se for maior que 10, há uma situação severa. O balanço deve ser o menor possível ou pelo menos *L/D <5*. Outro fabricante recomenda outro cálculo interessante: Cálculo do a_p em função do balanço, ou seja, se o balanço da ferramenta for maior que quatros vezes o diâmetro da ferramenta e se estiverem usando hastes cilíndricas, é viável adotar um novo valor de profundidade de corte. A Equação 3 mostra este cálculo.

$$ap(novo) = ap\,|\,(catálago)x\left(\frac{4xDc}{Novo\ comprimento\ em\ balanço}\right)^2 \qquad (3)$$

a_p = Profundidade de corte efetiva [mm];

Dc = Diâmetro de corte [mm].

2.2.4 Fresamento da liga de alumínio

O alumínio e suas ligas são materiais que possuem boa usinabilidade se for comparado com o aço e ferro fundido. Se a presença de silício for maior que 12 %, há formação de inclusões duras de silício (*silicato*) e pode influenciar o desgaste das ferramentas e prejudicar também o processo de usinagem (CAVALCANTE, 2010).

Segundo Machado et al. (2009), o alumínio pode ser usinado a seco, entretanto as ligas conformadas, com alto teor de cobre, necessitam de fluido de corte com alto poder de refrigeração.

O alumínio é um material extremamente fácil de deformar. Possui uma estrutura CFC (*cúbica de face centrada*), seu módulo de elasticidade é baixo e sua ductilidade é alta. Tem a predisposição a formar *APC* (*aresta postiça de corte*). Essas características devem ser observadas quando na construção da geometria da ferramenta. No fresamento de topo o número de facas da ferramenta deve ser o mínimo possível e os ângulos de saída devem ser o maior possível, pois facilitará a saída do cavaco (WEINGAERTNER e SCHROETER, 1991).

O alumínio é um bom exemplo de material que possui excelente usinabilidade quando levamos em conta a vida da ferramenta, potência, força ou temperatura de corte, entre outros. Se nos processos de usinagem o objetivo for obter peças com qualidade dimensional, é muito importante que todos os recursos de fabricação estejam disponíveis, os materiais da peça devem ser sem defeitos de fundição ou de qualquer processamento, a ferramenta atenda todos os esforços submetidos tanto no material da peça, quanto da máquina, como por exemplo: máquinas-ferramentas potentes, rígidas e precisas (MACHADO e DA SILVA, 2004).

Devido à temperatura do ponto de fusão do alumínio e suas ligas estarem em torno dos 650ºC a 700ºC, na interface de contato peça-cavaco-ferramenta pode chegar a esta temperatura facilitando a fusão alumínio/ferramenta (*empastamento*). Neste caso é importante utilizar fluido de corte para remover o calor e evitar a formação de aresta postiça na ferramenta. O alumínio é um material muito dúctil e no processo de usinagem são produzidos cavacos longos e a área de contato cavaco-ferramenta é relativamente grande, resultando num aumento da força de corte, por isso o fluido tem grande participação, pois facilita o cisalhamento do material. Dentre os fluidos de corte mais utilizados, estão os óleos emulsionáveis de base vegetal, mineral e sintético e ainda os semi-sintéticos. São preparados na proporção 1:25 e 1:50 (*óleo e água*). A aplicação do jato de óleo refrigerante deve ser direcionada para a área de corte, sendo 2/3 para a peça e 1/ 3 para a ferramenta, a vazão deve ser eficiente e seu fluxo sem interrupções para que ocorra um arraste eficiente dos cavacos (WEINGAERTNER e SCHROETER, 1991).

Balkrishna e Yung (2001), pesquisaram o processo de corte em termos de forças de corte, morfologia do cavaco e integridade da peça. Utilizaram um processo de faceamento em altas velocidades e uma liga de alumínio 7075 T6. Concluíram que em altas velocidades o ângulo de saída do cavaco aumenta, as forças de usinagem caem e o ângulo de cisalhamento aumenta, resultando num cavaco fino. As Figuras 2.12 e 2.13 mostram os resultados obtidos pelos pesquisadores.

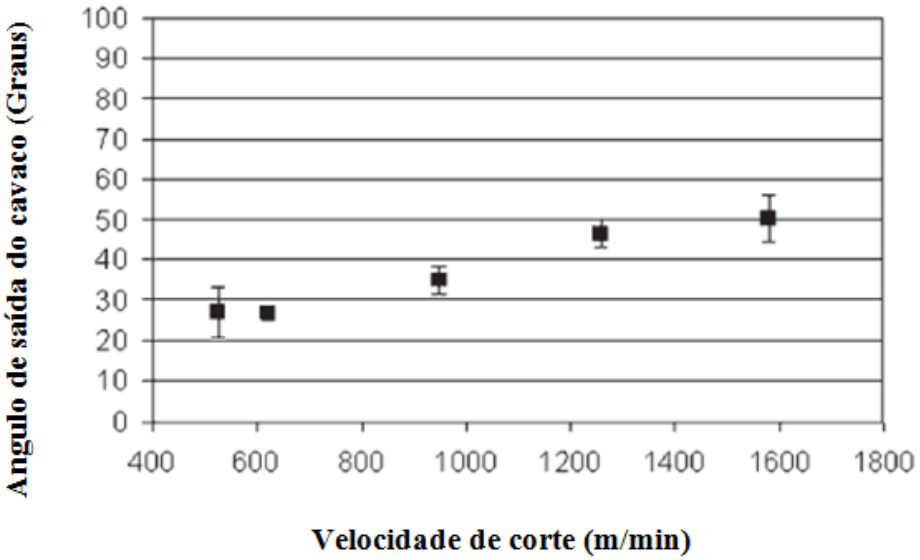


Figura 2.12–Variação do ângulo de saída do cavaco com a velocidade de corte-AL7075-T6, ferramenta de metal duro, fz = 0.2 mm/dente; ap = 1,27 mm).
Fonte: Balkrishna e Yung (2001).

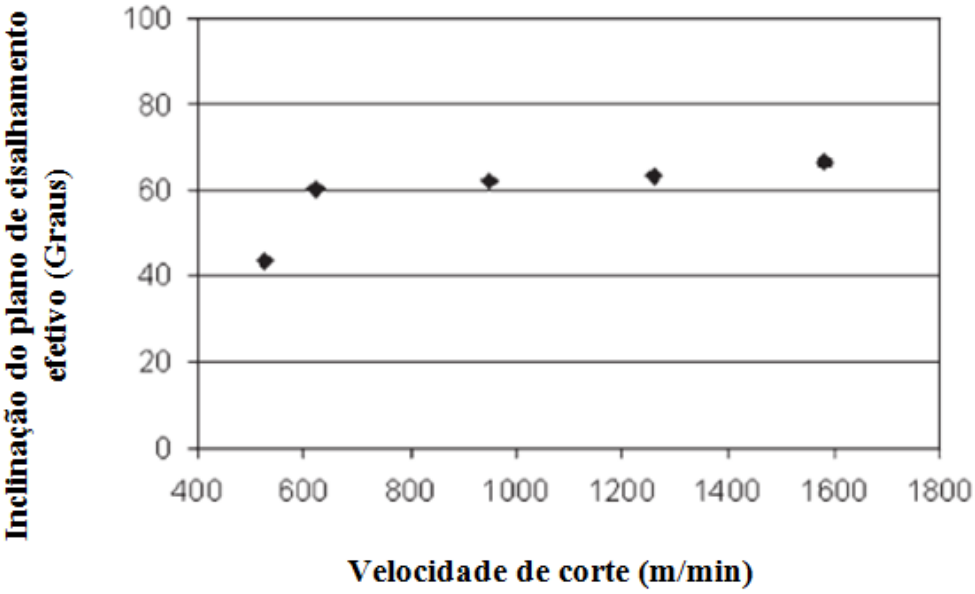


Figura 2.13-Variação do ângulo de cisalhamento com a velocidade de corte-AL7075-T6, ferramenta de metal duro; fz = 0.2 mm/dente; ap = 1,27 mm.
Fonte: Balkrishna;Yung (2001)

Segundo Costa et al. (2006), verificaram a rugosidade em canais usinados pelo processo de fresamento de topo, sobre uma liga de alumínio 6351-T6, utilizando para isso fresas de metal duro de aplicação geral e observaram que o fator que mais chamou atenção no estudo foi a influência individual de cada parâmetro de corte: velocidade de corte, avanço por dente, profundidade, número de dentes e algumas combinações entre eles.

As Tabelas 2.8 e 2.9 apresentam os parâmetros utilizados e a influência de cada variável de corte e de algumas combinações entre duas variáveis na rugosidade. Observa-se que na mudança do avanço por dente, ou seja de 0,02 [mm/dente] para 0,04 [mm/dente] há um aumento significativo de 45% da rugosidade (R_a) e quando se aumenta o nº de dentes de 2 para 4 há uma diminuição de 14% sobre a rugosidade (R_a). Pode -se destacar também que na combinação da velocidade de corte com a profundidade de corte a rugosidade diminui em 28 % e quando a velocidade de corte quando combinada com o numero de dente a rugosidade aumenta em 7 %

Tabela 2.8-Efeito médio das variáveis nas rugosidades R_a e R_z.

	Rugosidade - R_a/ R_z [µm]									
	Rugosidade média		**1 Veloc.de corte [m/min] 50⇨100**		**2 Avanço [mm/dente] 0,02⇨0,04**		**3 Prof. de corte [mm] 0,50⇨1,0**		**4 Nº dentes Fresa - 2⇨4**	
	R_a	**R_z**	**R_a**	**R_z**	**R_a**	**R_z**	**R_a**	**R_z**	**R_a**	**R_z**
EFEITO	0,69	4,4	+0,06 ↑9%	-0,2 ↓5%	+0,31 ↑45%	+1,9 ↑43%	0	+0,1 ↑2%	-0,10 ↓14%	-1,2 ↓27%

Fonte: Costa, Gonçalves e Machado (2006)

Tabela 2.9-Efeito médio quando se combina duas variáveis nas rugosidades R_a e R_z.

Rugosidade - R_a/ R_z [µm]												
1 e 2		**1 e 3**		**1 e 4**		**2 e 3**		**2 e 4**		**3 e 4**	
R_a	**R_z**	**R_a**	**R_z**	**R_a**	**R_z**	**R_a**	**R_z**	**R_a**	**R_z**	**R_a**	**R_z**
-0,04 ↓6%	-0,4 ↓9%	-0,19 ↓28%	-1,2 ↓27%	0,05 ↑7%	0,1 ↑1%	0,13 ↑19%	0,7 ↑16%	-0,14 ↓20%	-1,3 ↓30%	0,01 ↓1%	0,1 ↑2%

Fonte: Costa, Gonçalves e Machado (2006)

Segundo Machado et al. (2009), o baixo ponto de fusão do alumínio (659ºC) e a temperatura de corte não são problemas para as ferramentas atuais. Pode se obter velocidade de corte elevada no processo de usinagem. Mas o único obstáculo é a potencia e vibração excessiva da máquina. Eles recomendam as velocidades conforme o material da ferramenta: para material HSS a velocidade deve ser até 300 m/min, para metal duro até 600 m/min e para PCD até 4.500 m/min.

Um dos empecilhos para usinar alumínio e suas ligas é o controle do cavaco. O alumínio possui uma estrutura de face centrada e facilita que maiores alterações ocorram antes do material se romper, resultando em cavacos contínuos, grossos e resistentes, dificultando o controle do mesmo (SUAREZ, 2008).

2.3 Geração e Distribuição de Calor no Processo de Fresamento

2.3.1 Fontes de geração de calor em usinagem

A temperatura exerce um papel fundamental na usinagem dos materiais, ela pode tanto beneficiar como prejudicar o andamento do processo de fabricação. Estudos realizados demonstraram que 1 a 3 % da energia gasta na formação do cavaco não é convertida em calor (QUEINEY e TAYLOR, 1934 -1937).

Apenas 8 a 10 % do calor gerado é absorvido pela ferramenta e uma pequena parcela é transferida para a peça, causando aumento de temperatura e ocasionando problemas dimensionais e o restante é dissipado para o cavaco (MACHADO e DA SILVA, 2004). A Figura 2.14 mostra as três fontes onde o calor é gerado, *zonas de cisalhamento* na usinagem.

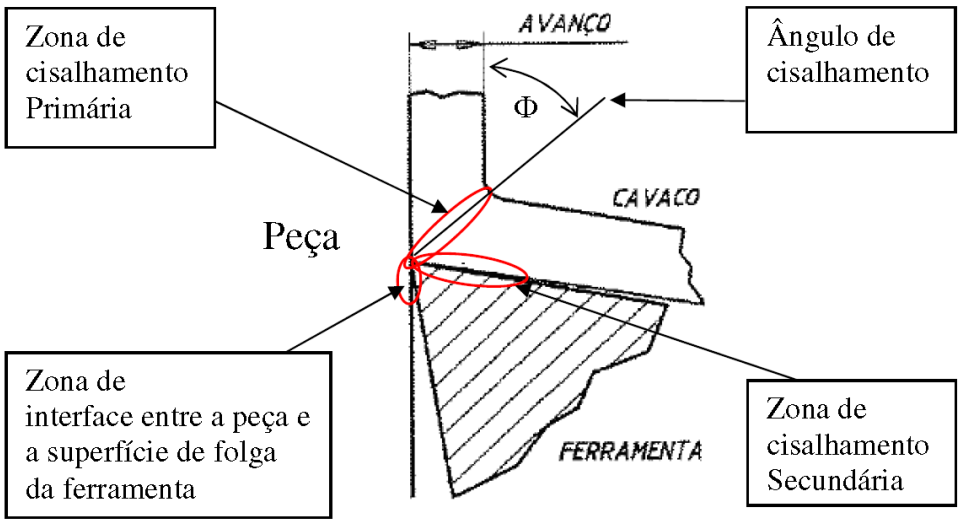


Figura 2.14-Zonas de cisalhamento no processo de corte ortogonal.
Fonte: Trent e Wright (2000).

2.3.2 Distribuição do calor gerado no processo de corte

A Figura 2.15 mostra a distribuição das temperaturas na região de corte.

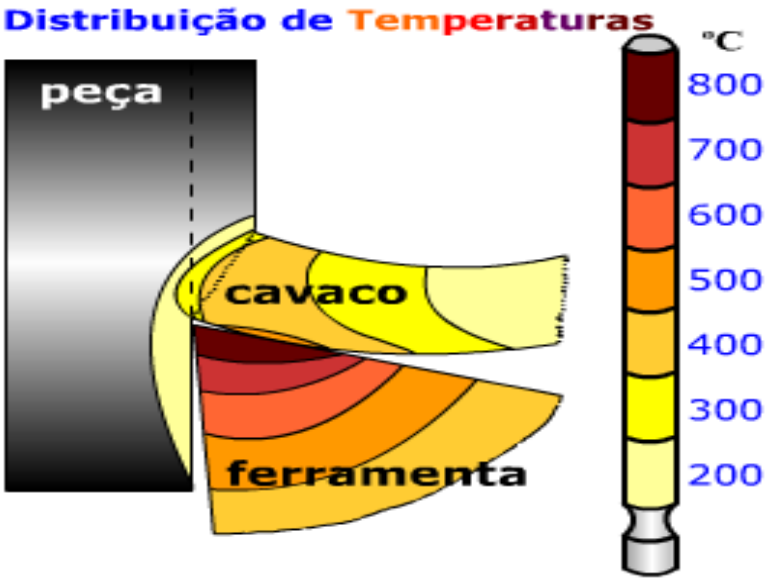


Figura 2.15-Distribuição típica de temperaturas na região de corte.
Fonte: CIMM (2007)

Alguns autores propõem que a temperatura de corte em uma operação de usinagem aumenta com a velocidade de corte e após atingir determinado valor de velocidade a temperatura começa a abaixar, conforme mostrada na Figura 2.16 (a) SALOMON (1931), citado por (DEWES e ASPINWALL, 1997) Apud (SUAREZ, 2008). Porém, outros estudos que foram realizados não comprovaram este resultado.

Longbottom e Lanham (2006), deixam claro em publicação um questionamento sobre a curva de Salomon. A temperatura refere-se à peça, concluindo que o aumento da velocidade de corte altera a dissipação do calor, ou seja, o cavaco absorve maior calor e a peça, uma quantidade menor. O calor que é gerado entre o cavaco e a ferramenta é diretamente proporcional à velocidade de corte.

Outra proposta é a de Mcgee (1979), citado por (DEWES e ASPINWALL1997), a temperatura sobe conforme a velocidade de corte aumenta até o ponto de fusão do material que está sendo usinado, demonstrado na Figura 2.16 (b).

a) Salomon a) McGee

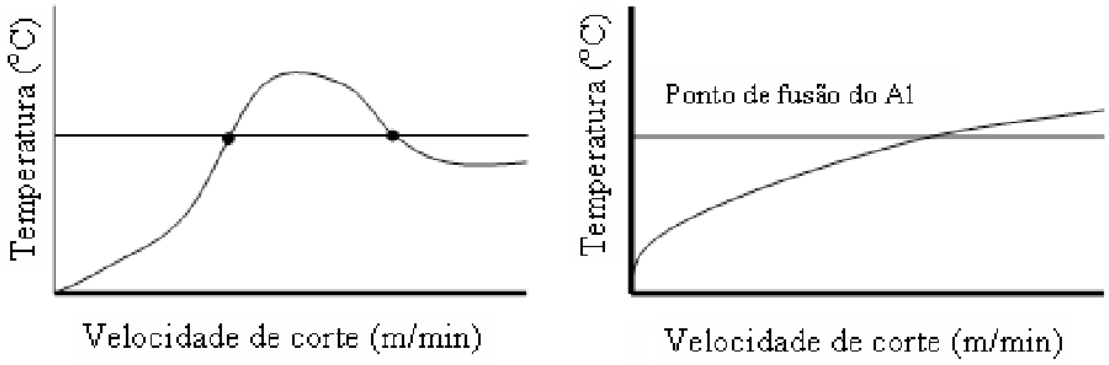


Figura 2.16–Gráfico Temperatura x Velocidade de corte. A) Curva de Salomon; B) Curva de McGee.

Materiais que possuem ponto de fusão baixo, no caso do alumínio que está em torno de 659ºC, a velocidade de corte fica limitada pelas condições que a máquina oferece. O ponto de fusão do alumínio é muito abaixo se compararmos como ponto de fusão das ferramentas de metal duro e cerâmica (MACHADO e DA SILVA,2004).

A Figura 2.17 demonstra a distribuição de calor na região do corte. A ferramenta e o cavaco absorvem mais calor e não dando tempo para que possa ser transmitido para a peça.

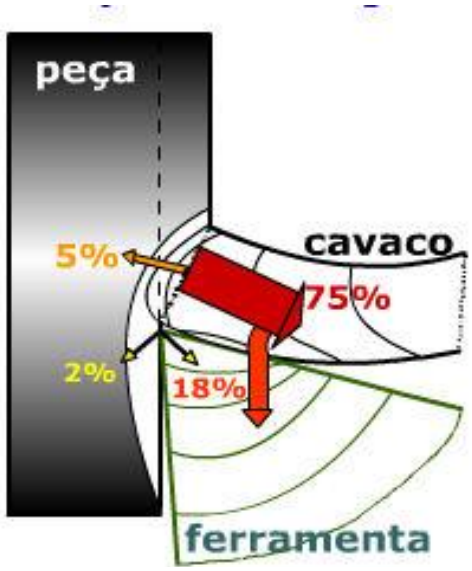


Figura 2.17-Porcentagem de calor na região de corte.
Fonte: CIMM (2007)

2.4 Fluidos de Corte

Taylor (1894) foi o primeiro pesquisador que verificou que quando ao jogar grandes quantidades de água na zona de corte teve uma queda da temperatura na região peça /ferramenta/cavaco e um aumento de 33% na velocidade de corte sem causar avarias na ferramenta (FERRARESI, 1981). Essas melhorias sempre foram almejadas não só na velocidade de corte, como também no avanço e profundidade de corte. Hoje é possível graças ao aumento de novos tipos de materiais melhorados em sua estrutura, que facilitam a usinabilidade. Também não deixando de citar o progresso dos materiais, revestimentos e geometrias das ferramentas de corte (MIRANDA, et al. 2001); (ABRÃO et al., 2008).

Os resultados abaixo no gráfico da Figura 2.18 foram citados por (FERRARESI, 1981). Eles mostram através do gráfico as temperaturas em diferentes materiais que foram usinados em velocidades de corte diferentes.

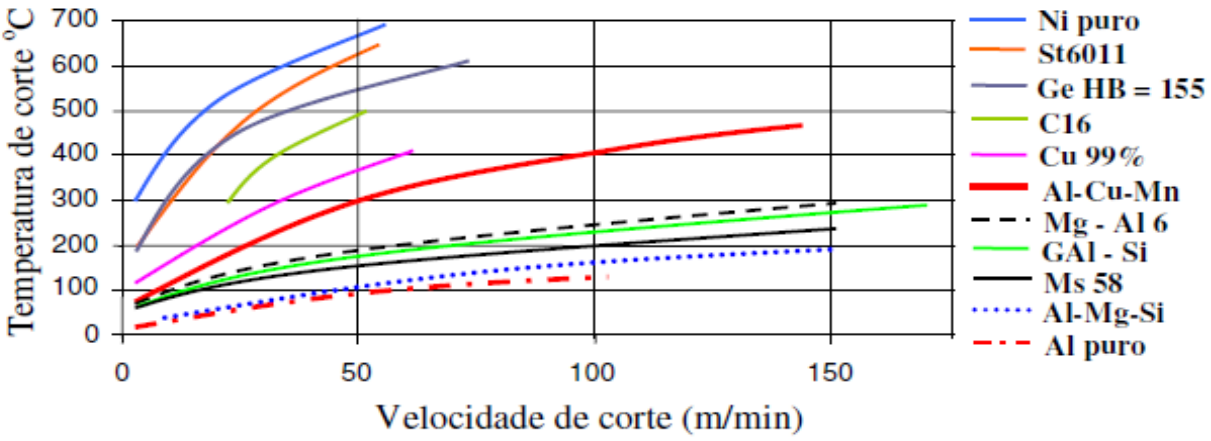


Figura 2.18–Temperatura de corte através de termopares ferramenta-peça cavaco, para diferentes materiais. Adaptado de Ferraresi (1981).

Diminuir a temperatura na interface cavaco/ferramenta/peça resulta em benefícios para a ferramenta, pois se o calor não for removido, ocorrem distorções térmicas na peça que está em usinagem e respectivamente afetará a estrutura da ferramenta, causando um desgaste prematuro e trocas mais frequentes. Por outro lado manter a temperatura elevada é benéfico quando se usinam materiais endurecidos, pois o calor favorece o cisalhamento do material, mas sem a adição de fluido refrigerante, sendo que o mesmo dificulta este beneficio (CIMM, 2007).

A Figura 2.19 mostra o efeito da temperatura x dureza, de alguns materiais utilizados para ferramentas.

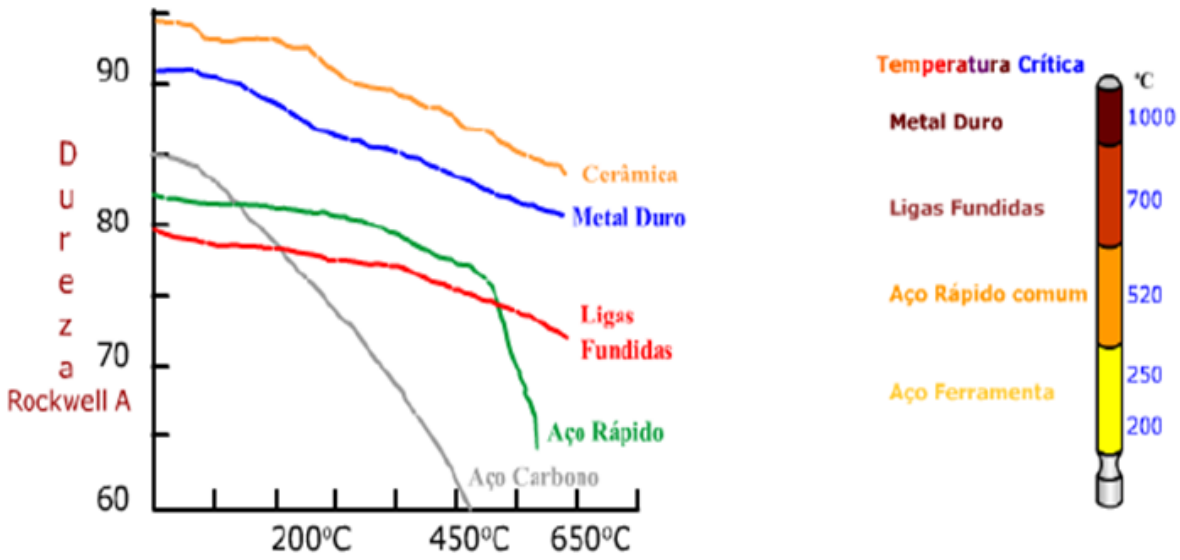


Figura 2.19-Curvas de perda de dureza em função da temperatura para diferentes materiais de ferramenta.
Fonte: CIMM (2007).

2.4.1 Funções dos fluidos de corte

Os fluidos ajudam a refrigerar a região de corte em altas velocidades de corte, lubrificam a região de corte em baixas velocidades e altas tensões de corte, reduzem a força de corte, melhoram a vida da ferramenta, o acabamento superficial, a precisão dimensional da peça, auxiliam na quebra do cavaco, facilitam o transporte de cavaco, deixam uma camada protetora sobre a superfície usinada e protegem a máquina ferramenta contra ação oxidante (EL BARADIE, 1996; SCHROETER, 2002).

