



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DA QUALIDADE DE FUROS SEDES DE
ROLAMENTOS PRODUZIDOS EM PEÇAS DE LIGA DE
ALUMÍNIO POR MANDRILAMENTO COM FERRAMENTA
DE PCD

PAULO PAIVA DE CARVALHO

Belo Horizonte, 30 de Junho de 2017

Paulo Paiva de Carvalho

ESTUDO DA QUALIDADE DE FUROS SEDES DE
ROLAMENTOS PRODUZIDOS EM PEÇAS DE LIGA DE
ALUMÍNIO POR MANDRILAMENTO COM FERRAMENTA
DE PCD

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial à obtenção de título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Juan Carlos Campos Rubio

Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2017

- C331e Carvalho, Paulo Paiva de.
Estudo da qualidade de furos sedes de rolamentos produzidos em peças de liga de alumínio por mandrilamento com ferramenta de PCD [manuscrito] / Paulo Paiva de Carvalho. – 2017.
xi, 102 f., enc.: il.
- Orientador: Juan Carlos Campos Rubio.
- Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.
- Apêndices: f. 99-102.
- Inclui bibliografia.
1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Processos de fabricação - Teses.
3. Ligas de alumínio - Teses. 4. Usinagem - Teses. 5. Metais - Corte - Teses.
I. Campos Rubio, Juan Carlos. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.
- CDU: 621(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA
Av. Antônio Carlos, 6627 - Campus Universitário
31270-901 - Belo Horizonte - MG
Tel.: +55 31 3409.5145
E-mail: cpgmec@demec.ufmg.br

**“ESTUDO DA QUALIDADE DE FUROS SEDES DE ROLAMENTOS
PRODUZIDOS EM PEÇAS DE LIGA DE ALUMÍNIO POR
MANDRILAMENTO COM FERRAMENTA DE PCD”**

PAULO PAIVA DE CARVALHO

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "**Mestre em Engenharia Mecânica**", na área de concentração de "**Processos de Fabricação**".

Dissertação aprovada no dia 31 de julho de 2017.

Por:

Prof. Juan Carlos Campos Rúbio
Orientador - Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG

Prof. Márcio Bacci da Silva
Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Alexandre Mendes Abrão
Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG

Prof. Marcelo Araújo Câmara
Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus que expressou seu amor por mim e pela humanidade enviando seu único filho, Jesus Cristo, o qual se submeteu à morte na cruz para remissão dos nossos pecados.

À minha família, que é a minha base de sustentação.

Agradecimento especial à minha cunhada Ildete, que entrou para a família quando eu tinha apenas quatro anos e vem me acompanhando e me ajudando todos esses anos.

À FCA, em especial ao Flávio Goulart, Rogério Gomes e Cláudio Rocha pela flexibilização do horário de trabalho, permitindo, assim, a realização das atividades do mestrado.

Ao professor Juan Carlos Campos Rubio, pela orientação e pela troca de experiências, fundamentais na realização deste trabalho.

Ao professor Marcelo Araújo Câmara, pelos esclarecimentos e ensinamentos transmitidos em várias ocasiões durante a realização dos experimentos.

Aos membros da banca, pela disponibilidade de participação da banca examinadora.

Ao meu amigo e colega de trabalho Paulo Sergio Martins, pela imensa contribuição na viabilização dos materiais necessários à realização dos experimentos e por todo aconselhamento.

Agradeço também ao Artur, da empresa Mapal, pelo suporte na obtenção da ferramenta de corte e informações fornecidas.

Aos colegas de laboratório, Augusto, Anderson, Diogo e Bruna pelo auxílio na realização das atividades no laboratório de usinagem.

Enfim, agradeço a todos que tive contato, ainda que por pouco tempo, mas me ajudaram de alguma forma na realização das atividades.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	
LISTA DE GRÁFICOS	
LISTA DE TABELAS	
LISTA DE QUADROS	
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	
RESUMO	
ABSTRACT	
1	INTRODUÇÃO..... 1
1.1	Objetivos..... 5
1.2	Estrutura do trabalho..... 6
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... 7
2.1	Usinagem por Mandrilamento 7
2.2	Ligas de alumínio..... 13
2.3	Diamante Policristalino Sintético – PCD..... 18
2.4	Atrito e Desgaste em Ferramentas de PCD 23
2.5	Técnicas de lubri-refrigeração na usinagem 26
2.6	Tolerâncias de Forma..... 52
3	METODOLOGIA 55
3.1	Planejamento dos Experimentos 55
3.1	Variáveis de Entrada 56
3.2	Variáveis de Saída 57
3.3	Materiais e Equipamentos..... 58
3.3.1	Materiais 58
3.3.2	Equipamentos 59
3.4	Procedimento Experimental..... 60
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO 66
4.1	Análise do Comportamento do Diâmetro 66
4.2	Análise do Comportamento do desvio de circularidade 75
4.3	Análise da ferramenta de corte 81
4.4	Análise do Desempenho das Técnicas de Usinagem..... 84
5	CONCLUSÃO..... 88
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 90
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 91
	APÊNDICE..... 99

NOMENCLATURA

a_p	Profundidade de corte
f_z	Avanço por aresta (mm/rev)
AlSi	Liga de alumínio-Silício
Al-Cu	Liga de alumínio-Cobre
Al-Cu-Mg	Liga de alumínio-Cobre-Magnésio
Al-Mg-Si	Liga de alumínio-Magnésio-Silício
Al-Zn-Mg	Liga de alumínio- Zinco-Magnésio
Al-Si-Cu	Liga de alumínio-Silício-Cobre
Al-Si-Cu-Mg	Liga de alumínio- Silício-Cobre-Magnésio
Al-Si-Cu-Fe	Liga de alumínio- Silício-Cobre-Ferro
X, Y, Z	Eixos cartesianos
V_c	Velocidade de corte
f	Avanço em mm/min
Z	Numero de arestas de corte
d	Diâmetro da ferramenta
n	Numero de revoluções por minuto
HC-P	Metal Duro (Cemented Carbide) serie P
TiN	Nitreto de titânio
TiAlN	Nitreto de titânio liga de alumínio
L	Profundidade de usinagem
Bar	Unidade de medida de pressão
MPa	MegaPascal
WC-Co	Carboneto de tungstênio-cobalto
Ø	Diâmetro

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Representação esquemática do desalinhamento entre o centro do furo e o centro da ferramenta, a) vista de lado b) Vista de topo evidenciando a diferença da profundidade de corte em cada faca devido ao desalinhamento	9
FIGURA 2 - Representação esquemática da área dos cavacos removidos a) sem desalinhamento e b) com desalinhamento, evidenciando as diferentes espessuras (t) do cavaco em cada faca	10
FIGURA 3 – a) deslocamento e b) Forças atuantes antes, durante e depois do corte na operação de mandrilamento de furo.	10
FIGURA 4 - Variação do diâmetro e circularidade em função da velocidade de corte e avanço	11
FIGURA 5 - Variação do acabamento superficial para diferentes velocidades de corte, evidenciando aumento da vibração, (x7 ampliação), a) 25 m/min e b) 80 m/min	12
FIGURA 6 - Zonas de geração de calor na região do corte: A (cisalhamento primário); B e C (cisalhamento secundário) e D (interface ferramenta/peça)	12
FIGURA 7 - Diagrama de fases AlSi evidenciando o ponto eutetóide, Si = 12,5%	16
FIGURA 8 - Microestrutura típica de AlSi (12% Si evidenciando as partículas de silício globulares incorporadas na matriz e liga de alumínio.	17
FIGURA 9 - Seção transversal da pastilha de PCD.	19
FIGURA 10 - Microestrutura do substrato de metal duro evidenciando a presença de grãos de diamante. Luz polarizada foi utilizada para diferenciar as partículas de diamante (pontos claros) do substrato de WC-Co (área escura)	19
FIGURA 11 - Tenacidade a fratura da camada de PCD em função do tamanho de grão	20
FIGURA 12 - Variação módulo de elasticidade quase-estático com a temperatura.	21
FIGURA 13 - Resistência à abrasão relativa do PCD, tendo como base de normalização uma camada de PCD com grão de 30 μ m	22
FIGURA 14 – a) Adesão de liga de alumínio na aresta de corte. b) Espectro de EDX mostrando a presença de alumínio na área sinalizada com numero 1, c) espectro EDX mostrando o elemento cobalto na área sinalizada com o numero 2, d) Espectro de EDX mostrando o alumínio (pontos brancos sinalizados pelo numero 3) dissolvidos no cobalto....	25
FIGURA 15 - Ligações entre os grãos de diamante na matriz de metal duro.....	26
FIGURA 16 - Desgaste abrasivo na superfície da ferramenta próximo à aresta principal de corte.	26
FIGURA 17 - Pontos de aplicação de fluido de corte: A) Alta pressão entre a superfície de saída da ferramenta e o cavaco; B) Alta pressão entre a superfície de folga e a peça; C) Geral à baixa pressão	28
FIGURA 18 - Exemplo de aplicação de fluido de corte geral, à baixa pressão	28
FIGURA 19 - Medição da concentração de partículas metálicas com tamanho menor que 10 μ m geradas na usinagem utilizando óleo sintético com concentração de 5%.....	31

FIGURA 20 - Comparação da emissão de partículas entre as técnicas de usinagem com MQL e Fluido.	32
FIGURA 21 - Cálculo analítico para estimativa de geração de resíduos no processo de fresamento de liga de alumínio A390.0.....	33
FIGURA 22 - Temperatura da ferramenta em função da velocidade de corte para as técnicas, MQL, Fluido e Seco.	35
FIGURA 23 - a) Relação entre a técnica de usinagem e as forças de corte F(X), F(Y) e F(Z), b) desgaste de flanco em função do tempo de corte utilizando MQL e ar resfriado a -15°C, -30°C e -45°C	36
FIGURA 24 - Formação do jato de MQL composto por ar, óleo e água.	36
FIGURA 25 - Variação da força específica de corte com a taxa de comprimento de corte para as técnicas de usinagem MQL e OoW utilizando ferramenta de PCD com 0° de inclinação na superfície de saída.	37
FIGURA 26 - Variação da força de avanço em função da velocidade de corte e avanço para as técnicas de usinagem: com Fluido, MQL, Ar comprimido e à seco	38
FIGURA 27 - Comparação do desgaste de flanco entre as técnicas de usinagem com Fluido e MQL.	38
FIGURA 28 - Comparação dos resultados de diâmetro dos furos entre as técnicas de usinagem com Fluido e MQL.	39
FIGURA 29 - Sistema de geração de jato de MQL com um e dois canais.	40
FIGURA 30 - Barra de mandrilar com múltiplas arestas de corte com canais para alimentação interna do jato de MQL	42
FIGURA 31 - Influência da rotação do eixo árvore no tamanho da partículas de óleo do jato de MQL	43
FIGURA 32 - Sistema de aplicação de jato de MQL externo	44
FIGURA 33 - Comparação entre o aumento da viscosidade devido à oxidação durante o armazenamento.	46
FIGURA 34 - Resultado dos teste de medição da eficiência de energia no rosqueamento	46
FIGURA 35 - Força de corte na furação com MQL para diferentes gases com presença e ausência de óleo de corte éster na formação do jato.....	47
FIGURA 36 - Tamanho médio das partículas de óleo para as diferentes condições de entrada, geometria do canal e viscosidade do óleo	48
FIGURA 37 - Variações da geometria do canal de alimentam do jato de MQL e dados de entrada dos testes; a) Reto com \varnothing 6 mm; b) Reto com \varnothing 4 mm; c) Reto com \varnothing 2 mm; d) \varnothing 6 mm 45° com imperfeição; e) \varnothing 6 mm 45°; f) \varnothing 6 mm 90° com imperfeição; \varnothing 6 mm 90°.....	49
FIGURA 38 - Influencia da velocidade de corte e avanço na temperatura de interface cavaco-ferramenta no torneamento com MQL, fluido de corte e a seco do aço AISI 1040.....	51
FIGURA 39 - Tipos de revestimento: 1- AlTiN nano estruturado espessura 1,3 μ m; 2 – AlTiN nano estruturado espessura 2,3 μ m; 3 – Diamante espessura 10 μ m.....	52

FIGURA 40 – Ilustração da definição de desvio de circularidade.....	53
FIGURA 41 – Métodos de medição do desvio de circularidade e diâmetro, a) Círculo por mínimos quadrados, b) Círculo por mínima zona, c) Círculo máximo inscrito, d) Círculo máximo circunscrito.	54
FIGURA 42 – Distância de medição do diâmetro e circularidade a partir do plano de referência. Dimensões em mm.	57
FIGURA 43 – Ferramenta de corte utilizada nos experimentos, a) desenho da barra de mandrilar, b) geometria da plaqueta de PCD.	59
Figura 44 – Equipamentos utilização para realização dos experimentos a) centro de usinagem ROMI, b) Máquina de medir por coordenadas, TESA, c) equipamento gerador do jato de MQL.	60
FIGURA 45 - Desenho da carcaça da transmissão com identificação dos furos sede de rolamento escolhidos para análise.	60
FIGURA 46 - Corpos de prova extraídos das peças de produção.....	61
FIGURA 47 – Desenho do corpo de prova com indicação dos furos de referência cilíndrica, angular e furo sede de rolamento em estudo – furo 1	62
FIGURA 48 - Desenho dos pinos de referência a) cilíndrica e b) angular.....	63
FIGURA 49 - Desenho das bases de apoio utilizadas na realização dos testes.....	63
FIGURA 50 – Alinhamento da peça ao barramento da máquina.....	64
FIGURA 51 – Montagem e fixação da peça com destaque para o sistema gerador de MQL, a) instalação no centro de usinagem, b) ferramenta de corte de acabamento, c) fixação da peça, d) sistema gerador de MQL.	65
FIGURA 52 –Imagem da aresta de corte do PCD após os testes de usinagem.....	82
FIGURA 53 – Análise da aresta de corte da plaqueta de PCD e evidenciando adesão de liga de alumínio, a) Região de corte, ampliação 50X, b) Detalhe evidenciado em a), ampliação 250X, c) detalhe evidenciado em b), ampliação 500X, d) detalhe evidenciado em c), ampliação 1000X, e) Distância em relação a superfície de saída, ampliação 250X, f) Profundidade da região de liga de alumínio aderido no flanco.	83

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – Valores dos pares de testes para a usinagem com MQL.....	66
GRÁFICO 2 - Valores dos pares de testes para a usinagem com Fluido.....	67
GRÁFICO 3 - Valores dos pares de testes para a usinagem à seco.	68
GRÁFICO 4 – Análise da distribuição dos e resíduos para o diâmetro na usinagem com MQL, a) distribuição normal dos valores, b) distribuição dos resíduos.....	70
GRÁFICO 5 – Análise da distribuição dos e resíduos para o diâmetro na usinagem com Fluido, a) distribuição normal dos valores, b) distribuição dos resíduos.	70
GRÁFICO 6 – Análise da distribuição dos e resíduos para o diâmetro na usinagem à seco, a) distribuição normal dos valores, b) distribuição dos resíduos.....	71
GRÁFICO 7 - Parâmetros significativos sobre o diâmetro na técnica de usinagem com MQL: a) linear b) interações de segunda ordem.	71
GRÁFICO 8 - Parâmetros significativos sobre o diâmetro na técnica de usinagem com Fluido: a) linear b) interação de segunda ordem.	72
GRÁFICO 9 - Parâmetros significativos sobre o diâmetro na técnica de usinagem à seco: a) linear b) interação de segunda ordem.	73
GRÁFICO 10 - Valores dos pares de testes para o desvio de circularidade na usinagem com MQL.	75
GRÁFICO 11 - Valores dos pares de testes para o desvio de circularidade na usinagem com Fluido.....	76
GRÁFICO 12 - Valores dos pares de testes para o desvio de circularidade na usinagem à seco.	76
GRÁFICO 13 - Análise da distribuição dos e resíduos para o desvio de circularidade na usinagem com MQL, a) distribuição normal dos valores, b) distribuição dos resíduos.....	77
GRÁFICO 14 - Análise da distribuição dos e resíduos para o desvio de circularidade na usinagem com Fluido, a) distribuição normal dos valores, b) distribuição dos resíduos.	78
GRÁFICO 15 - Análise da distribuição dos e resíduos para o desvio de circularidade na usinagem à seco, a) distribuição normal dos valores, b) distribuição dos resíduos.	78
GRÁFICO 16 - Parâmetros significativos para o desvio de circularidade na técnica de usinagem com MQL: a) linear b) interação de segunda ordem.....	79
GRÁFICO 17 - Parâmetros significativos para o desvio de circularidade na técnica de usinagem com Fluido: a) linear b) interação de segunda ordem.	80
GRÁFICO 18 - Parâmetros significativos para o desvio de circularidade na técnica de usinagem à seco: a) linear b) interação de segunda ordem.....	81
GRÁFICO 19 - parâmetros de corte otimizados para diâmetro e desvio de circularidade para usinagem com MQL.	84
GRÁFICO 20 - parâmetros de corte otimizados para diâmetro e desvio de circularidade para usinagem com Fluido.....	85
GRÁFICO 21 - parâmetros de corte otimizados para diâmetro e desvio de circularidade para usinagem à seco.	85

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Valores de cada nível para os fatores V_C, f_z e a_p	56
TABELA 2 - Tabulação dos experimentos: planejamento fatorial completo com uma réplica	56
TABELA 3 – Dados do diâmetro e desvio de circularidade obtidos na usinagem de desbaste do furo	61
TABELA 4 - Parâmetros de corte dos pares de testes para o diâmetro e desvio de circularidade	66
TABELA 5 - ANOVA: Valores de <i>P-Valor</i> para o diâmetro	69
TABELA 6 - ANOVA: Valores de <i>P-Valor</i> para desvio de circularidade	77
TABELA 7 - Dados do diâmetro e desvio de circularidade para cálculo do teste de hipóteses de média.....	86
TABELA 8 - Resultados de <i>P-Valor</i> para o teste de hipóteses de média para diâmetro e desvio de circularidade	87

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - Composição química das diferentes ligas de alumínio	14
QUADRO 2 - Especificação dos tratamentos térmicos	14
QUADRO 3 - Tolerância e forma e simbologia.....	52
QUADRO 4 - Definição dos tipos de medição do desvio de circularidade	53
QUADRO 5 - Testes de hipóteses de média: nível de significância $\alpha = 0,05$	55
QUADRO 6 - Composição da liga de alumínio-Silício utilizada	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PCD	Diamante policristalino (<i>Polycrystalline Diamod</i>)
MQL	Mínima Quantidade de Líquido
ANOVA	Análise de Variância (<i>Analysis of Variance</i>)
ABAL	Associação Brasileira do Liga de alumínio
HSS	<i>High Speed Steel</i>
BOP	Bill of Process
CFD	<i>Computational Fluid Dinamics</i>
APC	Aresta Postiça de corte
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
EDX	Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios-X (<i>Energy-dispersive X-ray spectroscopy</i>)
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
OoW	<i>Oil film on Water droplet</i>
c_p	Calor específico a pressão constante.
rpm	rotações por minuto

RESUMO

As tecnologias de aplicação de técnicas de usinagem com MQL (mínima quantidade de líquido), com fluido de corte em abundância e à seco tem sido estudadas em diversas aplicações, operações e em diversos materiais, sobretudo a usinagem com MQL devido à redução dos impactos ambientais e consequente redução do custo do produto, uma vez que reduz drasticamente o consumo de fluido de corte do processo. A usinagem de peças em liga de alumínio requer atenção especial em função da maior probabilidade de ocorrência de adesão de material e deformações causadas pela temperatura de corte, bem como dilatações térmicas, que podem inviabilizar a aplicação das técnicas de usinagem com MQL e à seco, sobretudo nas operações de acabamento, as quais definem as características qualitativas finais dos produtos. Assim, este trabalho teve por objetivo avaliar o desempenho das técnicas de usinagem MQL, com fluido de corte em abundância e à seco por meio de estudo das características qualitativas, desvio de circularidade e diâmetro, em furos sede de rolamento de peças fabricadas em liga de alumínio na operação de acabamento utilizando barra de mandril de PCD. Os experimentos foram planejados e executados utilizando DOE (*Design Of Experiments*) e análise de variância (ANOVA), cujos parâmetros de corte, velocidade corte (842 e 1263 m/min), avanço por aresta (0,15 e 0,30 mm/rev) e a profundidade de corte (0,4 e 0,65 mm) foram selecionados como variáveis de entrada, utilizando o planejamento estatístico fatorial completo. O diâmetro e o desvio de circularidade foram definidos como variáveis de saída na avaliação da qualidade do furo. Os resultados evidenciaram um desempenho superior da usinagem com MQL quando comparada com a usinagem com fluido de corte em abundância, mesmo considerando as restrições da aplicação externa de MQL. A usinagem à seco apresentou valores acima das tolerâncias especificadas tanto para diâmetro quanto para desvio de circularidade, não sendo recomendada para a operação de mandrilamento de ligas de alumínio. Em geral, a velocidade de corte e o avanço por aresta foram os principais parâmetros lineares de influência, enquanto que a profundidade de corte e o avanço por aresta foram as principais influências combinadas sobre o desvio de circularidade e diâmetro.

Palavras-chave: Mandrilamento, liga de alumínio Al-Si, MQL, usinagem à seco, usinagem com fluido de corte, DOE, ANOVA, desvio de circularidade.

ABSTRACT

The application technologies of machining techniques with MQL (minimal quantity of liquid), Wet machining and Dry machining have been studied extensively in several applications, operations and different materials, mainly the machining with MQL, that combines better of both machining (Wet and Dry) once it reduces the environmental impacts and cost of the product, both due the reduction of the cutting fluid consumption from process. Machining of aluminum parts requires special attention due to the higher probability of BUE (built-up edge) formation and deformations caused by the cutting temperature. This may prevent the application of machining techniques with MQL and Dry, especially in the finishing operations, which define the final qualitative characteristics of the products. This paper aims to evaluate the performance of machining techniques with MQL, Cutting Fluid and Dry machining through the study of the qualitative characteristics diameter and roundness, in seat bearing holes of manufactured aluminum parts in the reaming operation using PCD tool. The experiments were designed with DOE (Design Of Experiments) and analysis of variance (ANOVA, whose cutting parameters, cutting speed (842 and 1263 m/min), feed rate (0.15 and 0.30 mm/rev) and depth of cut (0.4 and 0.65 mm) were selected as input variables, using the full factorial. The diameter and roundness were defined as output variables to the evaluation of the hole quality. The results showed a superior performance of MQL in relation to and Wet machining even considering the restrictions of the external application of MQL. Dry machining has presented values above the specified tolerances for both diameter and roundness, not being recommended for reaming machining of the aluminum alloy. In general, cutting speed and feed rate were the main linear parameters of influence, while depth of cut and feed rate were the main combined influences on diameter and roundness.

Keywords: Reaming, Aluminum, MQL, Dry Machining, Wet Machining, Cutting Fluid DOE, ANOVA, Roundness.

1 INTRODUÇÃO

O mercado industrial, sobretudo as indústrias do setor metal-mecânico, a exemplo da indústria automobilística, tem-se tornado mais competitivo devido à abertura do mercado brasileiro na última década e consequente entrada de novas montadoras. A globalização tem proporcionado não somente a abertura dos mercados, mas também tem contribuído para a formação de consumidores cada vez mais exigentes e bem informados. Esta crescente competitividade entre as indústrias impulsiona o desenvolvimento de novas tecnologias e novos produtos, cujo aumento da qualidade tem sido fator essencial tanto para garantir a satisfação e fidelidade do consumidor, quanto para redução dos custos de garantia. Desta forma, para se manterem competitivas no mercado, as indústrias têm buscado formas de aumentar o desempenho dos processos produtivos visando à redução dos custos de fabricação.

No âmbito dos processos de usinagem, várias técnicas têm sido estudadas como opção para redução de custos através da redução ou eliminação do fluido de corte. Segundo Sharma¹ *et al.* (2009, apud Sarikaya e Güllü, 2014), pode-se citar: refrigeração criogênica, lubrificante e refrigerantes sólidos, corte à seco, MQL (mínima quantidade de líquido), refrigeração a alta pressão, refrigeração interna de ferramentas e uso de ar/gases comprimidos. Devido à dificuldade de instrumentação nos processos de alta produtividade, algumas técnicas tais como: refrigeração criogênica, lubrificantes sólidos e uso de gases comprimidos não são utilizadas nas indústrias. Outras, no entanto, já são de uso comum, tais como: refrigeração à alta pressão e refrigeração interna de ferramentas.

As técnicas de usinagem com mínima quantidade de líquido (MQL) e à seco possuem aplicações específicas nas indústrias, embora existam empresas que produzam em série utilizando a técnica MQL. Segundo Tai *et al.* (2014), a Ford Motor Company lançou sua primeira linha produtiva utilizando MQL em 2005, na fábrica nos Estados Unidos. Segundo os autores, devido ao grande sucesso no emprego desta técnica de usinagem na fabricação de componentes prismáticos tais como: bloco em ferro fundido, cabeçotes, virabrequim, bloco motor e carcaças de transmissão em liga de alumínio, a usinagem com MQL se tornou padrão para aquisição de novas linhas produtivas, sendo incluída na lista de BOP² (Bill Of Process).