2.4.2 Os fluidos de corte como refrigerante

Segundo Machado et al. (2009), os requisitos que um fluido de corte deve possuir para retirar eficientemente o calor da região de corte da peça e da ferramenta são:

• Baixa viscosidade, a fim de fluir facilmente;

• Capacidade de molhar bem o metal para estabelecer um bom contato térmico;
• Alto calor específico e alta condutividade térmica.

Tais propriedades são esperadas de um fluido de corte típico de ação refrigerante, pois tal ação ocorre pela retirada do calor do conjunto ferramenta-peça após ele ser gerado durante a usinagem pela deformação do cavaco e atritos entre as superfícies de saída e de folga com o cavaco e superfície usinada, respectivamente (DINIZ et al. 2014).

2.4.3 Os fluidos de corte como lubrificante

Segundo Runge e Duarte (1989) e Machado et al., (2009), a lubrificação permite uma redução do coeficiente de atrito entre cavaco e ferramenta, pois é na superfície de saída da ferramenta que se desenvolvem as maiores temperaturas, devido à zona de aderência cavaco ferramenta, que facilita o fluxo de cavaco, reduzindo a força e a potência de corte. O fluido de corte penetra entre as superfícies em contato através do fenômeno da capilaridade, ajudado pela vibração entre ferramenta, peça e cavaco. Se o fluido não atingir a região de corte, não se efetivará a ação desejada (DINIZ et al., 2014).

Segundo Diniz et al. (2014) em processo de corte interrompido como fresamento, a lubrificação fica facilitada, pois o óleo com característica lubrificante toca a ferramenta enquanto ela se encontra fora da peça, geralmente metade da fresa fica fora da peça.

Para que um fluido seja um bom lubrificante, é necessário que ele possua as seguintes características:
• Resistência a pressões e temperaturas elevadas sem vaporizar;
• Boas propriedades antifricção e antissoldantes.
• A viscosidade deve ser suficientemente baixa para permitir uma fácil circulação do fluido e suficientemente alta para uma boa aderência do fluido às superfícies da ferramenta.

Além dessas propriedades necessárias para refrigeração e lubrificação, outras propriedades são exigidas do fluido de corte como:
• Não apresentar odores desagradáveis;
• Não corroer (ter capacidades de proteger as máquinas ferramentas);
• Não originar precipitados sólidos que se depositem nas guias da máquina;
• Não causar dano à pele humana e nenhum outro risco à saúde do operador.

2.4.4 Classificação dos fluidos de corte

Uma primeira classificação agrupa os fluidos da seguinte forma (Machado *et al*., 2009):

•Fluidos gasosos: ar

• Fluidos miscíveis em água: emulsões e soluções.

• Fluidos integrais: óleos minerais ou vegetais puros.

Uma segunda classificação divide os fluidos de corte em dois grupos (Machado *et al*., 2009):

• Fluidos formados apenas por óleo integral.

• Fluidos formados a partir da adição de óleo concentrado à água.

• Emulsões.

• Soluções.

2.4.5 Óleos integrais

Segundo Sheng et al. (1997) e Machado et al. (2009), os óleos integrais são predominantemente óleos minerais, mas os óleos vegetais ou hidrocarbonetos sintéticos também são utilizados. Podem ser usados totalmente puros (sem mistura) ou combinados (misturados com aditivos).

2.4.6 Fluidos miscíveis em água

Os fluidos miscíveis em água foram introduzidos na década de 1940 e desenvolvidos com o crescimento das ferramentas de metal duro e consequente aumento da velocidade de corte das máquinas-ferramentas (SHENG et al., 1997; TOBERT et al., 1992). Esses fluidos misturam óleo e água com emulsificadores e deixam um filme sobre a peça que inibe a corrosão. A emulsão é difícil de ser mantida em água com sais minerais ou na presença de bactérias e sais (OWEN, 1998). Análises de laboratório são desejáveis para descobrir quais os minerais presentes na água e sua dureza. Também deve ser observado o pH da solução, que deve variar de 8,5 até 9,3. Para um pH menor que 8,5 a probabilidade de oxidação da peça aumenta e maior que 9,3 a possibilidade de irritação da pele do operador cresce (EL BARADIE, 1996). A proporção de fluido de corte concentrado na água depende da operação de usinagem. Para alta taxa de remoção de cavaco, é normalmente misturada uma parte de concentrado para 20 ou 30 partes de água (1:20 ou 1:30). A água tem alto calor específico, alta condutividade térmica e alto calor de vaporização, sendo um dos meios mais eficazes de

refrigeração. Diluído em água, o fluido produz uma combinação de refrigeração e lubrificação moderada requerida para operações de remoção de metal conduzida em altas velocidades e baixas pressões.

Os fluidos solúveis em água são principalmente utilizados para processos a altas velocidades, pois possuem melhor capacidade de refrigeração nessas condições. Esses fluidos são melhores também no resfriamento dos componentes, evitando distorções térmicas (EL BARADIE, 1996).

2.4.7 Emulsões

As emulsões são compostas por óleos e água (El Baradie, 1996). Compõem-se de pequena porcentagem de um concentrado de óleo emulsificador e outros ingredientes, dispersos em pequenas gotículas na água. Os emulsificadores são substâncias que reduzem a tensão superficial da água e, com isso, facilitam a dispersão do óleo na água, mantendo-o finamente disperso como uma emulsão estável. Portanto, não são soluções de óleo em água (óleo e água não se misturam), mas sim água com partículas de óleo dispersas em seu interior. Assim, o nome de óleo solúvel normalmente dado a esse produto não é correto. A proporção óleo-água nesses compostos varia de 1:10 a 1:100, (MACHADO et al., 2009).

Segundo Diniz et al. (2014) o emprego dos óleos integrais e minerais puros como fluido de corte tem perdido espaço para os óleos solúveis ou emulsificáveis em água, devido ao alto custo em relação aos demais, à ineficiência a altas velocidades de corte, ao baixo poder refrigerante e a formação de fumo, além de oferecerem riscos à saúde humana.

2.5 Rugosidade

Podemos definir rugosidade de uma superfície como irregularidades finas ou erros micro geométricos da ação inerente ao processo de corte. O seu uso é utilizado para controlar o processo de fabricação e é avaliada por aparelhos eletrônicos, por exemplo, o rugosímetro. O parâmetro rugosidade média R_a, é um dos parâmetros e o mais utilizado para analisar o acabamento superficial após um processo de usinagem (ESPANHOL, 2008).

Abrão et al (2009), cita Field (1995), o acabamento superficial está associado somente com dois fatores: as irregularidades geométricas superficiais de materiais sólidos e características dos instrumentos de medição. O acabamento superficial é definido de acordo com a rugosidade (ondulações, direção predominante dos desvios e falhas). Medir a

rugosidade é um método tradicional para verificar a qualidade superficial de uma peça e ela é resultado de marcas de avanço da ferramenta durante a usinagem da peça. Rugosidades e ondulações são irregularidades geométricas e podem ser avaliadas por vários tipos de instrumentos de medição, sendo um tipo de contato e outro sem contato. O mais utilizado é o de contato que permite fazer leituras dos parâmetros R_a, R_t, R_z e outros.

A Figura 2.20 descreve a rugosidade e ondulações no perfil de uma peça. A rugosidade, ou seja, a *textura primária* são sulcos ou marcas produzidas pela ferramenta de usinagem na superfície da peça e está superposta ao perfil de *ondulação*. Ao conjunto de irregularidades repetidas em ondas de comprimento, bem maior que sua amplitude, dá-se o nome de *ondulação*, ou seja, *textura secundária* causada por erros de movimentos dos equipamentos.

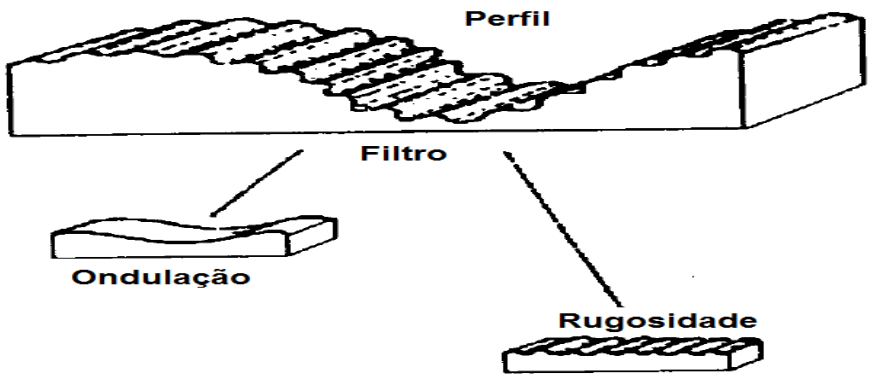


Figura 2.20-Perfil da peça: Rugosidade + Ondulações.
Fonte: Palma (2006).

Não existe uma superfície perfeita onde não contenha defeitos de formas ou texturas secundárias - erros macro geométricos e também defeitos de acabamento ou marcas de fabricação - erros micro geométricos, é apenas uma referência.

Podemos destacar vários parâmetros que podem avaliar a rugosidade de uma superfície de uma peça. São eles: comprimento da rugosidade (1), o comprimento da ondulação (2), a amplitude das cristas (3), a amplitude da ondulação (4) e sua orientação (5), como são mostradas na Figura 2.21, (CAMARGO, 2002).

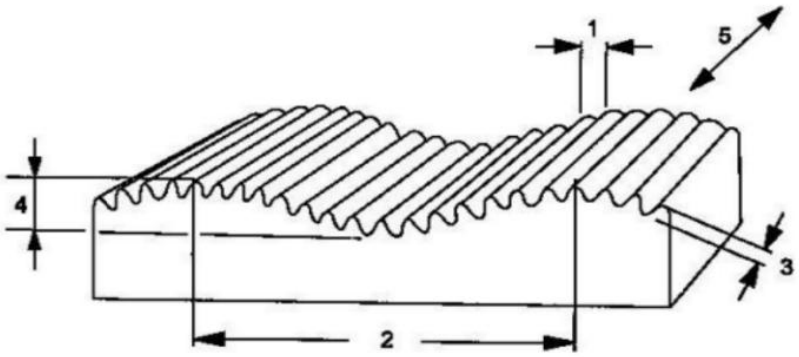


Figura 2.21-Elementos de uma superfície usinada.
Fonte: Camargo (2002)

2.5.1 Fatores influentes na rugosidade

Segundo Çolac et al. (2005), o acabamento superficial é um fator importante para se determinar a qualidade de um produto. Ele é prejudicado pelos parâmetros de corte velocidade, avanço, profundidade de corte, forças, as características do material e da ferramenta, resultando em rugosidade, sendo que ela pode ser expressa na Figura 2.22.

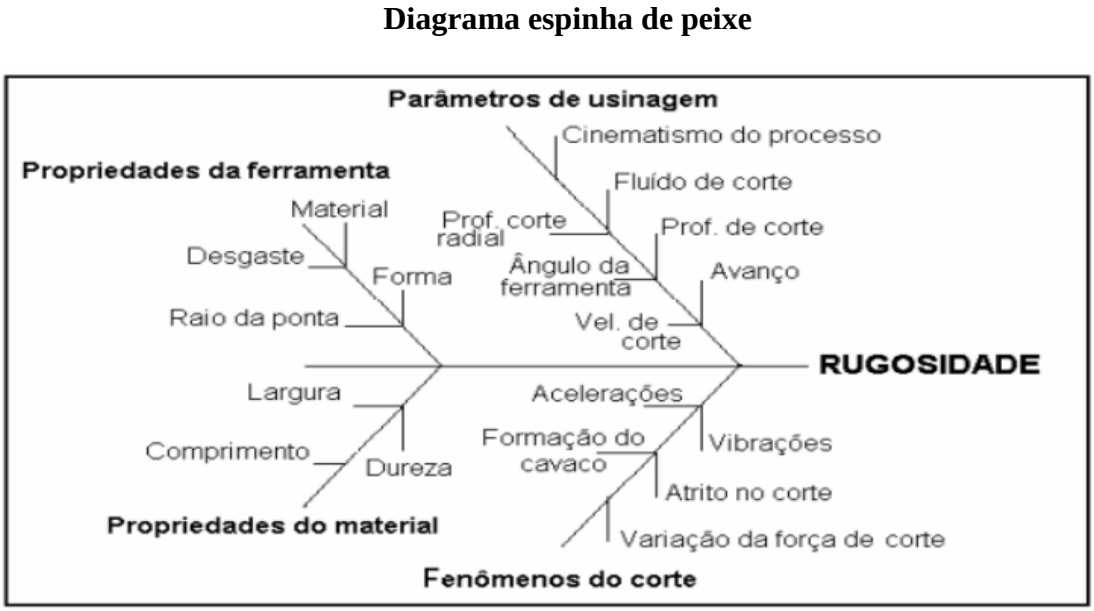


Figura 2.22-Fatores que influenciam na rugosidade.
Fonte: Çolac et al. (2005)

Segundo Toh (2004) apud Batista (2006), o sentido de corte influencia na rugosidade. Para isto ele usou um aço ferramenta H13, 52 HRc de dureza e concluiu que no sentido de corte concordante a textura foi muito ruim com cristas irregulares, a força de corte foi maior e também ocorre deflexão da ferramenta. No sentido discordante e com sentido único, o resultado foi melhor na vertical e sem depender das condições de corte.

Korkut & Dornetas (2005), em seus experimentos observaram que o aumento da velocidade de corte proporcionou a diminuição da rugosidade em uma operação de usinagem, Figura 2.23. Souza(b) (2004), também confirmou que a força de corte diminui com o aumento da velocidade de corte.

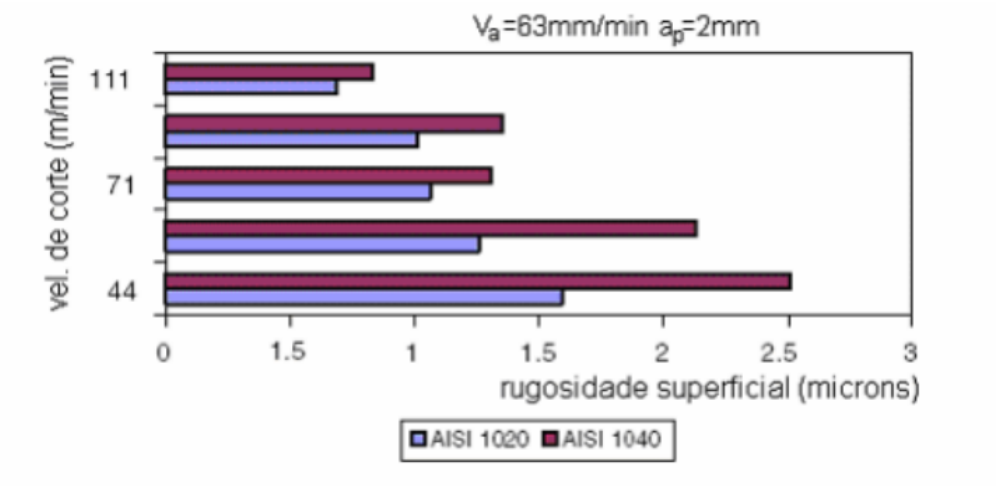


Figura 2.23–Redução da rugosidade superficial com o aumento da velocidade de corte.
Fonte: Korkut e Dorneta (2005)

Schulz (2001), apud Batista (2006), comenta que os fatores efeitos térmicos e mecânicos, que são produzidos pelo processo de corte, alteram os passos laterais e posteriores. A dissipação do calor gerado no cavaco pela deformação plástica é lenta e resulta em uma expansão térmica e uma compressão plástica na superfície causando uma tensão residual. Estas variações das propriedades da superfície podem chegar a espessuras entre *15µm a 60µm* e depende do material e do tipo de processo de usinagem utilizado. Essas variações de profundidade alteram desde o comportamento de formação cavaco no acabamento até a rugosidade final.

Ozcelik e Bayramoglu (2005), citam que, normalmente com o aumento do desgaste da ferramenta, há um aumento da rugosidade. Outro fator importante e que afeta diretamente no acabamento, principalmente em altas rotações, é o balanço da ferramenta. Ou seja, balanço/diâmetro da ferramenta *(L/D)* muito elevado, se for maior que 10, há uma situação

severa, o balanço da ferramenta deve ser o menor possível ou pelo menos (*L/D <5)*, isto ajuda a evitar a quebra da ferramenta (KECELJ et al., 2004).

2.5.2 Medição da rugosidade

A norma ABNT NBR 6405 define alguns termos e parâmetros para se efetuar a medição de uma rugosidade. A medição é coletada pelo sistema de apalpamento e são utilizados aparelhos eletromecânicos. O sistema utilizado é o sistema de medição cujo nome é "sistema M", ou seja, este sistema utiliza uma linha Média-*linha de referência*. Esta linha é utilizada porque de acordo com a metrologia que controla as superfícies, não se mede a dimensão de um corpo na metrologia dimensional, mas sim os desvios em relação a uma forma ideal. Na Figura 2.24, é mostrada a linha média disposta paralelamente à direção do perfil dentro do percurso de medição *Lm*, de tal maneira que a soma das áreas superiores seja exatamente igual à soma das áreas inferiores.

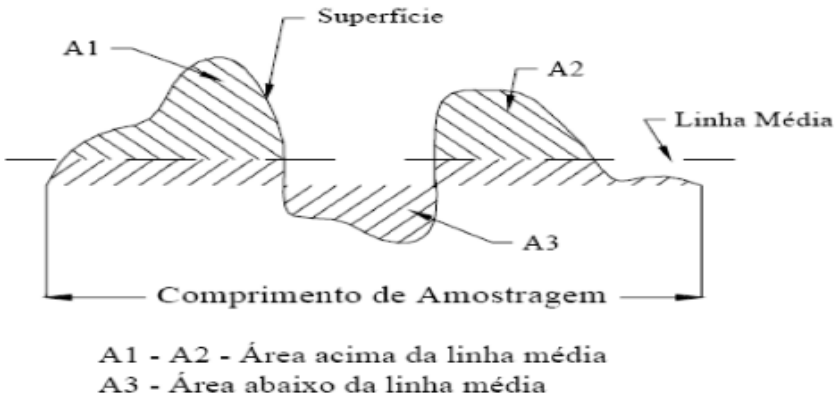


Figura 2.24-Conceito de linha média.
Fonte: Palma (2006)

A rugosidade Média ($R_{a)}$, é medida com base em uma série de comprimentos de amostragem, ou seja, comprimento de referência ou *cut-off.* Nos aparelhos eletrônicos o termo *cut-off,* não é o comprimento total que o apalpador percorre sobre a superfície de uma peça, ele é o mínimo comprimento de amostragem e conforme a norma DIN 4768 (1990) e ISO 4288 (1996) devem ser respeitadas o comprimento de amostragem *cut-off*. É feita uma avaliação antes de determinar a medição da rugosidade para selecionar o comprimento. A seleção considera as variáveis de perfil: se periódico ou aperiódico e parâmetros de medição R_a e R_z, com estas informações escolhe se o valor *cut-off,* conforme Tabela 2.10 abaixo.

Tabela 2.10-Comprimento da amostragem *cut-off*.

Rugosidade R_a (mm)	**Mínimo comprimento de amostragem L (*cut-off)***
De 0 até 0,1	0,25
> 0,1 até 2,0	0,80
> 2,0 até 10,0	2,50
> Maior que 10	8,00

Fonte: REBRAC (2013)

2.5.3 Parâmetros de rugosidade média: (R_a)

A rugosidade média (R_a), é um parâmetro muito conhecido e expresso em (μm) e corresponde a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento (yi), dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição (Lm) (REBRAC, 2013). Esta grandeza pode representar a altura de um triangulo cuja área é igual à soma das delimitadas pelo perfil de rugosidade e pela linha média, tendo por comprimento o percurso de medição (Lm) (AMORIM, 2002). A Figura 2.25 esboça os pontos de um perfil de rugosidade em relação à linha média.

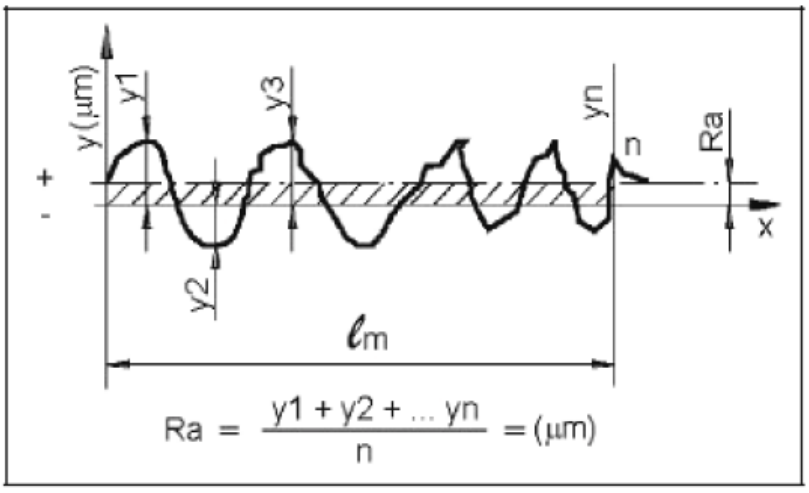


Figura 2.25-Percurso de medição de rugosidade R_a.
Fonte: REBRAC (2002)

Segundo Field (1995), a rugosidade média (R_a), é provavelmente o mais antigo conceito de rugosidade ainda em uso. Isto se deve a sua facilidade de cálculo, mesmo com aparelhos analógicos simples. Sua definição pode ser demonstrada como o desvio médio de

um perfil de sua linha média. Outra definição que pode ser explicada seria a distância média de um perfil desde sua linha média, sobre um comprimento medido. A Figura 2.26 mostra a rugosidade média do perfil de uma peça.

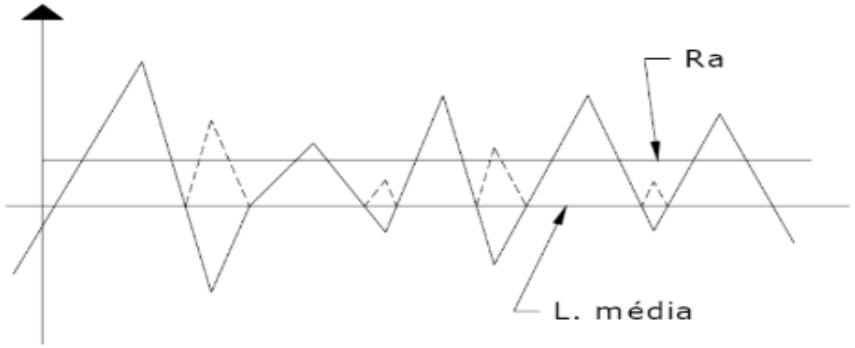


Figura 2.26-Rugosidade média R_a.
Fonte: Palma (2006).

Segundo Camargo (2002), o parâmetro para medir rugosidade na maioria dos processos é o R_a. Este parâmetro filtra grandes variações que podem alterar o valor medido e também por ser empregada como indicação da situação da superfície por comparações a classe de rugosidades, conforme NBR8401/1984.

Çolac, et al. (2005), comentam ainda que diferentes perfis podem ter o mesmo valor de rugosidade R_a, como mostrado na Figura 2.27.

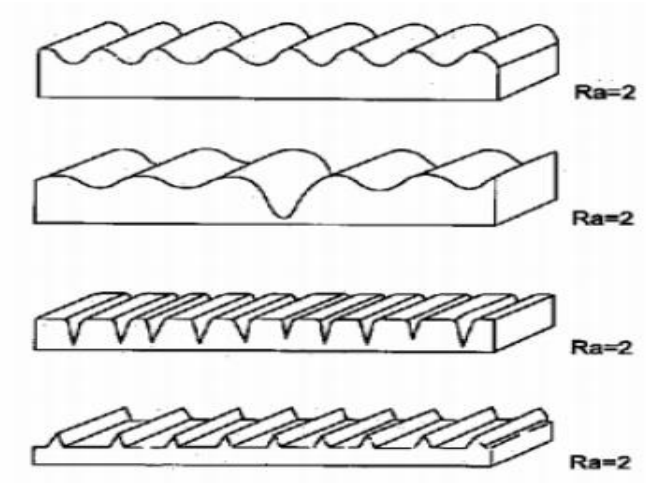


Figura 2.27- Diversos perfis com mesma rugosidade R_a.
Fonte: Camargo (2002).

2.5.4 Indicação da rugosidade R_a pelos números de classe NBR 8404/1984

Para as classes de rugosidade, a norma NBR 8404/84 define 12 valores que representam determinados desvios médios aritméticos (R_a) expressos em micrômetro (μm). A Tabela 2.11 apresenta as 12 classes de rugosidade e seus desvios equivalentes.

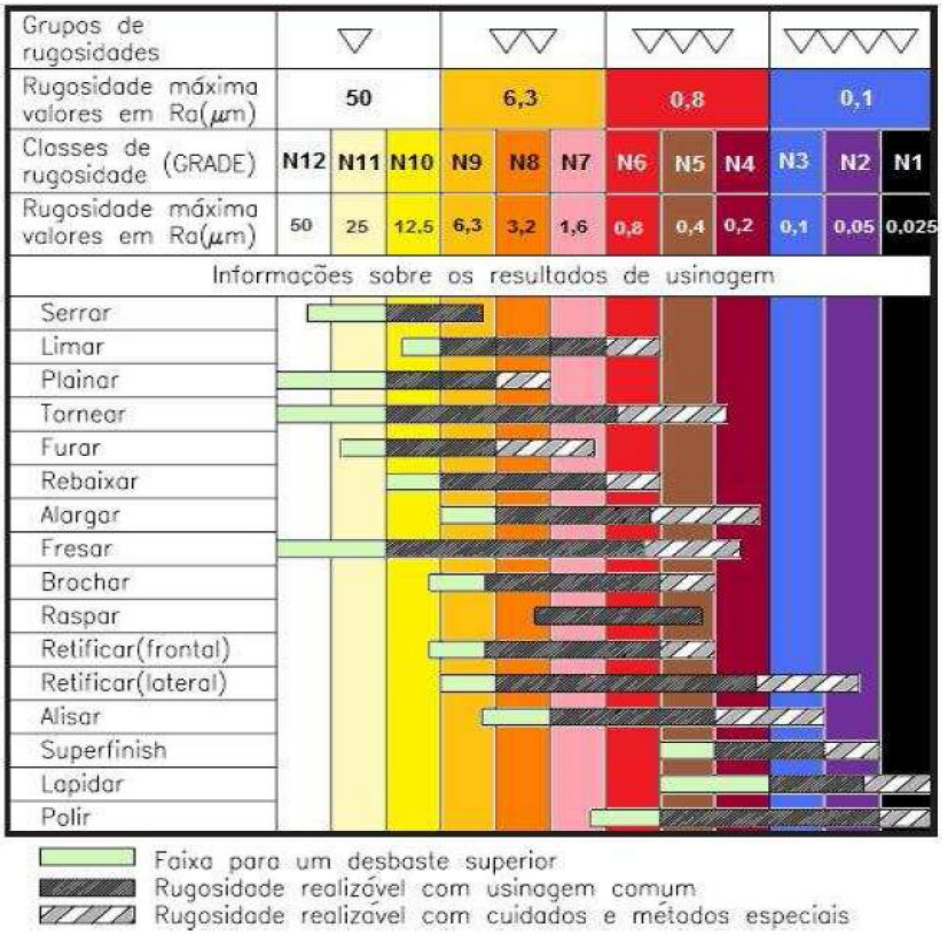
Tabela 2.11-Características das classes e desvios da rugosidade R_a

Classe de rugosidade	**Desvio médio aritmético R_a** (μm)
N12	50
N11	25
N10	12,5
N09	6,3
N08	3,2
N07	1,6
N06	0,8
N05	0,4
N04	0,2
N03	0,1
N02	0,05
N01	0,025

2.5.5 Simbologia, equivalência e processos de usinagem

A Tabela 2.12 distribui em 12 grupos os acabamentos superficiais normalmente utilizados nas indústrias e também organiza de acordo com o grau de rugosidade e o processo de usinagem que pode ser empregado para se atingir. De outra forma exibe uma relação similar entre simbologia de triângulos, as classes e os valores de *rugosidade Média (*R_a*)*.

Tabela 2.12-Simbologia de triângulos, as classes e os valores de Ra (rugosidade média).



Fonte: REBRAC (2013)

2.6 Projeto e Análise de Experimentos (DOE)

O projeto de experimentos (DOE) consiste em técnicas que objetivam planejar experimentos capazes de gerar dados apropriados para uma análise estatística que resulte em conclusões válidas e objetivas. Sugere a variação simultânea dos fatores envolvidos em um experimento com o objetivo de construir modelos de previsão para as respostas de interesse.

Segundo Grine et al. (2010) e Haridy *et al*. (2010), afirmam que projeto de experimentos (DOE), é um método estruturado e organizado, utilizado na determinação do relacionamento entre os diferentes fatores de entrada e saídas do processo, envolvendo a definição do conjunto de experimentos, nos quais todos os fatores relevantes são variados sistematicamente. Quando os resultados desses experimentos são analisados, ajudam a

identificar aqueles fatores que mais influenciam os resultados, as interações e as sinergias entre eles e as condições ótimas.

Segundo Montgomery (2005), um experimento pode ser definido como um teste ou uma série de testes em que mudanças propositais são feitas nas variáveis de entrada de um processo ou sistema, com o objetivo de observar e identificar a forma como as respostas desse sistema são afetadas em função das mudanças provocadas nas variáveis de entrada. Assim, a experimentação, se caracteriza como uma parte fundamental para o método científico na análise das diversas aplicações de engenharia. As técnicas do Projeto e Análise de Experimentos (DOE) têm encontrado uma ampla aplicação em diversas áreas de conhecimento, mostrando-se como um conjunto de ferramentas importantes para o desenvolvimento de produtos e processos. Os principais benefícios alcançados com o emprego das técnicas do DOE podem ser resumidos em:

• Melhoria do rendimento dos processos;
• Redução de variabilidade e maior conformidade com especificações nominais;
• Redução do tempo de desenvolvimento de produtos ou processos;
• Redução de custos.

Os três princípios básicos do Projeto de Experimentos (DOE) são a aleatorização, a replicação e a blocagem. A aleatorização consiste na execução dos experimentos em ordem aleatória para que os efeitos desconhecidos dos fenômenos sejam distribuídos entre os fatores, aumentando a validade da investigação. A replicação é a repetição de um mesmo teste várias vezes, criando uma variação para a variável de resposta utilizada para avaliação do erro experimental. A blocagem deve ser utilizada quando não for possível manter a homogeneidade das condições experimentais. Essa técnica permite avaliar se a falta de homogeneidade interfere nos resultados.

O emprego da abordagem estatística no Projeto e Análise de Experimentos (DOE) necessita que as pessoas envolvidas nos experimentos tenham uma ideia clara a respeito do fenômeno que se pretende estudar, de como os dados serão coletados e de um entendimento básico das ferramentas de análise utilizadas. Assim, ele propõe que o emprego do Projeto e Análise de Experimentos deve considerar as seguintes etapas:

• Definição do problema;
• Escolha dos fatores e definição dos níveis de trabalho;
• Seleção das variáveis de resposta;

• Escolha do projeto experimental;
• Execução dos experimentos;
• Análise estatística dos dados;
• Conclusões e recomendações.

Com relação aos projetos experimentais, tem-se que técnicas mais utilizadas compreendem o Planejamento Fatorial Completo, o Planejamento Fatorial Fracionado, os arranjos de Taguchi e a Metodologia de Superfície de Resposta (Nilo Júnior, 2003). Dessa forma, a Tabela 2.13 apresenta as principais características relacionadas a cada uma dessas técnicas experimentais.

Tabela 2.13–Características fundamentais das principais técnicas do Projeto e Análise de Experimentos

Projeto experimental	Vantagens	Desvantagens	Aplicação
Fatorial Completo 2^k	Permite a varredura completa da região de estudo, pois utiliza todos os fatores de respectivos níveis.	Não identifica variação intermediaria, pois só trabalha em dois níveis. Necessita de um alto numero de corridas para problemas com grande numero de variáveis.	Processos onde já se tem um prévio domínio e onde a realização das corridas não demanda maior tempo ou custo.
Fatorial Fracionado $2^{(k-1)}$	Permite uma pré-análise do processo com um numero reduzido de corridas.	Não promove a varredura completa da região experimental.	Processos onde se deseja um pré-conhecimento e onde a literatura é limitada. Corridas que demandam maior tempo ou custo.
Taguchi	Permite a análise de um processo com muitas variáveis de entrada com um numero extremamente reduzido de experimentos	Fornece uma ideia do processo, porem pode apresentar modelos matemáticos não confiáveis.	Processos onde há pouco ou quase nenhum conhecimento prévio de comportamento. Processos com alta dispersão ou que as corridas demandem alto custo ou tempo.
Metodologia de superfície de resposta	Permite a verificação de variações intermediarias do processo.	Pode apresentar erros na extrapolação dos pontos estrela, já que são realizadas poucas corridas nestes níveis.	Otimização de processos, principalmente bem conhecidos e com baixa dispersão.

Fonte: Adaptado de Gomes (2010).

2.6.1 Planejamento Fatorial Completo

De um modo geral, o planejamento fatorial completo pode ser representado por $\mathbf{n^k}$, onde "**k**" é o número de fatores (variáveis independentes) e "**n**" é o número de níveis (valores das variáveis). Este tipo de planejamento faz todas as combinações possíveis dos **"n"** níveis e normalmente este é recomendável quando o número de variáveis é pequeno, pois no caso de se estabelecer maior quantidade de variáveis ou de níveis, o número de testes aumenta consideravelmente, o que faz de outros métodos uma melhor opção (SUAREZ, 2008).

O experimento fatorial completo se inicia com a definição dos fatores a serem estudados, a partir da observação do processo e da definição de prováveis fatores que influenciarão sobre o resultado do mesmo. Todos os fatores possuem dois níveis denotados pelos sinais "+" e "–". Estes dois níveis são chamados respectivamente de *alto* e *baixo*. O efeito principal do fator *A* é a diferença entre a resposta média do nível + de *A* e a resposta média no nível – de *A*. Pode ocorrer uma modificação na resposta com a mudança do fator "*A"* do nível *baixo* (–) para o nível *alto* (+). A resposta pode ser dada graficamente pela Figura 2.28, onde a resposta é considerada quanto "menor", melhor. Portanto, neste caso, a melhor resposta é obtida ao se utilizar o fator "*A"* com nível *baixo* (–) (MONTGOMERY, 2001) apud (MACEDO, 2012).

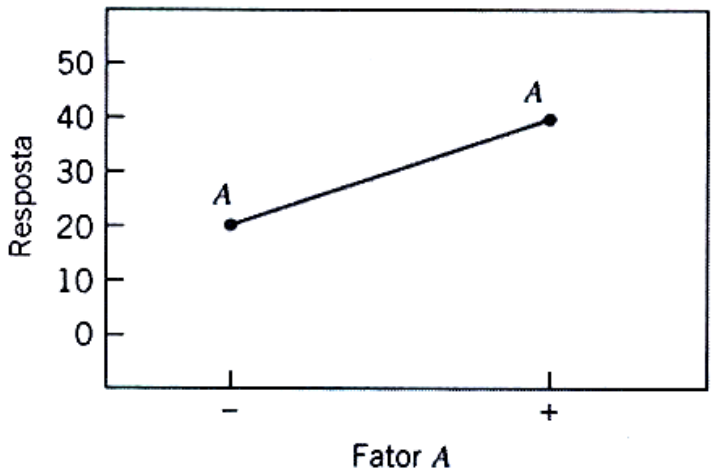


Figura 2.28-Exemplos de gráfico dos efeitos principais.

Fonte: Montgomery (2004).

2.6.2 Diagrama de Pareto

O diagrama de Pareto é um histograma ordenado de maneira decrescente disponível no software MINITAB, que permite expressar graficamente uma priorização. O diagrama de Pareto procura separar as poucas causas vitais das muitas causas triviais. Este diagrama é usado para demonstrar que efeitos e interações são significativos para um determinado modelo. Quando há replicações dos experimentos a linha de referência desenhada sobre o diagrama de Pareto é dada pela Estatística *T de student* (α; df (MSE)), onde α é o nível de significância e df (MSE) são os graus de liberdade da média quadrática do erro. Qualquer efeito padronizado que ultrapasse a linha de referência é tido como significativo, conforme a Figura 2.29. Neste exemplo a temperatura e a pressão foram significativas para a resposta, pois atravessaram a linha de referência vertical. O efeito padronizado é encontrado dividindo-se o valor do coeficiente do fator pelo respectivo erro padrão (SE) (PAIVA, 2004).

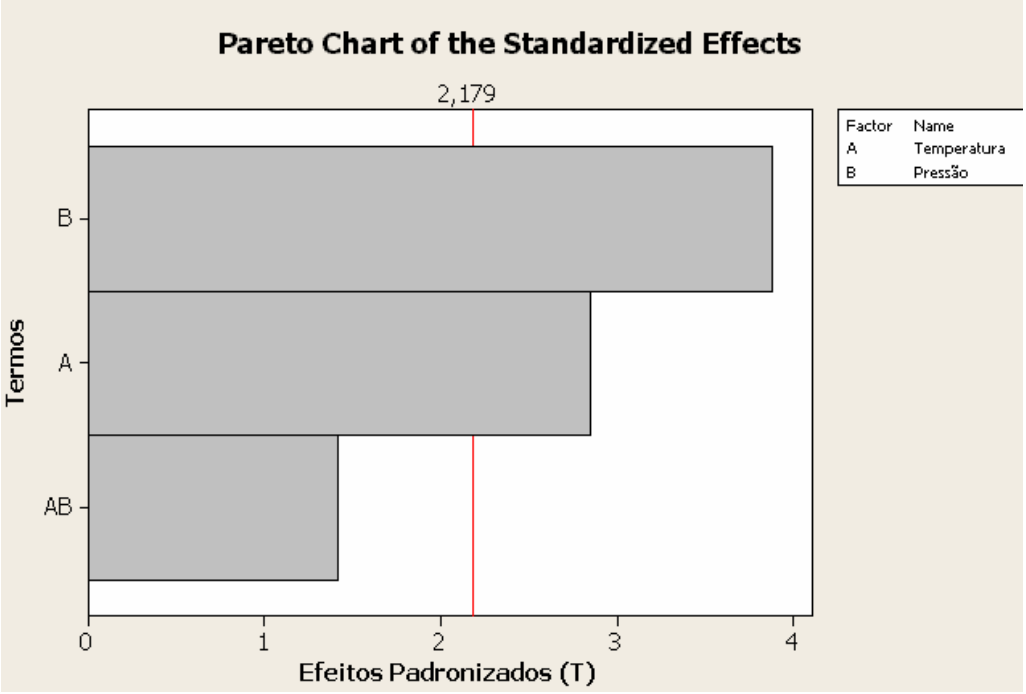


Figura 2.29–Exemplo do diagrama de Pareto, efeitos dos elementos e suas interações. Adaptado de Paiva (2004)

2.6.3 Análise de Variância (*ANOVA*)

A Análise de Variância (ANOVA) é uma técnica utilizada para se testar a igualdade entre médias de vários grupos. O parâmetro de teste utilizado pela ANOVA para verificar a igualdade entre as médias baseia-se na relação existente entre a variação *entre* um tratamento (*Between*) e a variação *dentro* de tratamentos (*Within*), (MONTGOMERY & RUNGER, 2003).

Quando dois níveis de um fator geram respostas médias estatisticamente iguais, significa que o fator não influencia a resposta. Quando, ao contrário, a resposta média em um nível específico é estatisticamente diferente daquela obtida nos outros níveis, o fator é significativo (PAIVA, 2004).

A variação *dentro* (*Within*) origina-se das replicações. Calculando-se a média das replicações, obtém-se a média *dentro* do tratamento. Quanto mais as replicações diferirem desta média, maior será a variação *dentro* deste tratamento. Dividindo-se a variação *entre* pela variação *dentro* obtém-se a Estatística de Teste F, que, quando comparada com um valor de *F crítico*, definido segundo o nível de significância e o número de graus de liberdade (Figura 2.30), possibilita a aceitação ou rejeição da hipótese nula, acerca da igualdade entre as médias dos níveis dos fatores (BALESTRASSI, 2003).

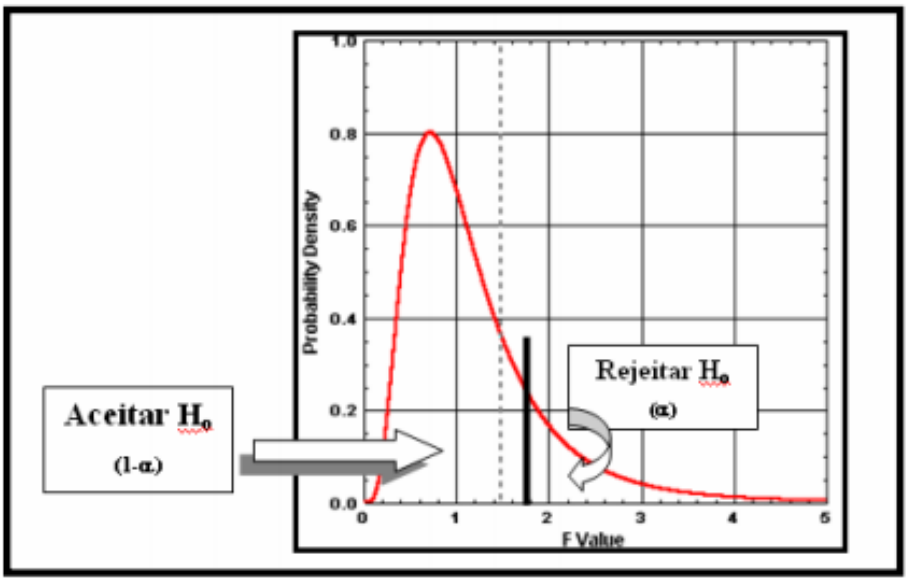


Figura 2.30-Regiões de rejeição e aceitação de Ho p/uma distribuição F.
Adaptado de Neto (2002) e Devor (1992).

O procedimento estatístico de confirmação para uma resposta é realizado através da análise do P. Segundo Triola et al (1999), “P é a probabilidade de se obter um valor da estatística amostral de teste no mínimo tão extremo como o que resulta dos dados amostrais, na suposição de a hipótese nula ser verdadeira”.

O teste de hipótese é feito da seguinte maneira (Balestrassi, 2003):

- H0 = o fator não tem efeito sobre a resposta;
- H1 = o fator tem um efeito sobre a resposta;
- Se $P > \alpha$: Aceita-se H0 ;
- Se $P < \alpha$: Rejeita-se H0;

Onde α é o nível de significância e para essa pesquisa vamos utilizar um $\alpha = 0{,}05$ que fornece um resultado do teste com 95 % de confiança.

Capítulo 3

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Todas as informações necessárias para a metodologia experimental são descritas neste capítulo visando obter os resultados para a caracterização da rugosidade, aspecto visual, microestrutura e análise estatística. Os experimentos de usinagem foram realizados na Oficina mecânica de precisão do LNA - Laboratório Nacional de Astrofísica, vinculado ao Ministério da Ciência e Tecnologia e as análises foram realizadas no Laboratório de Metrologia do LNA, Laboratório de Metalurgia e Materiais e Laboratório de Caracterização Estrutural da UNIFEI - Universidade Federal de Itajubá e no Laboratório de Recebimento de Materiais da IMBEL.

3.1 Máquina CNC

Para realizar a usinagem dos corpos de prova foi utilizado um centro de usinagem vertical VEKER, Modelo CVK-610L, BT 40, com 4 eixos, que pode ser equipado com 16 ferramentas, rotação máxima da árvore é igual a 8000 RPM e potência de 9 KW, curso de trabalho 610 x 410 x 460 mm, a velocidade máxima de trabalho de 8.000 mm/min e avanço rápido em X/Y/Z de 30.000 mm/min, conforme a Figura 3.1.

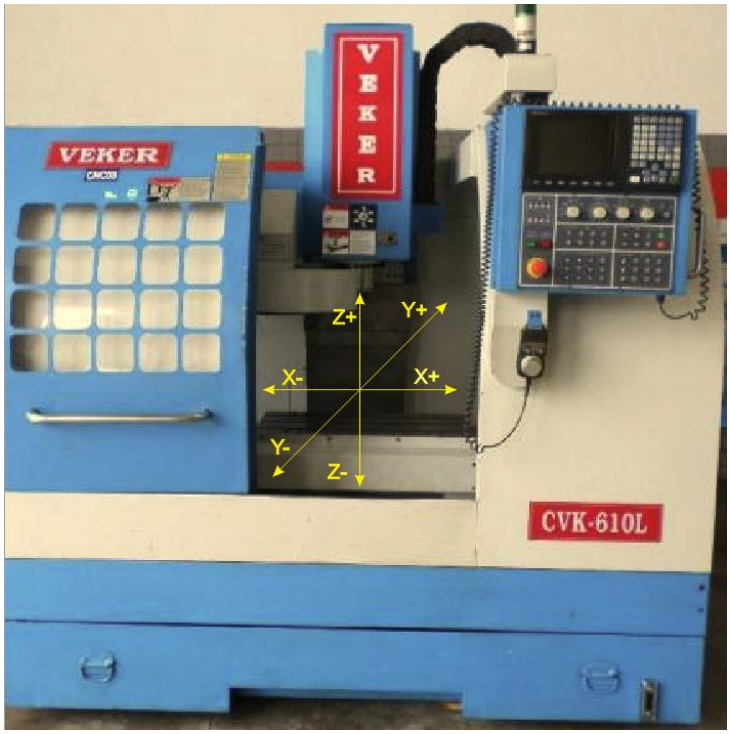
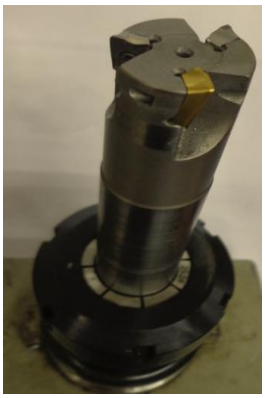
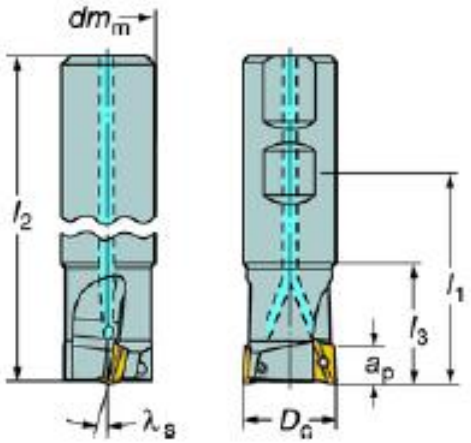


Figura 3.1-Centro de usinagem VEKER do Laboratório Nacional de Astrofísica-LNA.

3.2 Ferramenta de Corte

Foi utilizado nos ensaios uma fresa de topo conforme Figura 3.2, do fabricante Sandvik, código R390-025A25-11M (passo médio), com sistema de fixação porta barra, sem refrigeração, diâmetro 25 mm, com três insertos intercambiáveis para usinagem de fresamento de cantos a 90º, com limite máximo de rotações por minuto igual a 36500 r/min. Foram feitas duas montagens, sendo que na primeira montagem foram utilizados três insertos com geometria de raio normal (N), conforme Figura 3.3 e na segunda montagem foram utilizados três insertos, sendo dois insertos com geometria de raio normal (N) e um inserto com geometria alisadora *WIPER* (W), conforme Figuras 3.3 e Figura 3.4 respectivamente.

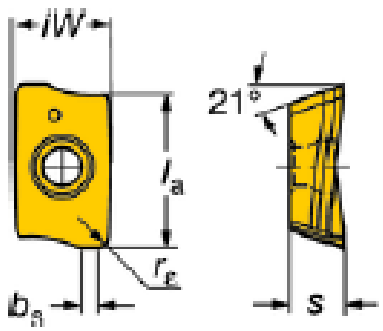




Dc (mm)	**l_2 (mm)**	**dm_m**	**l_3 (mm)**	**ap (mm)**	**λs (º)**	***N* máx**
25	210	25	32	10	17,06	36500

Figura 3.2-Cabeçote com insertos para o fresamento de topo.

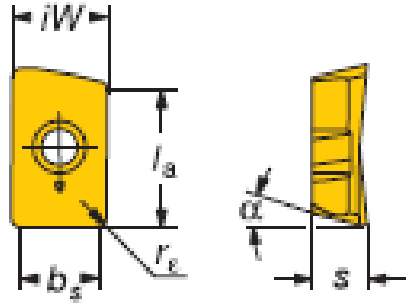
A Figura 3.3 mostra o tipo de inserto com geometria de raio normal (N)), código Sandvik R390-11 T3 08E-NL H13A para CoroMill® 390 metal duro ISO N15, revestido com nitreto de titânio.



iW (mm)	s (mm)	l_a (mm)	r (mm)	b_s(mm)
6,8	3,5	11	0.8	1,5

Figura 3.3-Inserto com geometria de raio normal (N) - R390-11 T3 08E-NL H13A.

A Figura 3.4 mostra o tipo de inserto com geometria alisadora *WIPER* (W), código Sandvik R390-11T3 08 E-PLW GC 1025 para CoroMill® 390, ISO N15.



iW (mm)	s (mm)	l_a (mm)	r (mm)	b_s (mm)
6,8	3,5	11	0.8	4

Figura 3.4-

Inserto com geometria alisadora *WIPER* (W)

3.3 Fluido de Corte

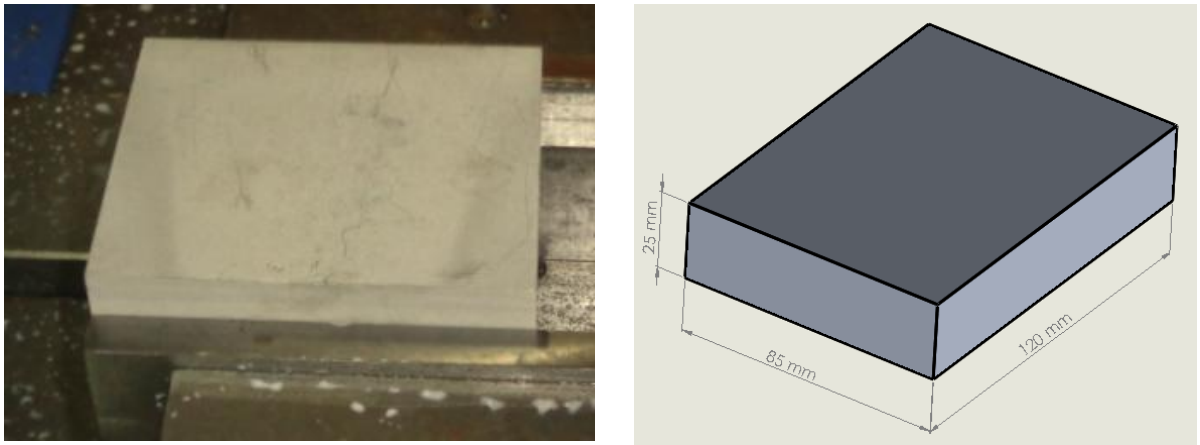
Foi utilizado um fluido semi-sintético, Ecofluid BQ504 da BETIM QUIMICA, com uma condição básica, emulsionado em abundância, na proporção em volume de uma parte de

óleo para vinte partes de água (1:20), bombeado com uma vazão de aproximadamente 40 l/min, pelo próprio sistema de aplicação de fluido de corte da máquina-ferramenta.