¹ SHARMA, V.S. DOGRA, M. SURI, N.M. 2009. Cooling techniques for improved productivity in turning. *Int. J. Mach. Tools Manufact.* 49 (6), 435e453.

² BOP (Bill Of Process) é um descritivo de processo que contém as melhores práticas e padrões mundiais de desempenho, qualidade e produtividade, sendo, portanto, utilizado como padrão de aquisição de processos.

Levando-se em consideração a máxima redução de custos, a técnica de usinagem a seco, aparentemente, parece ser a mais vantajosa, porém, usinar à seco não implica somente em retirar o fluido de corte, mas é preciso um estudo minucioso de todo processo, o que inclui a operação de usinagem, a máquina, o material da peça, a ferramenta e o dispositivo de fixação, uma vez que eliminando-se o fluido de corte perde-se também as funções por ele desempenhadas tais como: refrigerar, lubrificar e remover cavacos (WEINERT *et al.* 2004). Em alguns casos, tanto a operação quanto o material podem ser impeditivos para aplicação da usinagem a seco. De acordo com Dhar *et al.* (2006), é impossível realizar a usinagem à seco na operação de furação em ligas de alumínio-silício devido à alta ductilidade deste material, uma vez que sem refrigeração e lubrificação, o cavaco adere à ferramenta e pode provocar sua fratura em um curto tempo.

A técnica de usinagem utilizando MQL tem sido muito estudada como uma excelente alternativa em relação à usinagem com Fluido e à seco, uma vez que combina o melhor de ambas as técnicas, devido às grandes vantagens propiciadas aos processos produtivos e ao meio ambiente tais como: redução do investimento inicial com sistema de bombeamento, filtragem e tratamento dos resíduos gerados pelo fluido de corte. No custo de fabricação, há redução do consumo de energia, óleo de corte, água, e maior taxa de reciclagem de cavacos. Isso porque a técnica de MQL utiliza uma pequena quantidade de óleo de corte ao invés de grande quantidade de fluido, como ocorre no sistema com Fluido. Segundo Cardoso (2014), o sistema de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) funciona por meio de um jato de ar pressurizado, que interagindo com uma gota de óleo a fragmenta, formando uma mistura de ar pressurizado e micro gotas de óleo, denominado *jato*. Para uma mesma máquina e mesma usinagem o sistema com Fluido utiliza uma vazão de fluido de corte de aproximadamente 30 l/h, a exemplo dos fluidos de corte emulsivos, normalmente com concentração entre 8 a 10%, enquanto que a técnica de MQL utiliza vazão de 10 a 100 ml/h (OIKAWA *et al.* 2009).

Em relação ao meio ambiente, reduzindo-se os insumos gastos na fabricação reduz-se também os impactos ambientais, uma vez que elimina os rejeitos descartados no meio ambiente e melhora a qualidade do ar no chão fábrica, reduzindo os problemas de saúde causados nos operadores, especialmente quando do uso de fluidos de corte emulsivos, devido à geração de névoa (ARUMUGAM *et al.* 2003). Segundo os mesmos autores, somente nos Estados Unidos estima-se que mais 100 mil galões (360 mil litros) de fluido de corte sejam utilizados por ano e entre 700.000 e 1000.000 de trabalhadores são expostos à névoa gerada durante o corte. A névoa é formada por partículas finas de 5 μm de diâmetro, e por isso,

permanecem suspensas no ar por um longo período de tempo, o que contribui para o surgimento de doenças nos operadores, tais como: respiratórias e de pele (ARUMUGAM *et al.* 2003).

Em relação à usinagem à seco, muitos autores têm realizados estudos comparativos de desempenho com a usinagem com Fluido e MQL. Na maioria dos casos, os resultados da usinagem com MQL são melhores que os da usinagem à seco em termos de potência de corte, desgaste de ferramentas e menores variações de outros parâmetros de estudo em relação aos parâmetros de corte utilizados. Dhar *et al.* (2006) estudaram a influência das técnicas de MQL, com Fluido e à seco no torneamento do aço AISI 1040. Os resultados demonstraram maior temperatura alcançada na usinagem à seco em relação à MQL, em 80 °C, para faixas de velocidade de corte de 60 a 130 m/min e avanços entre 0,10 e 0,20 mm/rev. Neste mesmo estudo, os autores encontraram também maiores variações no diâmetro ao longo do comprimento de corte em relação à usinagem MQL. Coz *et al.* (2012) estudando a influência da geometria de corte no fresamento à seco de liga de alumínio aeroespacial AA7075 - AlZnMgCu1.5 e encontraram como principal mecanismo de desgaste a adesão, devido às maiores temperaturas de corte. Jayal *et al.* (2007) encontram maiores desvios para o diâmetro nominal de 12 mm quando da aplicação da usinagem à seco na furação de ligas fundidas de liga de alumínio. Os desvios encontrados foram de aproximadamente 0,01 mm para a técnica de MQL e um desvio de 0,013mm para a usinagem com Fluido.

Desta forma, há um grande apelo para o uso da técnica de usinagem MQL, porém, mesmo com desempenho superior em relação à usinagem à seco e em muitos casos também em relação à usinagem com Fluido, os efeitos do aquecimento causado pela temperatura gerada no corte podem influenciar na qualidade dos produtos, especialmente os fabricados em liga de alumínio, o que limita ou mesmo impede o uso da técnica de MQL em larga escala nos processos industriais. Isso porque o efeito do aquecimento nas tolerâncias das peças torna o processo produtivo em série instável, uma vez que a função de refrigerar a peça, exercida pelo fluido de corte não está presente na técnica de MQL, embora alguns autores afirmem que o ar pressurizado seria capaz de refrigerar a peça. Segundo Silva Neto (2012), na técnica da mínima quantidade de líquido (MQL) a função de lubrificação é assegurada pelo óleo e a de refrigeração, principalmente, pelo ar comprimido. Porém, segundo Weinert *et al.* (2004), a capacidade de refrigeração do ar é muito menor que a capacidade das emulsões e/ou óleos de refrigeração, devido às próprias propriedades físicas, tais como calor específico a pressão constante (C_P). Comparativamente, os valores de C_P do ar, água, e óleo são, respectivamente:

1.04 kJ/kgK, 4.18 kJ/kgK e 1.92 kJ/kgK. Por isso, o sucesso do uso da técnica de MQL em substituição à com Fluido, depende da operação, dos parâmetros de corte, do material e geometria da peça e das tolerâncias de fabricação requeridas pelo produto. No caso da usinagem de componentes em liga de alumínio, os efeitos negativos da absorção de calor são ainda maiores devido à maior dilatação sofrida pelo liga de alumínio em relação às outras ligas utilizadas nos processos industriais. Essa dilatação, associada aos esforços de corte, provocam torções na peça, que após a usinagem são percebidas através de desvios dimensionais tais como: erros de planicidade, paralelismo, desvio de circularidade e cilindricidade e diâmetro de furos, etc. (KELLY e COTTERELL 2002).

Como o calor gerado durante corte é distribuído entre o fluido de corte, o cavaco, a ferramenta e a peça, parece evidente a maior tendência ao aquecimento das peças produzidas pela técnica MQL em relação à com Fluido, porém, há uma grande vantagem da técnica MQL no que diz respeito à capacidade de penetração do *jato* na zona de corte, uma vez que o fluido de corte tende a evaporar antes de efetivamente atingir a zona de corte. Já o *jato* pulverizado sob alta pressão possibilita maior penetração (Kelly e Cotterell, 2002), o que contribui para a redução significativa do atrito e conseqüente reduz o calor gerado e aumenta a vida útil da ferramenta (SARIKAYA e GÜLLÜ, 2014).

Dentre os processos de usinagem utilizados na produção de peças para a indústria automobilística, o mandrilamento é utilizado para acabamento de furos de alta precisão, porém esta operação exige uma usinagem prévia de desbaste. Bezerra *et al.* (2001) analisaram a influência dos parâmetros de corte nas características qualitativas de furos com 12 mm de diâmetro utilizando um alargador de 11,997 mm de diâmetro médio e 140 mm de comprimento. Segundo esses autores, menores variações do diâmetro e do desvio de circularidade ocorreram à baixas velocidades de corte.

O material da ferramenta também influencia no desempenho do processo, bem como a geometria e o desgaste da ferramenta interferem diretamente na qualidade do furo produzido, além de influenciar também no custo do processo. Ferramentas fabricadas em PCD (*Polycrystalline Diamond* ou diamante policristalino) são as mais utilizadas na usinagem de ligas de alumínio, especialmente no processo de mandrilamento, por garantir a melhor relação entre o acabamento superficial e a vida útil da ferramenta, tendo em vista a menor quantidade de sobremetal removido. Segundo Wang *et al.* (2013), o PCD possui desempenho muito superior na usinagem de liga de alumínio, em relação ao metal duro e HSS, porque permite a utilização de maiores velocidades de corte e avanços com menor taxa de desgaste. Isso ocorre

devido à baixa afinidade do diamante com o liga de alumínio a capacidade de suportar maiores temperaturas de corte sem perder suas propriedades mecânicas.

Neste trabalho, propõe-se a investigação da influencia dos parâmetros de corte na qualidade dos furos sede de rolamento utilizando a operação de mandrilamento concomitantemente às técnicas de usinagem com fluido, MQL e a seco em peças de liga de alumínio de parede fina tais como as carcaças da transmissão de veículos automotores. Esta investigação foi feita utilizando-se as mesmas características dos furos utilizados na produção industrial, sendo o diâmetro e o desvio de desvio de circularidade do furo escolhidos como variáveis de saída. Os corpos de prova foram produzidos a partir da peça original fundida a fim de garantir a mesma liga do liga de alumínio e as mesmas características dos furos. Com isso, pretende-se a avaliar o desempenho das três técnicas de usinagem, cujo objetivo principal é estudar a viabilidade da substituição da técnica de usinagem com fluido de corte em abundância pela MQL. Para isso, um conjunto de experimentos foi planejado, executado e analisado utilizando-se o planejamento fatorial completo por meio de DOE (Design Of Experiments) e ANOVA (análise de variância).

1.1 Objetivos

Como objetivos gerais, este trabalho pretende:

- . Avaliar o desempenho das técnicas de usinagem, MQL, com fluido de corte em abundância e à seco na operação de mandrilamento de acabamento de furo sede de rolamento de peças fabricadas em liga de alumínio-silício por meio de medições de diâmetro e desvio de circularidade, tendo como parâmetros de entrada a velocidade de corte, avanço por aresta e a profundidade de corte.

- . Estudar a viabilidade da substituição da técnica de usinagem com Fluido pela técnica de MQL por meio da comparação dos resultados e consequente manutenção dos mesmos padrões qualitativos e produtivos alcançados com a técnica Com Fluido.

- . Avaliar as condições da ferramenta de corte utilizada.

Como objetivos específicos pretende-se:

- . Analisar a influência dos parâmetros de corte e as características qualitativas do furo para cada uma das técnicas de usinagem.

. Identificar os parâmetros de corte de maior influência na qualidade e produtividade dos furos para cada uma das técnicas de usinagem.

. Identificar os parâmetros de corte otimizados que garantam a obtenção dos resultados dentro das tolerâncias especificadas para o furo sede de rolamento em análise.

1.2 Estrutura do trabalho

Este trabalho está dividido em seis capítulos, dos quais o primeiro refere-se à introdução do trabalho com seus respectivos objetivos, gerais e específicos, apresentada anteriormente. A seguir é a apresentada a revisão bibliográfica, a qual foi subdividida em cinco tópicos para abranger toda a literatura necessária para desenvolvimento deste trabalho. Em seguida é apresentada a metodologia adotada para realização dos experimentos e na sequência são apresentados os resultados, bem como a discussão dos efeitos dos parâmetros de corte e análise do desempenho das técnicas de usinagem. Nas sessões finais são apresentadas as conclusões do trabalho e as propostas para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada a revisão da literatura para os temas relevantes e necessários ao desenvolvimento deste trabalho os quais se referem à operação de mandrilamento, ao alumínio e suas principais ligas, ao material utilizado na ferramenta de corte, incluindo o atrito e desgaste no PCD e por fim é apresentada a revisão das técnicas de lubri-refrigeração com foco nas técnicas MQL, com fluido de corte em abundância e à seco.

2.1 Usinagem por Mandrilamento

Dentre as operações de usinagem, a operação de mandrilamento é utilizada para obtenção de superfícies de revolução e acabamento de furos de alta precisão. Esta operação pressupõe uma usinagem prévia de desbaste, cujo objetivo é deixar o sobremental adequado para o acabamento, além de aproximar as características dimensionais do furo para facilitar a obtenção das tolerâncias no acabamento. Wang *et al.* (2013) e Bhattacharyya *et al.* (2006) definem o mandrilamento como uma usinagem de precisão cujo objetivo é alargar o diâmetro dos furos para se alcançar estreitas tolerâncias finais exigidas pelo produto, tais como: diâmetro, desvio de circularidade e cilindricidade, rugosidade e posição. Assim, tratando-se de processos de produção em série, para se obter as características finais desejadas para o furo é preciso que todas as operações precedentes ao mandrilamento tenham suas características sob controle, uma vez que a ferramenta tende a seguir a orientação do furo de desbaste. Desta forma, caso haja um desalinhamento entre o centro real do furo de desbaste e o centro teórico do furo, programado a partir das coordenadas do desenho da peça, haverá um desbalanceamento das forças de corte devido a maior remoção de material do lado do furo em relação ao lado oposto. Este desbalanceamento das forças de corte gera deflexão da ferramenta e conseqüentemente dificuldades na obtenção das características do furo acabado. Segundo Bhattacharyya *et al.* (2006), o desalinhamento da posição dos furos gera variação na profundidade de corte em cada aresta de corte da ferramenta em cada rotação. Segundo Jun *et al.* (2006), este desalinhamento causa também deflexão e alteração do batimento da ferramenta, o que contribui para aumento do desbalanceamento da força de corte.

O desalinhamento entre os centros acontece, principalmente, devido às diferenças nos pontos de referência de usinagem e fixação da peça entre as operações de desbaste e acabamento. Em muitos casos o projeto do processo exige a separação destas usinagens devido ao primeiro referenciamento da peça ser feito a partir da superfície bruta da peça, onde

as tolerâncias e variações entre uma peça e outra são maiores. Assim, há uma grande dificuldade em usinar as características do furo acabado partindo diretamente da fixação da peça bruta. Por esse motivo, a operação de desbaste é considerada intermediária e possui dois objetivos: o primeiro é aproximar as tolerâncias da peça bruta em relação à peça acabada e o segundo é gerar novos pontos de referência, os quais são usinados com tolerâncias mais estreitas. Assim, partindo destas novas referências usinadas no desbaste, a peça passa a ser apoiada e fixada para usinagem da operação de acabamento.

A quantidade de sobremetal deixada para operação de acabamento também influencia a obtenção das características finais do furo. Desta forma, para o correto dimensionamento do sobremetal deve-se levar em consideração a capacidade qualitativa da máquina, a tolerância de posição e o projeto da ferramenta. Assim, baixos valores de sobremetal podem dificultar o corte, ampliando a região inicial do corte onde normalmente acontece um “amassamento” do material da parede furo, o que resultaria em erros de forma e rugosidades acima do especificado. Por outro lado, maiores valores de sobremetal geram maior resistência ao corte e por consequência, maior potência de corte, desgaste da ferramenta e maior custo para o processo, uma vez que o valor financeiro recuperado com a venda do cavaco é muito inferior ao valor do acréscimo do material na peça. Segundo Chiffre *et al.* (2009), pouco sobremetal também pode causar desgaste prematuro da ferramenta devido ao maior atrito na interface cavaco-ferramenta. Por isso, Wang *et al.* (2013) afirmam que a quantidade adequada de sobremetal, bem como a regularidade na sua remoção garantem maior vida útil da ferramenta.

Outra grande influência na qualidade do furo acabado no processo de usinagem por mandrilamento é o batimento da ferramenta, o qual pode ser medido com equipamento específico ou dentro da própria máquina, após a fixação da ferramenta no eixo árvore da máquina. Em ambos os casos, o batimento é considerado como sendo a variação radial da medida entre um ponto de referência no diâmetro da ferramenta, considerado como zero, e a maior medida encontrada em um giro completo, ou seja, 360° da ferramenta. Segundo Jun *et al.* (2006), existem duas forças que influenciam na deflexão das ferramentas, a saber, a força gerada a partir do erro de batimento e a força gerada do desalinhamento entre o centro do furo de desbaste e o centro da ferramenta de acabamento (barra de mandrilar). Assim, o erro de forma gerado no acabamento do furo é influenciado pelo batimento da ferramenta que por sua vez é potencializado pela rotação da ferramenta e quanto maior a rotação maior será a amplitude da vibração da ponta da ferramenta e maior será o erro de forma transferido para o furo acabado. As figuras 1 e 2 mostram, esquematicamente, a relação entre o desalinhamento

dos centros do furo e da ferramenta e a variação da profundidade de corte, as quais causam alteração na quantidade de material removido por aresta cortante e conseqüentemente gera forças de corte diferentes em cada rotação da ferramenta. Jun *et al.* (2006) estudaram os efeitos do batimento da ferramenta e da força de corte na qualidade dos furos usinados utilizando barra de mandril com quatro arestas cortantes. A figura 3 mostra os valores de deslocamento e forças atuantes na ferramenta antes, durante e depois do corte. Percebe-se que o deslocamento da ferramenta diminui durante o corte devido à própria restrição do corte imposto pelo furo, porém não chega zero, o que provoca variação na força corte devido à variação momentânea da profundidade de corte em cada inserto/aresta cortante. Como dito anteriormente, esta variação na profundidade de corte é a responsável pela usinagem irregular do furo, ou seja, o deslocamento da ferramenta é transferido para o furo de acordo com a frequência da vibração, gerando erros qualitativos no furo acabado tais como, desvio de circularidade, variações indesejadas no diâmetro e na rugosidade. Os experimentos foram realizados introduzindo-se um desalinhamento máximo de 0,1 mm e um batimento cujo deslocamento máximo da ferramenta, medido antes do corte e durante o corte foi de 0,2 e 0,1 mm, respectivamente, o que provocou variações de 0,08 mm no diâmetro em relação ao valor nominal e 0,1 mm de amplitude no desvio de circularidade.

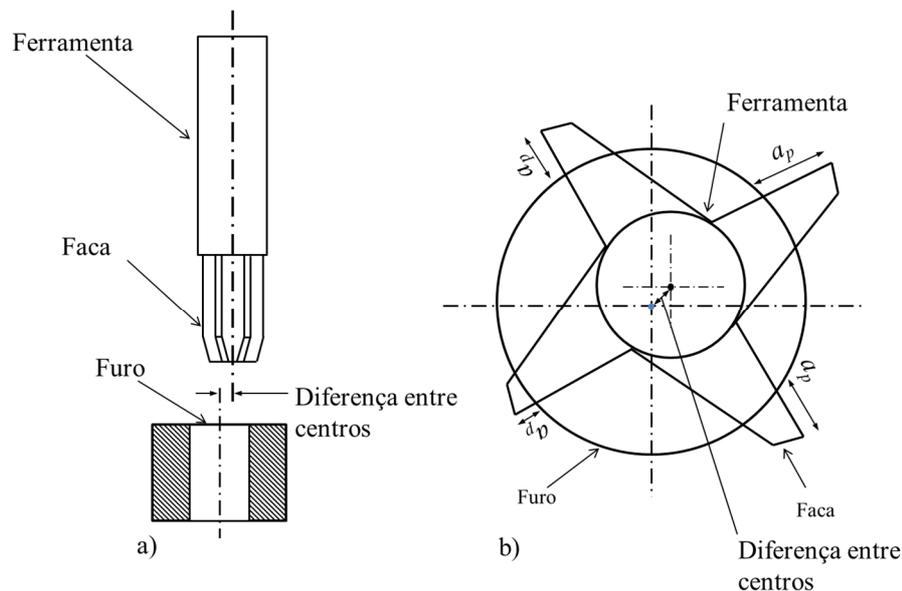


FIGURA 1 - Representação esquemática do desalinhamento entre o centro do furo e o centro da ferramenta, a) vista de lado b) Vista de topo evidenciando a diferença da profundidade de corte em cada faca devido ao desalinhamento

FONTE: Adaptação de a) BHATTACHARYYA *et al.*, 2006 p.840, e b) JUN *et al.*, 2006, p.1283.

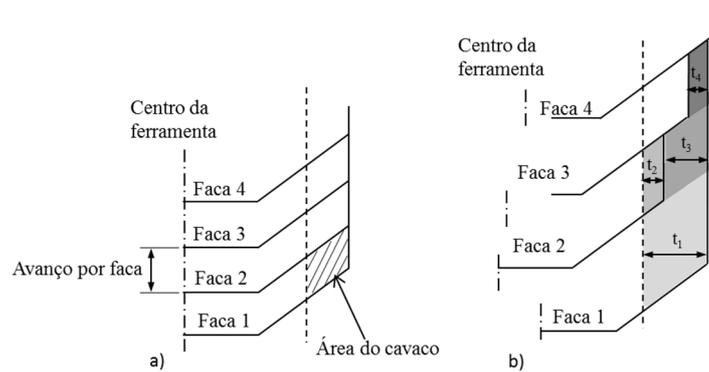


FIGURA 2 - Representação esquemática da área dos cavacos removidos a) sem desalinhamento e b) com desalinhamento, evidenciando as diferentes espessuras (t) do cavaco em cada faca

FONTE: JUN *et al.*, 2006, p.1284

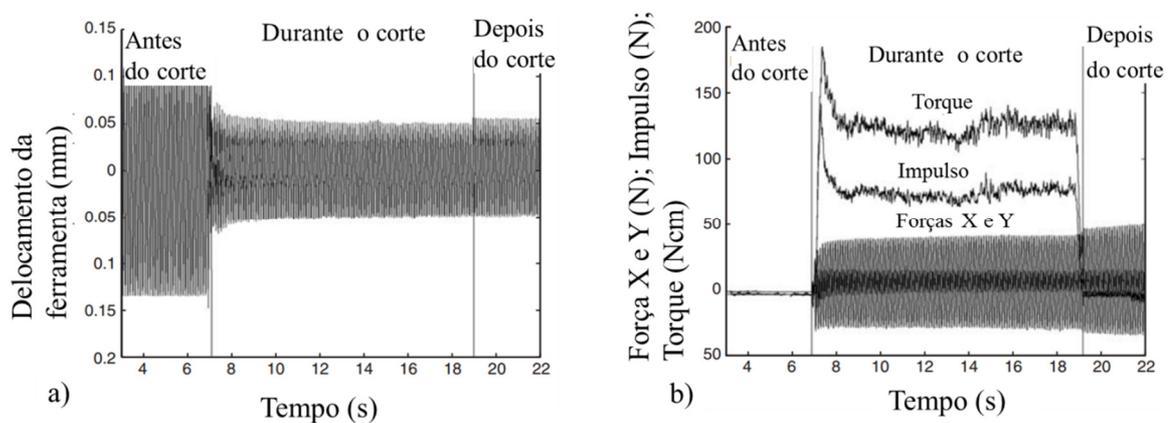


FIGURA 3 – a) deslocamento e b) Forças atuantes antes, durante e depois do corte na operação de mandrilamento de furo.

FONTE: JUN *et al.*, 2006, p.1282

No caso de acabamento de furos em peças de liga de alumínio, a operação de mandrilamento é imprescindível para a obtenção das tolerâncias, geralmente com ajuste H7. Bezerra *et al.* (2001) analisaram a influência dos parâmetros de corte nas características qualitativas de furos com 12 mm de diâmetro, utilizando um alargador de 11,997 mm de diâmetro médio e 140 mm de comprimento. A figura 4 mostra os resultados obtidos para o diâmetro e desvio de circularidade em função do número de facas, avanço e velocidade e corte. Segundo os autores, menores variações do diâmetro e do desvio de circularidade ocorreram em baixas velocidades de corte, porém, em relação à velocidade de corte, os resultados contradizem a literatura, uma vez que a baixas velocidades de corte há maior probabilidade de formação de aresta postiça de corte, o que conduziria a maiores variações no diâmetro, o que não aconteceria à altas velocidades de corte, pois, a aresta postiça de corte

tenderia a desaparecer, reduzindo-se, assim, as variações do diâmetro. Os autores argumentam que este comportamento seria esperado para ligas de alumínio hipereutetóidicas, porém, em caso de ligas hipoeutetóidicas a formação da aresta postiça de corte não é esperada em função da ausência da segunda fase neste tipo de liga, resultado comprovado pela negligenciável existência de aresta postiça de corte nos testes realizados. Assim, quanto maior a velocidade de corte e avanço, maiores tenderiam a ser as variações no diâmetro, devido ao aumento da vibração, o que poderia ser comprovado pela variação da qualidade da superfície dos furos com o aumento da velocidade de corte, como mostra a figura 4.

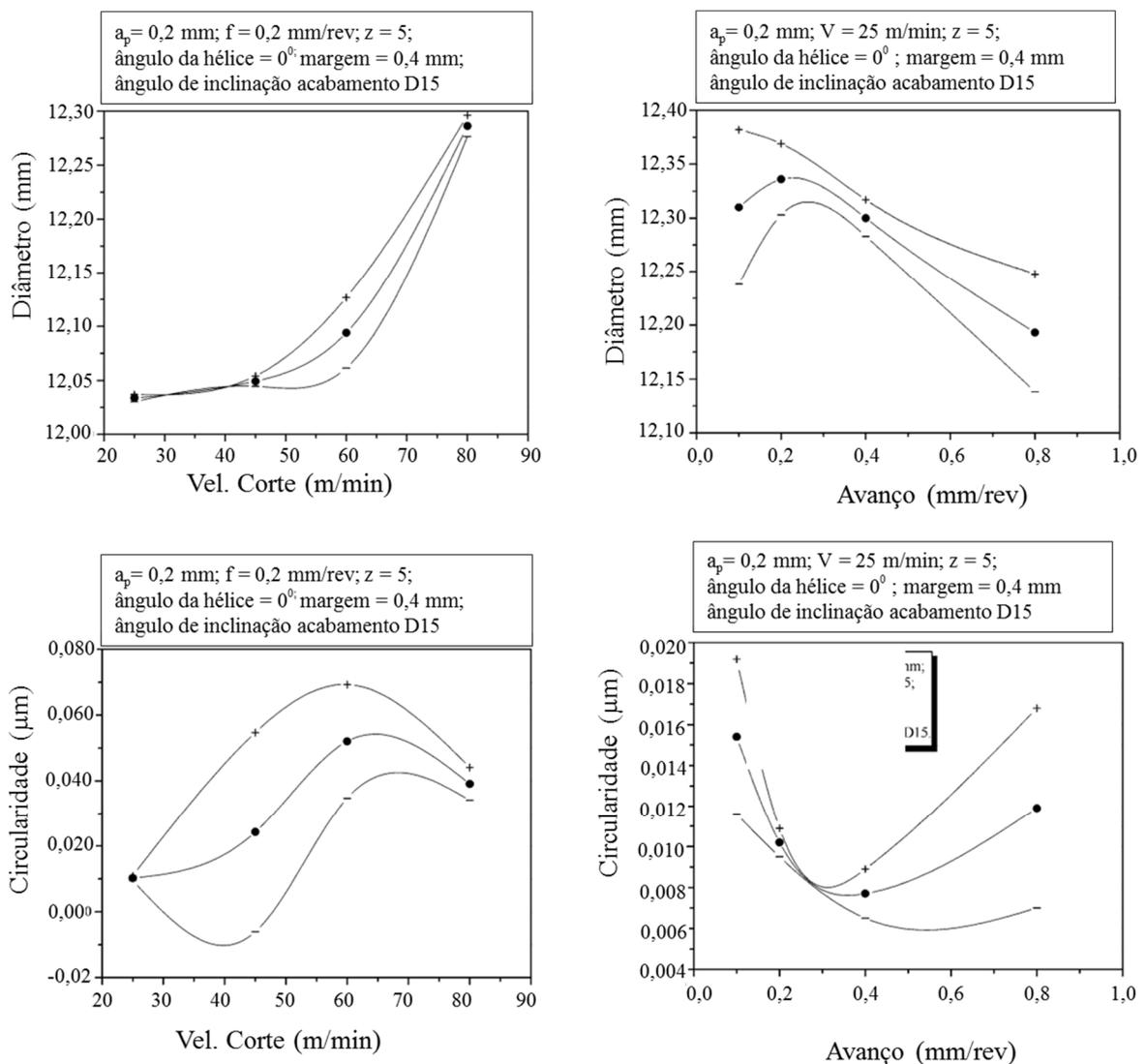


FIGURA 4 - Variação do diâmetro e circularidade em função da velocidade de corte e avanço

FONTE: BEZERRA *et al.* 2001, p.189

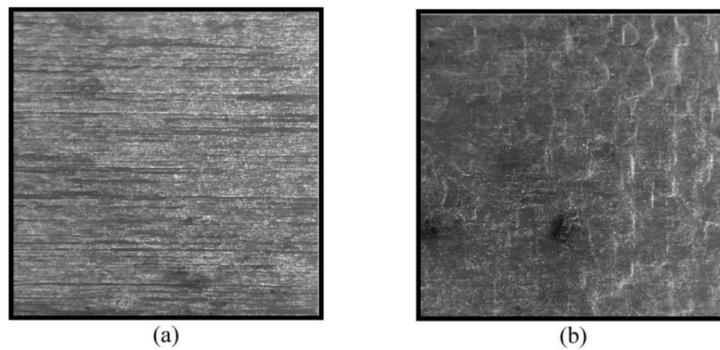


FIGURA 5 - Variação do acabamento superficial para diferentes velocidades de corte, evidenciando aumento da vibração, (x7 ampliação), a) 25 m/min e b) 80 m/min

FONTE: BEZERRA *et al.*, 2014, p.189

Em relação ao avanço, os autores evidenciaram um considerável aumento da exatidão do diâmetro do furo, ou seja, aproximação do valor encontrado em relação ao nominal, com o aumento do avanço. Isso porque utilizando-se baixos avanços, há aumento do tempo de contato entre a ferramenta e a peça, o que provoca sobreposição de corte e consequente aumento do diâmetro. Para o desvio de circularidade, percebe-se um ponto ótimo, cujo avanço corresponde a 0,4 mm/rev. Este resultado apresenta também o menor desvio para o diâmetro em relação ao valor base.

Segundo Machado (2015), durante o corte, mais de 90% de todo o trabalho mecânico gasto para formar o cavaco é convertido em calor, sendo este, por sua vez, distribuído entre os elementos participantes do corte: peça, cavaco, ferramenta e fluido de corte. O calor é gerado devido às três zonas do corte, cisalhamento primário, secundários e interface entre a ferramenta e a peça, conforme mostra a figura 6.

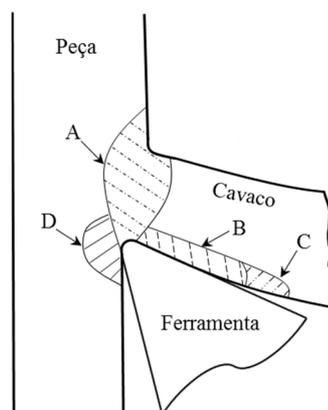


FIGURA 6 - Zonas de geração de calor na região do corte: A (cisalhamento primário); B e C (cisalhamento secundário) e D (interface ferramenta/peça)

FONTE: O AUTOR

Segundo Hui (2007), os efeitos térmicos contribuem com mais de 50% do erro total da peça usinada e 17% do calor gerado na zona primária é absorvido pela peça. O calor absorvido pela peça causa aumento de temperatura e conseqüentemente erros geométricos.

2.2 Ligas de alumínio

O alumínio, apesar de ser o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre é o metal mais jovem utilizado em escala industrial. Há sete milênios, ceramistas da Pérsia já produziam seus vasos com um tipo de barro que continha óxido de liga de alumínio, que hoje é conhecido como alumina. Trinta séculos mais tarde, egípcios e babilônios usaram outra substância contendo liga de alumínio na fabricação de cosméticos e produtos medicinais. Sua cronologia mostra que, mesmo nas civilizações mais antigas, o metal dava um tom de modernidade e sofisticação aos mais diferentes artefatos. Não obstante, durante suas primeiras aplicações, nada se sabia sobre o metal na forma como se conhece hoje, já que o liga de alumínio somente começou a ser produzido comercialmente há cerca de 150 anos (ABAL, 2004).

As ligas estão entre os materiais mais utilizados atualmente na indústria mecânica, automobilística, naval e aeronáutica devido à excelente combinação entre densidade, resistência à corrosão e propriedades mecânicas. A resistência à corrosão ocorre devido à reação entre os átomos da superfície do material e o oxigênio criando uma camada protetora de óxido de liga de alumínio. Além disso, o liga de alumínio possui cerca de 1/3 da densidade do aço e boa conformabilidade, que conferem ampla aplicação nas diversas operações de usinagem (LAURO *et al.* 2013). Um dos atrativos da utilização das ligas de alumínio como material de construção mecânica é a sua capacidade se combinar com a maioria dos metais de engenharia, chamados de elementos de liga. Através destas associações é possível obter características tecnológicas ajustadas à aplicação do produto final. Isto porque muitas ligas de alumínio são tratáveis termicamente, razão pela qual se obtém inúmeras variações das propriedades mecânicas e conseqüentemente ampla aplicação. Como resultado destas variações obtém-se muitas combinações de resistência mecânica, resistência à corrosão e ao ataque de substâncias químicas, condutibilidade elétrica, usinabilidade, ductilidade, conformabilidade, entre outros benefícios (ABAL, 2004). Por isso, o alumínio (e suas ligas) é o segundo metal mais utilizado, superado apenas pelo aço.

Segundo Olakanmi *et al.* (2015), as ligas de alumínio são categorizadas em ligas fundidas, tratáveis e não tratáveis termicamente, dependendo do elemento de liga associado ao alumínio. Os quadros 1 e 2 mostram, respectivamente, os elementos de liga de cada série e a nomenclatura para os tipos de tratamento térmico disponíveis para indústria. As ligas tratadas termicamente à base de cobre e magnésio (Al-Cu ou Al-Cu-Mg) são denominadas pela serie 2000; já as ligas à base de magnésio e silício (Al-Mg-Si) são da serie 6000 e a serie 7000 contempla as ligas à base de zinco e magnésio (Al-Zn-Mg), as quais são obtidas pelas alterações nas propriedades mecânicas advindas dos diversos tratamentos térmicos. As séries 1000, 3000, 4000 e 5000 são não tratáveis termicamente, porém as três primeiras contém somente silício e a serie 5000 é obtida por processos de deformação mecânica (OLAKANMI *et al.* 2015).

QUADRO 1 - Composição química das diferentes ligas de alumínio

Série	Elemento de Liga	Outros elementos de liga
1xxx	Liga de alumínio puro	-
2xxx	Cu	Mg, Li
3xxx	Mn	Mg
4xxx	Si	-
5xxx	Mg	-
6xxx	Mg, Si	-
7xxx	Zn	Cu, Mg, Cr, Zr
8xxx	Li, Sn, Fe, Cu e Mn	
9xxx	Reservado para uso futuro	

FONTE: Nascimento, 2007, p.5

QUADRO 2 - Especificação dos tratamentos térmicos

Tipo	Especificação do 1º dígito
T1	Solubilização parcial e envelhecimento natural
T2	Recozimento
T3	Solubilização total e deformação a frio
T4	Solubilização total e envelhecimento natural
T5	Apenas envelhecimento artificial
T6	Solubilização total e envelhecimento artificial
T7	Solubilização e estabilização
T8	Solubilização, deformação a frio e envelhecimento artificial
T9	Solubilização, envelhecimento artificial e deformação a frio

FONTE: Nascimento, 2007, p.5

As ligas de alumínio para fundição abrangem várias aplicações na indústria. O sistema de ligas liga de alumínio-silício é um dos mais importantes para a indústria de fundição, principalmente devido à alta fluidez conferida pela presença do eutético Al-Si. Segundo Yan *et al.* (2013), a liga de AlSi₂ é uma das mais importantes representantes das ligas de fundição da série AlSi, sendo empregada na fabricação de bloco de motores, cabeçote, pistões, etc. Ainda segundo estes autores, o silício atua como um importante reforço pela formação de lamelas distribuídas na matriz dúctil de α -liga de alumínio. Desta forma, as propriedades físicas e mecânicas da liga AlSi são influenciadas pela morfologia, fração volumétrica e propriedades mecânicas e físicas específicas do eutético silício. Segundo Coelho *et al.* (1995), outros elementos adicionados ao sistema AlSi produzem importantes ligas fundidas tais como: Al-Si-Cu, Al-Si-Mg, Al-Si-Cu-Mg e Al-Si-Cu-Fe. A adição de cobre contribui para a resistência, e o silício melhora a moldabilidade e também aumenta a resistência à abrasão do produto final.

As ligas com elevados teores de silício são normalmente utilizadas na fundição de produtos mais complexos em matrizes permanentes. As ligas Al-Si-Cu/Mg com mais de 3-4% de cobre ou magnésio são tratáveis termicamente. Segundo Asghar, Requena e Kubel (2010), a adição de cobre e magnésio nas ligas de AlSi melhora a resistência mecânica destas ligas à temperatura ambiente devido à formação de precipitados de Mg₂Si e Al₂Cu, porém, este efeito de endurecimento por precipitação reduz quando estas ligas são expostas a temperaturas acima de 150 °C. Já as ligas com altos teores de silício (> 12% Si) apresentam

menor dilatação térmica, o que confere uma vantagem em caso de operações em alta temperatura. Quando o teor de silício excede cerca de 12-13%, a estrutura cristalina apresenta cristais de silício primário dispersos na estrutura eutética. Quando estes cristais se apresentam uniformemente distribuídos o produto tende a possuir excelente resistência ao desgaste (COELHO *et al.*, 1995).

No diagrama de fases o ponto eutetóide (ponto onde a temperatura de fusão é a menor), corresponde ao percentual de 12,5% de Si, em peso, como mostra a figura 7. Assim, ligas hipoeutéticas, ou seja, aquelas que possuem teores de Si abaixo de 12,5 %, normalmente entre 7 e 10% Si, apresentam alta ductilidade e baixa resistência mecânica. Neste caso, adições de magnésio são necessárias para compensar os baixos teores de silício, o que contribui para o endurecimento da liga (ASM HANDBOOK, CASTING, 1992).

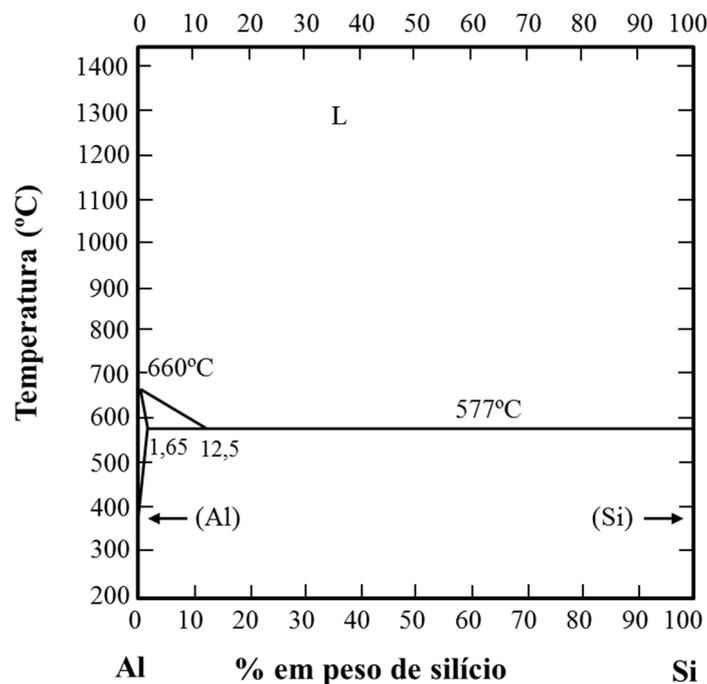


FIGURA 7 - Diagrama de fases AlSi evidenciando o ponto eutetóide, Si = 12,5%

FONTE: ASM HANDBOOK Casting, 1992, p.623

Segundo Couto³ *et al.* (2010, *apud* Parreira, 2014), as ligas do sistema AlSi, em geral, possuem, além da alta fluidez, baixa contração nos fundidos, elevada resistência à corrosão,

³ COUTO, A. A.; MARRECO, D. M.; CABRAL Neto, A.; VATAVUK J.; NAVA M. A. Caracterização de Ligas Al-Si Eutética e Hipereutética Fundidas por Centrifugação para Aplicações Automotivas. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência Dos Materiais, 19. 2010, Campos do Jordão. Anais. Campos do Jordão, 2010.

boa soldabilidade, fácil brasagem e baixo coeficiente de expansão térmica. Segundo Requena *et al.* (2009), o silício eutético melhora substancialmente as propriedades do liga de alumínio, devido a transferência de carga da matriz dúctil de liga de alumínio para as partículas duras de silício.

A usinabilidade das ligas do sistema AlSi depende da composição química final da liga, uma vez que a adição de elementos tais como: cobre e magnésio alteram as propriedades e conseqüentemente a usinabilidade. Segundo Kishawy *et al.* (2005), o percentual de silício na liga também influencia na usinabilidade da liga uma vez que as partículas de silício apresentam maior dureza que qualquer outra fase da microestrutura da liga. Desta forma, a abrasão torna-se o principal mecanismo de desgaste da ferramenta, uma vez que a temperatura alcançada na zona de corte não ultrapassa o ponto de fusão da liga (em média de 650 °C) e mesmo próximo desta temperatura as ferramentas de corte não sofreriam influencia do desgaste termicamente ativado. A figura 8 mostra a microestrutura típica de uma liga AlSi, evidenciando as partículas globulares de silício dispersas na matriz de liga de alumínio.

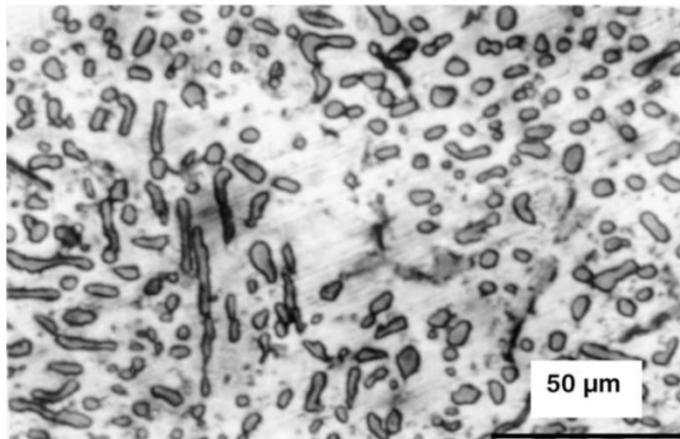


FIGURA 8 - Microestrutura típica de AlSi (12% Si evidenciando as partículas de silício globulares incorporadas na matriz e liga de alumínio.

FONTE: Roy *et al.*, 2009, p. 537

Nikman, Zedan e Songmene (2014) afirmam que a usinagem das ligas de alumínio, embora sejam classificadas como de fácil usinagem no que tange ao desgaste de ferramentas e potência de corte, torna-se mais complicada em função do desgaste da ferramenta provocado pelas partículas duras de silício. Bezerra *et al.* (2001) também comentam que a maior resistência à abrasão conferida pelo Si contribui para o aumento do desgaste de ferramenta e conseqüentemente do custo do processo de usinagem. Segundo Yan *et al.* (2013), as ligas de AlSi são mais susceptíveis à formação de aresta postiça de corte tanto na superfície de saída

quando no flanco das ferramentas, principalmente com materiais que possuem afinidade química com o liga de alumínio. A formação da aresta postiça de corte conduz a maiores forças de corte e degradação do acabamento da peça. Desta forma, os mesmos autores comentam que o melhor desempenho da ferramenta na usinagem do alumínio seria obtido com materiais que combinassem as melhores características de maior resistência ao desgaste e menor degradação por afinidade química. Por estes motivos o PCD (diamante policristalino) tem sido reconhecido como material de alto desempenho na usinagem das ligas de alumínio devido à possibilidade de aumento da velocidade de corte e avanço. Também devido aos bons resultados alcançados em termos de controle dimensional e acabamento das peças, em comparação com ferramentas de metal duro e aço rápido (WANG *et al.* 2013). As propriedades do PCD dependem, em larga escala, do tamanho do grão de diamante, o qual confere maior resistência à abrasão, uma vez que a dureza das partículas de silício é inferior à do diamante, sendo este o ponto chave para justificar o alto desempenho das ferramentas de mandrilar de PCD na usinagem das ligas de alumínio (YAN *et al.* 2013).

2.3 Diamante Policristalino Sintético – PCD

O diamante é o material mais duro conhecido na natureza. Para fabricação de ferramentas de corte, o diamante pode ser encontrado na forma natural como mono cristais, chamados de MCD (*Monocrystalline Diamond*) ou sintético, PCD (*Polycrystalline*). Os diamantes naturais, além de monocristalinos são também anisotrópicos, ou seja, suas propriedades mecânicas variam com a direção. Por isso, a lapidação deve ser feita na direção de menor dureza e a montagem no porta-ferramenta deve ser feita na direção de máxima dureza. Comercialmente o diamante natural não é utilizado como ferramenta de corte devido ao alto custo de fabricação.

Os diamantes sintéticos (PCD) são policristalinos e produzidos pela sinterização de partículas de diamante com cobalto num processo de alta pressão (6000 a 7000 MPa) e alta temperatura (1400 a 2000 °C). Segundo Philbin e Gordon (2005), o cobalto ou liga de cobalto/níquel atua como catalisador na aglomeração dos grãos de diamante. O Cobalto também auxilia no crescimento das partículas, além de preencher os espaços vazios, tornando a plaqueta de PCD uma estrutura compacta, rígida e extremante resistente ao desgaste (DENG, *et al.* 2011). Assim, a camada formada é isotrópica, ou seja, as propriedades mecânicas não variam com a direção, porém, nunca se atinge a dureza do diamante natural na

direção de máxima dureza (DENG *et al.* 2011). A plaqueta de PCD é formada pelo diamante policristalino e o substrato de metal duro, como mostra a figura 9, onde pode ser vista a seção transversal da plaqueta de PCD, evidenciando a camada de diamante e o substrato de metal duro (WC-Co).

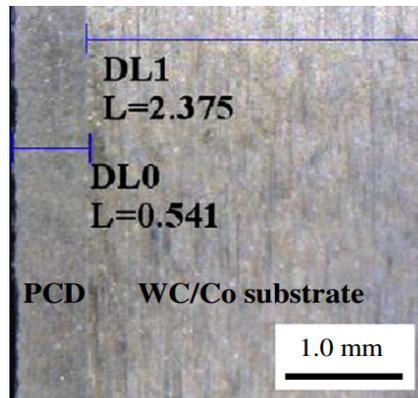


FIGURA 9 - Seção transversal da plaqueta de PCD.

FONTE: DENG *et al.* (2011)

Durante o processo de sinterização, pseudo-eutéticos de WC-Co líquidos advindos do carboneto e do tungstênio cobalto infiltram entre as partículas do pó de diamante facilitando a ligação intergranular do diamante no substrato (DENG *et al.* 2011). Isto não somente conduz a ligação intergranular, mas também resulta na difusão de carbono no substrato de metal duro. Conforme o processo de sinterização acontece, a fase de cobalto do metal duro torna-se saturada em relação ao carbono e quando o composto é resfriado o excesso de carbono na fase é rejeitado, criando distintas zonas no substrato de metal duro, ou seja, grãos de diamante imersos na matriz de WC-Co, conforme mostra a figura 10 (MIESS e RAI, 1996).

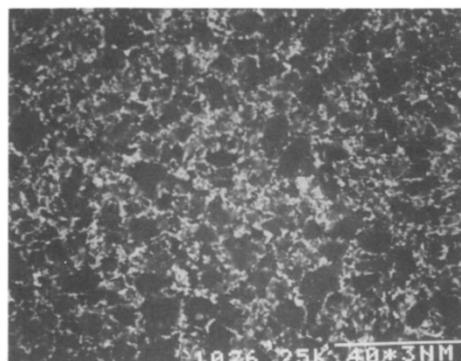


FIGURA 10 - Microestrutura do substrato de metal duro evidenciando a presença de grãos de diamante. Luz polarizada foi utilizada para diferenciar as partículas de diamante (pontos claros) do substrato de WC-Co (área escura)

FONTE: MIESS e RAI, 1996, p. 15

A quantidade e a composição química, no que tange ao teor de carbono da fase líquida são dependentes do tamanho do grão de diamante e de sua distribuição. Grãos de diamante finos possuem maior densidade de elementos metálicos que grãos maiores, o que determina a tenacidade a fratura do composto sinterizado. Segundo Petrovic *et al.* (2012), a tenacidade do PCD, normalmente considerada como moderada, é dependente do tamanho do grão de diamante. O gráfico da figura 11 mostra a relação entre a tenacidade a fratura e o tamanho do grão da camada de PCD. Há um aumento significativo da tenacidade com o aumento do tamanho do grão até aproximadamente 30 μm . Após esse valor a tenacidade mantém-se constante (MIESS e RAI, 1996).

Durante a usinagem, inevitavelmente, falhas surgem na plaqueta de PCD devido aos esforços de corte e a alta temperatura na aresta de corte da ferramenta. A temperatura induz a ocorrência de trincas devido a diferença entre o coeficiente de dilatação do diamante e do cobalto, principalmente. Há ainda a perda das propriedades mecânicas do cobalto com o aumento da temperatura, o que favorece a propagação de trinca no contorno do grão de diamante (PETROVIC *et al.* 2012). Segundo os mesmos autores, é possível relacionar o comprimento da falha c e o tamanho do grão d . Quando $c/d < 1$, ou seja, o material é composto por maiores grãos, a tenacidade é assumida como a tenacidade do próprio grão de diamante, porém, para pequenos grãos, $c/d > 1$, a tenacidade já não pode ser assumida como a do grão de diamante, mas, torna-se mista, ou seja, a tenacidade da própria rede policristalina. A fase de transição ocorre quando $c \approx d$.