3.4 Material da Peça

A Figura 3.5 apresenta um tarugo de alumínio 7075 retirado de um lingote com as dimensões de 102 x 202 x 250 mm e submetido ao tratamento térmico T6. Este material é procedente da Rússia, conforme especificação ASTM B209. É utilizado na fabricação de peças para instrumentos auxiliares que são utilizados nos telescópios. Esses instrumentos atendem tanto a projetos internacionais e nacionais. Foram retirados 16 corpos de prova do tarugo com as dimensões de 25 x 85 x120 mm conforme Figura 3.6. Estas dimensões foram adotadas para que não ultrapassasse a capacidade da morsa.

Figura 3.5-Tarugo liga 7075 preparado com dimensões de 102x202x250 mm



a) b)

Figura 3.6-Corpo de prova Alumínio 7075 T6 fixo na morsa (a) e suas dimensões (b).

3.5 Análise Química

Para determinar a composição química da liga de alumínio 7075 recebida, foi utilizado o equipamento Espectrômetro de Emissão Óptica da Figura 3.7, marca Spectromax, modelo 2009, da Indústria de Material Bélico do Brasil-(IMBEL). O programa utilizado para análise foi o Al-01-F de ligas de alumínio. O processo para a determinação quantitativa dos elementos na amostra consiste na espectroscopia de emissão ótica. A amostra foi preparada apenas cortando o material no tamanho adequado, aproximadamente um quadrado de 10 x10 mm, sem qualquer outro tipo de cuidados, como lixamentos, polimentos, ataques, etc. A amostra ficou exposta à ação de um arco elétrico, parte deste material foi vaporizado e transformado em plasma. Os elétrons e íons excitados neste plasma tiveram suas emissões decompostas em componentes espectrais, que foram processadas pelo equipamento através das intensidades e comprimentos de onda deste espectro. Foi possível conhecer quais foram os elementos químicos presentes na amostra, bem como suas proporções em massa. O equipamento é calibrado periodicamente conforme procedimentos do setor de Qualidade.

Figura 3.7-Espectrômetro de emissão ótica.

3.6 Tratamento Térmico do Alumínio

Para a realização do tratamento térmico T6 foi utilizado um forno câmara, Figura 3.8 (a), da indústria Maxtermo, marca JUNG, modelo 9610, com controle micro processado

digital de temperatura, com rampa de aquecimento/patamar e com sensor de temperatura blindado. O forno possibilitou a manutenção da temperatura com erro no máximo de ± 1ºC em seu interior, tendo um termopar que controlou a temperatura de aquecimento do corpo de prova. Para a execução do envelhecimento artificial foi utilizado uma câmara de ensaio climático Votsch, modelo 4100, com faixa de trabalho de -42 ºC a 180 ºC do Laboratório Nacional de Astrofísica, conforme Figura 3.8 (b).

a) b)

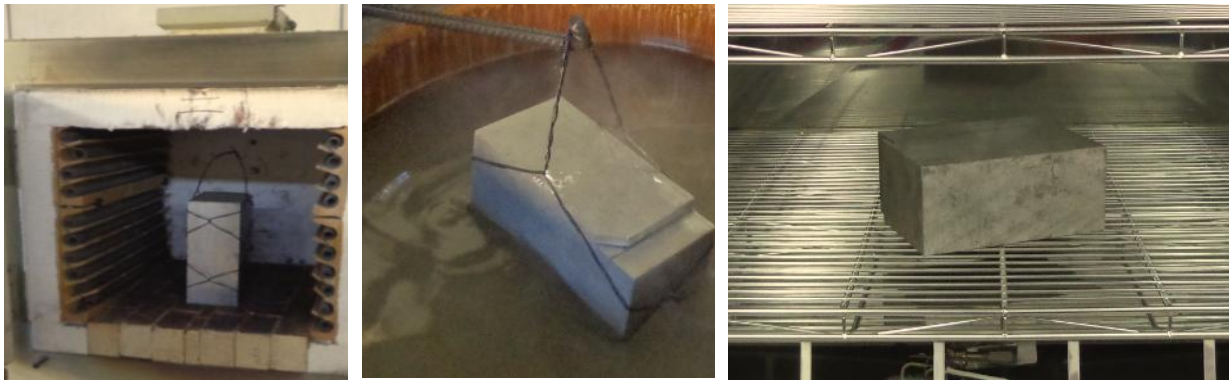
Figura 3.8-Forno (a) e Câmara de ensaio climático para envelhecimento artificial (b).

Inicialmente, o tarugo foi envolto com uma armação de arame, tipo gaiola, conforme Figura 3.9(a), para facilitar a colocação e retirada do forno ao ser executado o tratamento de solubilização e têmpera.

Para a execução da solubilização, o tarugo foi submetido a seguinte rampa de aquecimento, dividida em 3 etapas: inicialmente foi colocado no forno ainda desligado, logo após foi ajustada a temperatura para 100 °C. Depois de o forno ter alcançado esta temperatura, permaneceu pelo tempo de 15 minutos e posteriormente esta foi reajustada para 250 °C. Quando o forno atingiu tal temperatura, permaneceu outros 15 minutos e finalmente foi ajustada para 480 °C permanecendo o tempo de 155 minutos.

A temperatura de encharque foi estipulada em 480 ± 5 °C, o tempo foi controlado após a temperatura do tarugo atingir a mesma do forno. Para isto foi utilizado um termopar introduzido por um furo. A literatura indica que a temperatura para o tratamento da têmpera T6 deve ser igual a 460 ºC a 499 ºC e depende da espessura da peça, ou seja, para espessura de até 100 milímetros são 65 a 75 minutos (parte mais comprida da peça) e acima de 100 milímetros deve-se aumentar 15 minutos a cada 12,7 milímetros, sendo que a temperatura da

água não deve ultrapassar 43 ºC. Estipulou-se, portanto que a temperatura de encharque seja de 480 ºC e o tempo igual a 150 minutos (ASM INTERNATIONAL, 1991b).



a) b) c)

Figura 3.9-Detalhes do Tratamento de solubilização (a), Têmpera (b) e Envelhecimento artificial(c)

Após a passagem do tempo de encharque, seguiu-se imediatamente o mergulho em tanque com água e temperatura em torno de 33 ºC. O tempo de retirada do tarugo do forno e a posterior imersão em água foi inferior a 15 segundos, conforme sugerido pela (ASM INTERNATIONAL, 1991b).

Após a solubilização e têmpera o tarugo foi colocado em uma câmara de ensaio com faixa de trabalho de -42 ºC a 180 ºC e taxa de aquecimento 4 ºC/minutos e submetido ao envelhecimento artificial na temperatura de 121°C e tempo igual a 24 horas, conforme é especificado pela (ASM INTERNATIONAL, 1991b), para o tratamento da têmpera T6 para a liga 7075.

3.7 Ensaio de Dureza

Para avaliar a dureza do material foi utilizado um Durômetro digital Mitutoyo, modelo DUROTWIN-D 963-102-50, conforme Figura 3.10, segundo métodos Rockwell normal, um penetrador com esfera de aço de diâmetro 1/16, escala B, com carga 100 kgf para aplicações em ligas de Cu, Ni, Al, aços não temperados, aço liga metais moles, bronze etc.

Figura 3.10-Durômetro Mitutoyo -DUROTWIN-D (963-102-50).

Foram retiradas 3 amostras no recebimento da liga 7075, após ela ter sido solubilizada-Temperada e envelhecida artificialmente. Para cada amostra foram feitas 4 medidas em regiões aleatórias da face superior.

Após o envelhecimento artificial foram retirados os 16 corpos de prova do tarugo conforme Figura 3.6(b) e feito 10 medidas aleatórias da dureza em cada face dos corpos de prova, logo após foi calculado a média e convertidas para a dureza Brinell. Isto foi feito para acompanhar e avaliar o resultado final dos ensaios da dureza durante o processo de tratamento. Este estudo não irá se aprofundar em comparações com o material 7075 T6 já existente no mercado, deixando esta análise para trabalhos futuros, ou seja, a preocupação será apenas se o processo atingiu o resultado esperado.

3.8 Metalografia-Preparação do Material

A preparação da amostra para a análise de Metalografia foram executadas no Laboratório de Metalurgia e Materiais da UNIFEI. Foi utilizado um microscópio de luz refletida, marca Zeiss, modelo Jenavert e com acessório de aquisição de imagens, marca Olympus, modelo TVO 5XC-3.

Inicialmente foi retirada uma amostra do material no sentido longitudinal, conforme Figura 3.11, no estado recebido, solubilizado/temperado e envelhecido e foi feito o embutimento das mesmas, conforme Figura 3.12.

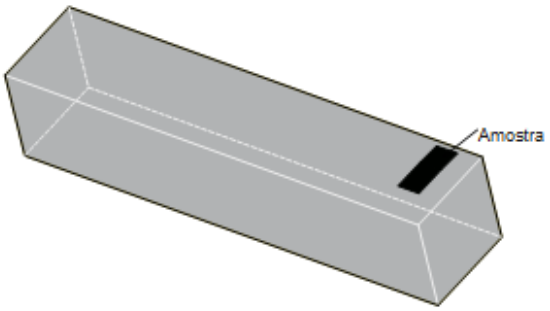


Figura 3.11-Ilustração da orientação do grão em relação à amostra no lingote laminado.

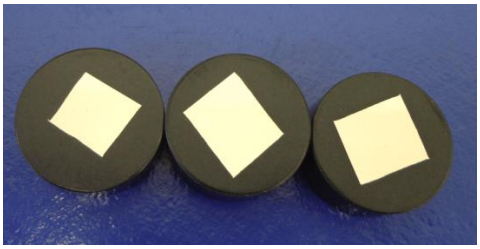


Figura 3.12-Amostras para análise

Após o embutimento as amostras passaram por um processo de lixamento com lixas de grau 200, 400, 600, 1200, polimento com solução de alumina, seguida polimento com solução de sílica coloidal OPU e para revelação dos contornos de grão utilizou-se ataque químico com reagente de Keller (3 segundos). Este reagente foi utilizado por ser recomendado para este tipo de ensaio para ligas da classe 7XXX (ASM INTERNATIONAL, 1998).

3.9 Análise no Microscópio Eletrônico (MEV)

A preparação das amostras foi similar ao procedimento realizado no item anterior 3.8. O microscópio utilizado foi o Zeiss EVO MA15, Figura 3.13, instalado no Laboratório de Caracterização Estrutural da UNIFEI.

Utilizou-se neste trabalho, análises por Elétrons Secundários do tipo I, *("secondary electron" – SE)* e por Elétrons Retroespalhados, *("backscattering electron" - BSE)*. Os contrastes das figuras apresentadas pelos dois tipos de análise traduziram se, majoritariamente, em características topográficas e composicionais da amostra.

Foi também empregado o Espectrômetro de Energia Dispersiva (EDS), marca Bruker, Modelo XFlash, associado ao MEV, a fim de obter informações adicionais a respeito da distribuição dos elementos químicos nas amostras.

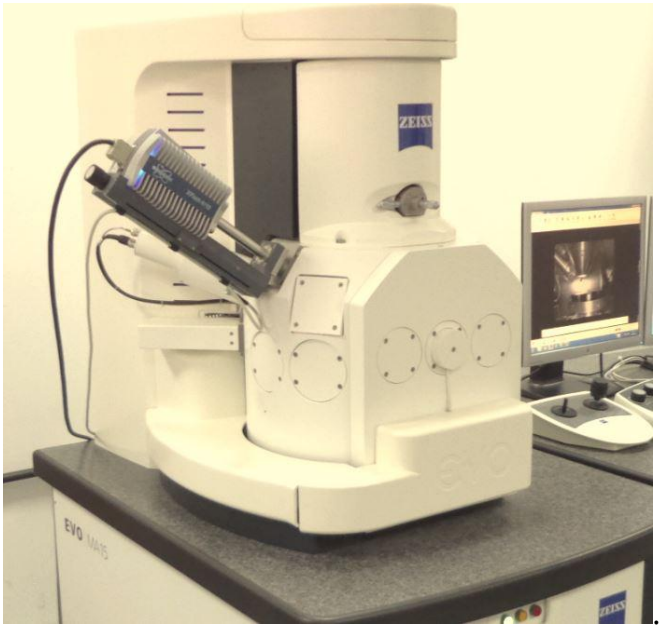


Figura 3.13-MEV - Microscópio Eletrônico de Varredura

3.10 Instrumentos de Medição

A avaliação da rugosidade da superfície usinada foi feita utilizando o rugosímetro portátil Mitutoyo Surftest 201 Mitutoyo, conforme mostrado na Figura 3.14.

Figura 3.14–Rugosímetro portátil Mitutoyo Surftest 201.

Os parâmetros medidos foram R_a e R_z, porém para efeito de análise apenas o valor de rugosidade R_a foi considerado em função da aplicação, representando a média aritmética das amplitudes entre os picos e vales em relação a uma linha de centro. O parâmetro de *cut-off*, comprimento de amostragem foi ajustado para 0,8 mm com 4 repetições em todas as medidas.

Após a primeira etapa dos ensaios de usinagem foi feita a limpeza das peças, depois 4 leituras no sentido do avanço, ou seja, perpendicular aos sulcos e foram registrados a média aritmética desses valores. Esse procedimento foi repetido para o segundo ensaio.

A posição da montagem do rugosímetro, para a coleta dos valores da rugosidade foi feita fixando o rugosímetro em um traçador de altura, possibilitando assim um melhor controle de aproximação e pressão da ponta do aparelho sobre a face da amostra que estava sobre uma mesa de desempeno. Os valores medidos eram registrados em planilha eletrônica. Antes das medições, o rugosímetro SJ201 foi calibrado seguindo seu procedimento com o padrão fornecido pelo fabricante.

3.11 Análises Microscópicas do Aspecto Visual

Para a avaliação microscópica do aspecto visual da superfície da peça fresada foi utilizado um microscópio Mitutoyo Hiper UMAP vision system 302 Type2, faixa de trabalho 400 mm x 400 mm x 250 mm, resolução 0,02 µm, câmara, CCD preto e branco do LNA-Laboratório Nacional de Astrofísica, conforme Figura 3.15

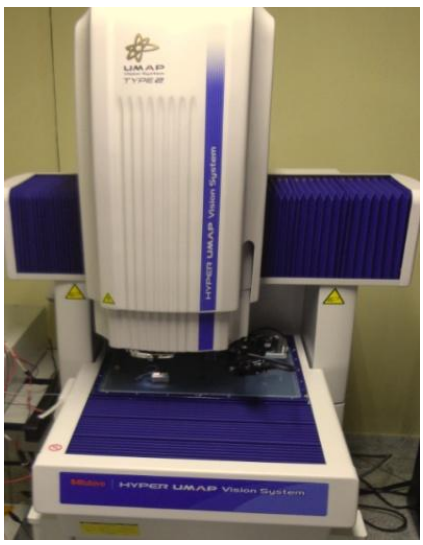


Figura 3.15-Aparelho Microscópio.

A utilização do microscópio em diferentes ampliações possibilitou reconhecer a direção de avanço da ferramenta e analisar os vários aspetos visuais geradas nas 32 regiões usinadas e os efeitos provocados pela inter-relação dos parâmetros em estudo.

3.12 Câmera Digital

Para registro das imagens dos ensaios de usinagem, corpos de provas e acessórios, foi utilizada uma câmera marca Sony Cyber-shot 16,1 mega pixels, 5xZoom.

3.13 Planejamentos Experimentais

3.13.1 Definição dos parâmetros

Os parâmetros utilizados nos ensaios estão de acordo com as informações do catálogo Sandvik Coromant (2011) e das características do material utilizado. O foco deste trabalho é investigar a influência de determinados parâmetros de usinagem na qualidade superficial da peça, executando o fresamento de acabamento de topo frontal.

Na Tabela 3.1 é apresentado o Planejamento Fatorial Completo para 4 fatores: avanço por dente, velocidade de corte, sentido de corte e raio. Foram escolhidos dois níveis diferentes para cada fator, sendo dois com valor numérico máximo e mínimo e dois fatores com valores em texto. A condição experimental do arranjo foi conduzida para a execução de 16 experimentos os quais foram replicados uma vez. Os ensaios foram feitos sobre condição de Lubri-refrigeração com jorro.

Tabela 3.1-Planejamento Fatorial Completo $2^{4.}$

	Fatores	**Níveis /Valores**	
		-1	1
1	Vc (m/min)	400	600
2	fz (mm/dente)	0,10	0,30
3	Sentido corte	C (concordante)	D (discordante)
4	Raio	Normal (N)	Normal/Wiper (N/W)
	Sistema de Lubri-refrigeração	Com Jorro	Com Jorro

Os ensaios foram realizados em duas etapas (dois blocos). A primeira etapa compreende um ensaio do planejamento completo 2^4. O objetivo é verificar a influência dos

fatores velocidade de corte, avanço por dente, sentido de corte e raio na rugosidade final. Os parâmetros penetração de trabalho e a profundidade de corte foram mantidas constantes em todos os ensaios nos valores iguais a 18 mm e 1 mm, respectivamente. Na segunda etapa foi realizado outro ensaio que constitui uma réplica, mantendo as mesmas condições dos ensaios do primeiro ensaio, totalizando 32 experimentos. A Tabela 3.2 mostra a matriz do planejamento fatorial completo 2^4. Foram realizados ensaios dispostos em ordem aleatória para se evitar desvios que pudessem apresentar erros sistemáticos.

Tabela 3.2-Planejamento Fatorial Completo 2^4 disposto aleatoriamente

	Ensaio	Velocidade de corte	Avanço por dente	Sentido de corte	Raio
Primeiro bloco -1º ensaio	1	600	0,1	D	NW
	2	600	0,1	D	N
	3	400	0,1	C	NW
	4	600	0,3	D	N
	5	600	0,3	D	NW
	6	600	0,1	C	NW
	7	600	0,1	C	N
	8	400	0,1	C	N
	9	400	0,1	D	NW
	10	600	0,3	C	N
	11	400	0,3	C	N
	12	600	0,1	C	NW
	13	600	0,1	D	N
	14	400	0,1	D	N
	15	400	0,1	D	N
	16	600	0,3	D	NW
Segundo bloco - Réplica	17	400	0,1	D	NW
	18	600	0,3	C	NW
	19	600	0,3	C	NW
	20	600	0,1	D	NW
	21	400	0,3	D	N
	22	400	0,3	D	NW
	23	400	0,3	C	NW
	24	400	0,1	C	N
	25	400	0,3	C	N
	26	400	0,3	C	NW
	27	400	0,3	D	N
	28	600	0,3	C	N
	29	400	0,3	D	NW
	30	600	0,3	D	N
	31	600	0,1	C	N
	32	400	0,1	C	NW

Sentido de corte : D-Discordante / C-Concordante

3.13.2 Procedimentos para realização dos ensaios de usinagem

No fresamento dos corpos de prova foi obedecido a sequência dos ensaios conforme disposição da Tabela 3.2, para que os dados recolhidos dos experimentos fossem variáveis aleatórias e independentes. A trajetória linear obedecida foi no plano xy da ferramenta em relação à peça. Portanto, uma rotina de programa em CNC foi desenvolvido para que a ferramenta usinasse em cada ensaio dois passes com a profundidade de corte no valor de 1,0 mm no sentido longitudinal do comprimento de 120 mm e a penetração de trabalho com valor de 18 milímetros foi mantida constante. Isto foi obedecido em todos os 32 ensaios, totalizando 64 passes.

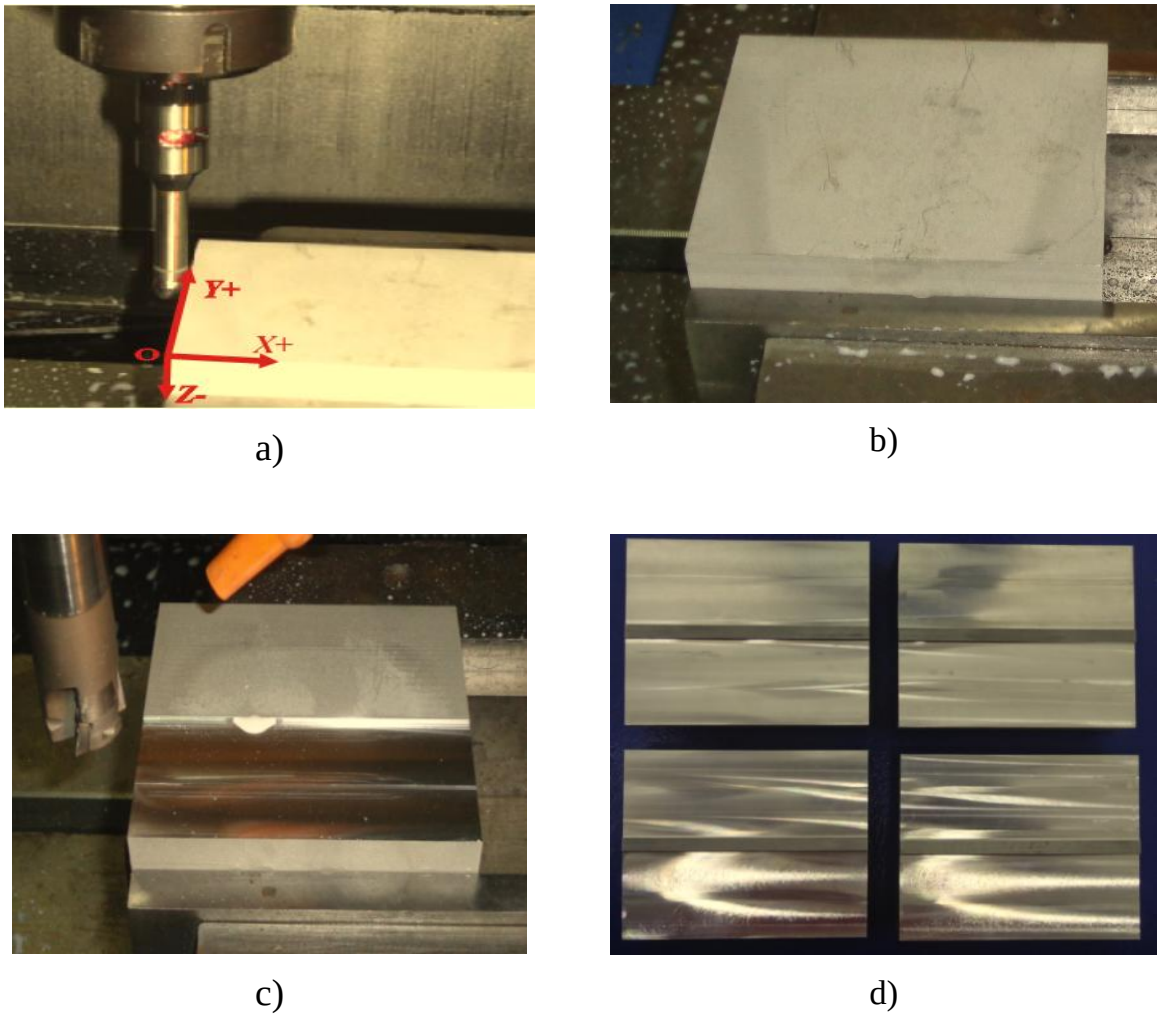


Figura 3.16-Detalhes da montagem e usinagem dos corpos de prova.

Na fixação da peça foram tomados todos os cuidados, para verificar o comportamento da peça, ferramenta, jato de óleo refrigerante e remoção de cavaco, para assegurar a uniformidade dos ensaios e evitar qualquer situação que pudesse causar interferência nos

resultados finais. Foi utilizado um sensor de aresta eletrônico com Led (Figura 3.16a) para o posicionamento zero peça na morsa dos eixos x e y, facilitando assim a troca dos corpos de prova (Figura 3.16b). A Figura 3.16c mostra o posicionamento de todos os 32 ensaios, resultando nos corpos de prova usinados da Figura 3.16d.

Inicialmente foram feito pré-testes de usinagem a fim de avaliar os parâmetros de corte impostos às amostras, assim como o sistema de fixação da peça, desgaste da ferramenta e o andamento do processo em si.

O balanço da ferramenta é um fator importante e que afeta diretamente no acabamento, principalmente em altas rotações. Ele é a razão do comprimento e o diâmetro da ferramenta (L/D), Se for maior que 10, é muito elevado, há uma situação severa. O ideal deve ser o menor possível, ou seja (L/D) < 5. O balanço para os ensaios ficou em torno de 4.

A sequência de cada ensaio de fresamento foi obedecido conforme já citado acima. Após usinagem dos 32 ensaios foram coletadas as rugosidades e os valores anotados em uma planilha e avaliado possíveis desgastes dos insertos.

Segundo a Sandvik-Coromant (2011), o inserto com geometria alisadora apresenta uma face plana que projeta-se abaixo dos insertos com geometria de raio normal de fresamento em aproximadamente 0,05 mm, quando montada em fresas com assentos fixos do inserto, conforme mostrado na Figura 3.17, onde o inserto do lado esquerdo é do tipo normal e da direita é do tipo alisadora *(wiper).*

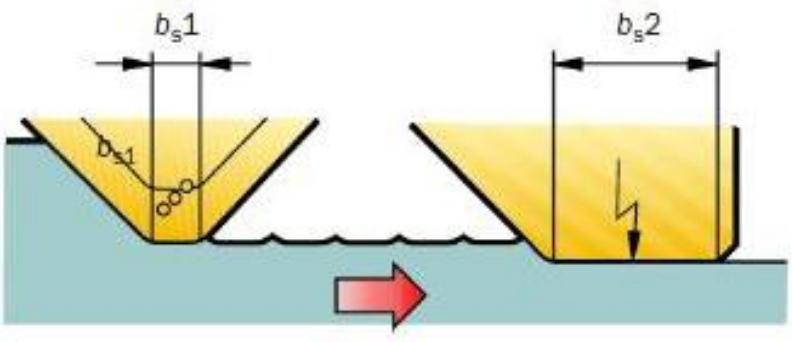


Figura 3.17-Acabamento com inserto com geometria normal e *Wiper* - Fonte (SANDVIK, 2011)

Capítulo 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

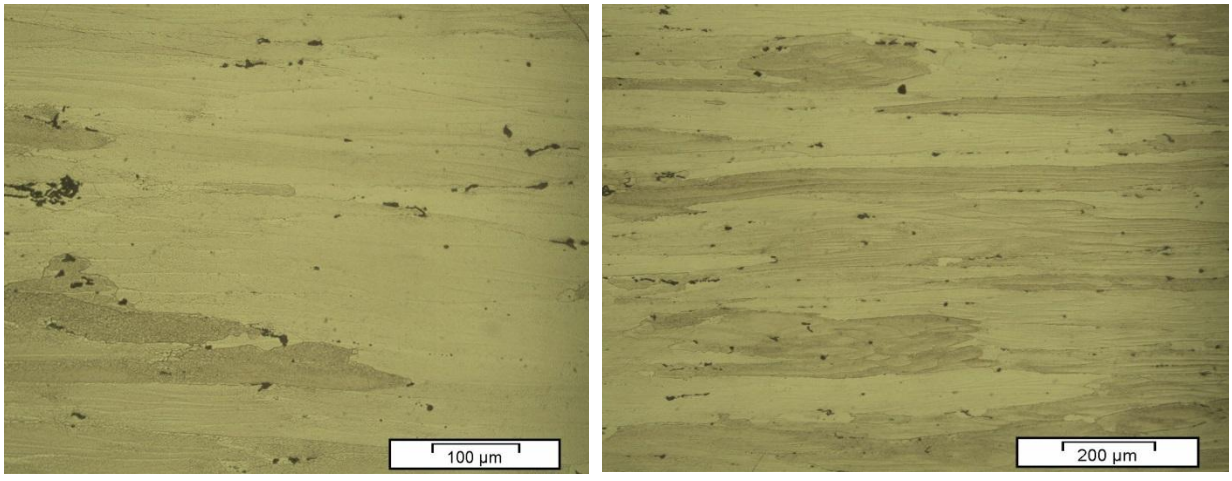
4.1 Caracterizações das Amostras do Material (recebido, solubilizado e envelhecido)

A Tabela 4.1, mostra o resultado da composição química encontrada no estado recebido. O resultado encontra-se de acordo com as especificações para a liga Al 7075.

Tabela 4.1-Composição química do material 7075-Estado recebido (% em peso).

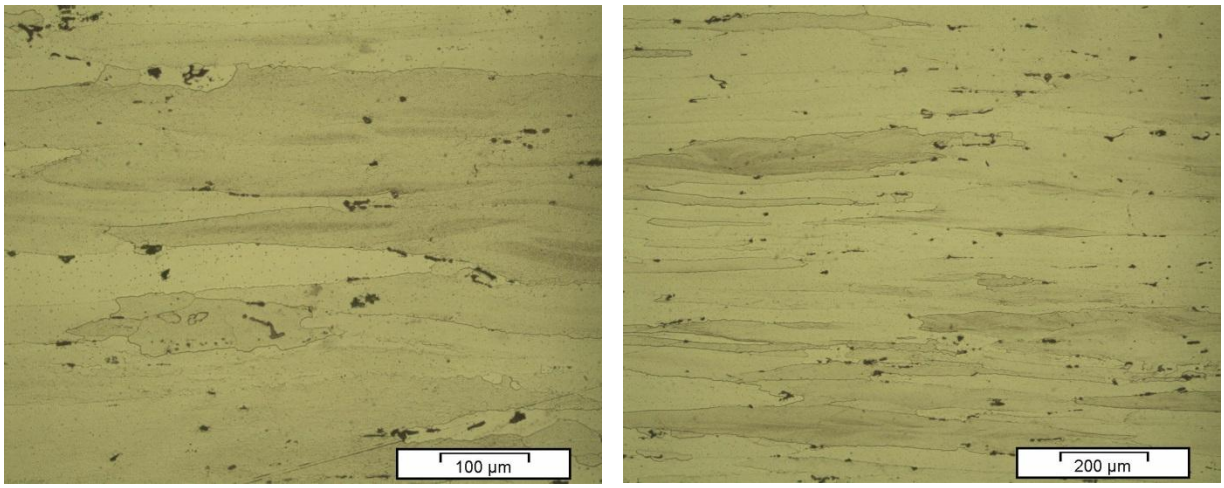
Composição Química %								
Mg	Fe	Cu	Mn	Al	Cr	Zn	Ti	Outros
2,40	**0,17**	**1,43**	**0,023**	**89,10**	**0,19**	**6,05**	**0,07**	-

As Figuras 4.1a; 4.1b; 4.2a; 4.2b; 4.3a e 4.3b apresentam a metalografia óptica do alumínio no estado recebido, solubilizado/temperado e envelhecido respectivamente. A orientação dos grãos e sua textura indicam tratar-se de material laminado. Não há evidência de precipitados grosseiros visíveis.



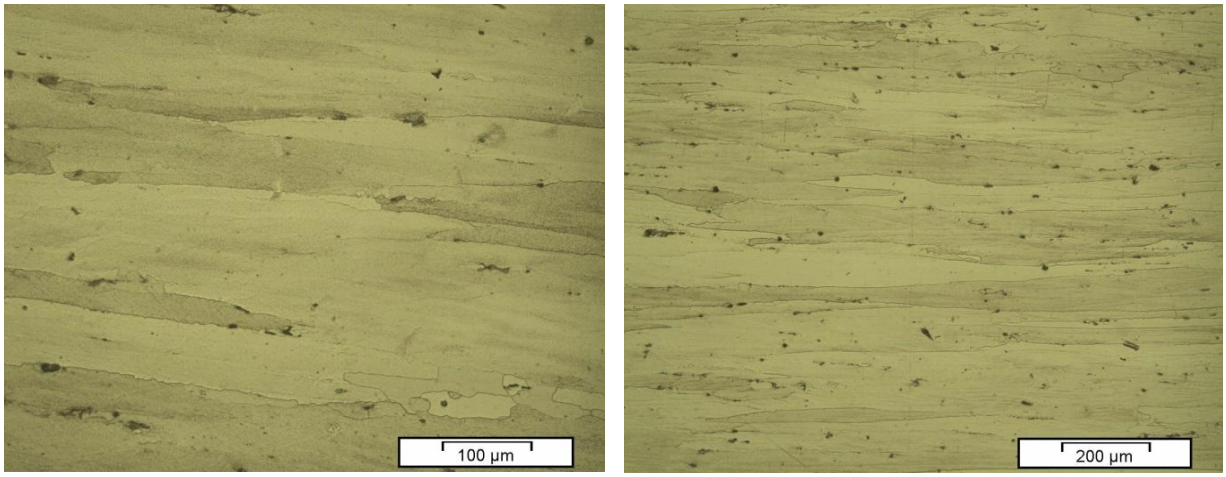
a) b)

Figura 4.1-Microscopia óptica da amostra do alumínio no estado recebido. Ataque com reagente de Keller diluído por 20s.



a) b)

Figura 4.2-Microscopia óptica da amostra do alumínio no estado solubilizado-temperado, 480 °C. Ataque com reagente de Keller diluído por 20s.



a) b)

Figura 4.3-Microscopia óptica da amostra do alumínio no estado envelhecido, temperatura de 121 °C por 24 h. Ataque com reagente de Keller diluído por 20s.

Após o tratamento térmico do alumínio, nota-se nos resultados da microscopia óptica dos três estados que não há diferenças morfológicas relevantes entre elas. Não há formação de grãos com formato equiaxiais, isto demonstra que o alumínio não foi exposto a temperaturas elevadas durante a solidificação. A mudança que foi observada entre as amostras foi a dureza, porém elas estão diferentes em todas as etapas do tratamento.

A Tabela 4.2 mostra o resultado obtido da dureza do alumínio no estado recebido, solubilizado/temperado e envelhecido artificialmente.

Tabela 4.2-Característica da dureza da liga 7075 no estado recebido, solubilizado e envelhecido artificialmente.

Condição do Material	Dureza 150 (Brinell)
Recebido	162
Solubilizado e temperado	135
Envelhecido artificialmente	177,5

Após a solubilização e têmpera verificou-se uma queda da dureza do material, a ausência de precipitados torna o material dúctil e macio, sendo este um momento especialmente propício para processos de conformação mecânica, como laminação (HATCH, 1984).

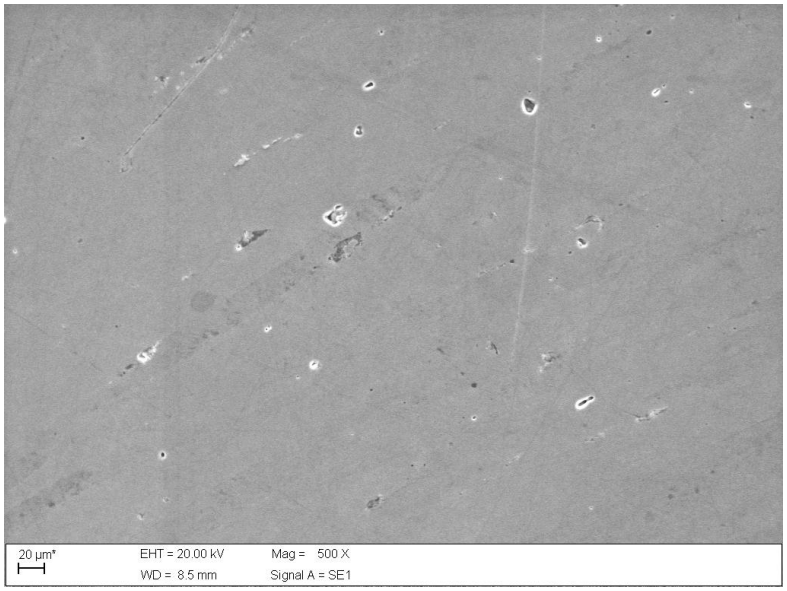
Após o envelhecimento artificial verificou-se um aumento da dureza e o resultado foi coerente com o tratamento executado, ou seja, está compatível com o recomendado para a liga Al 7075. O envelhecimento, seja artificial ou natural, é o processo pelo qual passa o alumínio, após ser solubilizado e resfriado rapidamente, onde proporciona uma correta difusão dos átomos de soluto, aquilo que foi dissolvido na solubilização e permite a formação de finos precipitados endurecedores. Estes finos precipitados endurecedores devem ter o tamanho e a quantidade suficiente para impedir a movimentação das discordâncias e por consequência endurecer a liga. Por outro lado, comprovou-se que a peça não ficou exposta a temperatura e tempo elevado. O superenvelhecimento, resultante do prolongamento do envelhecimento por longos períodos ou em altas temperaturas, provoca queda de dureza (IMFOMET, 2013).

4.1.1 Análise no MEV/EDS da Liga 7075 Conforme Recebido

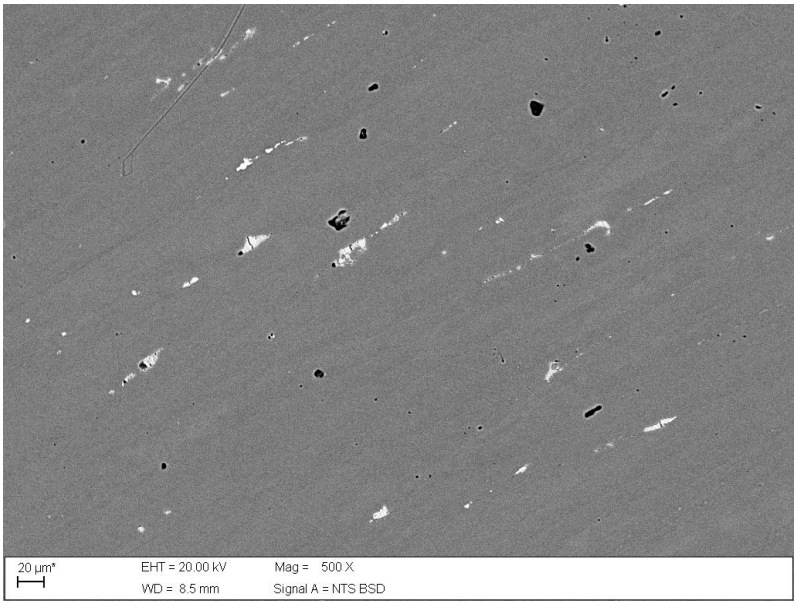
As Figuras 4.4a e 4.4b apresentam uma amostra da liga 7075 no estado recebido que foi analisada no MEV, nos modos Elétrons Secundários do tipo I, *("secondary electron" – SE)* e por Elétrons Retroespalhados, *("backscattering electron" - BSE)*. pode-se observar uma coerência entre as imagens nos dois modos de análises através da relação claro/escuro. As características topográficas da amostra no modo Elétrons Secundários do tipo I, *("secondary electron" – SE)* seguem as características composicionais obtidas pelo modo Elétrons Retroespalhados, *("backscattering electron" - BSE)*, ou seja, significa que as regiões de composição química diferenciada (fases intermetálicas), se encontram com diferença de altura em relação a matriz, resultando em regiões claras e escuras em Elétrons Secundários do tipo

I, *("secondary electron" – SE).* Isto demonstra a diferença de dureza das fases em relação a matriz, resistindo de forma diferente ao lixamento e polimento na preparação metalográfica.

Morfologicamente, as fases intermetálicas em sua maioria são alongadas e direcionadas na diagonal das imagens e é coerente com o estado laminado do material. O tamanho destas fases varia entre 2 e 30 μm, podendo ser classificadas como constituintes ou dispersóides.



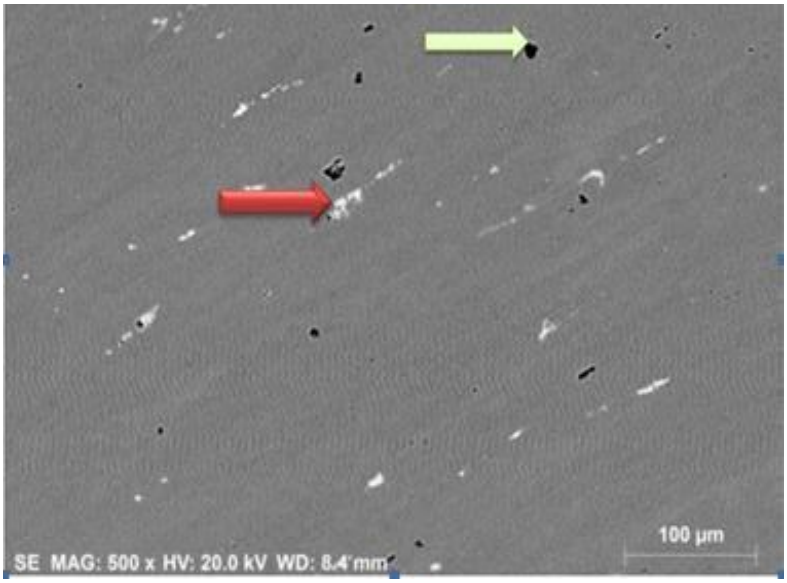
a)



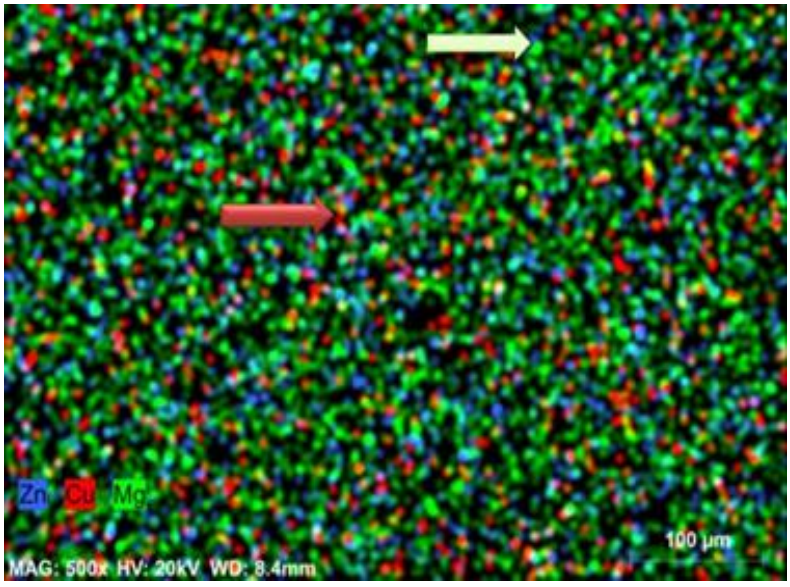
b)

Figura 4.4-Análise no MEV - a) contraste por SE; b) contraste por BSE.

As Figuras 4.5a e 4.5b apresentam a análise composicional das fases intermetálicas obtidas em um mapeamento por EDS *(energy dispersive x-ray detector, EDX ou EDS)* da amostra. Observa-se nas fases após o lixamento e polimento, que as regiões claras na imagem no modo SE são regiões ricas em cobre e são representadas pela cor vermelha no mapeamento por EDS. Respectivamente as regiões escuras são representadas pela cor verde no mapeamento por EDS, sendo regiões ricas em magnésio.



a)

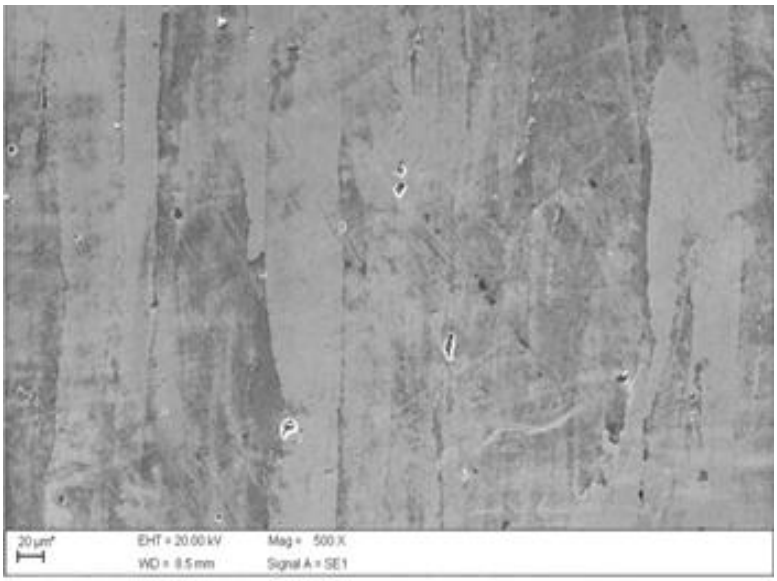


b)

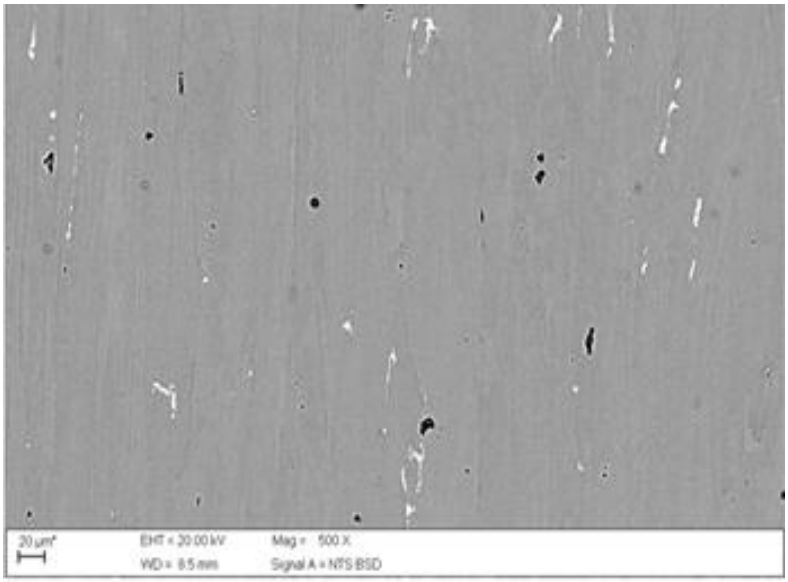
Figura 4.5-Análise em MEV/EDS a) contraste por SE; b) Mapeamento composicional por EDS. As setas indicam correspondências entre as imagens.

4.1.2 Análise no MEV/EDS da Liga 7075 -Envelhecida

As Figuras 4.6a e 4.6b apresentam uma amostra da liga 7075 no estado envelhecido que foi analisada no MEV nos modos Elétrons Secundários do tipo I, *("secondary electron" – SE)* e por Elétrons Retroespalhados, *("backscattering electron" - BSE).*



a)



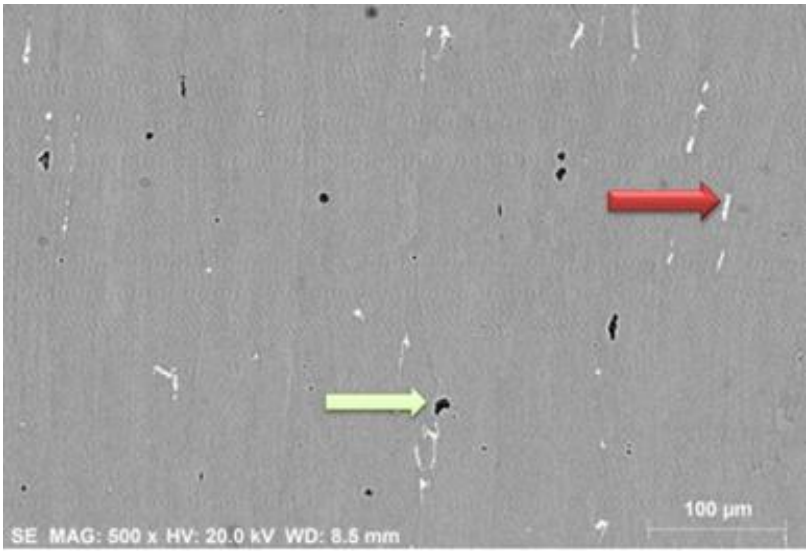
b)

Figura 4.6-Análise no MEV - a) contraste por SE; b) contraste por BSE.

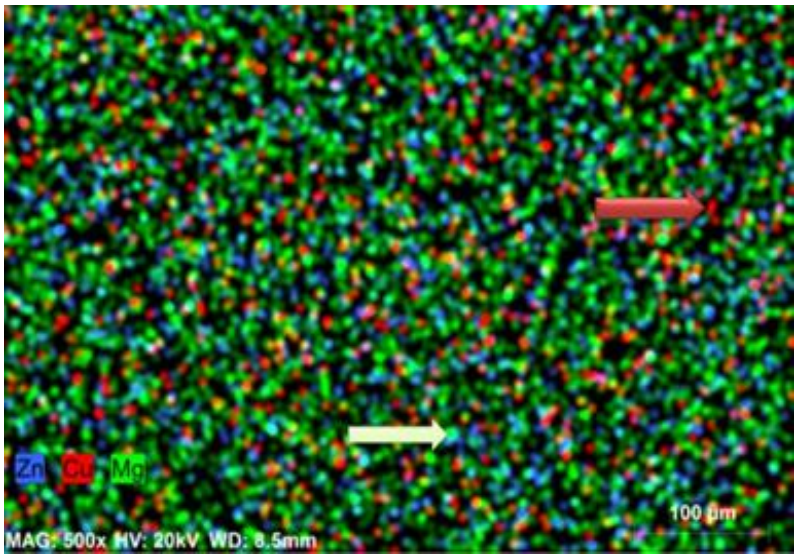
Permite-se concluir, que as amostras retornaram a uma condição de precipitação semelhante à original (Figuras 4.4a e 44.b), permanecendo os dispersóides e constituintes, que não desapareceram por completo em nenhum momento após o tratamento ser executado.

As Figuras 4.7a e 4.7b apresentam a análise composicional das fases intermetálicas obtidas em um mapeamento por EDS *(energy dispersive x-ray detector, EDX ou EDS).*

Observa-se nas fases após o lixamento e polimento que as regiões claras na imagem no modo SE são regiões ricas em cobre e são representadas pela cor vermelha no mapeamento por EDS. Respectivamente as regiões escuras são representadas pela cor verde no mapeamento por EDS, sendo regiões ricas em magnésio.



a)



b)

Figura 4.7-Análise no MEV/EDS a) contraste por SE; b) Mapeamento composicional por EDS. As setas indicam correspondências entre as imagens.

Assim, pode-se garantir através da caracterização do material como sendo uma liga de Al 7075 T6.

Foi realizada uma análise por EDS *(energy dispersive x-ray detector, EDX ou EDS)* correspondente ao MEV da Figura 4.7(a) e as concentrações dos elementos químicos encontrados estão dispostas na Tabela 4.3. pode se observar que o resultado está coerente com o resultado obtido pelo Espectrômetro Emissão Ótica da IMBEL, conforme tabela 4.1 do Item 4.1.

Tabela 4.3-Fração mássica, em análise por EDS, de elementos químicos da amostra envelhecida.

% em massa	**Al**	**Zn**	**Mg**	**Cu**
	89,23	6,22	3,00	1,55

Na Figura 4.8 estão ilustrados os espectros obtido por EDS, foi traçado um histograma com a abscissa sendo a energia dos fótons (kev) e a ordenada o número de fótons recebidos cps/ev (contagens) e também a Tabela 4.4 de descriminação dos elementos.