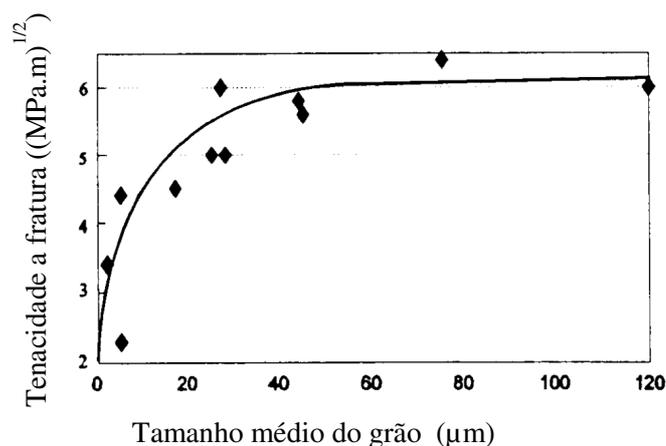


FIGURA 11 - Tenacidade a fratura da camada de PCD em função do tamanho de grão

FONTE: MIESS e RAI, 1996, p. 15

Segundo Deng *et al.* (2011), as plaquetas de PCD, fabricadas para ferramentas de corte, são compostas por partículas de granulação definida e fina para se obter o máximo de homogeneidade e densidade. Ainda assim, as propriedades do PCD são definidas pela quantidade, tamanho dos grãos, bem como da distribuição dentro da matriz. Segundo estes autores, as plaquetas de PCD com grãos entre 2 e 50 μm conferem à ferramenta alta resistência à abrasão. PCD com grãos entre 2 e 10 μm são utilizados primariamente no setor madeireiro para usinagem de compensados e MDF. Segundo Yan *et al.* (2013), plaquetas de PCD com grãos entre 10 e 50 μm seriam de uso geral, ou seja, compreendem uma grande gama de materiais não ferrosos e não metálicos, incluindo ligas de alumínio-silício e cobre eutéticas e hipereutéticas.

As propriedades mecânicas do PCD variam também com a temperatura. Segundo Petrovic (2012), o aumento da temperatura atua como catalisador na transformação da estrutura do diamante em grafite, o que seria o responsável pela redução do coeficiente de atrito. A figura 12 mostra a variação do módulo de elasticidade em função da temperatura. Percebe-se uma redução considerável com o aumento da temperatura para ambos os materiais testados: G6 é composto por grãos com tamanho de 6 μm dispersos na matriz de 23% (em peso) de Co; G30 é composto de grãos com 30 μm dispersos na matriz de 7% (em peso) de Co.

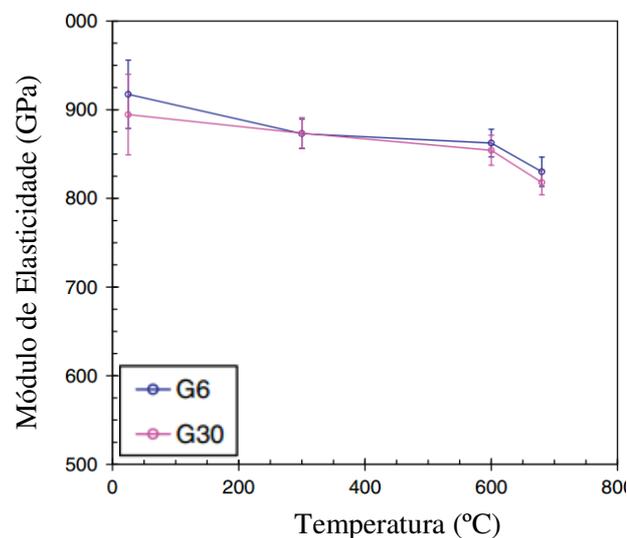


FIGURA 12 - Variação módulo de elasticidade quase-estático com a temperatura.

FONTE: PETROVIC *et al.* (2012), p 6

Segundo Heath (2001), as plaquetas de PCD são utilizadas na usinagem de materiais com baixa afinidade química com o carbono e nos casos onde o mecanismo de desgaste é predominantemente abrasivo. Por isso, o PCD é indicado na usinagem de materiais não ferrosos e não metálicos tais como: ligas de alumínio, latão, bronze, cobre, liga de estanho, borracha, vidros, plásticos abrasivos, pedras e materiais compósitos como liga de alumínio reforçado com SiC e fibra de vidro. A figura 13 mostra a variação da resistência à abrasão de acordo com o tamanho do grão na camada de PCD. Para fins comparativos, foi usado como referência um PCD com tamanho de grão de 30 μm .

Em relação às operações de usinagem, as plaquetas de PCD podem ser utilizadas nos processos de fresamento, mandrilamento, torneamento e furação convencionais, ou em altas velocidades e ainda em microusinagens ou usinagens com ferramentas de pequeno diâmetro. As ferramentas de PCD são empregadas mais comumente em operações de acabamento devido à alta estabilidade na obtenção das tolerâncias, menor remoção de material (baixo sobremetal) e conseqüentemente maior vida útil da ferramenta.

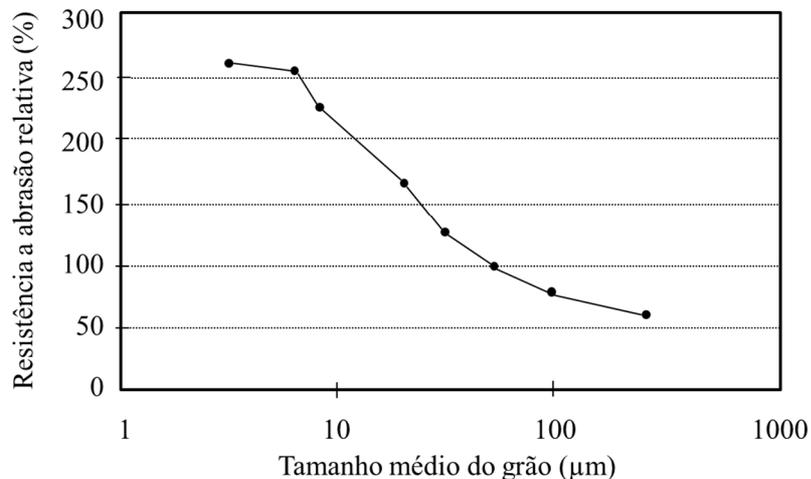


FIGURA 13 - Resistência à abrasão relativa do PCD, tendo como base de normalização uma camada de PCD com grão de 30 μm

FONTE: MEISS e RAI (1996), p 16

2.4 Atrito e Desgaste em Ferramentas de PCD

O atrito é uma força definida como a resistência encontrada por um corpo em movimento relativo, seja de deslizamento ou rolamento, sobre outro corpo, cuja condição pode ser com ou sem lubrificação (HUTCHINGS, 1992).

A Norma ISO 3685 (1993) define desgaste em ferramentas como sendo a mudança na forma original durante o corte, resultante da perda gradual de material. De acordo com Hutchings (1992), o desgaste pode ser definido como a destruição de uma ou de ambas as superfícies que compõem o sistema tribológico, geralmente envolvendo perda progressiva de material. Segundo o mesmo autor, tribologia é a ciência e tecnologia da interação superficial em movimento relativo, o que abrange o estudo do atrito, desgaste e lubrificação.

O desgaste e o atrito são dependentes das propriedades mecânicas das superfícies em contato, em geral, admite-se que superfícies mais duras sejam mais resistentes ao desgaste (Hutchings 1992). O desgaste ocorre em função da cinemática do sistema, podendo variar entre, deslizamento, rolamento, oscilação, impacto e erosão. Considerando a abrangência da usinagem do liga de alumínio, especialmente as ligas de alumínio-silício, os mecanismos de desgaste operantes são adesivo e abrasivo, principalmente.

O desgaste adesivo ocorre quando as asperezas das superfícies em contato se fundem devido à alta pressão exercida pela carga normal aplicada. Devido à pequena área de contato entre as asperezas, pequenas cargas normais provocam altíssimas pressões, favorecendo a ligação química entre as superfícies, a qual é suficientemente forte para resistir ao deslizamento. Como resultado dessa adesão, uma deformação plástica é causada na região de contato gerando uma trinca que pode se propagar levando à geração de um terceiro corpo e/ou uma transferência completa de material. No desgaste abrasivo ocorre remoção de material da superfície, sendo este função da forma das asperezas e da dureza dos dois materiais em contato.

Nas ligas de alumínio-silício, o silício dissolvido e/ou disperso na matriz de liga de alumínio da liga forma pontos de silício puro, cuja dureza é cerca de seis vezes mais que a dureza do liga de alumínio, tornando este material mais abrasivo e agressivo ao material da ferramenta. Isso gera a necessidade de ferramentas de corte com maior dureza e resistência ao desgaste, a fim de prolongar a vida útil da ferramenta e garantir a melhor relação custo-benefício para o processo através da utilização de condições de corte com altas velocidades e profundidades de corte. Neste sentido, ferramentas fabricadas em diamante sintético, PCD,

são preferencialmente utilizadas na usinagem de liga de alumínio e suas ligas, devido à alta dureza, baixo coeficiente de atrito com o alumínio e também da pouca afinidade química entre o liga de alumínio com o diamante (XIAO *et al.* 2009). Segundo Mahato (2010), quando o material da liga de AlSi é submetido a severas condições de corte, ocorre um grande fluxo plástico, que provoca a fragmentação das partículas de silício. Paralelamente, trincas são nucleadas gerando adesão e delaminação do material. Embora os constituintes fragmentados das ligas tais como: Si e CuAl, sejam menos duros que o diamante, e por consequência incapazes de causar abrasão no grão de diamante, eles causam desgaste abrasivo na matriz de metal duro do PCD. O constante impacto destas partículas duras no diamante gera forças oscilatórias normais e de cisalhamento, que provocam a fadiga da matriz e por consequência lascamentos dos grãos de diamante (XIAO *et al.* 2009).

Segundo Miess e Rai (1996), as tensões e altas temperaturas geradas no corte potencializam os efeitos químicos, que provocam a dissolução, em escala atômica, do material da ferramenta no cavaco, sendo, portanto, arrastado pelo cavaco. Ainda segundo estes autores, o desgaste abrasivo pode ocorrer pela geração de inúmeras microtrincas nos contornos de grão, ou seja, entre os grãos de PCD e a matriz de metal duro. A dissolução do material da ferramenta no cavaco ocorre devido à afinidade química do liga de alumínio com o cobalto. Segundo Calatoru (2008), a transformação de cobalto de ϵ -estrutura em α -estrutura ocorre a temperaturas tão baixas quanto 300°C para uma concentração de liga de alumínio de menos de 3% em cobalto. Para o cobalto puro, a temperatura dessa transformação de fase é 422 °C. O produto formado, chamado de cobalto “aluminizado” é quebradiço e apresenta tendência a precipitar, o que piora drasticamente as características do material por ele constituído (CALATORU *et al.* 2008). A figura 14 mostra a adesão de liga de alumínio na aresta de corte do PCD. A área assinalada no ponto 1 representa o liga de alumínio aderido na aresta de corte. As áreas 2 e 3 mostram o alumínio dissolvido no cobalto.

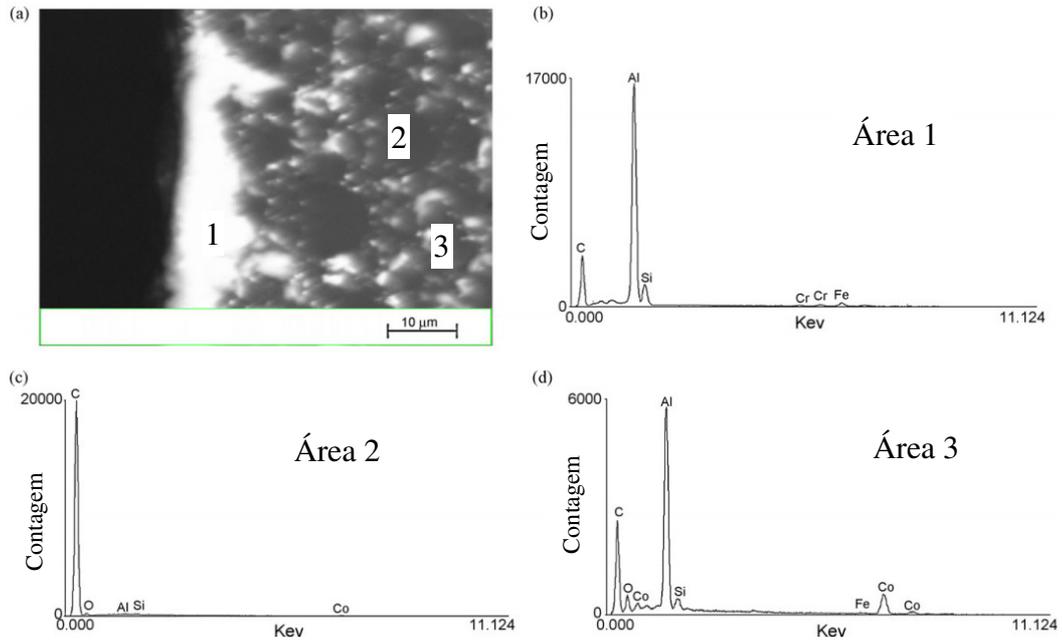


FIGURA 14 – a) Adesão de liga de alumínio na aresta de corte. b) Espectro de EDX mostrando a presença de alumínio na área sinalizada com numero 1, c) espectro EDX mostrando o elemento cobalto na área sinalizada com o numero 2, d) Espectro de EDX mostrando o alumínio (pontos brancos sinalizados pelo numero 3) dissolvidos no cobalto.

FONTE: XIAO *et al.* (2009), p 3

Outro fator importante na determinação do desgaste o inserto de PCD é a relação entre o tamanho do grão e o tipo de ligação que ocorre entre os próprios grãos de diamante e entre os grãos de diamante e a matriz de metal duro, conforme mostra a figura 15. Quanto maior for o tamanho do grão de diamante sintetizado, mais elevada será a resistência ao desgaste. Por outro lado, quanto menor for o grão, melhor será a qualidade da aresta de corte. É comum no torneamento de ultraprecisão de materiais dúcteis, que inclusões e partículas duras causem entalhes na aresta de corte da ferramenta. O acúmulo de microfraturas é observado tanto na aresta lateral quanto na frontal de folga. A fratura pode ocorrer num estágio prematuro do corte, portanto, qualquer fratura que ocorra na aresta frontal afetará a rugosidade superficial significativamente. A figura 16 mostra o desgaste abrasivo na superfície de saída, próximo à aresta de corte principal da plaqueta de PCD.

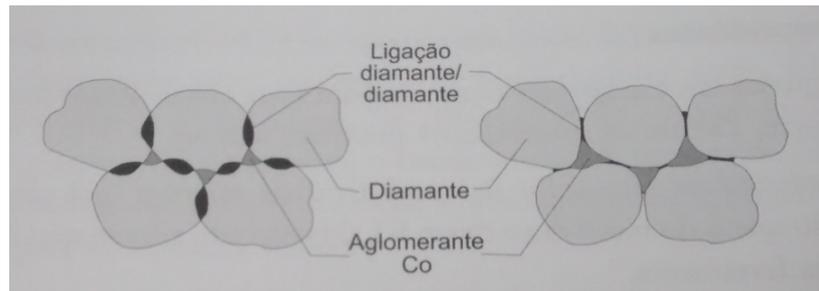


FIGURA 15 - Ligações entre os grãos de diamante/diamante com aglomerante cobalto.

FONTE: SANTOS E SALES (2007), p 3

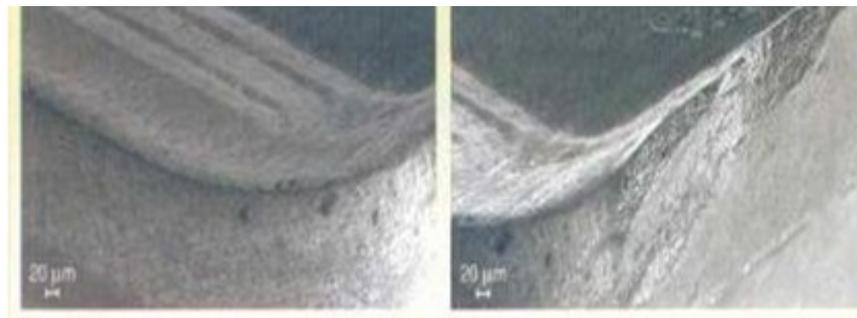


FIGURA 16 - Desgaste abrasivo na superfície da ferramenta próximo à aresta principal de corte.

FONTE: SANTOS E SALES (2007), p 3

2.5 Técnicas de lubri-refrigeração na usinagem

A indústria ainda utiliza como processo padrão a aplicação de fluidos de corte em abundancia, seja em baixa ou alta pressão, em todas as operações de usinagem. Segundo Priarone *et al.* (2014), a usinagem com fluido de corte em abundância é considerada como padrão na usinagem de metais devido à boa relação entre qualidade e produtividade obtida nos processos produtivos, mesmo considerado as desvantagens da utilização de fluido de corte. Isso porque o fluido de corte desempenha bem as funções de refrigerar, lubrificar e escoar os cavacos. Ainda segundo Priarone *et al.* (2014), a refrigeração impede que o aumento da temperatura cause redução da resistência mecânica da ferramenta, reduzindo-se assim, o efeito dos mecanismos de desgaste termo induzidos tais como adesão e difusão. Segundo Tai *et al.* (2014), a refrigeração auxilia na homogeneização da temperatura da peça, dispositivo de fixação e da máquina, evitando-se assim, dilatações no conjunto peça/dispositivo e distorções geométricas na máquina, que causam problemas de qualidade nos produtos fabricados. A lubrificação reduz o atrito na interface cavaco-ferramenta, devido à formação de uma fina

película de óleo que evita o contato direto entre a peça e a ferramenta, reduzindo-se assim, o calor gerado, o que também contribui para aumento da vida útil da ferramenta (TAI *et al.* 2014). Desta forma, dependendo da operação, do material, geometria e tolerâncias de fabricação, a escolha do fluido de corte se baseia nas funções de refrigerar e lubrificar. As emulsões, por exemplo, são indicadas para usinagem de liga de alumínio devido à grande concentração de água e conseqüentemente da maior capacidade de refrigeração. Já os fluidos com características lubrificantes são indicados para as operações de alta energia de corte, tais como a retificação, e materiais considerados como de difícil usinagem, tais como: as ligas de titânio (TAI *et al.* 2014). Desta forma, para reduzir o desgaste da ferramenta e a dilatação térmica do conjunto peça/dispositivo de fixação, bem como, o dano térmico causado à estrutura superficial da peça, o calor gerado na zona de corte precisa ser reduzido, através da lubrificação, ou retirado, através da refrigeração (DINIZ *et al.* 2003). A retirada do calor possibilita o aumento dos parâmetros de corte e conseqüentemente o aumento da produtividade. O escoamento do cavaco também auxilia na retirada do calor da área de trabalho, uma vez que o cavaco transporta a maior parte do calor gerado na zona de corte, o que permite maior estabilidade térmica no processo de usinagem. O fluido de corte também contribui para proteção contra a corrosão da máquina e da peça, além de reduzir a possibilidade de micro soldagem do cavaco na superfície de saída da ferramenta e evitar a formação de aresta postiça de corte, quando aditivos apropriados são utilizados.

Em usinagem com altas velocidades de corte, o fluido de corte não consegue penetrar na interface cavaco-ferramenta para que ele exerça o papel lubrificante. Neste caso, a refrigeração torna-se mais importante, o que justifica o uso de fluidos à base de água. A eficácia do fluido de corte na lubrificação e/ou refrigeração depende da estratégia de aplicação. Conforme mostra a figura 17, existem três possibilidades de aplicação, sendo duas delas, A e B, aplicadas a alta pressão nas interfaces cavaco-ferramenta e ferramenta-peça, respectivamente. A terceira possibilidade, C, também chamada de refrigeração geral, é aplicada em grande quantidade, porém à baixa pressão, cujas funções são: refrigerar a base da máquina e escoar o cavaco para manter a peça, o dispositivo e a máquina limpos.

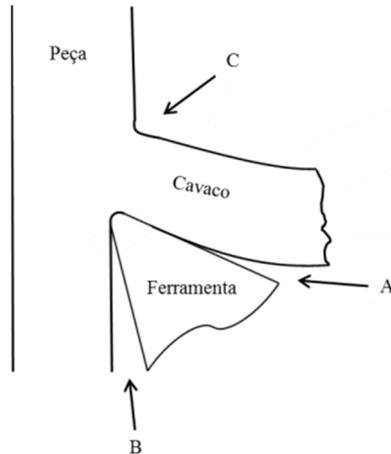


FIGURA 17 - Pontos de aplicação de fluido de corte: A) Alta pressão entre a superfície de saída da ferramenta e o cavaco; B) Alta pressão entre a superfície de folga e a peça; C) Geral à baixa pressão

FONTE: Adaptação de FERNANDES *et al.* 2010, p. 7

A figura 18 mostra um exemplo de aplicação geral. Na maioria dos processos de produção em série são utilizadas as aplicações geral e na interface cavaco-ferramenta. Esta última é aplicada com pressões entre 50 e 60 bar por meio de orifícios interno à ferramenta e devidamente projetados orientados para a superfície de saída do cavaco. Segundo Sharma⁴ *et al.* (2009 apud Sarikaya e Güllü, 2014), entre as técnicas que têm sido estudadas para substituição do fluido de corte em abundância pode-se citar: refrigeração criogénica, refrigerantes e lubrificantes sólidos, corte à seco, MQL (mínima quantidade de líquido) e uso de ar/gases comprimidos.



FIGURA 18 - Exemplo de aplicação de fluido de corte geral, à baixa pressão

FONTE: FERNANDES *et al.* 2010, p. 8

⁴ SHARMA, V.S. DOGRA, M. SURI, N.M. 2009. Cooling techniques for improved productivity in turning. *Int. J. Mach. Tools Manufact.* 49 (6), 435 e 453.

Segundo Soković e Mijanović (2001), os fluidos de corte são classificados em miscíveis e não miscíveis em água. Dentro destas classificações eles são divididos em óleos, emulsões e soluções. Embora os óleos e as emulsões sejam de origem mineral ou vegetal, os óleos são chamados de integrais, pois são puros, ou quando aditivados, usam somente aditivos EP (alta pressão) que evitam a desagregação do óleo quando submetidos a altas pressões de aplicação. Já as emulsões são compostas de óleos minerais e semissintéticos com aditivos emulsificantes, que permitem a diluição em água, mesmo sem a solubilização. Os fluidos classificados como soluções recebem este nome porque são óleos que se misturam com a água formando uma mistura homogênea (SOKOVIĆ e MIJANOVIĆ, 2001). A técnica de usinagem com Fluido recebe este nome exatamente por utilizar fluidos de corte em grande quantidade independente da operação ou da classificação do fluido.

Em comparação ao consumo de MQL (entre 10 e 100 ml/h), um centro de usinagem, operando com sistema com Fluido de refrigeração, utiliza vazão de aproximadamente 24000 l/h de emulsão (BRAGA *et al.* 2002). Assim, para garantir a circulação, resfriamento e filtragem do fluido de corte, é necessário dotar a máquina de sistemas de bombeamento, resfriamento, tanques de coleta, sistema de filtragem em duplo estágio, tubulações de alimentação e retorno do fluido, isolamento térmico dos tubos, além de outros componentes tais como: controle de nível, válvulas, etc. Todos estes agregados aumentam não só o custo inicial da máquina como também o custo de operação, uma vez que há um consumo significativo de energia elétrica, água e outros vetores energéticos para o funcionamento do sistema. Para garantir uma vazão em torno de 24000l/h, os fabricantes de máquina fornecem os equipamentos com tanques que variam entre 800 a 1200 litros de capacidade, em se tratando de máquinas destinadas à produção em série. Adicionalmente aos custos de operação do sistema com fluido de corte, tem-se os custos logísticos com o abastecimento e reposição, tanto de água, devido às perdas por evaporação, arraste pelo cavaco e geração de névoa, quanto do controle da concentração do óleo na emulsão. Além disso, para prolongar a vida útil da emulsão, outros aditivos tais como: antiespumantes e bactericidas são utilizados. Segundo Tai *et al.* (2014), os custos para manutenção e operação do sistema com fluidos de corte em sistemas *Powertrain*⁵ podem chegar a 17% do custo de fabricação da peça, o que significa uma importante parcela do custo que pode ser reduzida em caso de eliminação do fluido de corte com Fluido do processo produtivo. Segundo Arumugam *et al.* (2003) só nos

⁵ Parte da indústria automobilística destinada a fabricação e montagem dos componentes da transmissão e motores.

Estados Unidos estima-se que mais 360 mil litros de fluido de corte são utilizados e entre 700.000 e 1000.000 de trabalhadores são expostos à névoa gerada durante o corte. Ainda segundo estes autores, a névoa é formada por partículas finas de 5 μm de diâmetro e por isso permanecem suspensas no ar por um longo período de tempo, o que contribui para o surgimento de doenças respiratórias. Em 2005 foram utilizadas 38 milhões de toneladas de fluido de corte na indústria de usinagem, com aumento previsto de 1,2% na década seguinte, dos quais 85% dos fluidos utilizados seriam de base mineral (DEBNATH *et al.* 2014). Outras questões relacionadas à saúde do operador envolvem o contato do fluido com a pele e a ingestão/inalação de poluentes derivados deste.