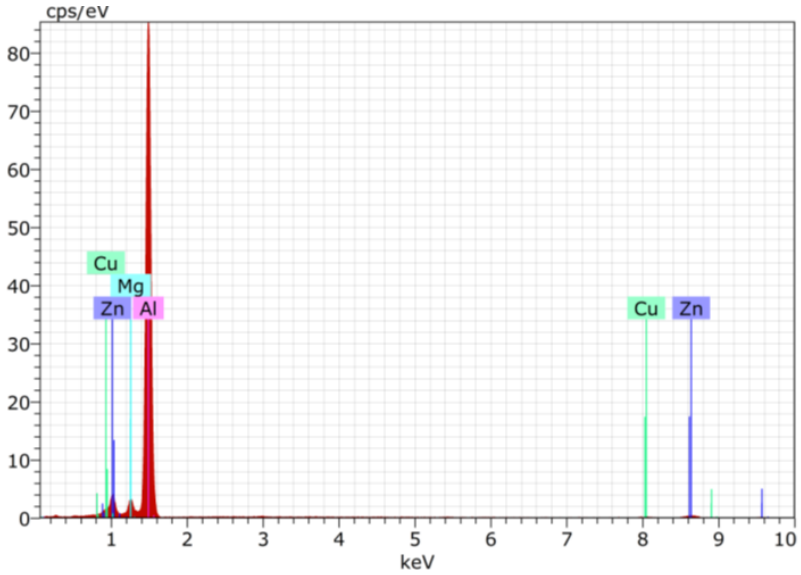


Figura 4.8-Espectro obtido por EDS de amostra envelhecida

Tabela 4.4 - Descriminação dos elementos

Elemento	**C norm. [Wt %]**	**C Atom [Wt %]**	**Sigma[Wt %]**
Al 13 k	89,23	93,16	4,43
Zn 30 k	6,22	2,68	0,26
Mg 12 k	3,10	3,47	0,21
Cu 29 k	1,60	069	0,11
Total	100,00	100,00	

4.2 Resultados Experimentais de Rugosidades

Após a execução dos ensaios de usinagem foram coletados os resultados das rugosidades. Os valores das rugosidades R_a e R_z são apresentados na Tabela 4.5 das diversas corridas experimentais.

Tabela 4.5-Rugosidade R_a e R_z para as diversas corridas experimentais.

	Teste	Velocidade corte (RPM)	Avanço por dente (mm/dente)	Sentido corte (C/D)	Raio (N-NW)	R_a (µm)	R_z (µm)
Primeiro bloco -1º ensaio	1	400	0,1	C	N	0,42	2,55
	2	600	0,1	C	N	1,79	9,14
	3	400	0,3	C	N	0,65	3,20
	4	600	0,3	C	N	0,67	3,48
	5	400	0,1	D	N	0,35	2,34
	6	600	0,1	D	N	0,46	2,43
	7	400	0,3	D	N	0,17	1,09
	8	600	0,3	D	N	0,15	0,92
	9	400	0,1	C	N/W	0,18	1,19
	10	600	0,1	C	N/W	0,68	3,43
	11	400	0,3	C	N/W	1,62	7,94
	12	600	0,3	C	N/W	0,16	0,99
	13	400	0,1	D	N/W	0,69	3,83
	14	600	0,1	D	N/W	1,76	9,43
	15	400	0,3	D	N/W	1,81	8,76
	16	600	0,3	D	N/W	0,64	3,57
Segundo bloco - Réplica	17	400	0,1	C	N	1,84	8,96
	18	600	0,1	C	N	1,96	9,20
	19	400	0,3	C	N	1,68	8,62
	20	600	0,3	C	N	0,69	3,48
	21	400	0,1	D	N	1,16	5,40
	22	600	0,1	D	N	1,93	8,56
	23	400	0,3	D	N	0,68	3,59
	24	600	0,3	D	N	0,80	4,27
	25	400	0,1	C	N/W	0,77	4,07
	26	600	0,1	C	N/W	0,73	3,85
	27	400	0,3	C	N/W	1,67	7,58
	28	600	0,3	C	N/W	0,83	4,36
	29	400	0,1	D	N/W	0,78	3,93
	30	600	0,1	D	N/W	1,77	9,48
	31	400	0,3	D	N/W	2,17	9,44
	32	600	0,3	D	N/W	0,70	3,44

Na Figura 4.9, são apresentados os resultados das medições para uma análise global dos parâmetros utilizados. Existe uma coerência entre os valores do primeiro ensaio e a réplica quando se utilizou a combinação de dois insertos com geometria de raio normal e um inserto com geometria alisadora *Wiper*, independente dos sentidos de corte concordante e

discordante. Isto não ocorre quando se utiliza apenas insertos com geometria de raio normal, onde pode se verificar picos de valores mais altos entre o primeiro ensaio em relação à réplica, independente dos sentidos de corte concordante e discordante.

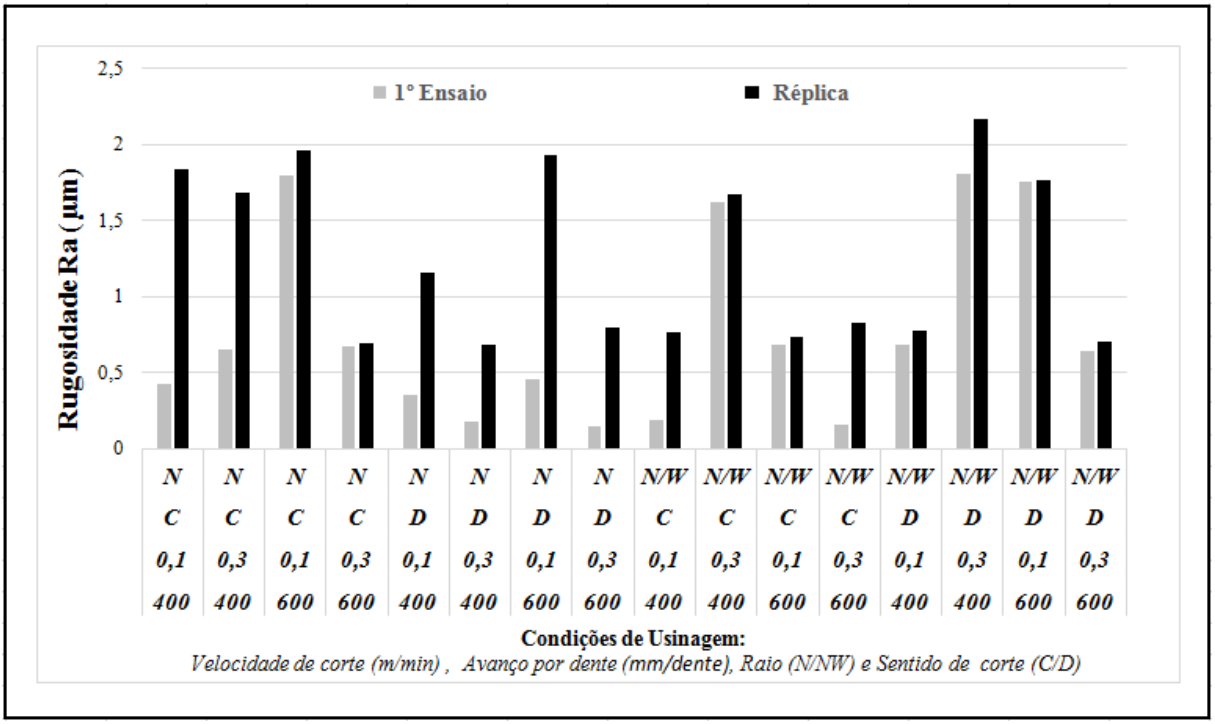


Figura 4.9-Comparativo entre os parâmetros na rugosidade (R_a)

4.2.1 Análise do Aspecto Visual da Superfície Usinada

Nas Figuras 4.10 e 4.11, têm-se as amostras do aspecto visual típico de cada face das superfícies usinadas dos 32 ensaios. Na Figura 4.10, todas as amostras foram usinadas somente com insertos com geometria de raio normal, conforme especificada no item 3.2. Os ensaios foram executados aleatoriamente, conforme disposição da Tabela 3.2 do item 3.13.1.

As duas colunas do lado esquerdo apresentam as usinagens executadas no sentido concordante e as duas colunas do lado direito no sentido discordante.

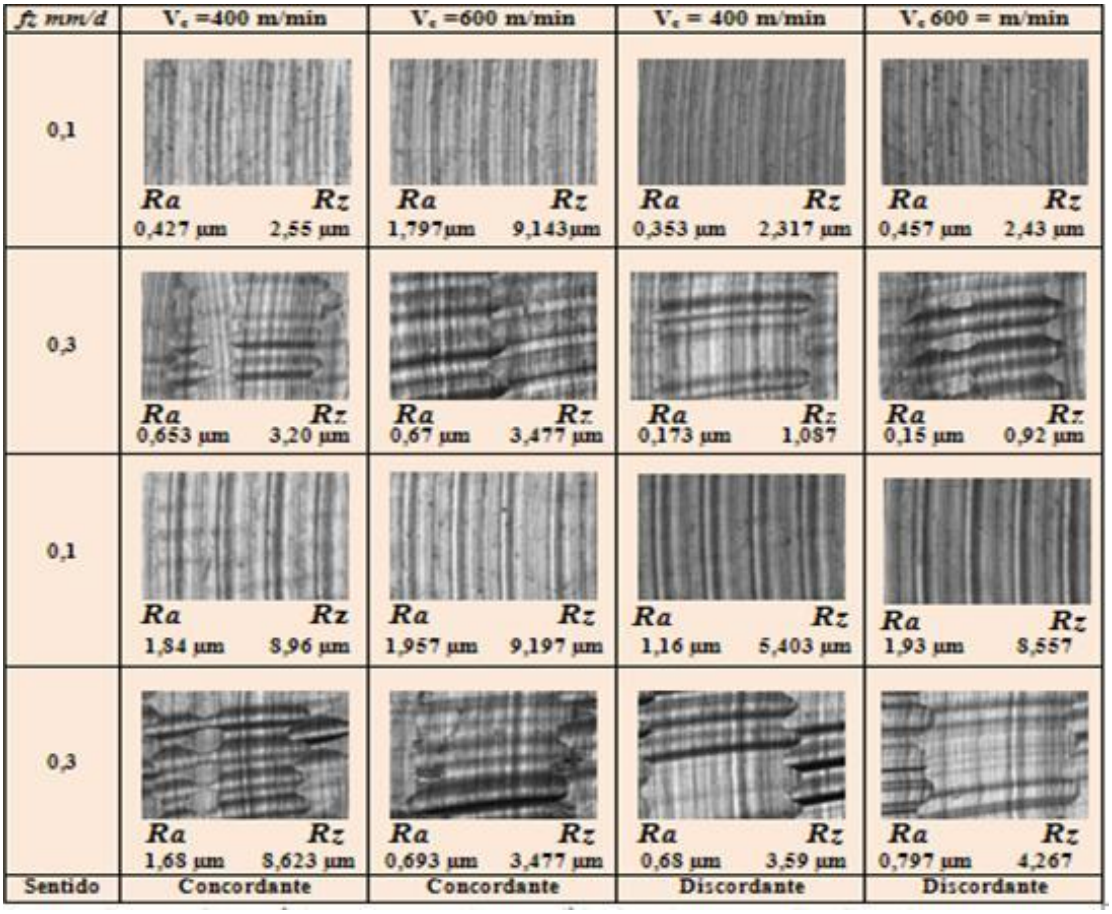


Figura 4.10-Características do visual das superfícies fresadas com insertos normais (N)-(160 X)

Na Figura 4.11, as amostras foram usinadas com a combinação contendo dois insertos com geometria de raio normal e um inserto com geometria alisadora *Wiper*. As duas colunas do lado esquerdo apresentam as usinagens executadas no sentido concordante e as duas colunas do lado direito no sentido discordante.

Em todos os casos as marcas deixadas pela ferramenta são bem definidas, mas não mantém um padrão constante, o que demonstra a existência significativa de vibrações. Elas aparecem nos sentidos concordantes e discordantes, principalmente no avanço por dente de valor igual a 0,3 [mm/dente], independente da velocidade de corte e tipo de inserto utilizado.

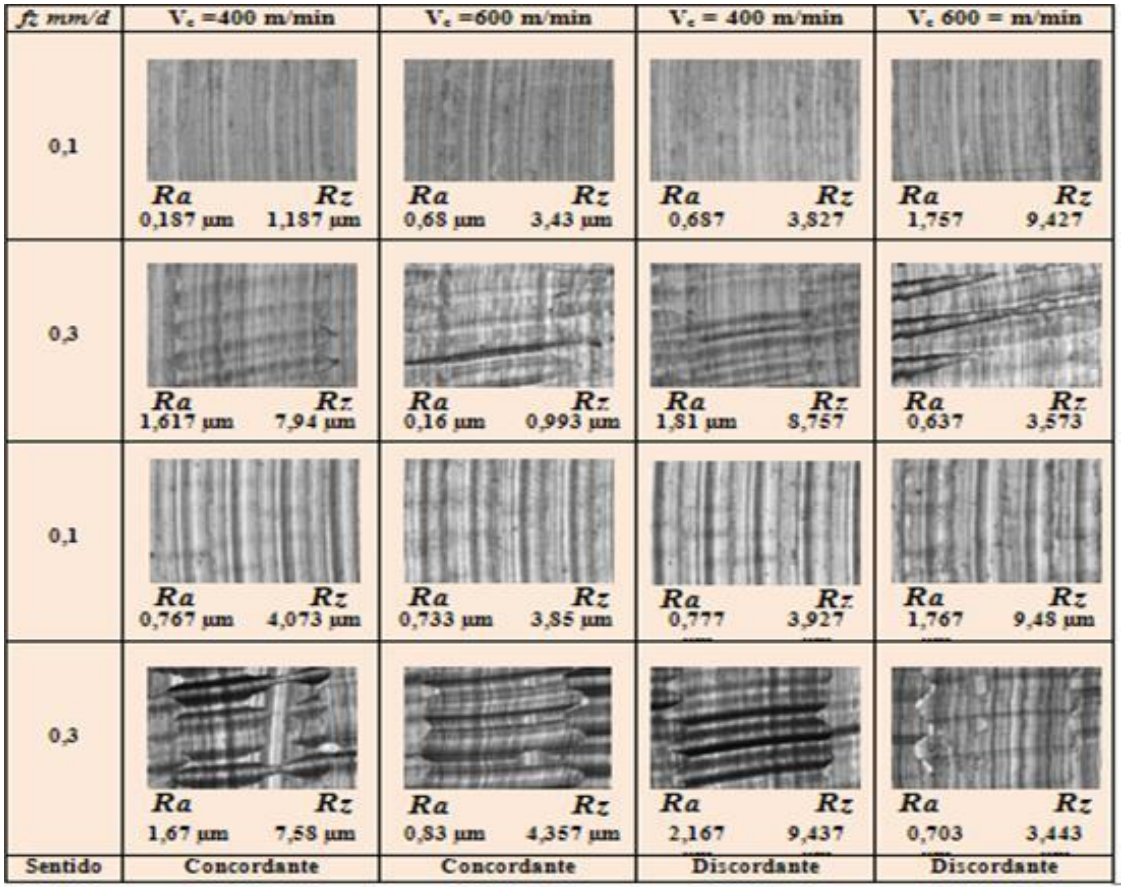


Figura 4.11-Características do visual das superfícies fresadas com insertos normais e Wiper (NW)-(160 X)

As regiões claras apresentam a trajetória da aresta de corte e as regiões escuras entre os passes laterais no sentido vertical, formando os picos de altura de crista. Esta formação é constante em ambas as Figuras 4.10 e 4.11, devido ao uso de passes paralelos. É importante observar que em todas as regiões usinadas por insertos com geometria de raio normal e a combinação Normal e *Wiper*, com avanço de 0,1 [mm/dente], a trajetória da ferramenta foi uniforme devido à baixa velocidade de avanço e conseguiu se uma aparência aceitável. Porém nas Figuras 4.10 e 4.11, onde as regiões foram usinadas com insertos com geometria de raio normal e a combinação Normal e *Wiper* com avanço de 0,3 [mm/dente], a trajetória da ferramenta não é uniforme devido à alta velocidade de avanço. Os passes laterais no sentido horizontal ficaram deformados e com vibrações, comprometendo a aparência da superfície e os valores encontrados de rugosidades totalmente dispersos, especialmente com insertos normais. Todas os insertos utilizados nos 32 ensaios foram monitorados e foi feita uma avaliação microscópica. Foi observado que não houve formação de Aresta Postiça de Corte (APC) e nenhum outro tipo de desgaste que pudesse comprometer a vida e o uso do inserto, podendo ainda ser reutilizado.

Antes mesmo de analisar-se os resultados estatisticamente, foi possível verificar visualmente a influência negativa do fator avanço 0,3 [mm/dente] sobre o acabamento, independente de qual foi a velocidade de corte, sentido de corte e tipo de raio utilizado, apesar da obtenção de valores de rugosidades baixas.

A Figura 4.12 mostra que há uma influência significativa na interação da velocidade de corte e avanço por dente na rugosidade. Pode-se observar esta influência nas colunas de avanço por dente de 0,3 [mm/dente] versus velocidade de corte 600 [m/min] no sentido discordante, o que obteve menores valores de rugosidade. Isto não ocorre nas colunas de avanço por dente 0,1 [mm/dente] versus velocidade de corte 400 [m/min], onde os valores de rugosidade foram maiores. Apesar dos ensaios com insertos normais terem alcançado valores baixos de rugosidade, ficou visível o desempenho da combinação de insertos com geometria de raio normal e alisadora *Wiper*, isso pode ser observado na uniformidade dos valores da rugosidade alcançada.

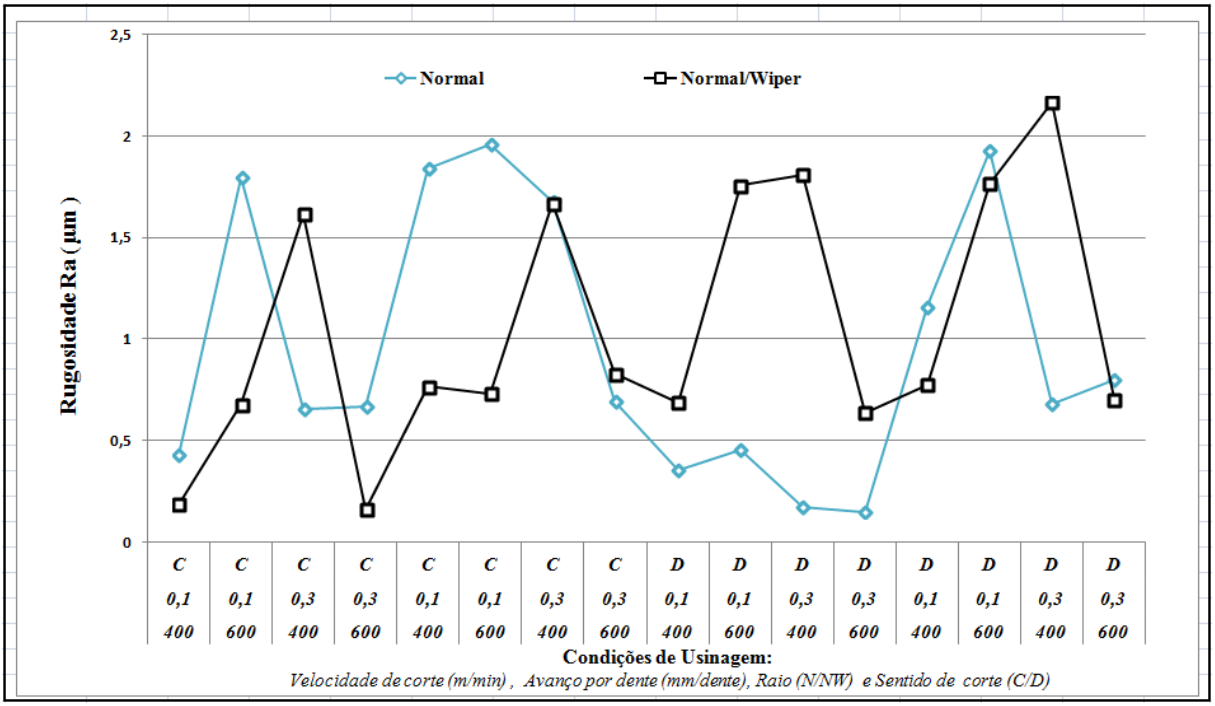


Figura 4.12-Comparativo entre os ensaios com insertos normais e com insertos normais e *Wiper*.

4.3 Análise de Variância

A adequação dos modelos foi verificada através da Análise de Variância (ANOVA), realizados pelo software *MINITAB*. São apresentados os resultados desta análise na Tabela

4.6. Observa-se que nem todos os fatores envolvidos são adequados, apenas as interações: velocidade de corte*avanço por dente, avanço por dente*raio e sentido de corte*raio apresentam valores de P inferiores a 5% de significância para a rugosidade (R_a) e os demais termos apresentam valores de P superiores a 5% de significância.

Tabela 4.6-Análise da Variância para Rugosidade média (Ra) – Modelo completo

Termo	**Efeito**	**Coefic.**	**SE Coefic.**	**T**	**P**
Constante		1,0114	0,08561	11,81	0,000
V_c	-0,0581	-0,0291	0,08561	-0,34	0,739
f_z	-0,1366	-0,0683	0,08561	-0,80	0,437
C/D	-0,0223	-0,0111	0,08561	-0,13	0,898
Raio	0,0957	0,0479	0,08561	0,56	0,584
V_c*f_z	-0,6681	-0,3341	0,08561	-3,90	**(0,001)**
V_c*C/D	0,1070	0,0535	0,08561	0,62	0,541
V_c*Raio	-0,2437	-0,1219	0,08561	-1,42	0,174
f_z*C/D	-0,0848	-0,0424	0,08561	-0,49	0,627
f_z*Raio	0,4165	0,2083	0,08561	2,43	**(0,027)**
C/D*Raio	0,4799	0,2399	0,08561	2,80	**(0,013)**
V_c*f_z*C/D	-0,0165	-0,0083	0,08561	-0,10	0,924
V_c*f_z*Raio	-0,2635	-0,1318	0,08561	-1,54	0,143
V_c*C/D*Raio	0,0506	0,0253	0,08561	0,30	0,771
f_z*C/D*Raio	-0,1129	-0,0564	0,08561	-0,66	0,519
V_c*f_z*C/D*Raio	-0,2261	-0,1131	0,08561	-1,32	0,205

S = 0,484284 R-Sq = 70,03% R-Sq(adj) = 41,93%

Os resultados da ANOVA também demonstram que, os modelos desenvolvidos apresentam falta de ajuste, pois o valor de (R^2(adj)) foi baixo. Todavia, estes dados não serão corrigidos através do procedimento de redução dos modelos, por que o próprio aspecto visual já demonstra estar com vibrações, conforme item 4.3, Figuras 4.10 e 4.11, especialmente no avanço 0,3 [mm/dente], ora já citado acima.

4.3.1 Análise fatorial

A Figura 4.13 apresenta o gráfico de Pareto para os efeitos principais e para as interações dos fatores: velocidade de corte, avanço por dente, sentido de corte e raio sobre a rugosidade R_a. A interação que teve maior significância foi velocidade de corte*avanço por dente*, seguida da interação sentido de corte*raio e a menos significativa avanço por dente*raio.

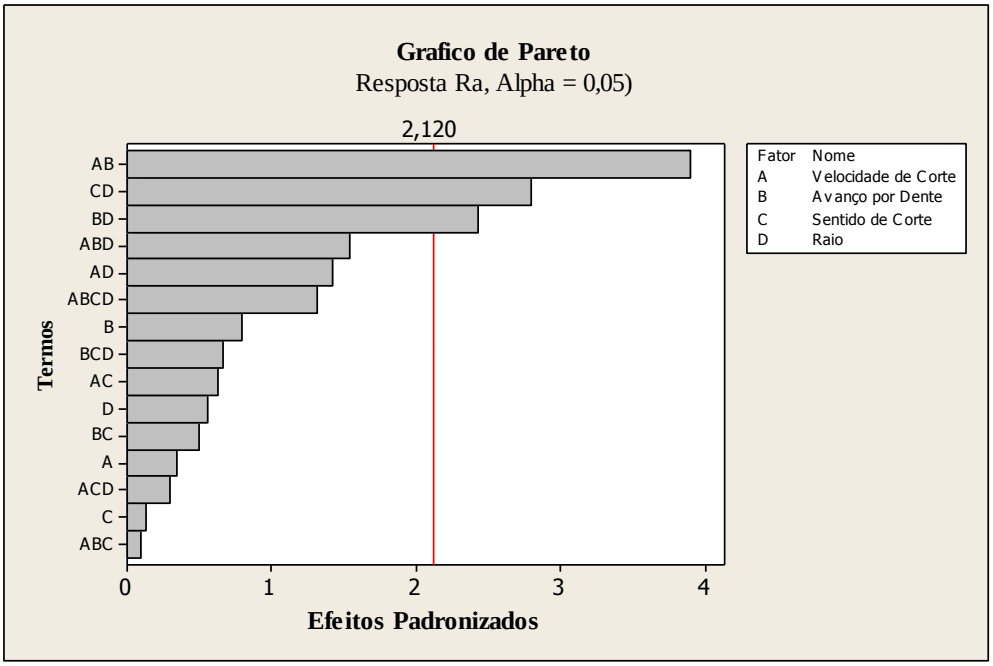


Figura 4.13-Gráfico de Pareto dos efeitos principais e interações para R_a [µm]

A Figura 4.14, mostra uma comparação dos efeitos principais de todos os fatores envolvidos na rugosidade final R_a, velocidade de corte, avanço por dente, sentido de corte e raio.

É possível observar na Tabela 4.6, que o parâmetro avanço por dente teve valor de probabilidade maior que o nível de significância adotado nos experimentos (P > 0,05), ou seja, o referido fator não causou diferença significativa na rugosidade.