Para minimizar o impacto ambiental causado pelo descarte do fluido de corte, as grandes empresas investem em complexos sistemas de tratamento para garantir a remoção dos resíduos tóxicos antes do descarte final do fluido no meio ambiente. Desta forma, seja através de canalizações no piso, remoção manual ou de bombeamento, o fluido de corte utilizado nas máquinas, uma vez deteriorado é enviado para a central de tratamento, o que implica também em custos adicionais, bem como em riscos de vazamento e contaminação do solo, tanto nas máquinas, quanto nos tubos ou canaletas no piso. Segundo Debnath *et al.* (2014), o custo do descarte de fluidos de corte de base mineral pode chegar a quatro vezes o custo de aquisição. Além disso, estes fluidos não são biodegradáveis e possuem elementos tóxicos na sua composição química. Desta forma, o descarte dos fluidos de corte depende da natureza do óleo, ou seja, origem mineral, animal, vegetal ou sintética. Segundo Gonçalves (2008), os óleos minerais antes de serem vendidos devem passar por um processo de limpeza para retirada de impurezas e garantir baixas concentrações de enxofre e zero teor de cloro. Também as emulsões não podem ser descartadas diretamente no esgoto, sendo necessária a operação de separação do óleo e dos produtos químicos dissolvidos na água. Segundo o mesmo autor, os processos de descarte de emulsões são divididos em químicos, físicos e físico-químicos, cuja seleção depende da composição e do custo envolvido. Outra desvantagem do fluido de corte consiste na reciclagem dos cavacos, uma vez que há necessidade de secagem antes do envio à área de reciclagem, o que implica, também, em custos com equipamentos, energia e área para manuseio (TAI *et al.* 2014).

Jayal *et al.* (2007), estudaram a formação de névoa no processo de furação de liga fundida de alumínio A390.0. Neste estudo, os autores mediram o tamanho das partículas metálicas presentes na névoa gerada no interior da área de trabalho da máquina, conforme mostra a figura 19. Segundo os autores, os picos de máxima concentração ocorreram nos

tempos de corte mais longos, ou seja, com menores avanços e maiores profundidade dos furos, o que permitiu concluir sobre a influência da taxa de remoção de material na concentração das partículas.

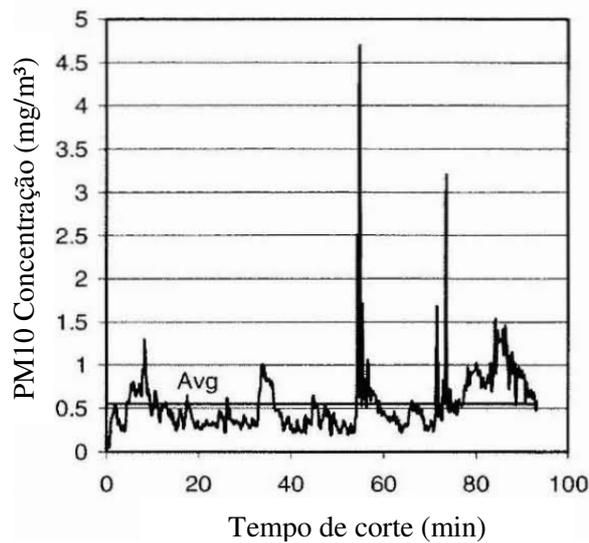


FIGURA 19 - Medição da concentração de partículas metálicas com tamanho menor que $10\mu\text{m}$ geradas na usinagem utilizando óleo sintético com concentração de 5%.

FONTE: adaptação de JAYAL *et al.*, 2007, p. 142.

Em relação à concentração de partículas, segundo Tai *et al.* (2014), estudos comparativos entre as técnicas MQL e com Fluido demonstraram maior eficiência da técnica MQL na geração de partículas metálicas, como mostra a figura 20. Neste estudo, medições foram realizadas em três pontos principais de concentração, a saber, no próprio operador, no painel de controle da máquina e no sistema de exaustão, respectivamente. Os resultados mostram menores níveis de concentração para a técnica MQL para todos os pontos analisados.

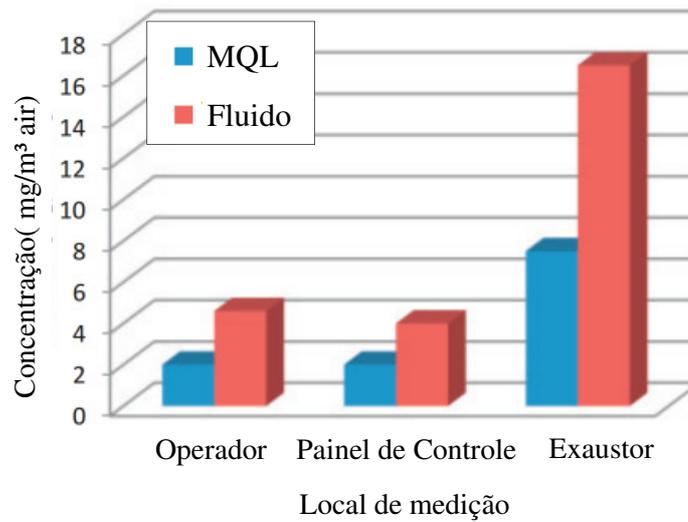


FIGURA 20 - Comparação da emissão de partículas entre as técnicas de usinagem com MQL e Fluido.

FONTE: TAI *et al.*, 2014, p. 525

Munoz e Sheng (1995) estudaram a geração de resíduos no processo de fresamento de aço 4340 empregando um modelo matemático, o qual permitiu o cálculo da quantidade de líquido perdido por arraste do cavaco. Segundo os autores, foram produzidas 1000 peças utilizando como fluido de corte uma mistura de água e óleo contendo com 25% de água e os seguintes parâmetros de corte: $V_C = 99,6$ m/min; $f_z = 0,6$ mm/rev e $a_p = 0,5$ mm, totalizando 277,8 h de usinagem. A figura 21 mostra o gráfico dos resíduos gerados. Como resultado dos cálculos os autores encontram que 408 kg de fluido de corte foram perdidos pelo arraste do cavaco e somente 3 kg foram perdidos por evaporação. Os dados servem de base para se estabelecer a dimensão do impacto ambiental da utilização de fluidos de corte com fluido no processo de usinagem. Considerando, em média, 5900 h trabalhadas em um ano, é possível calcular a perda anual de fluido de corte por arraste do cavaco em cerca de 8,7 toneladas. Por este motivo, muitos estudos têm sido feitos em duas vertentes diferentes: de um lado há o desenvolvimento de novos fluidos de corte, biodegradáveis e mais resistentes à oxidação e a contaminação bacteriana, a fim de maximizar a vida útil do fluido. De outro, as técnicas de usinagem com MQL e à seco, que visam substituir a usinagem com fluido de corte, tem sido desenvolvidas concomitantemente com o desenvolvimento de novas ferramentas e máquinas operatrizes.

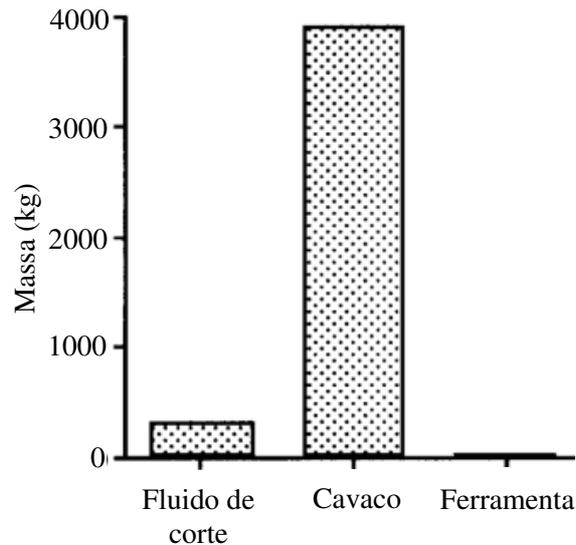


FIGURA 21 - Cálculo analítico para estimativa de geração de resíduos no processo de fresamento de liga de alumínio A390.0

FONTE: MUNOZ e SHENG, 1995, p. 752.

A técnica de usinagem utilizando MQL refere-se ao processo no qual se utiliza como fluido de corte uma mistura pulverizada de óleo e ar, que sob pressão controlada, garante baixo consumo de óleo, até 30 ml/h, no ponto de corte (KHALID *et al.* 2015). Outros autores, tais como: Dhar *et al.* (2006), definem a técnica de usinagem com MQL quando são utilizadas vazões de óleo até 500 ml/h. Segundo Jayal *et al.* (2007), vazões de óleo entre 0,5 e 200 ml/h são encontradas na literatura e utilizadas em estudos de eficiência e desempenho da técnica MQL, a qual é aplicada nas operações de furação, torneamento e fresamento, principalmente. Segundo Oikawa *et al.* (2009), a técnica de MQL utiliza vazões entre 10 e 100 ml/h. A razão para esta grande variação de consumo se deve ao fato da existência de três tipos de sistemas de MQL. No primeiro tipo, o jato é formado à baixa pressão, em torno de 0,5 bar, através da aspiração do óleo pela passagem do ar, assim como ocorre no sistema Venturi. Este sistema permite o alcance de baixas vazões, em geral, de 0,5 a 10 ml/h, porém, a principal desvantagem reside na incapacidade de controlar a vazão, devido à falta de mecanismos exatos de dosagem, uma vez que este é feito variando-se apenas a vazão de ar. No segundo tipo de jato de MQL, o óleo é bombeado e dosado através de micro pulsos do sistema de bombeamento, sem a utilização de ar, ou seja, o óleo pressurizado é injetado e pulverizado por pulsos de até 260 ciclos/minuto, a uma vazão de 0,1 a 1 ml por ciclo. Neste sistema, a principal vantagem é a alta capacidade de regulagem da vazão através da quantidade de pulsos e do diâmetro do orifício do sistema de bombeamento. Já o terceiro tipo de jato de

MQL, tanto o ar quanto o óleo são pressurizados no mesmo canal (tubulação) ou em canais separados. Segundo Mello *et al.* (2002), este tipo de sistema é uma alternativa interessante porque abrange a utilização de uma ampla gama de vazões, em geral entre, 10 e 100 ml/h, o que permite a utilização em vários processos, com várias combinações. Além disso, a mistura coaxial de fluido e ar, no bocal, auxilia na prevenção da formação de névoa.

A pressão utilizada para a pulverização da mistura, comumente encontrada na indústria e na literatura, varia de 4 a 10 bar. Braga *et al.* (2002) avaliaram o desempenho do revestimento de diamante no processo de furação de liga de alumínio-silício AlSi12. Neste trabalho, os autores utilizaram 4,5 bar de pressão com vazão de ar de 72 m³/h, o que resultou em um consumo de óleo de 10 ml/h. Segundo os autores, outros consumos foram testados, tais como 30 e 60 ml/h, porém, sem alteração no desgaste da ferramenta. Assim, é devido ao baixo consumo de óleo obtido com a técnica de MQL que advém a redução de custo do processo produtivo, bem como a redução do impacto ambiental e da significativa melhora da qualidade do ar no chão de fábrica.

Muitos estudos comparativos de desempenho entre as técnicas de usinagem com fluido de corte em abundância, MQL e a seco têm sido conduzidos no sentido de demonstrar a factibilidade da aplicação destas duas últimas, porém a técnica de MQL parece ser a mais promissora, embora, aparentemente, apresente problemas similares aos da usinagem a seco no que diz respeito aos efeitos negativos do aquecimento e desgaste de ferramentas. Porém, estudos tem demonstrado que o jato de MQL é capaz de reduzir os efeitos do aquecimento, desempenhando as funções de refrigeração e lubrificação. Segundo Silva (2012), na técnica da mínima quantidade de líquido (MQL) a função de lubrificação é assegurada pelo óleo e a de refrigeração, principalmente, pelo ar comprimido. Porém, segundo Weinert *et al.* (2004), a capacidade de refrigeração do ar é muito menor que a capacidade das emulsões devido às próprias propriedades físicas, tais como calor específico à pressão constante (c_p). Comparativamente, os valores de c_p do ar, água, e óleo são: 1,04 kJ/kgK, 4,18 kJ/kgK e 1,92 kJ/kg, respectivamente. Segundo Park *et al.* (2010), tendo em vista a menor capacidade de refrigeração do jato, em relação aos fluidos à base de água, a principal função dos óleos utilizados na formação do jato de MQL reside na lubrificação com conseqüente redução do atrito nas interfaces ferramenta-peça e cavaco-ferramenta. Além disso, segundo os mesmos autores, para alcançar boa penetração, o jato deve não somente cobrir toda a área da ferramenta como também chegar ao ponto de corte com pressão e vazão mássica adequadas. Desta forma, estudos indicam que o jato, uma vez posicionado corretamente, é capaz de

penetrar na interface cavaco-ferramenta e reduzir o atrito e a aderência de material na ferramenta, reduzindo-se, assim, a temperatura de corte. Esta seria a razão pela qual menores temperaturas são encontradas na técnica MQL em relação à usinagem à seco, como mostra a figura 22, referente à furação de aço 1045 com brocas de HC-P + TiN, diâmetro 11,8 mm e avanço de 0,2 mm/rev. A medição de temperatura foi feita utilizando-se termopares posicionados próximos às arestas principal de corte da broca.

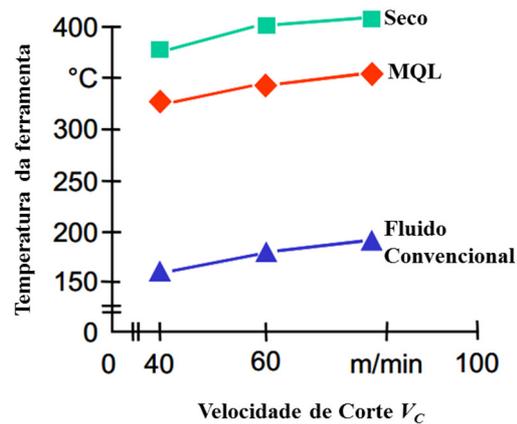


FIGURA 22 - Temperatura da ferramenta em função da velocidade de corte para as técnicas, MQL, Fluido e Seco.

FONTE: WEINERT *et al.* 2004, p.2

A fim de melhorar a capacidade de refrigeração da técnica MQL, alguns estudos têm sido conduzidos adicionando-se ar resfriado a temperaturas abaixo de 0 °C, cujo objetivo é aproximar, ao máximo, as condições de corte em termos de lubrificação e refrigeração obtidas com a técnica de usinagem com Fluido. Yuan *et al.* (2011), estudaram os efeitos da adição de ar com temperaturas de 0 °C, -15 °C, -30 °C e -45 °C no fresamento de liga de titânio Ti-6Al-4V utilizando a técnica de MQL. A figura 23 mostra os resultados para a força de corte, desgaste de ferramenta e acabamento superficial.

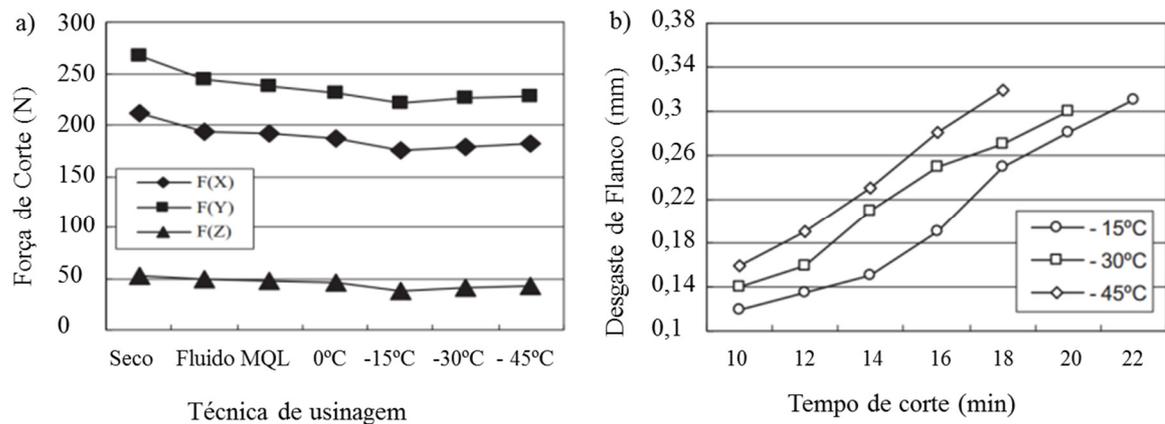


FIGURA 23 - a) Relação entre a técnica de usinagem e as forças de corte $F(X)$, $F(Y)$ e $F(Z)$, b) desgaste de flanco em função do tempo de corte utilizando MQL e ar resfriado a -15°C , -30°C e -45°C

FONTE: YUAN *et al.* 2011, p.358

Percebe-se uma redução nas forças de corte e no desgaste de flanco com a utilização de ar resfriado abaixo de 0°C , sobretudo à temperatura de -15°C .

Itoigawa *et al.* (2006), estudaram os efeitos da adição de água no jato de MQL. Nos experimentos conduzidos por estes autores, o jato final foi formado pela pulverização de ar com vazão de 70 l/h e água a vazão de 3000 ml/h, conforme mostra a figura 24. Como a adição de água modifica a composição do jato de MQL, os autores chamaram essa técnica de OoW (*Oil film on Water droplet*). Neste estudo, os testes foram realizados com o objetivo de simular o corte interrompido na usinagem de ligas de alumínio-silício a fim de verificar a variação da força específica de corte com os parâmetros de corte, utilizando ferramentas de PCD e metal duro na usinagem com as técnicas, com Fluido, à seco, MQL e OoW.

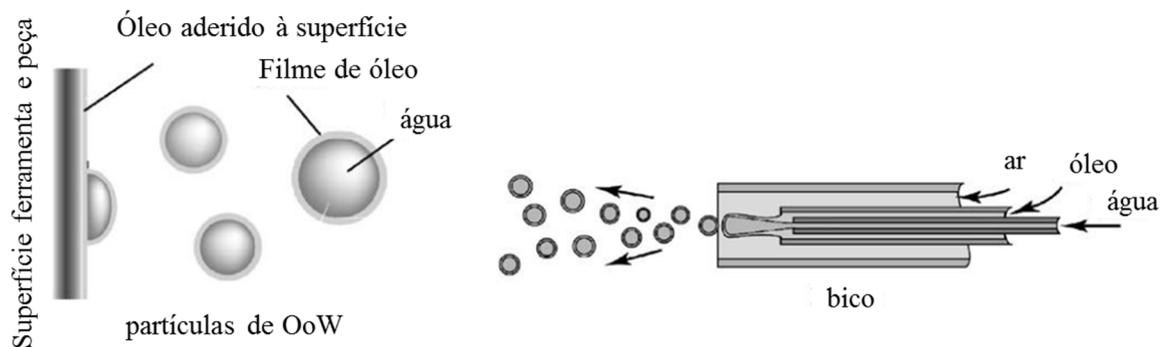


FIGURA 24 - Formação do jato de MQL composto por ar, óleo e água.

FONTE: Adaptação de ITOIGAWA *et al.*, 2006 p.340

A figura 25 mostra a comparação dos resultados entre as técnicas MQL e OoW. Os dados evidenciam maior estabilidade do corte com a técnica OoW, uma vez que há menor

variação da força específica de corte e menores valores alcançados para as duas condições de corte testadas. Isso evidencia o importante papel desempenhado pela água, sobretudo nos fluidos de corte emulsionáveis, na capacidade de refrigeração dos elementos envolvidos no corte, ou seja, ferramenta, peça e máquina / dispositivo. Outros testes realizados pelos autores mostraram um comportamento semelhante da força específica de corte entre as técnicas com Fluido e OoW, o que confirma a afirmação da influência da água na mistura base do jato de MQL.

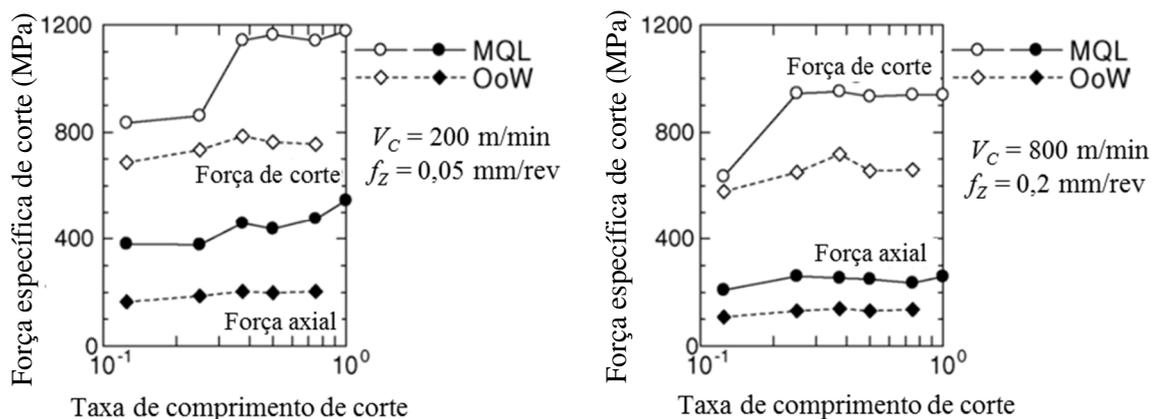


FIGURA 25 - Variação da força específica de corte com a taxa de comprimento de corte para as técnicas de usinagem MQL e OoW utilizando ferramenta de PCD com 0° de inclinação na superfície de saída.

FONTE: ITOIGAWA *et al.* 2006 p.341

Kelly e Cotterell (2002) efetuaram testes comparando o desempenho das técnicas: MQL, com Fluido, à seco e somente com ar comprimido. Nestes experimentos, o jato de MQL foi formado com ar pressurizado a 6 bar e óleo vegetal, gerando uma vazão de jato de 20 ml/h. O ar comprimido foi direcionado diretamente à zona de corte também com pressão de 6 bar. Já o teste com fluido foi feito com óleo solúvel, com concentração de 4% e vazão 5,2 l/min (312000 ml/h). A figura 26 mostra o gráfico da força de avanço obtida na furação da liga de alumínio-silício. Percebe-se um melhor desempenho da técnica MQL em relação ao ar comprimido e à seco, uma vez que as forças de usinagem influenciam na deformação plástica da aresta de corte, além de influenciar no desenvolvimento de outros mecanismos e processos de desgaste. Outras comparações de desempenho entre as técnicas com Fluido e MQL foram feitas por Braga *et al.* (2002), em relação ao desgaste de flanco e precisão dimensional dos furos. Estes autores utilizaram brocas de metal duro sem revestimento e com revestimento de diamante na furação de ligas de alumínio-silício contendo 7% de silício. Os resultados indicaram um desempenho inferior para o revestimento de diamante em relação ao metal duro

em ambas as técnicas, com Fluido e MQL, o que, segundo os autores, pode ser explicado pelo baixo avanço utilizado nos experimentos, f_z de 0,1 mm/rev.

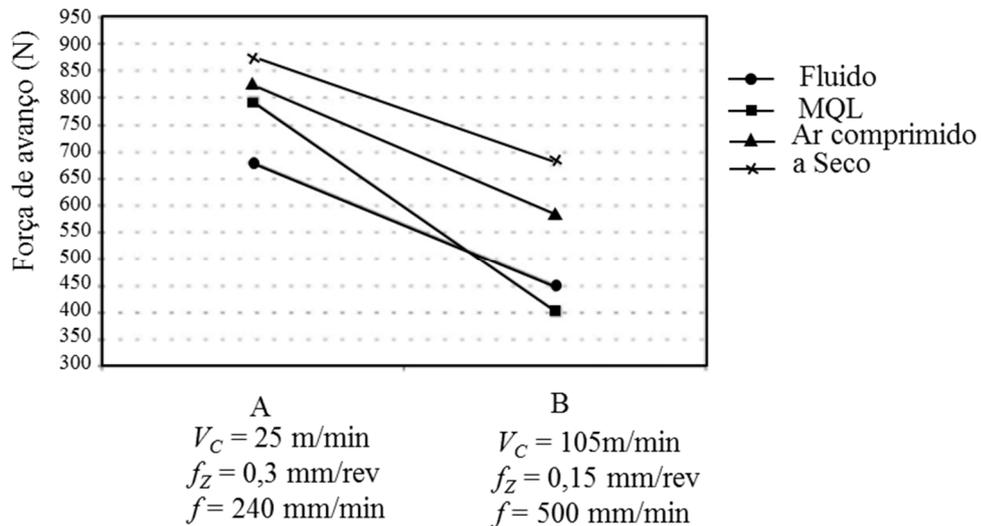


FIGURA 26 - Variação da força de avanço em função da velocidade de corte e avanço para as técnicas de usinagem: com Fluido, MQL, Ar comprimido e à seco

FONTE: KELLY e COTTERELL, 2002, p. 331

Contudo, depois de 612 furos executados, o desgaste de flanco das brocas com revestimento de diamante foi 0,05 mm maior que as brocas de metal duro. Em relação à comparação do desgaste das brocas de metal duro, os resultados foram similares entre as técnicas de usinagem com Fluido e MQL, porém, a precisão dimensional dos furos usinados com a técnica de MQL foi superior para ambos os revestimentos, em comparação com a usinagem com Fluido. As figuras 27 e 28 mostram, respectivamente, o desgaste de flanco e os valores de diâmetros encontrados nos experimentos.

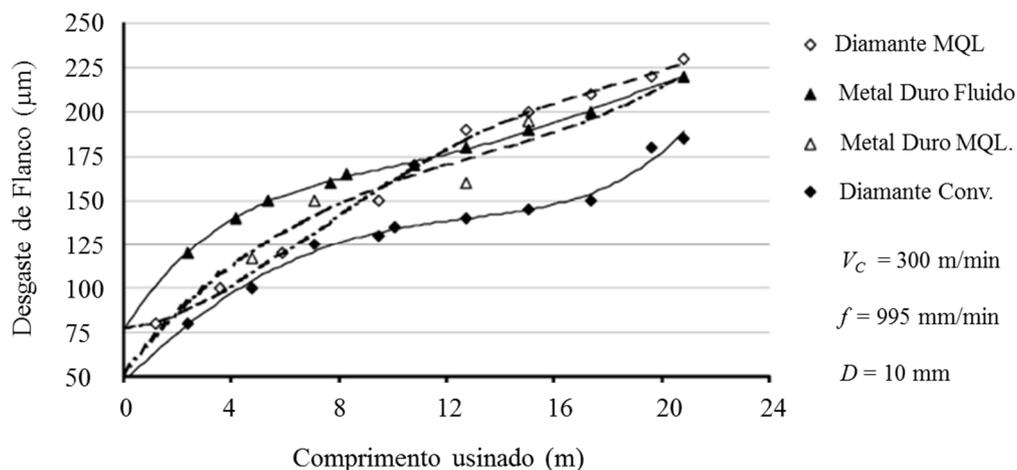


FIGURA 27 - Comparação do desgaste de flanco entre as técnicas de usinagem com Fluido e MQL.

FONTE: BRAGA *et al.* 2002, p.130

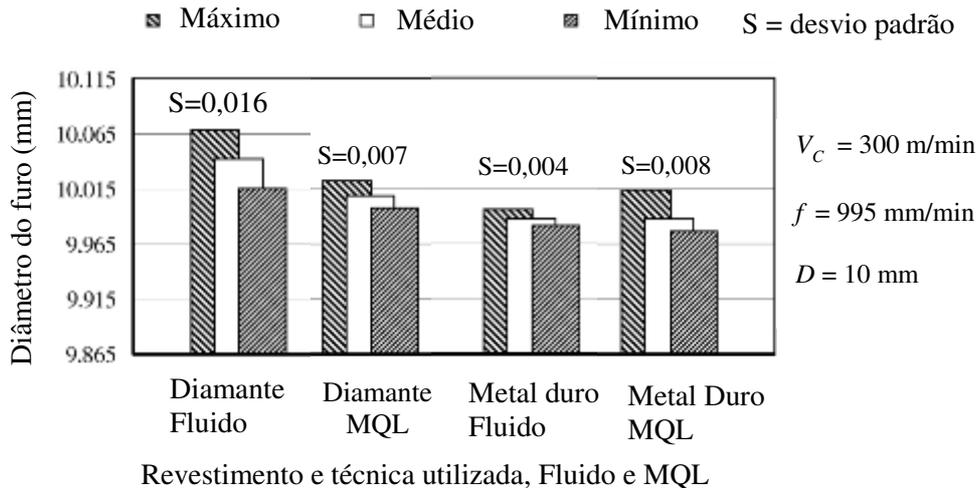


FIGURA 28 - Comparação dos resultados de diâmetro dos furos entre as técnicas de usinagem com Fluido e MQL.

FONTE: Adaptação de BRAGA *et al.*, 2002, p.133

O estudo da técnica de MQL torna-se cada vez mais complexo quando se analisa as variáveis que influenciam o desempenho do processo, dentre as quais pode-se citar, além dos parâmetros de corte, operação e material da peça: o consumo de óleo, que está relacionado com a vazão de ar admitida; a pressão de aplicação do ar; o tipo, diâmetro da partícula, composição química e características do óleo; a posição do bico na aplicação do jato (se externa ou interna à ferramenta); o direcionamento do jato, principalmente em aplicações externas. Por este motivo, Biermann e Iovkov (2015) classificaram a aplicação da técnica MQL como um desafio para o processo de usinagem, tendo vista a variação dos resultados que pode ser obtida dependendo da combinação das variáveis de influência nas diversas operações de usinagem. Adicionalmente, o desempenho da técnica MQL é influenciado pela geometria da canalização interna da máquina, o que inclui o canal interno da ferramenta, no que tange à forma e o diâmetro.

Algumas variáveis estão diretamente relacionadas entre si, como por exemplo: a aplicação interna com um ou dois canais, diâmetro das partículas, o consumo e a viscosidade do óleo. A figura 29 mostra, esquematicamente, a diferença entre o sistema de alimentação interna com um e dois canais. Quando a aplicação é feita por um canal, o jato de MQL é formado fora da máquina e percorre todo o canal até chegar à ponta da ferramenta. Em ambos os casos, ou seja, em aplicações com um ou dois canais, ferramentas especialmente desenvolvidas para MQL são requeridas, uma vez que possuem canais internos que se conectam aos canais do eixo árvore da máquina por meio do adaptador da ferramenta.

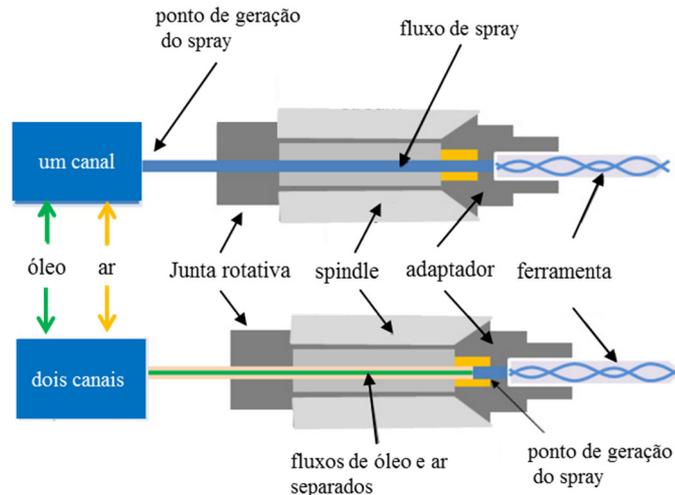


FIGURA 29 - Sistema de geração de jato de MQL com um e dois canais.

FONTE: WEINERT *et al.*, 2004, p.520

Em aplicações com dois canais, o jato de MQL é formado na entrada da ferramenta, ou seja, o ar e o óleo são direcionados em canais diferentes e se encontram dentro do eixo árvore da máquina, onde ocorre a formação do jato, sendo a mistura conduzida até a ponta da ferramenta e conseqüentemente à zona de corte. Em relação à viscosidade e o tamanho das partículas, a aplicação com um canal requer o uso de óleos especiais de baixa viscosidade, em geral em torno de $19 \text{ a } 28 \text{ mm}^2\text{s}^{-1}$. Esta baixa viscosidade é necessária para se reduzir a perda de carga e a instabilidade do *jato* na saída da ferramenta, particularmente para pequenos diâmetros do canal das ferramentas, em geral, abaixo de 2 mm (TAI *et al.* 2014). Devido às perdas por arraste e colisões no trajeto do canal, menores partículas de óleo (entre 0,5 a 2 mm de diâmetro) são obtidas, o que conduz a um menor consumo de óleo em relação à aplicação com dois canais, porém, com maior dificuldade no controle da vazão do *jato*. Adicionalmente, o sistema de aplicação com um canal possui menor quantidade de peças de desgaste, além de não necessitar de modificações no *eixo árvore* da máquina e permitir a adaptação do sistema com fluido de corte existente. Já o sistema com dois canais permite um controle preciso da vazão de óleo, porém, exige um projeto especial do *eixo árvore* da máquina, devendo este ser totalmente conectado ao sistema de bombeamento do ar e óleo, além de possuir peças de desgaste tais como bombas e válvulas de comutação, o que torna o sistema mais complexo. Assim, uma grande vantagem deste sistema consiste no menor tempo de formação do jato e, conseqüentemente, menor tempo até a ponta da ferramenta. Isso porque o ponto de formação do jato mais próximo da ferramenta e do sistema de bombeamento mantém os canais de ar e óleo pressurizados, o que permite uma rápida formação do *jato*. Por

este motivo o sistema com dois canais é recomendado quando o processo possui muitas trocas de ferramentas, devido às constantes interrupções e retomadas do fornecimento do *jato* de MQL.

No sistema com um canal, a comutação, ou seja, a interrupção e retomada do fornecimento do *jato* ocorre no sistema de pressurização, aumentando-se assim o tempo de disponibilização do *jato* na ponta da ferramenta, uma vez que a cada comutação, (necessária para a troca de ferramenta) o *jato* percorre toda a tubulação entre o sistema de pressurização e a ferramenta. Em geral, o tempo gasto pelo sistema de dois canais para entrega do *jato* na ponta da ferramenta é 0,1s, comparativamente com 1s gasto pelo sistema com um canal. Devido à separação do ar e do óleo, o sistema com dois canais sofre menor influência tanto da geometria do canal quanto da força centrífuga da junta rotativa do *eixo árvore* da máquina, uma vez que o *jato* é formado após a união rotativa, como mostra a figura 24 (WEINERT *et al.*, 2004).

A aplicação interna é utilizada em sistemas de alta produção de peças complexas, as quais exigem muitas trocas de ferramentas. Por isso, as máquinas e ferramentas utilizadas neste processo são fabricadas especialmente para MQL, o que implica em alterações significativas de projeto, tornando-o mais caro que o com Fluido em termos de investimento inicial. As máquinas operatrizes, por exemplo, os centros de usinagem, são fabricados considerando o aquecimento causado pelo corte. Desta forma, é estritamente necessário que o cavaco seja retirado, rapidamente, tanto da peça quanto da área de trabalho. Devido à alta produção o aquecimento da máquina é inevitável, uma vez que a capacidade de dissipação do calor é menor que a velocidade de propagação. Assim, os centros de usinagem são projetados com a área de trabalho protegida por chapas de aço inoxidável inclinadas para facilitar o escoamento do cavaco, bem como há um isolamento entre a área de trabalho e a base da máquina, para se evitar o aquecimento da base e conseqüentemente distorções geométricas advindas da dilatação térmica. Adicionalmente, as máquinas são equipadas com sistemas de compensação de temperatura para os eixos X, Y, Z. Devido à impregnação de óleo na área de trabalho, há também acúmulo de cavaco, principalmente das partículas mais finas, o que exige um ciclo de limpeza com maior frequência. Outra característica indispensável das máquinas é a instalação de sistema de exaustão com anti-incêndio, uma vez o óleo utilizado é inflamável, principalmente sob determinados níveis de concentração.

Em se tratando da ferramenta de corte, canais internos são construídos para conectar a tubulação do eletromandril à aresta de corte, por meio dos adaptadores, conforme mostra a figura 30.

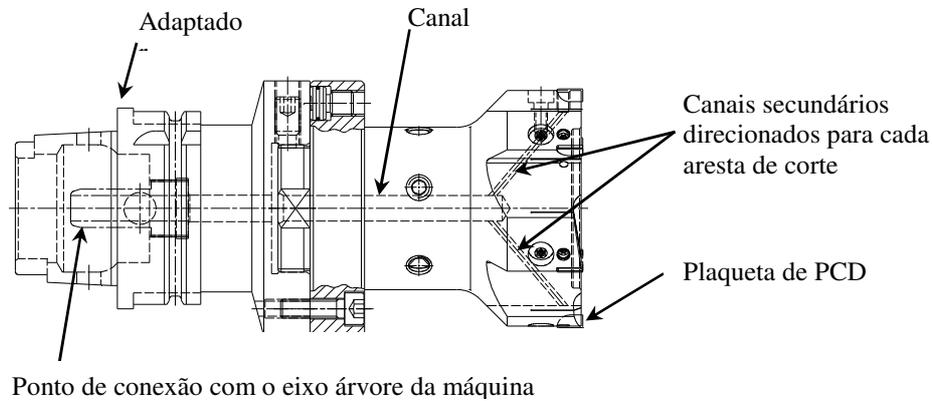


FIGURA 30 - Barra de mandril com múltiplas arestas de corte com canais para alimentação interna do jato de MQL

FONTE: O AUTOR

No entanto, a forma, o diâmetro e percurso do canal podem influenciar na eficiência da aplicação do jato de MQL. Outros fatores importantes que se relacionam com a geometria do canal são a pressão de aplicação e a viscosidade do óleo, os quais interferem no tamanho das partículas e conseqüentemente na velocidade do fluxo do jato. De acordo com Duchosal *et al.* (2013), menores partículas, em torno de $1\mu\text{m}$ de diâmetro melhoram a eficiência do jato quanto à penetração na zona de corte, as quais são produzidas em sistemas com canais internos, ao contrário de sistemas de alimentação externos, onde as partículas produzidas tem diâmetro $3\mu\text{m}$. O tamanho das partículas também está relacionado com a viscosidade. Ainda segundo Duchosal *et al.* (2013), partículas de $10\mu\text{m}$ de diâmetro são produzidas com pressão de $0,8\text{ bar}$, enquanto que partículas com $\varnothing 15\mu\text{m}$ são produzidas com pressão $0,27\text{ bar}$. O tamanho das partículas de óleo também é influenciado pela rotação do eixo árvore, a qual introduz uma turbulência que causa a divisão das partículas grandes em partículas menores. Segundo Aoyama (2002), a influencia da rotação é bastante significativa até 10000 rpm , uma vez que nestas condições a força centrífuga causa a separação das partículas de óleo do ar, reduzindo-se assim, o tamanho das partículas e conseqüentemente o volume de óleo na zone de corte. A figura 31 mostra o resultado de testes realizados para verificação da influência da rotação do eixo árvore no tamanho das partículas de óleo no jato de MQL. O teste foi realizado posicionando-se um anteparo a uma distância fixa do ponto de saída da ferramenta e medindo-se o tamanho das machas de óleos deixadas no anteparado.

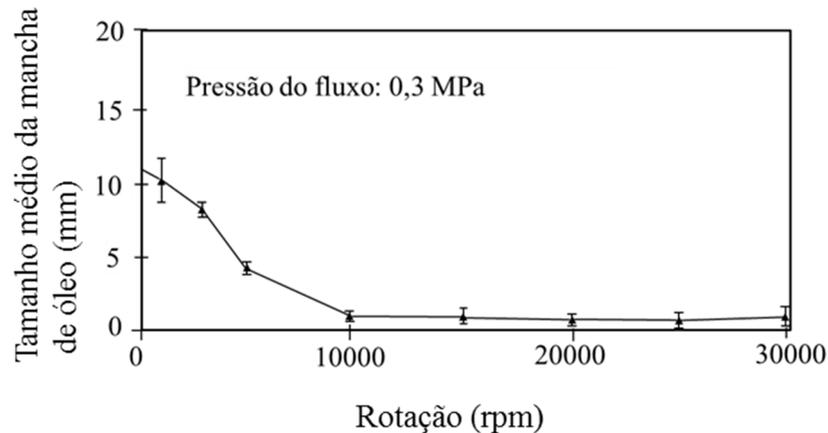


FIGURA 31 - Influência da rotação do eixo árvore no tamanho da partículas de óleo do jato de MQL

FONTE: AOYAMA (2002)

Obikawa *et al.* (2009) estudaram os efeitos da distancia entre o ponto de saída do jato e a zona de corte. Nestes estudos , simulações utilizando o software CFD (*computational fluid dynamics*) foram feitas para verificar a queda de velocidade do jato e conseqüente eficiência da usinagem. Os resultados evidenciaram uma queda brusca de velocidade do jato com aproximadamente o quadrado da distância, o que resultou em redução da velocidade de 44,2 m/s para 1,9 m/s em apenas 1 mm de distância. Assim, devido ao fluxo turbulento alcançado pelo jato e maiores distancias percorridas, maior espalhamento do jato ocorre, o que contribui para redução da pressão e velocidade do fluxo. Situação semelhante acontece com as operações de fresamento e mandrilamento quando se utiliza alimentação interna da ferramenta. Devido às limitações construtivas, os furos foram posicionados tão próximos do inserto quanto possível, porém, deve-se observar o sentido do fluxo para garantir que o jato, mesmo considerando o espalhamento e conseqüente redução da pressão e velocidade, atinja a zona de corte em condições de máximo desempenho.

Em relação à comparação entre a utilização da aplicação externa ou interna, Weinert *et al.* (2004) afirmam que a utilização do sistema de aplicação interna (com um ou dois canais) é indicada para operações de furação, rosqueamento e mandrilamento, cuja relação entre a profundidade da usinagem (L) e o diâmetro da ferramenta (d) seja superior a 3, ou seja, $\frac{L}{d} > 3$, uma vez que na aplicação externa o jato não consegue alcançar a aresta de corte, como mostra a figura 32. Outra restrição à aplicação externa está na dependência do posicionamento dos bicos e conseqüentemente do ajuste que é feito pelo operador, o qual é específico para cada ferramenta, operação e configuração de máquina. Assim, quanto maior o numero de ferramentas, maior tende a ser a diferença dimensional entre elas, tais como: diâmetro e

comprimento, maior é a dificuldade de ajuste do(s) bico(s), uma vez que a cada troca o operador deve ajustar a posição que melhor atenda a usinagem (Duchosal *et al.* 2015), Por isso, a aplicação externa é indicada para operações mais simples e com o menor número de ferramentas possível, tais como: serramento, fresamento, torneamento e furação desde que $\frac{L}{d} < 3$ (WEINERT *et al.*, 2004).

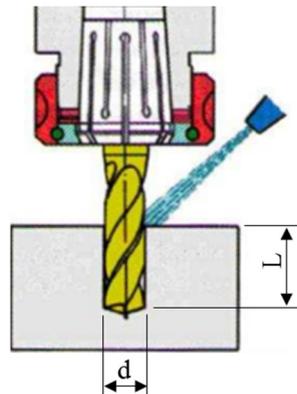


FIGURA 32 - Sistema de aplicação de jato de MQL externo

FONTE: Adaptação de Cardoso, 2014, p 52

Duchosal *et al.* (2015), utilizando simulação numérica, avaliaram os efeitos do posicionamento do bico e da pressão de aplicação do fluido sob o comprimento de contato médio da interface cavaco-ferramenta, para determinadas condições de corte (V_c e f_z) no fresamento de topo. Dentre os parâmetros definidos pelos autores foram estudados três níveis de inclinação dos bicos, 45°, 60° e 75° em relação à vertical e três níveis de pressão de aplicação, 0,3; 0,77 e 1 bar. Utilizando o método de Taguchi, os autores concluíram que os melhores parâmetros foram: 45° para inclinação e 1 bar para pressão. Considerando os menores valores para pressão de aplicação os autores também concluíram que a velocidade de corte exerceu pouca influência.

Os óleos utilizados na usinagem com MQL também são classificados por tipo, ou seja, base mineral, vegetal ou sintético. A escolha do tipo de fluido interfere no desempenho da usinagem, bem como no impacto ambiental, normalmente medido pela biodegradabilidade do óleo. Desta forma, devido à alta biodegradabilidade, os óleos vegetais e sintéticos têm sido amplamente utilizados, mesmo que, comparativamente, os óleos sintéticos sejam considerados parcialmente biodegradáveis, porém com alto índice (~90%), uma vez que dependem da combinação da estrutura molecular (WEINERT *et al.*, 2004).

A estrutura molecular é obtida a partir da combinação de álcoois e ácidos graxos, sendo os ésteres os mais utilizados entre os óleos sintéticos. Dentre as características dos ésteres pode-se citar: alta viscosidade, baixa volatilidade, maior resistência ao envelhecimento e boas propriedades de fluxo frio em comparação com óleos minerais. Isso porque os óleos sintéticos são fabricados com processo controlado, o que garante propriedades superiores em relação aos óleos minerais, os quais são obtidos através do refinamento do petróleo, porém, permanecendo sempre como uma mistura de hidrocarbonetos. Já os ésteres são obtidos pelo processo de esterificação, ou seja, através de reação química entre ácido carboxílico e álcool. Desta forma, os óleos de corte fabricados para usinagem com MQL devem possuir características superiores em termos de biodegradabilidade e estabilidade à oxidação para garantir baixa degradação durante o armazenamento. Segundo Suda *et al.* (2002), estas são características importantes dos óleos para MQL, pois, devido ao baixo consumo, o óleo normalmente permanece muito tempo armazenado no almoxarifado das empresas. Além disso, é indispensável, mesmo com baixo consumo, que o óleo tenha menor impacto ambiental possível, por isso o índice de biodegradabilidade é de 95%, em média. Ainda segundo os mesmos autores, o óleo pulverizado na zona de corte tende a aderir nas partes internas da máquina, formando uma fina camada de óleo. Em caso de rápida oxidação o óleo se transforma em uma substância com alto poder de aderência, o que aumenta a probabilidade de acúmulo de cavaco e impurezas. Segundo Park *et al.* (2010), óleos vegetais possuem baixa estabilidade contra oxidação e degradação térmica em relação aos óleos minerais. Desta forma, a fim de comparar o desempenho dos diversos tipos de óleos, estudos comparativos de biodegradabilidade, oxidação e armazenamento foram realizados entre o óleo éster e o óleo vegetal. Ainda segundo Suda *et al.* (2002), a fim de verificar o desempenho dos fluidos de corte, testes foram realizados através da medição da energia de rosqueamento, utilizando macho M8 utilizando as técnicas MQL, com fluido de corte em abundância e a seco. Assim, três tipos de poliol-ésteres com diferentes viscosidades foram utilizados na usinagem MQL. Para o teste de usinagem com fluido foi utilizada refrigeração emulsionável com concentração de 10% e somente ar foi utilizado na usinagem a seco. As figuras 33 e 34 mostram, respectivamente, os resultados obtidos dos testes de oxidação e medição da energia de rosqueamento. Os resultados evidenciam a superioridade do óleo éster em relação ao óleo vegetal devido à maior estabilidade ao longo do tempo, ou seja, à baixa capacidade de reação com o oxigênio, o que garante maior durabilidade no armazenamento (figura 33). A figura 34 mostra o desempenho dos diversos óleos tanto na usinagem MQL, quanto na com Fluido e à

seco. Conforme pode ser visto o corte à seco possui menor desempenho, o qual é medido dividindo-se a energia gasta no rosqueamento à seco pela energia gasta no rosqueamento utilizando um óleo de referência. Desta forma é possível avaliar o torque e a capacidade de expulsão dos cavacos. Entre os óleos éster o tipo A apresentou melhor desempenho e comparativamente com a emulsão os valores são bem próximos, o que demonstra a boa capacidade de lubrificação e conseqüentemente menor atrito, geração de calor e consumo de energia. Os autores Suda *et al.* (2002) realizaram uma investigação adicional para entender a diferença de desempenho entre os óleos éster e a possível correlação com o aumento da viscosidade do óleo. Assim, novos testes foram realizados com óleos de viscosidade na faixa de 5 a 90 mm^2s^{-1} , porém, nenhuma variação significativa nos valores percentuais de eficiência energética no teste de rosqueamento foi encontrada. Conseqüentemente, novas investigações devem ser feitas para se esclarecer quais características dos óleos, além da viscosidade poderiam ter influenciado na diferença de desempenho entre os óleos éster estudados.

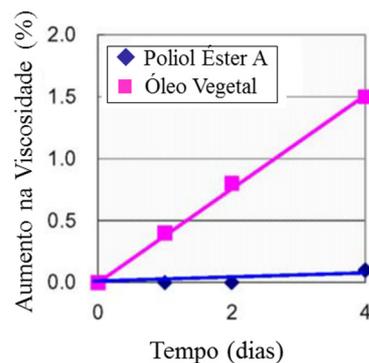


FIGURA 33 - Comparação entre o aumento da viscosidade devido à oxidação durante o armazenamento.

FONTE: SUDA *et al.* (2002)

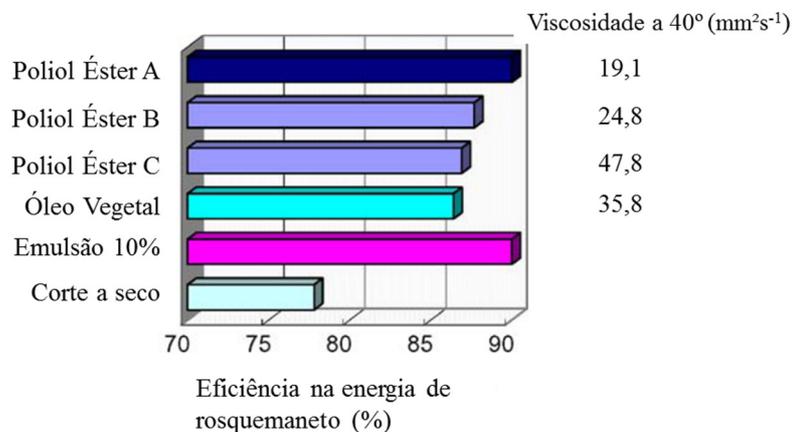


FIGURA 34 - Resultado dos teste de medição da eficiência de energia no rosqueamento

FONTE: SUDA *et al.* (2002)

Mesmo considerando a baixa reatividade dos ésteres com o oxigênio, o desempenho da usinagem da liga de alumínio é superior, em termos de força de corte, quando comparado com a usinagem sem a utilização de óleo de corte com éster. Isso porque a reação com o oxigênio, ainda que baixa, reduz a quantidade de oxigênio na zona de corte e consequentemente reduz formação de óxido de liga de alumínio na superfície recém-usinada, o que torna o corte mais estável. Segundo Wakabayashi *et al.* (2007), o óxido de liga de alumínio é indesejado devido à maior probabilidade de desgaste da ferramenta pelas partículas duras do óxido. Os mesmos autores estudaram a adsorção de oxigênio no óleo de corte éster, bem como avaliaram a força de corte requerida na furação de liga de alumínio fundido, utilizando como gases formadores do jato de MQL o oxigênio, ar, nitrogênio e argônio. Utilizando uma câmara de vácuo, os autores realizaram testes de furação com brocas de metal duro revestidas de DLC, conforme mostra a figura 35. Analisando os dados, percebe-se que os valores da força de corte são mais próximos com e sem éster quando o oxigênio é utilizado como gás na formação do jato de MQL. Essa menor diferença da força, com e sem éster, comparada com outros gases, pode ser explicada pela alta taxa de oxidação, tanto do óleo quando da superfície recém-usinada. Essa oxidação reduz a capacidade de lubrificação do óleo ao mesmo tempo em que acelera o desgaste da ferramenta, aumentando-se assim, a força de corte. A menor força de corte é obtida com a combinação de gás argônio e óleo éster, devido a dois fatores: a ausência de oxigênio na zona de corte e baixa reação do argônio, por ser este um gás inerte, o que potencializa a capacidade de lubrificação do óleo éster, dentro das condições de aplicação realizadas.