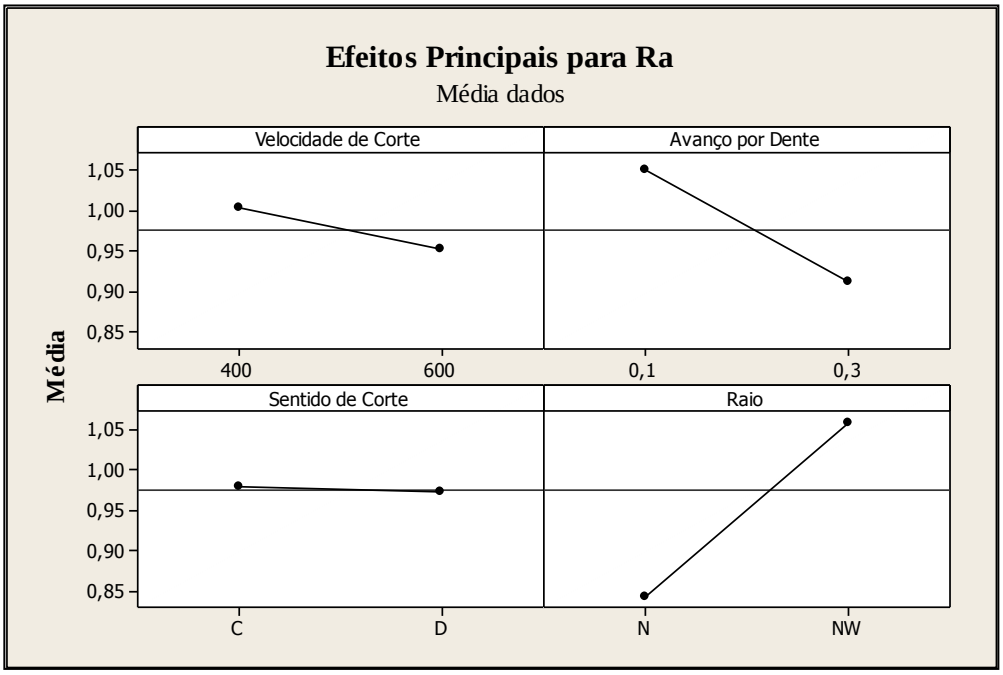


Figura 4.14-Gráficos dos efeitos principais para a resposta R_a [µm]

A Figura 4.14, mostra qualitativamente o comportamento da rugosidade através da variação dos parâmetros. Nota-se que na mudança do raio NW (*combinação de inserto com geometria de raio normal e geometria alisadora Wiper*) para o raio N (*inserto com geometria de raio normal*), ajudou a diminuir o valor da rugosidade, entretanto foi o fator que mais oscilou em torno da média e indicou que não foi significativo no acabamento. Isto pode ser comprovado na Tabela 4.6 pela probabilidade P=0,584, foi maior que o nível de significância de 5 % adotado.

Da mesma forma que se pode observar graficamente os efeitos principais, também através do auxílio do software Minitab consegue-se obter os gráficos de efeitos para as interações, conforme Figura 4.15.

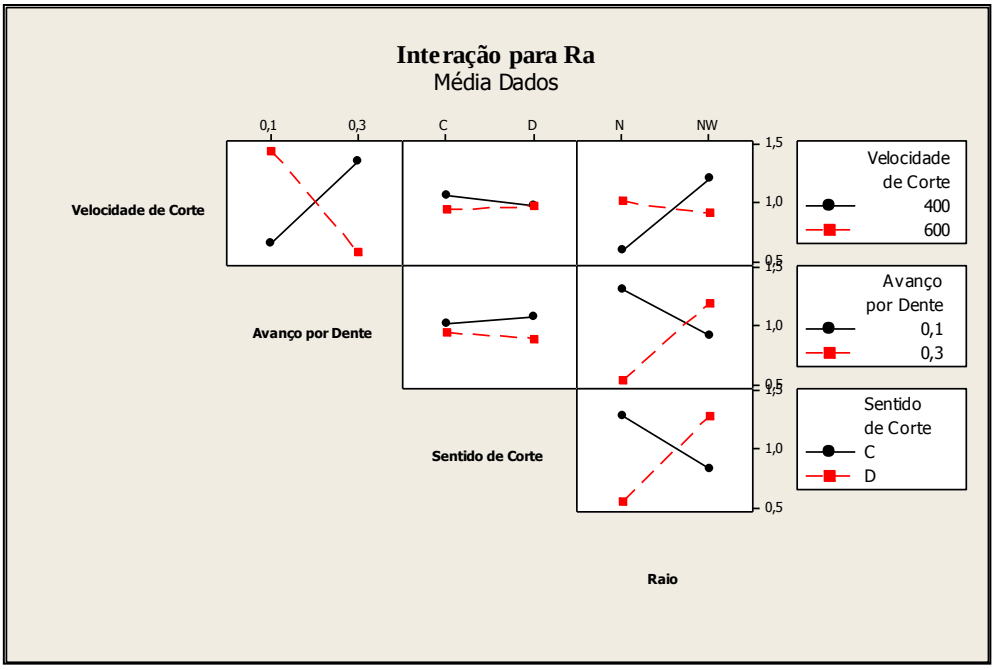


Figura 4.15-Gráfico de efeito das interações para R_a [μm]

Conforme já comentado na Revisão Bibliográfica no item 2.6.1, verifica–se a existência de interações entre os fatores quando as linhas de representação estão com inclinações opostas, resultando na alteração da resposta de saída, isto quando se compara o efeito de dois fatores, isoladamente, com as combinações destes.

Isto significa que ao analisarmos na Figura 4.15 a interação dos fatores velocidade de corte e avanço por dente, pode-se observar que o fator avanço por dente [0,3 mm/dente] quando combinado com o fator velocidade de corte de 600 [m/min], houve diminuição da rugosidade bem acentuada. Outra interação que averiguou-se é entre o raio NW, quando combinado com a velocidade de corte de 600 [m/min], teve uma diminuição da rugosidade e também a interação entre os fatores sentido de corte concordante e raio NW, obteve-se como resposta uma diminuição significativa da rugosidade.

Porém deve ser observado que mesmo diante de valores de rugosidade baixos, há existência de vibrações e deformações, ora já discutidos no item 4.3. Todos os cuidados foram tomados: usinagem dos corpos de prova, posição dos corpos de prova na morsa e a fixação da haste cilíndrica foram iguais para todos.

4.3.2 Análise dos resíduos

É de grande importância a análise dos resíduos por se caracterizar como um importante procedimento para a obtenção de modelos matemáticos que possam representar bem as respostas de interesse.

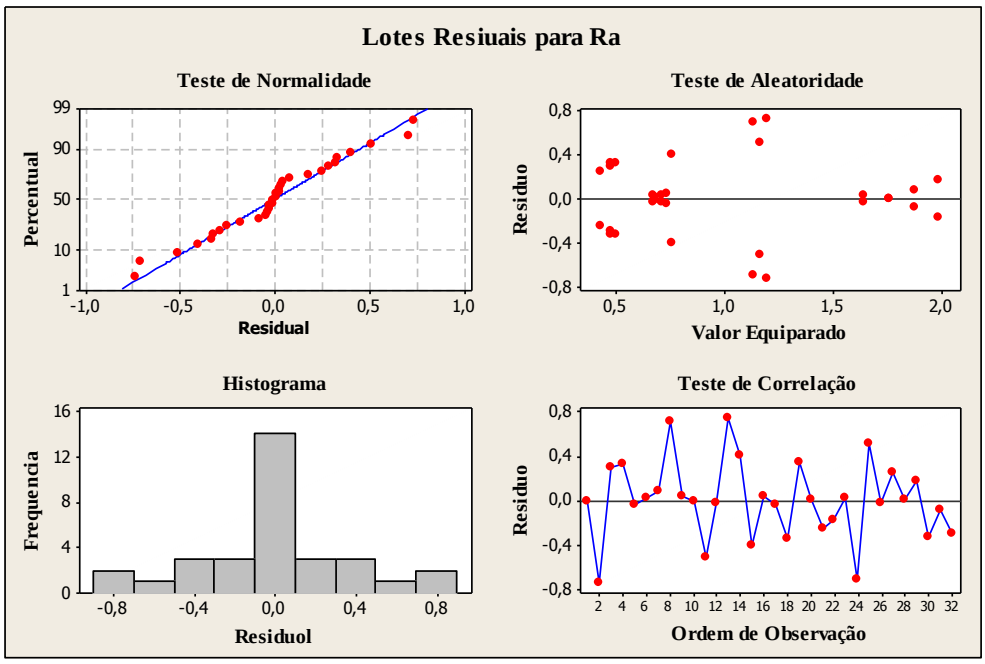


Figura 4.16-Análise de resíduos para R_a

É sempre prudente checar se o modelo de previsão obtido representa bem a relação entre as variáveis de entrada. Para isso, uma análise sobre os resíduos encontrados podem fornecer muitas informações. Na Figura 4.16, verificou-se que os resíduos dos modelos obtidos para as rugosidades R_a apresentaram distribuição normal. Os pontos estão distribuídos sobre a reta e os dados são normalmente distribuídos. Observou-se também que os resíduos apresentam-se de forma independente e aleatória.

4.4 Análise da Variância (ANOVA)-Comparação dos 2 Blocos-Réplicas.

A Tabela 4.7 apresenta a análise de variância (ANOVA) e observou-se primeiramente o efeito dos blocos e também o efeito das interações, velocidade de corte*avanço por dente, sentido de corte*raio, avanço por dente*raio e velocidade de corte* avanço por dente*raio, apresentando valores de *P* inferiores a 5% de significância para a rugosidade ($R_{a)}$.

.

Tabela 4.7- Análise da variância para Rugosidade média (R_a) – comparação 2 blocos -Réplicas

Termo	**Efeito**	**Coefic.**	**SE Coefic.**	**T**	**P**
Constante		1,0114	0,06097	16,59	0,000
Bloco		-0,2481	0,06097	-4,07	**(0,001)**
V_c	-0,0580	-0,0290	0,06097	-0,48	0,641
f_z	-0,1368	-0,0684	0,06097	-1,12	0,280
C/D	-0,0224	-0,0112	0,06097	-0,18	0,857
Raio	0,0959	0,0479	0,06097	0,79	0,444
V_c*f_z	-0,6680	-0,3340	0,06097	-5,48	**(0,000)**
V_c*C/D	0,1071	0,0536	0,06097	0,88	0,394
V_c*Raio	-0,2439	-0,1219	0,06097	-2,00	0,064
f_z*C/D	-0,0849	-0,0424	0,06097	-0,70	0,497
f_z*Raio	0,4166	0,2083	0,06097	3,42	**(0,004)**
C/D*Raio	0,4800	0,2400	0,06097	3,94	**(0,001)**
V_c*f_z*C/D	-0,0164	-0,0082	0,06097	-0,13	0,895
V_c*f_z*Raio	-0,2636	-0,1318	0,06097	-2,16	**(0,047)**
V_c*C/D*Raio	0,0505	0,0253	0,06097	0,41	0,685
f_z*C/D*Raio	-0,1127	-0,0564	0,06097	-0,92	0,370
V_c*f_z*C/D*Raio	-0,2262	-0,1131	0,06097	-1,86	0,083

S = 0,344905 R-Sq = 85,75% R-Sq(adj) = 70,55%

O resultado mostrado na Tabela 4.7 indica que o modelo se caracteriza como expressão de um ajuste aceitável, já que este modelo apresenta ajuste superior a 70%.

Ainda abordando os valores de P, nota-se que o modelo de regressão possui uma constante significativa e os blocos possuem efeito significativo, ou seja, existe diferença nas rugosidades médias dos dois blocos, pois o valor de P é menor que 0,05.

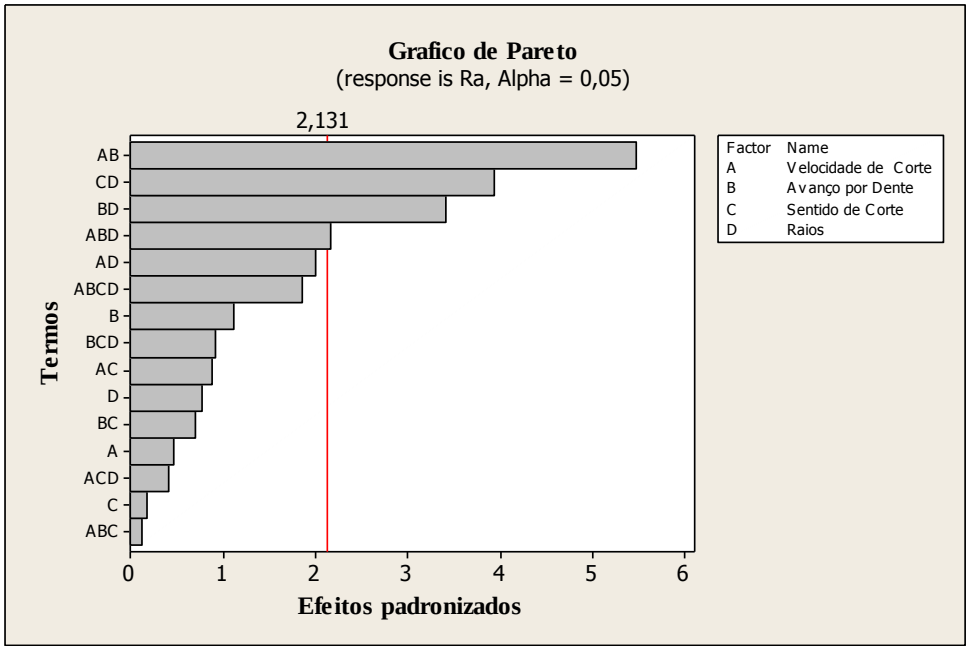


Figura 4.17-Gráfico de Pareto dos efeitos principais e interações para R_a [µm]

A Figura 4.17 mostra o gráfico de Pareto das interações que possuem efeito significativo sobre a rugosidade. Pode-se ainda observar que as interações significativas velocidade de corte*avanço por dente, sentido de corte*raio e avanço por dente*raio encontradas no modelo completo (Tabela 4.4) se mantiveram no modelo de comparação dos 2 blocos (Tabela 4.5), destacando o acréscimo da interação velocidade de corte*avanço por dente*raio. No modelo completo esta interação não foi significativa, tendo o valor de P igual a 0,143 e no modelo dos 2 blocos ela foi significativa, sendo o valor de P igual a 0,047.

Na Figura 4.18, verifica-se que os resíduos dos modelos obtidos para as rugosidades R_a apresentam distribuição normal. Os pontos estão distribuídos sobre a reta e os dados são normalmente distribuídos. Observa-se também que os resíduos apresentam-se de forma independente e aleatória.

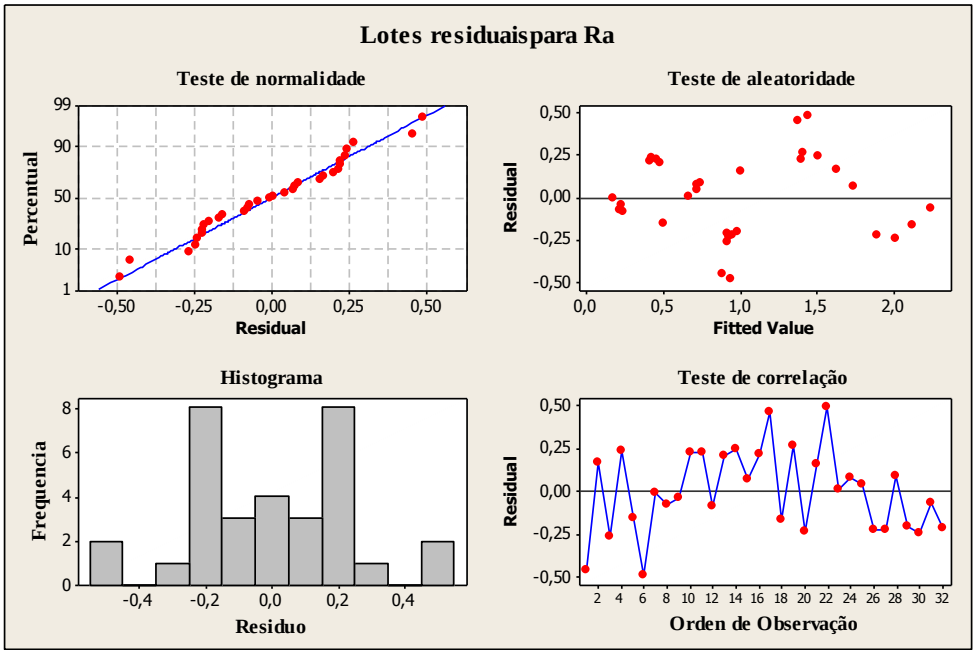


Figura 4.18-Análise de Resíduos para R_a

4.5 Teste T-Emparelhado para os 2 Blocos

A Tabela 4.8 e a Figura 4.19 mostram o resultado obtido do teste de hipótese T-student Emparelhado, para comparar os dois blocos e verificar se a dureza dos corpos de prova eram diferentes, pode-se inferir que entre os blocos não existe uma diferença significativa, pois o valor de P é maior que 0,05. Portanto não tendo influência significativa na rugosidade da peça.

Tabela 4.8-Teste T Emparelhado – comparação 2 blocos

	N	Média	St Dev	SE Média
Bloco 1	16	176,756	3,161	0,790
Bloco 2	16	178,063	3,129	0,782
Diferença	16	-1,306	2,789	0,697

95 % Diferença médias : (-2,793; 0,180)
T-teste diferença médias = 0 (vs not = 0 : T-value = -1,87 P-value = 0,081

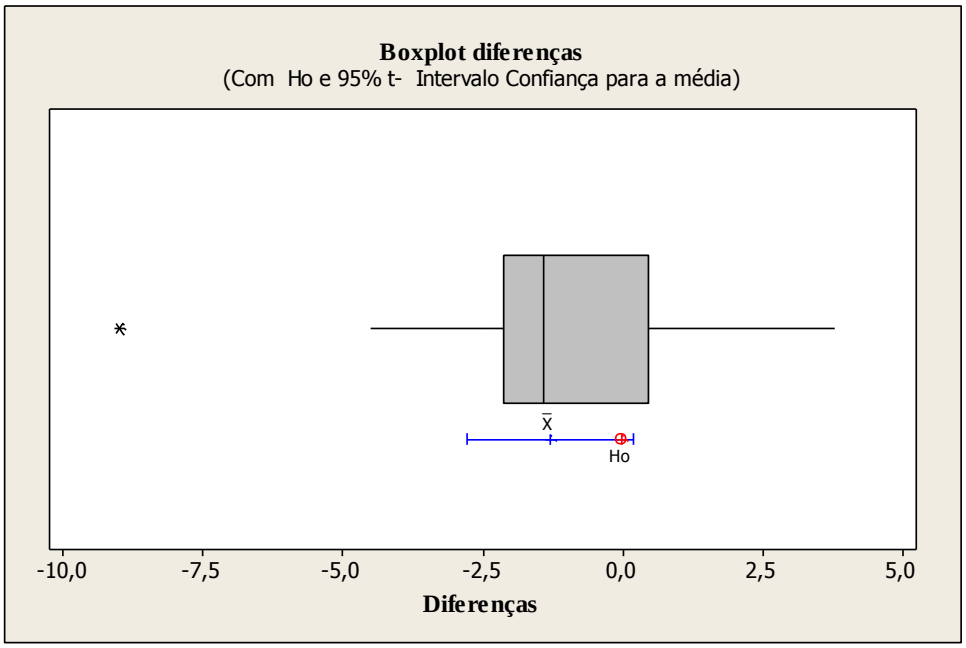


Figura 4.19-Boxplots para comparação da dureza entre blocos 1 e bloco 2.

4.6 Planejamentos Experimental 2^3

Foi feito um novo Planejamento Fatorial completo 2^3, utilizando apenas três variáveis para uma nova análise estatística, ou seja, eliminando o fator avanço por dente, pois considerou-se o nível de vibração para f_z = 0,03 inaceitável. Na Tabela 4.9 é apresentado o planejamento para 3 fatores: velocidade de corte, sentido de corte e raio. Foram escolhidos dois níveis diferentes para cada fator, sendo um com valor numérico máximo e mínimo e dois com valores em texto. A condição experimental do arranjo foi conduzida para 8 experimentos e uma réplica.

Tabela 4.9- Planejamento Fatorial Completo $2^{3.}$

	Fatores	**Níveis /Valores**	
		-1	1
1	V_c (m/min)	400	600
2	Sentido corte	C (concordante)	D (discordante)
3	Raio	Normal (N)	Normal/Wiper (NW)

A Tabela 4.10 mostra a matriz do planejamento fatorial completo 2^3. Foram realizados ensaios dispostos em ordem aleatória para se evitar desvios que pudessem apresentar erros. Os valores de R_a já coletados anteriormente foram dispostos conforme distribuição na tabela.

Tabela 4.10- Planejamento Fatorial Completo 2^3 disposto aleatoriamente

Ensaio	Velocidade de corte	Sentido de corte	Raio N-NW	R_a (μm)
12	600	D	N	1,93
1	400	C	N	0,43
7	400	D	NW	0,69
5	400	C	NW	0,19
3	400	D	N	0,35
9	400	C	N	1,84
6	600	C	NW	0,68
14	600	C	NW	0,73
15	400	D	NW	0,78
13	400	C	NW	0,77
11	400	D	N	1,16
8	600	D	NW	1,75
4	600	D	N	0,46
16	600	D	NW	1,77
10	600	C	N	1,96
2	600	C	N	1,80

Sentido de corte : D- Discordante / C-Concordante

A adequação dos modelos foi verificada através da Análise de Variância (ANOVA). Os resultados desta análise são apresentados na Tabela 4.11, mostrando que todos os fatores envolvidos não são adequados, pois apresentam valores de P superiores a 5% de significância.

Tabela 4.11- Análise da Variância para Rugosidade média (Ra) – Modelo completo

Termo	**Efeito**	**Coefic.**	**SE Coefic.**	**T**	**P**
Constante		1,0791	0,1424	7,58	0,000
V_c	0,6087	0,3044	0,1424	2,14	0,065
C/D	0,0612	0,0306	0,1424	0,22	0,835
Raios	-0,3220	-0,1610	0,1424	-1,13	0,291
V_c*C/D	0,1222	0,0611	0,1424	0,43	**0,679**
V_c*Raio	0,0185	0,0092	0,1424	0,06	**0,950**
C/D*Raio	0,5915	0,2958	0,1424	2,08	0,071
V_c*C/D*Raio	0,2755	0,1377	0,1424	0,97	**0,362**

S = 0,569586 R-Sq = 58,62% R-Sq(adj) = 22,41%

Os resultados da ANOVA também demonstram que, os modelos desenvolvidos apresentam falta de ajuste, pois o valor de (R^2(adj)) foi baixo, igual a 22,41%, ou seja O coeficiente de determinação reflete a qualidade do ajuste do modelo e portanto quanto maior o (R^2(adj)), melhor o modelo se ajusta aos dados. Todavia, este dado pode ser corrigido através do procedimento de redução dos modelos.

Após a verificação da adequação dos modelos, estes foram reduzidos através da remoção dos termos não significativos. O critério adotado para a remoção destes foi o aumento do valor de (R^2(adj.)). Os termos eliminados foram as interações: velocidade de corte*sentido de corte, velocidade de corte*raio e velocidade de corte* sentido de corte*raio.

Foi obtido novo valor e apresentado pela Análise de Variância (ANOVA), sendo o novo ajuste igual a 40,94 %. A Tabela 4.12 mostra o novo valor para Análise de Variância ajustado.

Tabela 4.12- Análise da Variância para Rugosidade média (Ra) – Modelo reduzido

Termo	**Efeito**	**Coefic.**	**SE Coefic.**	**T**	**P**
Constante		1,0398	0,1171	8,88	0,000
V_c	0,5300	0,2650	0,1171	2,26	**(0,045)**
C/D	-0,0175	-0,0087	0,1171	-0,07	0,942
Raios	-0,2433	-0,1216	0,1171	-1,04	0,321
C/D*Raio	0,6702	0,3351	0,1171	2,86	**(0,015)**

S = 0, 468388 R-Sq = 56,69% R-Sq (adj) = 40,94%

Complementando a análise fatorial, a Tabela 4.12 apresenta a Análise de Variância ajustada para o experimento. Nota-se que os valores destacados em negrito e entre parênteses foram significativos, uma vez que os valores de P são inferiores ao nível de significância de 5%. Neste caso é interessante ressaltar a significância, ou seja, o nível do fator velocidade de corte e a interação sentido de corte*raios.

A Tabela 4.13 compara o modelo completo da Tabela 4.11 com o modelo reduzido da Tabela 4.12. Os resultados indicam que os modelos finais desenvolvidos apresentam falta de ajuste, pois o valor de (R^2(adj)) foi baixo, no entanto, o procedimento de redução não melhorou o ajuste do aspecto R_a de 22,41 para 40,94 %, fazendo com que o modelo ainda apresente um ajuste deficiente.

Tabela 4.13-Comparação entre o ajustes completos e modelos reduzidos.

	R^2(Adj.) (%)	
Resposta	Modelo Completo	Modelo Reduzido
R_a	22,41 %	40,94 %

4.6.1 Análise fatorial

A Figura 4.20 apresenta o gráfico de Pareto para os efeitos padronizados e exibe o valor absoluto dos efeitos estabelecendo uma linha de referência, denominada de Linha de Lenth. Qualquer fator que cruze esta linha de referência é potencialmente significativo. Por meio do gráfico tornou-se ainda mais fácil visualizar que o fator velocidade de corte e a interação sentido de corte*raio foram significativos.