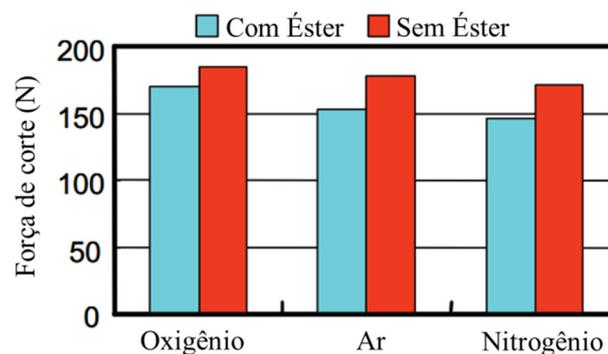


FIGURA 35 - Força de corte na furação com MQL para diferentes gases com presença e ausência de óleo de corte éster na formação do jato

FONTE: WAKABAYASHI *et al.* (2007)

Em relação à viscosidade e pressão, em geral, menores viscosidades facilitam a atomização, ou seja, a pulverização do óleo e conseqüentemente a geração de partículas menores porém, dependendo da pressão de entrada e da geometria do canal, o fluxo pode entrar em estado turbulento e modificar o tamanho das partículas. A fim de analisar a influência da geometria do canal, da viscosidade do óleo e da pressão de aplicação na velocidade e tamanho das partículas e do consumo, Duchosal *et al.* (2013) realizaram experimentos em um banco de prova especialmente projetado para reproduzir as condições de um centro de usinagem e da ferramenta de corte, porém, sem considerar o efeito da rotação do eixo árvore, uma vez que o teste em bancada é estático. Desta forma, foram selecionados três tipos de óleos com diferentes viscosidades, 28, 46 e 80 $\text{mm}^2 \text{s}^{-1}$, juntamente com três condições de pressurização, as quais variam para cada diâmetro do canal em termos de vazão e pressão do ar. Para avaliar a geometria do canal, sete tipos diferentes de configuração foram estudadas. . A figura 36 mostra a relação entre a viscosidade do óleo e o tamanho das partículas e a figura 37 mostra as diferentes geometrias do canal, bem como os dados de entrada dos testes. A variação dos dados entre 1 e 3 refere-se à adição de ar pressurizado no jato de MQL, pouco comentado pelos autores

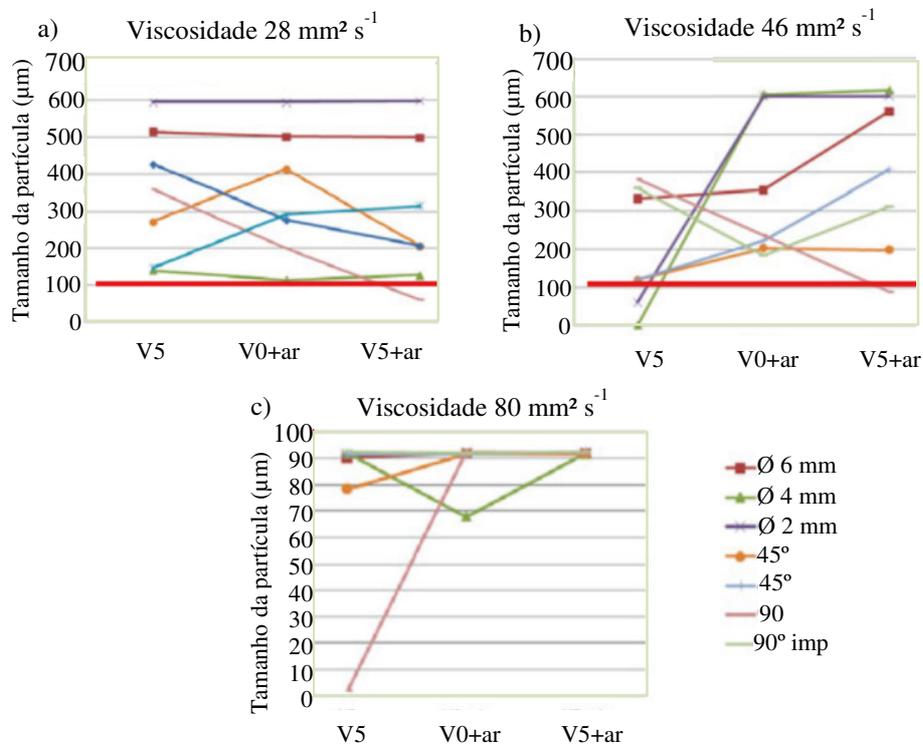
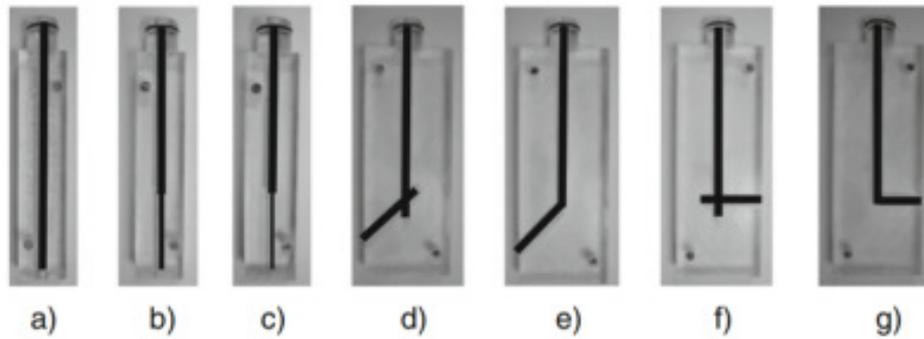


FIGURA 36 - Tamanho médio das partículas de óleo para as diferentes condições de entrada, geometria do canal e viscosidade do óleo

FONTE: DUCHOSAL *et al.* (2013), p. 1011.



DADOS DE ENTRADA DOS TESTES

	Ø 6 (*)	Ø 4 (*)	Ø 2(*)
1) V0 + ar	[340] - (1,95)	[340] - (3,6)	[200] - (6)
2) V5	[190] - (0,77)	[190] - (1,61)	[150] - (6)
3) V5 + ar	[329] - (2,5)	[329] - (3,6)	[210] - (6)

[] vazão de ar - Nl min^{-1} ; () pressão do jato - bar; (*) diâmetro do canal - mm

FIGURA 37 - Variações da geometria do canal de alimentam do jato de MQL e dados de entrada dos testes; a) Reto com \varnothing 6 mm; b) Reto com \varnothing 4 mm; c) Reto com \varnothing 2 mm; d) \varnothing 6 mm 45° com imperfeição; e) \varnothing 6 mm 45°; f) \varnothing 6 mm 90° com imperfeição; \varnothing 6 mm 90°

FONTE: DUCHOSAL *et al.* (2013), p. 1006.

Em resumo, os resultados mais importantes foram:

- Fluxo do jato mais homogêneo e regular aconteceu com o canal de \varnothing 6 mm para as condições de entrada 2 e óleo com viscosidade de $80 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$, cujo valor máximo de velocidade foi de 180 ms^{-1} . O pior resultado ocorreu no canal de 2 mm de diâmetro devido ao fluxo turbulento desenvolvido pelo jato.
- Não houve significativa diferença entre as velocidades alcançadas com a variação da geometria a, e, g e da viscosidade do óleo, segundo os autores, devido ao comprimento do canal entre a bifurcação e a saída ser dez vezes maior que o diâmetro, o que reconduziria as partículas a um fluxo estável. A velocidade, no entanto, seguiu um padrão de proporcionalidade com a pressão de aplicação para todas as faixas de viscosidade estudadas.
- Houve variação significativa do tamanho das partículas para diferentes viscosidades, pressões de entrada e geometria do canal, conforme mostra a figura 32. Entre os óleos com viscosidade de 28 e $46 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$ o tamanho médio das partículas foi de $600 \mu\text{m}$ de diâmetro, porém, percebe-se que com o aumento da viscosidade há uma considerável redução do tamanho das partículas, sobretudo para as condições de entrada V5, que corresponde ao fluxo estável do jato. A figura 32 a), mostra que o tamanho das

partículas é praticamente constante para o canal com \varnothing 2 mm, onde os maiores valores são encontrados. Isso se deve ao fato do fluxo se tornar turbulento neste canal, mesmo para as condições de entrada que garantem maior estabilidade no fluxo (V5). Esta turbulência aliada às maiores velocidades alcançadas neste canal faz com que as partículas saiam da corrente do fluxo e colidam, em maior quantidade, com as paredes da tubulação. Essa colisão causa a aglutinação das partículas tornando-as maiores.

Levando-se em consideração a máxima redução de custos, a técnica de usinagem à seco seria a mais vantajosa, porém, usinar à seco não implica somente em retirar o fluido corte, mas é preciso um estudo minucioso de todo processo, o que inclui a operação de usinagem, a máquina, o material da peça, a ferramenta e dispositivos de fixação (WEINERT *et al.*, 2004). Em alguns casos, tanto a operação quanto o material podem ser impeditivos para aplicação da usinagem à seco. Segundo Dhar *et al.* (2006), é impossível realizar a operação de furação à seco em ligas de alumínio-silício, devido à alta ductilidade deste material, que sem refrigeração e lubrificação, facilita a aderência do cavaco na ferramenta, provocando a quebra da ferramenta em curto tempo.

Ainda assim, há um grande apelo para uso da técnica de usinagem a seco, devido à grande contribuição na preservação ambiental e redução de custos. Porém, os efeitos do aquecimento causado pela alta temperatura gerada no corte podem influenciar na qualidade dos produtos, especialmente os fabricados em liga de alumínio, o que limita ou mesmo impede o uso da usinagem à seco em larga escala nos processos industriais. Isso porque o efeito do aquecimento sobre as tolerâncias das peças torna o processo produtivo instável devido ao aumento do atrito e adesão do material da peça na ferramenta de corte, resultando em menor vida útil, menor produtividade e dificuldade em garantir as tolerâncias exigidas pelo produto (YUAN *et al.* 2011). Segundo Sreejith e Ngoi (2000), maiores temperaturas podem provocar formação de cavacos em forma de fita, podendo afetar tanto a precisão dimensional quanto o acabamento superficial da peça. Segundo os mesmos autores, com a usinagem de corte à seco, reduzem-se os efeitos do choque térmico, causado pelo uso de fluido de corte. Isso poderia representar um aumento na vida útil da ferramenta. Dhar *et al.* (2006) torneando aço AISI 1040 investigou a influência dos parâmetros de corte na temperatura da interface cavaco-ferramenta, como mostra a figura 38. Os resultados evidenciam maiores temperaturas na usinagem à seco com a utilização de altos valores de

avanço. Porém, para avanços intermediários, os valores de temperatura são próximos aos encontrados na usinagem com fluido de corte e MQL.

Coz *et al.* (2012) realizaram experimentos com a liga de alumínio aeronáutico AA 7075 a fim de investigar a influencia do revestimento das ferramentas na temperatura e na potência consumida pelo eixo árvore da máquina. Desta forma, foram feitas usinagens à seco utilizando-se fresa de topo com diâmetro de 16 mm com duas hélices, cujos parâmetros de corte utilizados foram: V_C 700 m/min, f_z de 0,2 mm/faca, a_e e a_p de 4 e 8 mm respectivamente. A figura 39 mostra os resultados de temperatura obtidos em função dos tipos de revestimento utilizados na ferramenta. Percebe-se que há uma redução da temperatura entre os revestimentos 1 e 3 da ordem de 30%. Os autores também avaliaram o desgaste das ferramentas concluindo que a adesão foi o principal mecanismo de desgaste atuante.

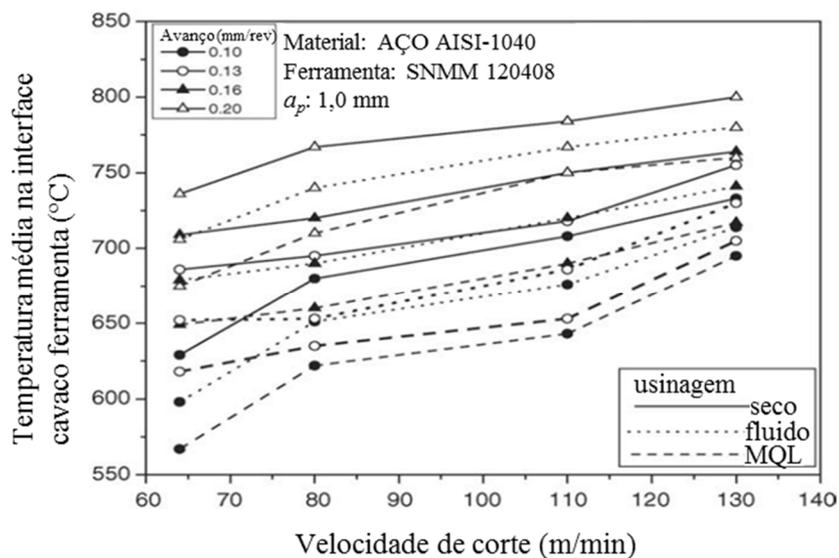


FIGURA 38 - Influencia da velocidade de corte e avanço na temperatura de interface cavaco-ferramenta no torneamento com MQL, fluido de corte e a seco do aço AISI 1040.

FONTE: DHAR *et al.* 2006, p. 96

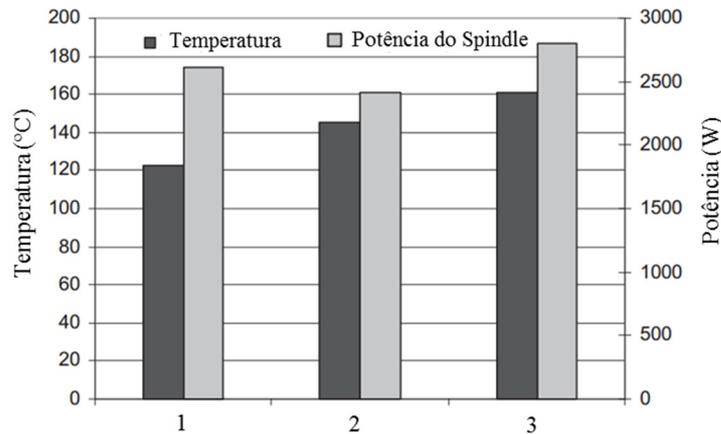


FIGURA 39 - Tipos de revestimento: 1- AlTiN nano estruturado espessura 1,3 μm; 2 – AlTiN nano estruturado espessura 2,3 μm; 3 – Diamante espessura 10 μm

FONTE: COZ *et al.* 2012, p. 439

2.6 Tolerâncias de Forma

As tolerâncias de forma estão alocadas dentro da categoria das tolerâncias geométricas, as quais abrangem: tolerância de forma, orientação, localização, ondulação e rugosidade (NBR 6409). O quadro 3 mostra os tipos de tolerâncias de forma com suas respectivas simbologias.

QUADRO 3 - Tolerância e forma e simbologia

Tolerância de forma	Simbologia
Retitude	—
Planeza	□
Desvio de circularidade	○
Cilindricidade	⊙
Perfil de linha qualquer	⌒
Perfil de superfície qualquer	⌒

FONTE: ABNT 6409

Dentre as tolerâncias de forma, o desvio de circularidade é uma das características mais comuns selecionadas para avaliação da qualidade de furos, sobretudo os que exigem tolerâncias estreitas (<H7) e se destinam a montagem de componentes tais como eixos, buchas e rolamentos.

O desvio de circularidade é definido como a distância radial entre dois círculos concêntricos, conforme mostra a figura 40, onde R é o raio do círculo circunscrito, r é raio do círculo inscrito e t corresponde ao valor do desvio de circularidade.

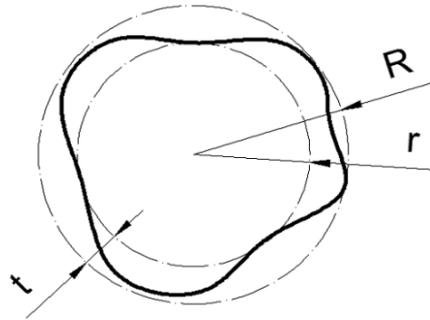


FIGURA 40 – Ilustração da definição de desvio de circularidade.

FONTE: Rosa (2014), p.2

Os medidores de desvio de circularidade, geralmente máquinas de medir por coordenadas (MMC) utilizam os dados de medição para gerar círculos de referência, cujas dimensões definem o valor de desvio de circularidade e diâmetro (MITUTOYO, de acordo com ISO 1181-1:2011, apud Müller, 2008). Existem quatro métodos utilizados para medir o desvio de circularidade, conforme apresentado no quadro 4.

QUADRO 4 - Definição dos tipos de medição do desvio de circularidade

Tipo de medição	Definição
Círculo por mínimos quadrados (LSC – <i>least squares circle</i>)	Consiste em calcular as coordenadas do centro de uma circunferência de tal modo que a soma dos quadrados das distâncias dos pontos amostrados até a circunferência seja mínimo.
Círculo por mínima zona (MZC – <i>minimum zone circle</i>)	Determina dois círculos concêntricos, com a menor distância radial, que limitam todos os pontos apalpados.
Círculo mínimo circunscrito (MCC – <i>minimum circumscribed circle</i>)	Determina o menor círculo que pode ser ajustado pelos três pontos apalpados mais distantes do centro da circunferência.
Círculo Máximo Inscrito (MIC – <i>maximum inscribed circle</i>)	Determina o maior círculo que pode ser ajustado pelos três pontos apalpados que apresentam a menor distância do centro da circunferência.

FONTE: Rosa (2014), p2

A figura 41 exemplifica os tipos de medição de desvio de circularidade e diâmetro.

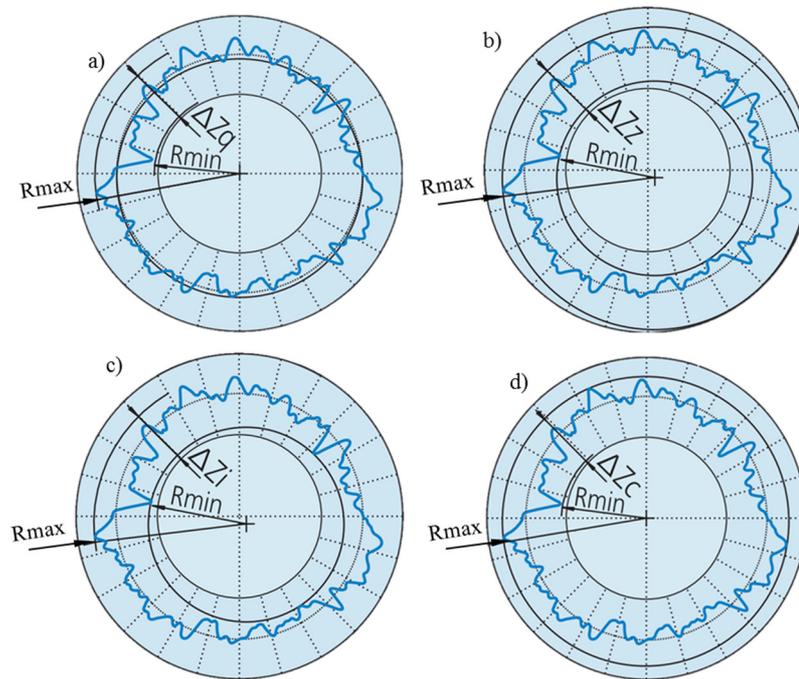


FIGURA 41 – Métodos de medição do desvio de circularidade e diâmetro, a) Círculo por mínimos quadrados, b) Círculo por mínima zona, c) Círculo máximo inscrito, d) Círculo máximo circunscrito.

FONTE: MITUTOYO (2016), p1

3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentados a metodologia, os materiais, as ferramentas e os equipamentos utilizados na realização dos experimentos. Os testes foram realizados no Laboratório de Usinagem e Automação da UFMG, onde também foram feitas as medições do diâmetro, circularidade e rugosidades dos corpos de prova.

3.1 Planejamento dos Experimentos

O planejamento fatorial completo foi utilizado para realização dos experimentos, cujo objetivo é comparar a influência dos parâmetros de corte nas características em estudo para cada uma das técnicas de usinagem, bem como verificar o desempenho e a viabilidade na substituição da técnica com Fluido pela técnica de MQL. Desta forma, análise de variância (ANOVA), DOE (*Design Of Experiments*) e testes de hipóteses foram utilizados para planejamento e análise dos resultados com o auxílio do software Minitab® versão 17.

O quadro 5 mostra a formulação das hipóteses (H_0 : hipótese nula e H_1 : hipótese Alternativa) para o teste de médias: teste t cujo objetivo é comparar a similaridade dos resultados do diâmetro e desvio de circularidade entre as técnicas de usinagem, permitindo, assim, a avaliação da possibilidade de substituição de uma técnica por outra. Todas as análises foram feitas com intervalo de confiança 95% (e nível de significância $\alpha = 0,05$) com avaliação bilateral (*two sided*). Desta forma, valores maiores que o nível de significância 0,05 indicam a impossibilidade de rejeição da hipótese nula (H_0), ou seja, indicam que os resultados de ambas as amostras em estudo fazem parte da mesma população, e, portanto, não há diferença entre os resultados, o que conduziria a conclusão de que as técnicas comparadas seriam equivalentes e comutáveis.

QUADRO 5 - Testes de hipóteses de média: nível de significância $\alpha = 0,05$

Teste de hipótese	Média
1	$H_0: \mu_{MQL} = \mu_{Fluido}$ $H_1: \mu_{MQL} \neq \mu_{Fluido}$
2	$H_0: \mu_{MQL} = \mu_{SECO}$ $H_1: \mu_{MQL} \neq \mu_{SECO}$

FONTE: O AUTOR

3.1 Variáveis de Entrada

Para a usinagem de mandrilamento foram consideradas como variáveis de entrada três fatores: velocidade de corte (V_C), avanço por revolução (f_z) e a profundidade de corte (a_p). Cada fator foi definido com dois níveis, o que resultou em um fatorial 2^3 . Desta forma, considerando os experimentos com uma réplica, tem-se um total de 16 testes para cada técnica de usinagem, totalizando 48 experimentos. As tabelas 1 e 2 mostram, respectivamente, os níveis definidos para V_C , f_z e a_p , bem como a tabulação dos experimentos considerando a aleatorização e a ordem de execução dos experimentos.

TABELA 1 - Valores de cada nível para os fatores V_C , f_z e a_p

Fator	Nível	
	-1	1
V_C (m/min)	842	1263
f_z (mm/rev)	0,15	0,30
a_p (mm)	0,40	0,65

FONTE: O AUTOR

TABELA 2 - Tabulação dos experimentos: planejamento fatorial completo com uma réplica

Ordem Padrão	Ordem de execução	V_C (m/min)	f_z (mm/rev)	a_p (mm)
3	1	842	0,3	0,40
14	2	1263	0,15	0,65
2	3	842	0,15	0,65
6	4	1263	0,15	0,65
9	5	842	0,15	0,40
13	6	1263	0,15	0,40
5	7	1263	0,15	0,40
16	8	1263	0,3	0,65
11	9	842	0,3	0,40
8	10	1263	0,3	0,65
12	11	842	0,3	0,65
15	12	1263	0,3	0,40
10	13	842	0,15	0,65
7	14	1263	0,3	0,40
4	15	842	0,3	0,65
1	16	842	0,15	0,40

FONTE: O AUTOR

Os valores de V_C foram calculados considerando rotações de 4000 e 6000 rpm e o avanço por aresta foi definido em 0,15 e 0,3 mm/rev com base nos dados utilizados na indústria automobilística.

3.2 Variáveis de Saída

- a) Desvio de circularidade: medido a 16,5 mm do plano de referência, conforme mostra a figura 42, utilizando 8 (oito) toques igualmente distribuídos. Para garantir a equidade dos toques um gabarito contendo as marcações da divisão angular foi posicionado sobre o furo, tendo como referencial os furos de referência cilíndrica e angular.
- b) Diâmetro: valor nominal de $67^{+0,03}$ mm, medido nos mesmos locais do desvio de circularidade e com a mesma quantidade de toques.