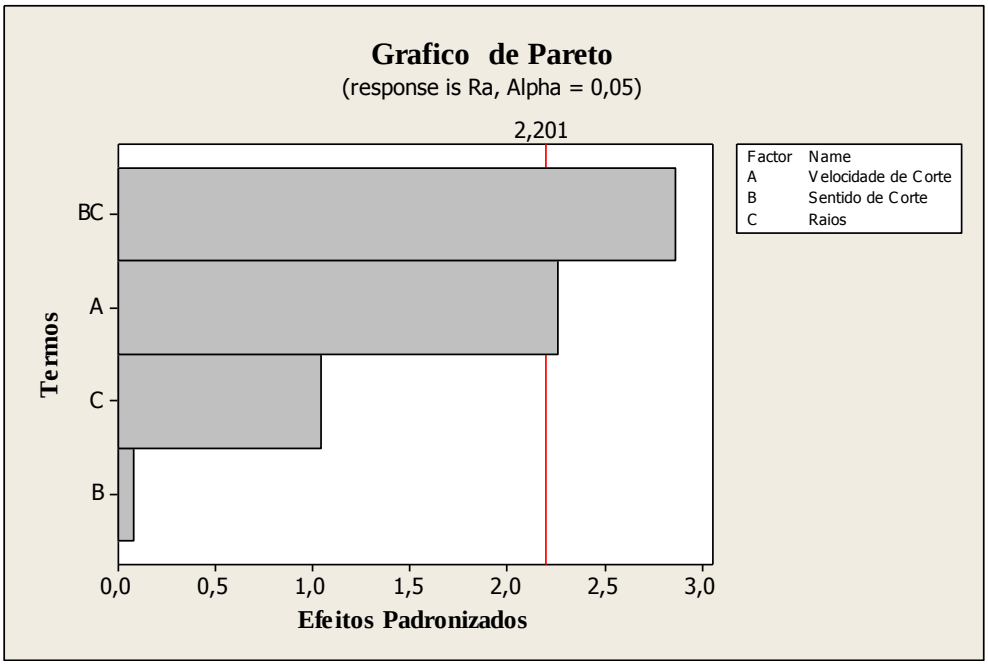


Figura 4.20-Gráfico de Pareto dos efeitos principais e interações para R_a [µm]

A Figura 4.21 mostra uma comparação dos efeitos principais de todos os fatores envolvidos na rugosidade final R_a, velocidade de corte, sentido de corte e raio.

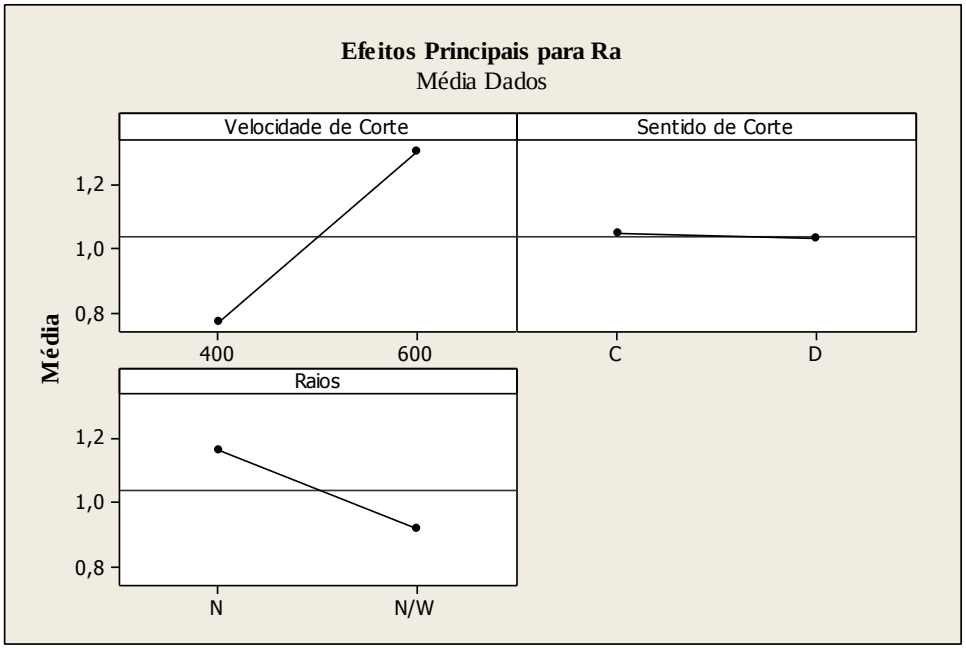


Figura 4.21-Gráficos dos efeitos principais para a resposta R_a [µm]

Nota-se como a rugosidade varia com a mudança dos níveis dos fatores velocidade de corte, sentido de corte e raio. O fator velocidade de corte tem sua reta com maior inclinação, sendo o maior nível de significância, quando o nível do fator é ajustado para a

velocidade de corte de 400 [m/min], resultando em uma diminuição significativa da rugosidade.

Da mesma forma que se pode observar graficamente os efeitos principais, também através do auxílio do software Minitab, consegue-se obter os gráficos de efeitos para as interações, conforme mostrado na Figura 4.22.

Apesar da menor inclinação da reta do fator raio, este também se revelou um fator significativo para a diminuição da rugosidade, destacando a combinação da interação raio*sentido de corte. Esta interação pode ser explicada em função do sentido de corte discordante com raio alisador *Wiper* gerar o chamado fluxo lateral do cavaco na entrada da fresa na peça, ou seja, a espessura de corte aumenta progressivamente de zero até um valor máximo. O que não acontece no caso do sentido de corte concordante, onde a espessura do cavaco é máxima no primeiro contato fresa - peça e sai com espessura igual a zero.

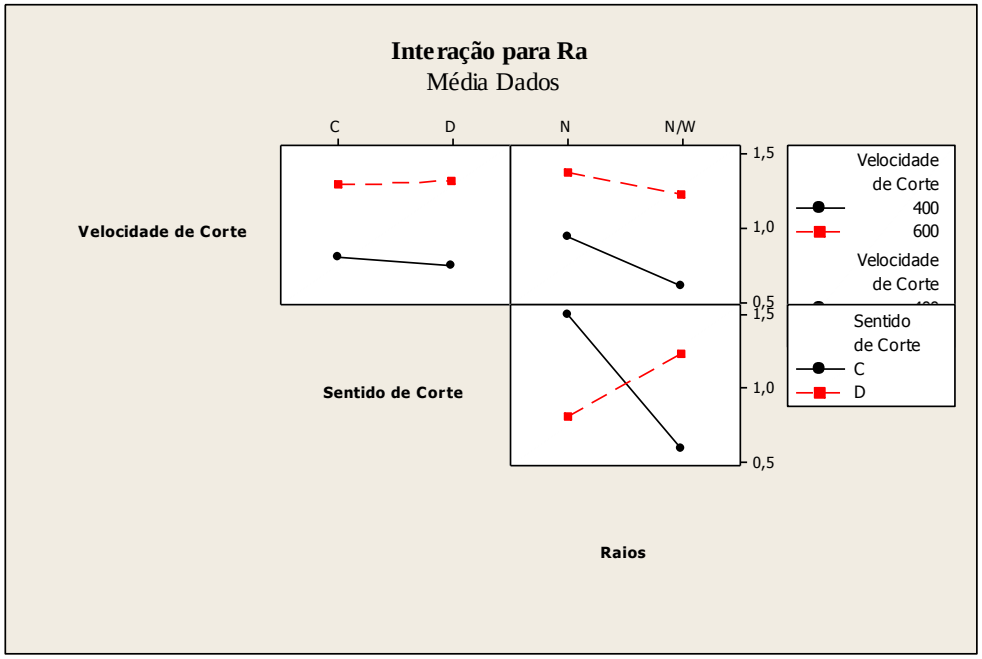


Figura 4.22-Gráfico de efeito das interações para R_a [µm]

Conforme já comentado no item 2.6.1, verifica–se a existência de interações entre os fatores quando as linhas de representação estão com inclinações opostas, resultando na alteração da resposta quando se compara o efeito de dois fatores isoladamente com as combinações destes.

Isto significa que ao analisarmos a Figura 4.22, apesar de não haver interação entre os fatores velocidade de corte e raio, podemos observar o efeito da velocidade de corte quando na mudança da velocidade de corte 600 [m/min] para velocidade de corte 400 [m/min] houve uma diminuição significativa da rugosidade.

Capítulo 5

CONCLUSÕES

Em função dos resultados obtidos e analisados, pode se concluir:

- A combinação de insertos com geometria de raio normal com o inserto de geometria alisadora forneceu a obtenção de valores uniformes e baixos de rugosidades $R_{a,}$ nas faixas 0,16 a 0,83 µm, com a utilização de avanço por dente 0,3 [mm/dente] e velocidade de corte 600 [m/min], parâmetros relativamente altos. Essas rugosidades se encontram em níveis próximos do processo de retificação, apesar de ter constatado presença de vibrações no processo;

- O avanço 0,3 [mm/dente] foi o fator que mais influenciou na ondulação, independente da interação com a velocidade de corte utilizada, sentido de corte e geometria dos raios, mesmo com a obtenção de valores de rugosidades relativamente baixas;

- A velocidade de corte de 600 [m/min] provocou aumento da rugosidade. Provavelmente por influência de vibração, relacionado ao balanço/batimento da fresa;

- A interação sentido de corte*raio com geometria Wiper na velocidade de corte de avanço 400 [m/min] e avanço 0,1 [mm/dente] alcançou os melhores resultados de rugosidade;

- Em função do tratamento térmico sofrido pela liga Al 7075 não observou-se durante os experimentos a formação de Aresta Postiça de Corte (APC).

- A comparação da dureza dos corpos de prova do primeiro ensaio e a réplica demonstrou que não houve diferença significativa. Portanto não tendo influência significativa na rugosidade.

Capítulo 6

SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Após o desenvolvimento desta pesquisa sugere-se.

- Repetir os ensaios para a investigação da vibração do conjunto máquina-ferramenta-peça e sua influência na rugosidade.

- Correlacionar o balanço da ferramenta/diâmetro com os valores obtidos na rugosidade.

- Executar novos ensaios e com variações dos parâmetros velocidade de corte, avanço por dente e profundidade de corte estipulados, para se obter um melhor resultado na rugosidade final.

- O método utilizado neste trabalho para visualizar superfícies foi à microscopia óptica por ser o mais empregado e mais prático. Sugere que seja utilizado o método MEV que fornecera imagens com melhores definições e qualidade para avaliar mais profundamente as características do aspecto visual, como cristas, deformações e aderência do material resultante da mecânica de corte.

- Repetir ensaios do tratamento térmico efetuado no alumínio 7075 visando um estudo de análise e comparação dos resultados obtidos com o material já existente no mercado.

Capítulo 7

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAL, O alumínio - (2007) **Associação Brasileira do Alumínio**. Disponível em: <http://www.abal.org.br/aluminio/historia.asp>. Acesso em: 13 Novembro 2007.

ABRÃO, A. M; LIZARDO B. F; PINHEIRO B. L; RUBIO, J. C. (2009). **Metodologia Experimental para Avaliação dos Desvios Geométricos em Máquinas-Ferramenta através do Produto Acabado,** 10p. V Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Belo Horizonte. Disponível em: http://www.abcm.org.br/pt/wp-content/anais/cobef/2009/busca/artigos/011096358.pdf. Acesso em: Outubro 2013.

ACABAMENTO COMPASTILHAS WIPER. Disponível em: <http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/application_overview/face_milling/finishing_with_wiper_inserts/pages/default.aspx>. Acesso em: Setembro 2013.

ALCOA. (2010). **Catalogo ligas Temperas.** Disponível em: <http://www.alcoa.com/brasil/pt/resources/pdf/industria/catalogo_ligas_temperas_2010.pdf> Acesso em: 03 Julho 2010.

ALCOA. Alloy 7075. **(**2012). **ALCOA Mill Products.** Disponível em: <http://www.alcoa.com/mill_products/catalog/pdf/alloy7075techsheet.pdf>. Acesso em: 07 Dezembro 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR METALS INTERNATIONAL HANDBOOK COMMITTEE . (ASM/HANDBOOK). (2003). In: **Metals Handbook**: Corrosion. Metals Park.

AMORIM, H., **(**2002). **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste da ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro.**, 113p. Dissertação (mestrado)-Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre–RS.

ASM INTERNATIONAL, (1991a).**ASM Handbook - Properties and Selection. Non ferrous Alloys and Special-Purpose Materials**. EUA, ASM International, v. 2.

ASM INTERNATIONAL. (1991b). **ASM Handbook. Heat Treating**. EUA, ASM International, v. 4.

ASM INTERNATIONAL. (1998). **ASM Handbook Metallography and Microstructures**. EUA: ASM International, v. 9.

BALESTRASSI, P. P. (2003). **Estatística Aplicada – Apostila do Curso de Pós - Graduação em Engenharia de Produçã** – Departamento de Produção – UNIFEI, Itajubá - MG.

BALKRISHNA R. , YUNG C. S. (2001). Analysis on High-speed Face–Milling of 7075-T6 Aluminum using Carbide and Diamond Cutters, **International Journal of Machine Tools & Manufacture,**V41,University,West Lafayette, IN 47907,USA, p 1763-1781.

BATISTA, M. (2006). **Estudo da Rugosidade de superfícies planas usinadas por Fresas de topo Esférico**, 103 p., Dissertação (Mestrado)-Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Carlos-Sp.

CALLISTER, W. D. (2005). **Ciência e engenharia de materiais**: Uma introdução 5 ed. São Paulo: LTC.

CAMARGO, R. (2002). **Rugosidade superficial nas operações de torneamento**. Santa Bárbara D`Oeste: SENAI.

CAMARGO, R. (2008). **Verificação da usinabilidade dos aços inoxidáveis austeníticos através do processo de furação**. 100p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Fabricação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP.

CAVALCANTE, F. (2010). **Análise de utilização de Broca Escalonada de canal reto no processo de furação em uma liga de alumínio utilizada na indústria automotiva,** 123p. , Dissertação (Mestrado)-Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba-PR

CENTRO DE INFORMAÇÃO METAL MECÂNICA – CIMM. Disponível em: <http://www.cimm.com.br>. Acesso em: 04 dezembros 2013.

ÇOLAC, O. ; KURBANOGLU, C.; KAYACAN, C.E. (2005). **Milling surface roughness prediction using evolutionary programming methods. Materials & Design**. Oxford, v.28, n.2, p.657-666.

COSTA, E. S.; GONÇALVES, C.S., MACHADO, A.R. (2006). **Analise da Rugosidade em canais Fresados na Liga de Alumínio ASTM 6351-T6 em Função dos Parâmetros de Corte e do Numero de Dentes da Fresa. XI Colóquio de Usinagem**, Goiânia.

COUTINHO, T. A. (1980). **Metalografia Dos Não Ferrosos**: Análise Prática. SÃO PAULO.

DAGILOKE, I. F., KALDOS, A., DOUGLAS, S. e MILLS B. (1995). **High-speed machining: an approach to process analysis,** Journal of Materials Processing Technology, n.54, p.82-87.

DALMOLIM- **Educação/Materiais**. Disponível em: **< (**http://www.dalmolim.com.br/EDUCACAO/MATERIAIS/Biblimat/aluminioconf.pdf)> Acesso em: 13 Agosto 2010.

DEVOR,R. E., CHANG, T., SUTHERLAND, J. W. (1992). **Statistical Quality design and Control – Contemporary concepts and methods**, New Jersey, Prentice Hall, Inc. Cap. 15-20, p.503-744.

DEWES, R. C., NG, E., CHUA, K. S., NEWTON, P. G. e ASPINWALL, D. K. (1999). **Temperature Measurement when High Speed Machining Hardened Mould/Die Steel,** Journal of Materials Processing Technology, n.92-93, p.293-301.

DEWS,R.C.E ASPINWALL, D.K.,A. (1997). **Review of Ultra High Speed Milling Of Hardened Steels,** Journal Of Materials' And Processing Technology,N69, p.1-17.

DIETER, G. (1981). **Metalurgia Mecânica**. 2ª. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois.

DINIZ, A. E., Marcondes, F. C, COPPINI, N. L. (2014). **Tecnologia da Usinagem dos Materiais.** 6 ed. São Paulo: Artliber Editora, 262 p.

DROZDA, T.J., WICK, C. (1983). **Tool and Manufacturing Engineers Handbook-Machining**, n.4.v.1. Dearborn: Societyof Manufacturing Engineers, p.1.1-1.66, p.10.1-10.76.

EL BARADIE, M. A. (1996) "**Cutting fluids: Part I. Characterization**". Journal of Materials Processing Technology, v. 56, pp. 786-797.

ESPANHOL, V. (2008). **Análise dos Esforços de Corte e Acabamento Superficial no Torneamento de Aço com Ferramenta de Superfície lisa e com Quebra-cavaco**, 83 p., Dissertação (Mestrado)-Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.

FELTRIN, J. V. (2004) **Obtenção e caracterização de estruturas reofundidas e tixofundidas da liga de alumínio AA7075**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

FERRARESI, DINO. (1981). **Fundamentos da usinagem dos metais**. Vol. 1, São Paulo: Edgard Blücher, 751 p.

FERRAMENTAS ROTATIVAS - SandvikCoromant**,** Disponível em: <http://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/catalogues/pt-pt/rotating/rot_g.pdf>Acesso em: 13 Novembros 2013.

GOMES, J. H. F., CAMPOS, P. H. S., LOPES, L. G. D., COSTA, S. C., PAIVA, A. P. (2012). **Otimização Robusta da Diluição e da Largura do Cordão na Soldagem com Arame Tubular para Aplicações de Revestimento do aço carbono ABNT 1020 com aço inoxidável ABNT 316L**, Anais do VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM), São Luís (MA), Brasil.

GRINE, K., ATTAR, A., AOUBED, A., BREYSSE, D. (2010) **Using the design of experiment to model the effect of silica sand and cement on crushing properties of carbonate sand**. Materials and Structures, v. 44, pp. 195-203.

HARIDY, S., GOUDA, S. A., WU, Z. (2010). **An integrated framework of statistical process control and design of experiments for optimizing wire electrochemical turning process**. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, DOI 10.1007/s00170-010-2828-7.

HATCH, JOHN, **Aluminum. Properties and physical mettalurgy**. (1984). ASM International, EUA.

INFOMET. Disponível em: <(http://www.infomet.com.br/metais-e-ligas-)>
Acesso em : 10 Agosto 2013.

KECELJ, B. et al. (2004). **Speciality of HSC in manufacturing of forging dies.** Journal of Materials Processing Technology, v.157/158, p.536- 542, Amsterdam

KORKUT, I.; DORNETAS, M.A. (2005) . **The influence of federate and cutting speed on the cutting forces , surface roughness and tool-chip contact length during face milling**. Materials & Desing, Oxford , v.28, n.1, p.308-312.

LONGBOTTOM,J.M., LANHAM, J. D. (2006). A Review of Research Related to Salomon´s Hipothesis on Cutting Speeds and Temperatures, **International Journal of Machine Tools & Manufacture**,vol.46, p.1740-1747.

MATTOS, P., A., M., J. (2010). **O comportamento da corrosão sob tensão da liga 7075- T6 para futuras utilizações em projetos mecânicos**, 88P., Dissertação (Mestrado)-Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte -MG

MACEDO, P. E. D. M. (2012). **Estratégia no setor brasileiro de alumínio:** reciclagem como alternativa de crescimento para a CBA. São Paulo: Trabalho de Formatura Engenharia de Produção, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, SP.

MACHADO, A. R., DA SILVA, MB. (2004). **Usinagem dos Metais** , apostila, 8ª versão , EDUFU, Uberlândia, 257 p.

MACHADO, A. R., COELHO, R.T., ABRÃO, A.M.; DA SILVA, M.B. (2009), **Teoria da Usinagem dos Materiais**. Ed. Edgard Blücher, São Paulo, 384 p.

MARCELINO, A.P., DOMINGOS, D.C., CAMPOS, D.V. E SCHOROETER, R.B. (2004). **Medição e Simulação dos Esforços de Usinagem no Fresamento de topo Reto de Ligas de Alumínio Tratável Termicamente 606**1,Rio de Janeiro: IX CREEM, Paper CRE04-p25.

METALS HANDBOOK. MACHINNING. (1989). USA; ASM Internacinal, v. 16, 9499 p.

MIRANDA, G.W. A., COPPINI,N. L., DINIZ, A, E.,BRAGA, D.U. (2001). **Quando as Brocas de Metal Duro Revestidas Dispensam os Fluidos de Corte**, O Mundo da Usinagem, ISSN1518-6991,RG.BN 217.147, 25 p.

MONTGOMERY, D. C., RUNGER, G. C. (2003). **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros. LTC** – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2 ed., p. 570.

MONTGOMERY, D. C. (2005) **Design and Analysis of Experiments,** John Wiley & Sons, 6ª ed., 643 p.

N. CAMUSCU, E., ASLAN, A. (2005). **Comparative study on cutting tool performance in end milling of AISI D3 tool steel**, Journal of Materials Processing Technology 170 121–126.

NETO, P. L. O. C., (2002). **Estatística** 2ª ed. Editora Edgard Blucher Ltda. São Paulo.

NILO Jr., L. P. (2003) - **Otimização de um processo de solda MIG/MAG para aplicação na indústria automobilística através da utilização da técnica do projeto e análise de experimentos.** Dissertação (Mestrado)-Engenharia de Produção) – Instituto de Engenharia de Produção e Gestão, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 111 pgs.

OZCELIK B., BAYRAMOGLU M. (2005). **The statistical modeling of surface roughness in high-speed flat end milling**, International Journal of Machine Tools & Manufacture.

OWEN, J. V. (1998). **Picking a Coolant. Manufacturing Engineering**, v. 120, no.5, pp. 92-100.

PAIVA, A. P., COSTA, S. C., PAIVA, E. J., BALESTRASSI, P. P., FERREIRA, J. R. (2007) **Multi objective optimization of pulsed gas metal arc welding process based on weighted principal component scores**. InternationalJournal Adv. Manuf. Technol, 2504-y.

PALMA, E.S. **Apostila de Metrologia**. (2006). Programa de pós Graduação em engenharia mecânica, mecatrônica, PUC, MG.

RAGHAVAN, A. et al. Microanalytical study of the heterogeneous phases in commercial Al-Zn-Mg-Cu alloys. (1985). **Metallurgical Transactions A** , v. 16, n. 11, p. 1925-1936.

REBRAC- Instrumentos de Medições, Disponível em: http://www.rebrac.com.br/downloads/RUGOSIDADE%20-par%C3%A2metros-.pdfAcesso em: 10 Novembros 2013.

SANDVIK COROMANT. (2011). **Manual Técnico de Usinagem**, Sandviken, Suécia.

SCHROETER, R. B., WEINGAERTNER, W. L. (2002). **Tecnologia da usinagem com ferramentas de geometria definida** – parte 1. Apostila do curso de Engenharia Mecânica.

SOUZA, A, (b). (2004). **Contribuições ao fresamento de geometrias complexas aplicando a tecnologia de usinagem com altas velocidades.** 171 f., Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos-SP.

SHIGLEY, J. E.; MISCHKE C. R.; BUDYNAS R. G**.** (2005). **Projeto de engenharia mecânica –** Bookman. 7ª edição, Porto Alegre – RS.

SHENG, P. S., OBERWALLENEY, S. (1997). **Life cycle Planning of Cutting Fluids a Review. Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 119, no. 4 (b), pp. 791-800.

STARKE JR, E. A.; HORNBOGEN, E. Precipitation Hardening: From Alfred Hilm to the Present.In: HIRSCH, J.; SKROTZKI, B.; GOTTSTEIN, G. (2008). **Aluminium Alloys. Their Physical and Mechanical Properties**. Weinheim: Wiley-VCH, v. 1.

STEMER, C.E. (1996). **Ferramentas de Corte II**, 2º ed., Editora de la UFSC, 314p.

SUAREZ, M. (2008). **Fresamento de Canais da Liga de Alumínio Aeronáutico 7075-T7**, 125p., Dissertação (Mestrado)-Engenharia Mecânica, Área de Concentração: Materiais e Processo de Fabricação, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia–MG.

TAYLOR, G. I.; QUINEY, H. Proc. R. Soc. 1934, A142, 307

TAYLOR, G. I.; QUINEY, H. Proc. R. Soc. 1937, A163, 157

TOH, C. K. (2004). **A study of the effects of cutter path strategies and orientations in milling**. Journal of Materials Processing Technology, v. 152, p. 346-356.

TOBERTT, P. E., EISEN, E. A., POTHIER, L. J., MONSON, R. R., HALLOCK, M. F., SMITH, T. J. (1992). **Mortality studies of Machining-fluid Exposure in the Automobile Industry II Risks associated With Specific Fluid Types**. Scandinavian Journal Work Environment Health, v. 18, pp. 351-360.

TRENT, E.M.; WRIGTH, P, K,. **Metal Cutting,** 4a Ed. Butterworts , England, 2000.446 p.

TRIOLA, M. F. (1999). **Introdução à Estatística**. 7.ed. Rio de Janeiro: LTC Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.

VOGT, H. (1998). **Stress corrosion cracking of two Aluminum alloys: A comparison between experimental observations and data based on modeling. Corrosion Science**, V. 40, p. 251-270.

WEINGAERTNER W. L.; SCHROETER RB. (1991). **Tecnologia de usinagem do alumínio e suas ligas**, 2ª ed, São Paulo: Alcan Alumínio do Brasil.

WRUBLAK, O. PILATTI, L. A. ; PEDROSO, B. (2008). **Parâmetros e métodos de usinagem e sua relação com os custos do processo e o acabamento final do produto**. 4° Encontro de Engenharia e Tecnologia dos Campos Gerais, 9 p. Disponível em: http://www.4eetcg.uepg.br/painel/64_1.pdf Acesso em 20 outubros 2013.