Adotou-se a técnica de mínimos quadrados para medição do desvio de circularidade por ser a forma mais recomendada pelos fabricantes dos equipamentos, tendo em vista a característica controlada.

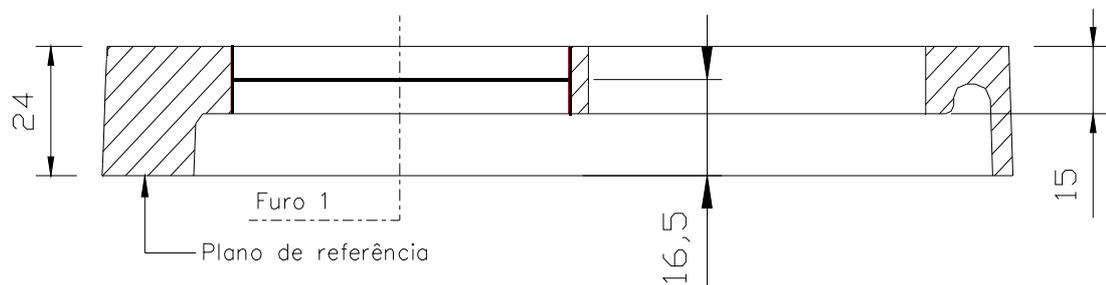


FIGURA 42 – Distância de medição do diâmetro e circularidade a partir do plano de referência. Dimensões em mm.

FONTE: O AUTOR

3.3 Materiais e Equipamentos

3.3.1 Materiais

Os experimentos foram executados utilizando-se os seguintes materiais:

- . 01 barra de mandrilar de PCD com uma aresta de corte, ajustada para \varnothing 67,010 mm, conforme figura 43. Utilizada para usinagem de mandrilamento do furo e obtenção do diâmetro e desvio de circularidade.
- . 48 corpos de prova: peças da liga de AlSi fundida AA384.0; ISO 3522 (Al-Si12Cu3Fe), com elementos constituintes conforme mostrado no quadro 6. Utilizados como corpos de prova na realização dos testes de usinagem.

QUADRO 6 - Composição da liga de alumínio-Silício utilizada

Elementos (%)			Impurezas (% máximo)								Al
Si	Cu	Fe	Zn	Mn	Ni	Mg	Ti	Pb	Sn.	Outros	
11,0	1,75	0,7	1,5	0,5	0,3	0,3	0,2	0,15	0,1	0,1	Balanço
a	a	a									
12.5	2,5	1,1									

FONTE: O AUTOR

- . Óleo de corte: óleo integral PLANTOCUT 40 SB, fabricação FUCHS, viscosidade cinemática: 40 mm²/s a 40°C. Utilizado como fluido de corte para geração do jato de MQL
- . Fluido de corte: Emulsão concentração de 8%. Utilizado como líquido de refrigeração na usinagem com fluido de corte em abundância.
- . 01 fresa de metal duro \varnothing 22 mm. Utilizada para usinagem de desbaste do furo e obtenção do diâmetro com a profundidade de corte (a_p) para a usinagem de acabamento.
- . 01 broca de aço rápido \varnothing 9,5 mm. Utilizada na usinagem de desbaste dos furos de referência cilíndrica e angular dos corpos de prova.
- . 01 alargador de aço rápido \varnothing 10 mm. Utilizado na usinagem de acabamento dos furos de referência cilíndrica e angular.
- . 01 broca de aço rápido \varnothing 6 mm. Utilizada para execução dos furos de implantação dos pinos nas bases.
- . 01 fresa com insertos de metal duro \varnothing 50 mm. Utilizada para usinagem do plano de referência dos corpos de prova.

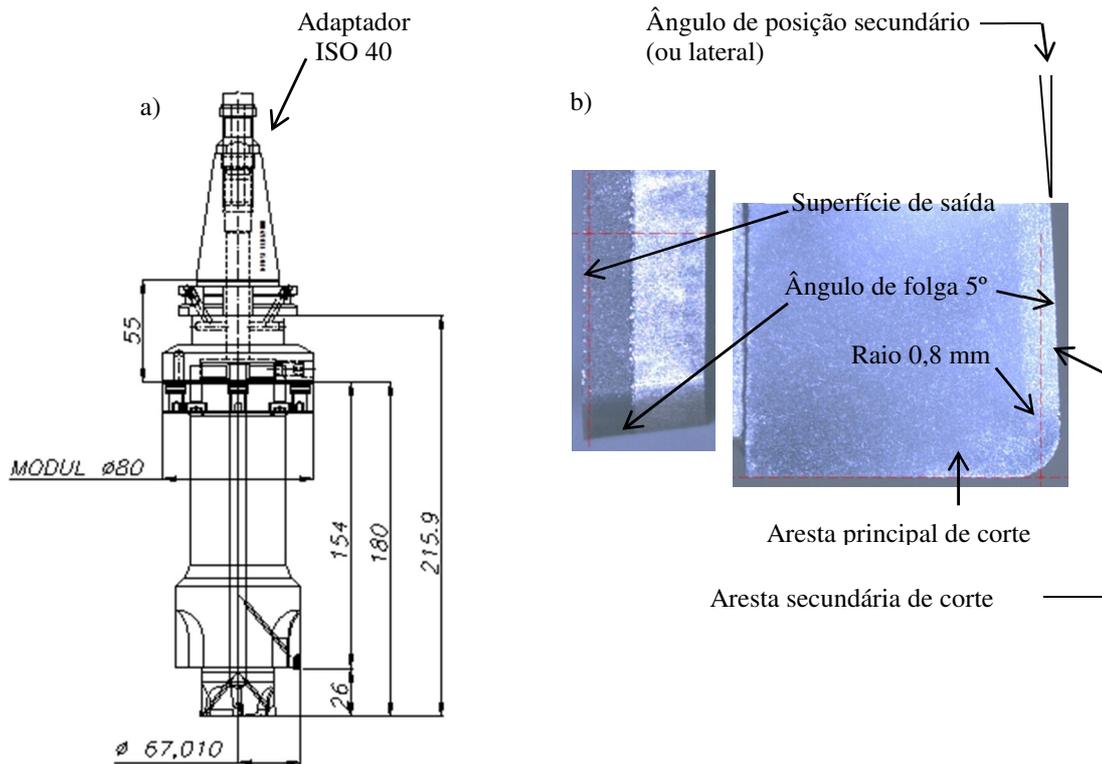


FIGURA 43 – Ferramenta de corte utilizada nos experimentos, a) desenho da barra de mandrilar, b) geometria da plaqueta de PCD.

FONTE: O AUTOR

3.3.2 Equipamentos

Os experimentos foram executados utilizando-se os seguintes equipamentos disponibilizados pelo Laboratório de Usinagem e Automação do Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG.

- . Centro de usinagem Romi modelo Discovery 560, comando numérico Siemens 810D, com potência de 7,5 kW e rotação máxima de 7500 rpm. Utilizado para execução das usinagens de preparação dos corpos de prova e testes finais (figura 44a)).
- . Máquina de medir por coordenadas (MMC) TESA, modelo MICRO HITE 3D com o software REFLEX SCAN, resolução de 0,001 mm, calibrada em Abril/17. Utilizada para medir as características diâmetro e desvio de circularidade do furo em estudo bem como para medição do diâmetro dos furos de referência, diâmetro e desvio de circularidade obtidos na usinagem de desbaste (figura 44b)).
- . Equipamento gerador de MQL, regulado para vazão de 30 ml/h de óleo. Utilizado para geração do jato de MQL (figura 44c)).

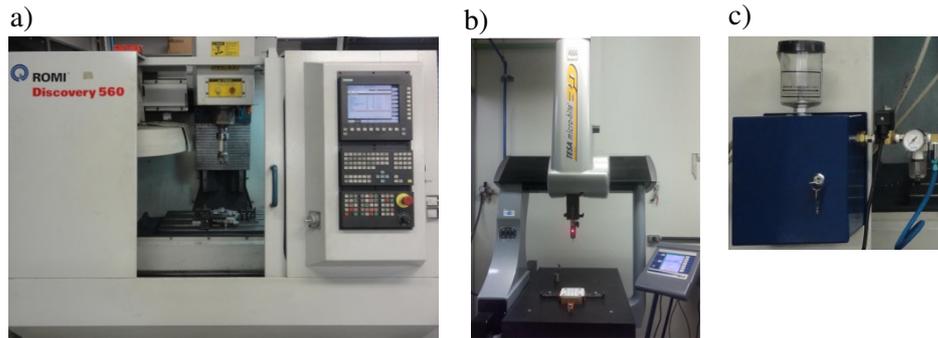


Figura 44 – Equipamentos utilização para realização dos experimentos a) centro de usinagem ROMI, b) Máquina de medir por coordenadas, TESA, c) equipamento gerador do jato de MQL.

FONTE: O AUTOR

. Microscópio de varredura eletrônica (MEV) com função EDX (espectroscopia de energia dispersiva de raios-X) incorporada. Utilizado para geração das imagens da plaqueta de PCD após a realização dos testes.

3.4 Procedimento Experimental

A fim de manter as mesmas características do furo e a mesma liga de alumínio (Al-Si) utilizadas na fabricação da carcaça da transmissão, corpos de prova foram extraídos das peças de produção, mantendo-se a região onde o furo sede de rolamento, escolhido para análise, está localizado. Na indústria, o furo em questão é acabado com diâmetro de $67^{+0,03}(H7)$ mm e desvio de circularidade de 0,015 mm. A figura 45 mostra o desenho da peça de produção juntamente com a identificação do furo escolhido para análise. Os corpos de prova foram gerados a partir do corte da parte superior da peça como mostra a figura 46.

Furo 1 sede de rolamento em análise



FIGURA 45 - Desenho da carcaça da transmissão com identificação dos furos sede de rolamento escolhidos para análise.

FONTE: O AUTOR

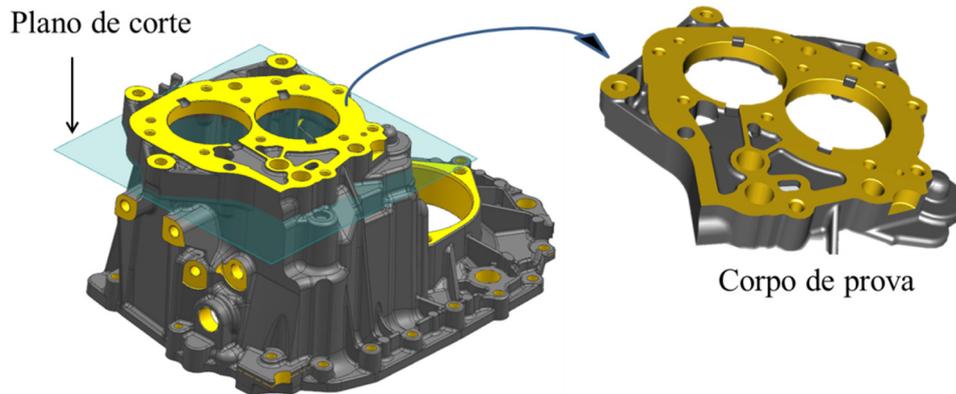


FIGURA 46 - Corpos de prova extraídos das peças de produção

FONTE: O AUTOR

Posteriormente, os corpos de prova receberam usinagens preparatórias para realização dos testes, as quais incluem:

- . Fresamento do plano na região do corte: criação de um plano de referência;
- . Furação e alargamento de dois furos \varnothing 10H7: criação de furos de referência cilíndrica e angular para as usinagens de desbaste e acabamento do furo sede de rolamento;
- . Mandrilamento de desbaste do furo em estudo, feito por interpolação, usinagem à seco, utilizando-se fresa de metal duro com \varnothing 22 mm e parâmetros de corte moderados para manter a tolerância e reduzir a variabilidade entre os resultados. Os furos foram usinados com sobremetal nominal de 0,8 e 1,3 mm, os quais geraram diâmetros de $66,2 \pm 0,1$ mm e $65,7 \pm 0,1$ mm respectivamente, tendo como base o diâmetro nominal acabado de 67 mm. O sobremetal de 0,8 e 1,3 mm corresponde à profundidade de corte, a_p , de 0,4 e 0,65 mm, respectivamente. A tabela 3 mostra o resultado das medições feitas para o diâmetro e desvio de circularidade do furo em estudo.

TABELA 3 – Resultados do diâmetro e desvio de circularidade obtidos na usinagem de desbaste do furo

a_p (mm)	0,40		0,65	
	\varnothing	C	\varnothing	C
Média (mm)	66,204	0,041	65,696	0,032
Desvio padrão (mm)	0,032	0,013	0,016	0,014
Máximo (mm)	66,277	0,067	65,720	0,067
Mínimo (mm)	66,181	0,013	65,667	0,013
Range (mm)	0,096	0,054	0,053	0,054

\varnothing : diâmetro e C: desvio de circularidade, ambos medidos em milímetros (mm)

FONTE: O AUTOR

A figura 47 mostra o desenho dos corpos de prova com indicação dos furos de referência cilíndrica e angular. O objetivo da definição dos furos de referência é permitir a troca dos corpos de prova sem a necessidade de determinação de um novo ponto de zero peça no programa de usinagem, bem como reproduzir o procedimento adotado pela indústria no qual a furação de desbaste e acabamento são feitas em máquinas diferentes, tendo como base os furos de referência. Este procedimento é adotado pela maioria das indústrias, porém, não é uma condição obrigatória, uma vez que as usinagens de desbaste e acabamento podem ser feitas na mesma operação, dependendo das referências de usinagem estabelecidas no projeto do processo.

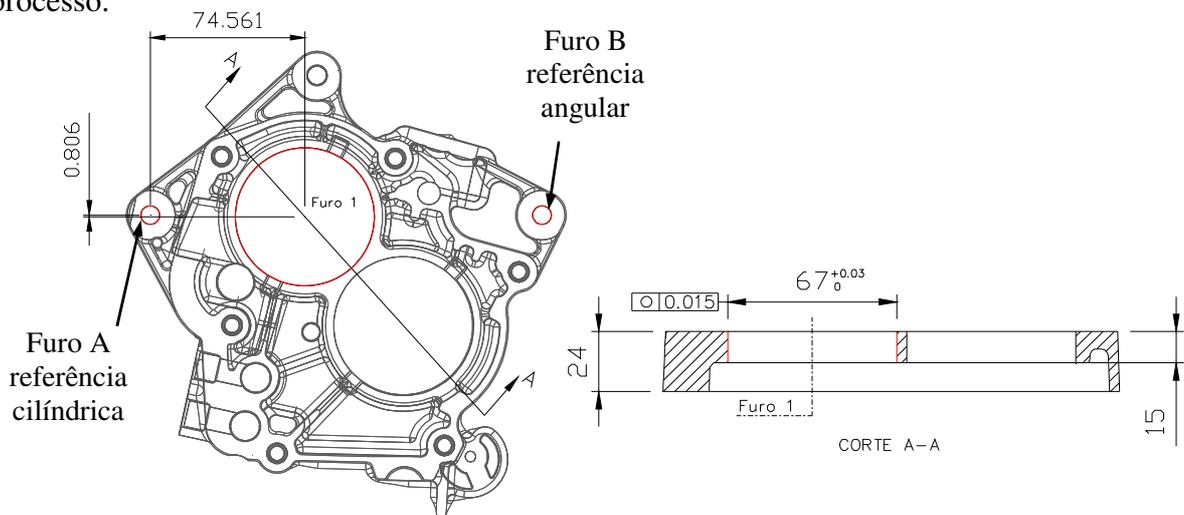


FIGURA 47 – Desenho do corpo de prova com indicação dos furos de referência cilíndrica, angular e furo sede de rolamento em estudo – furo 1

FONTE: O AUTOR

Da mesma forma, para permitir a montagem e a fixação da peça na mesa da máquina foram projetados dois pinos de referência (cilíndrica e angular) e três bases para elevação da peça em relação ao plano da mesa da máquina, para permitir a passagem da ferramenta nas operações de desbaste e acabamento. Os pinos de referência foram prensados, cada um em uma base, para formar os apoios e, juntamente com a terceira base, formar os três pontos de apoio necessários para suportar as peças. As figuras 48 e 49 mostram, respectivamente, os desenhos dos pinos de referência cilíndrica e angular e as bases de apoio da peça.

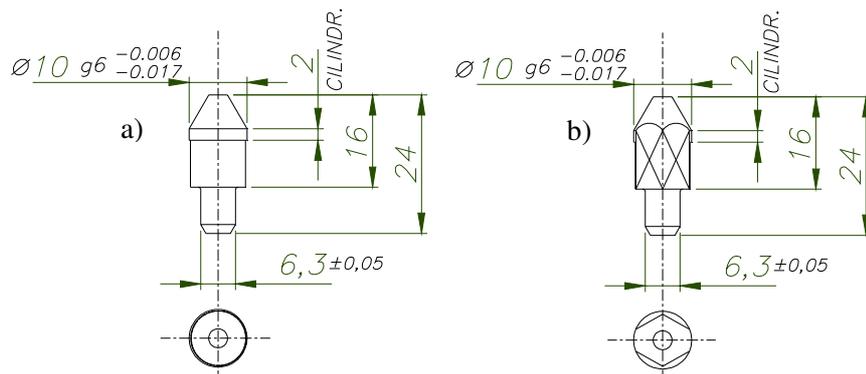


FIGURA 48 - Desenho dos pinos de referência a) cilíndrica e b) angular.

FONTE: O AUTOR

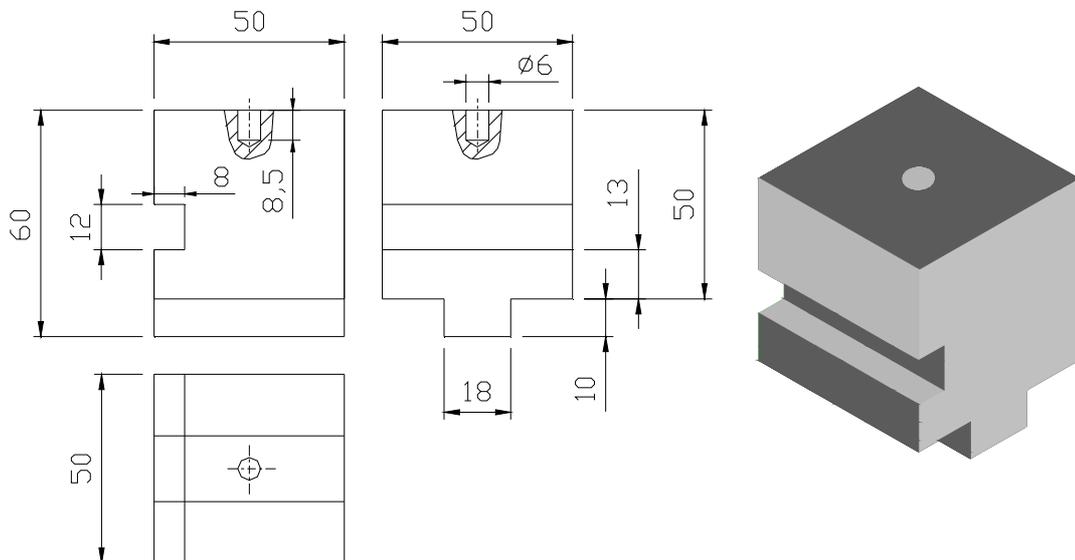


FIGURA 49 - Desenho das bases de apoio utilizadas na realização dos testes.

FONTE: O AUTOR

O furo de referência cilíndrica foi utilizado como zero peça no programa de usinagem e ambos os furos de referência foram alinhados ao rasgo do barramento da mesa da máquina como mostra a figura 50.

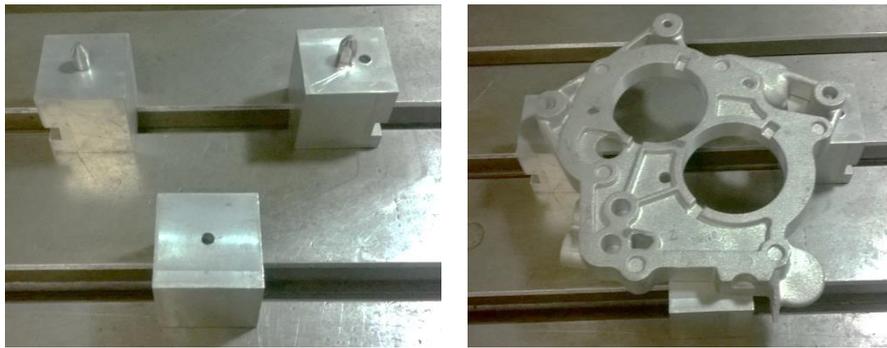


FIGURA 50 – Alinhamento da peça ao barramento da máquina.

FONTE: O AUTOR

A fim de reduzir a variabilidade entre as coordenadas do furo entre o desbaste e o acabamento, os furos de referência foram utilizados em ambas as usinagens. Para tanto, as peças foram posicionadas sobre as bases e indexadas pelos pinos de referência, mantendo-se assim, as mesmas coordenadas nominais estabelecidas na figura 48 para ambas as operações. Esta estratégia foi adotada também para manter a mesma sequência utilizada na indústria, embora o próprio jogo de tolerâncias entre os pinos e os furos de referência permita uma variação entre os centros do furo nas operações de desbaste e acabamento, a adoção das mesmas referências de usinagem garante a menor variabilidade possível, o que contribui para reduzir a influência do desalinhamento dos centros nas características em estudo.

A fixação das peças foi feita sobre os mesmos pontos de apoio da peça nas bases para se evitar deformações. As bases também foram fixadas na mesa da máquina para permitir a carga e descarga das peças sem risco de perda de posicionamento. A ferramenta de PCD foi montada na máquina e um programa de usinagem foi elaborado com as requeridas funções de parada para permitir a troca das peças. A figura 51 mostra a montagem e fixação da peça no centro de usinagem, bem como a ferramenta utilizada para o acabamento, com destaque para o sistema gerador de MQL.

A sequência dos experimentos foi idealizada para evitar a influência de uma técnica sobre outra. Desta forma, os experimentos foram realizados na seguinte ordem: usinagem à seco, MQL e por último com Fluido.

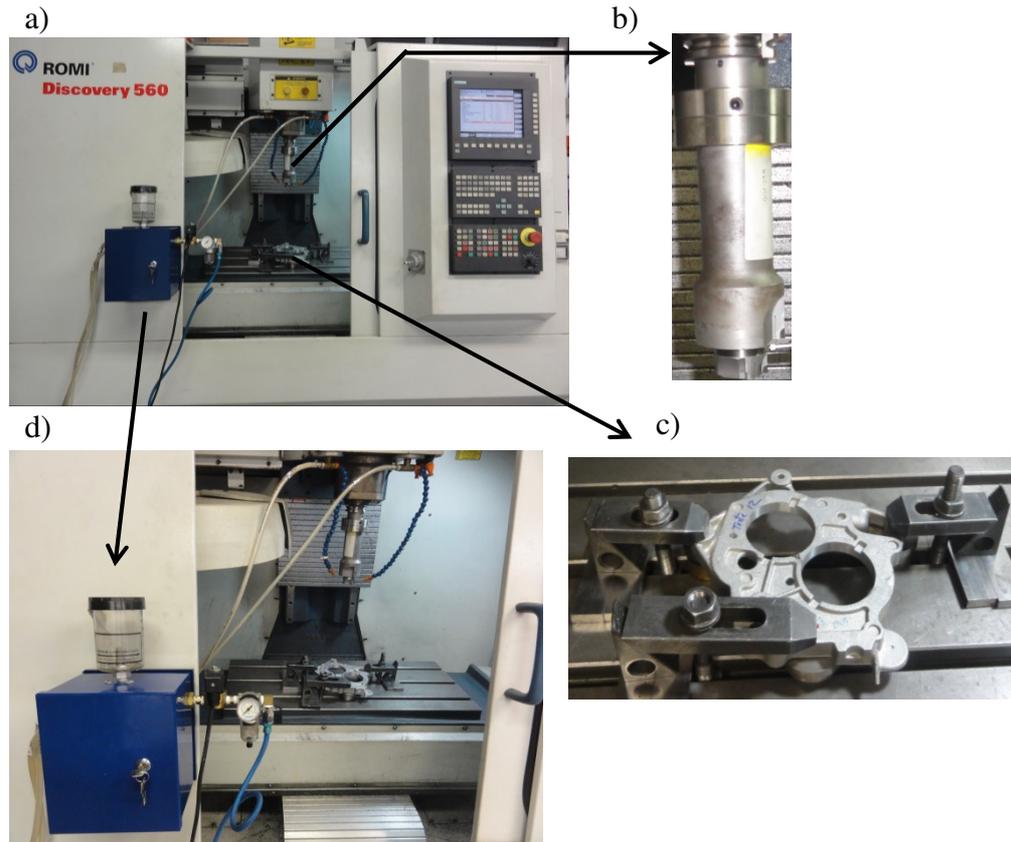


FIGURA 51 – Montagem e fixação da peça com destaque para o sistema gerador de MQL, a) instalação no centro de usinagem, b) ferramenta de corte de acabamento, c) fixação da peça, d) sistema gerador de MQL.

FONTE: O AUTOR

A aplicação do fluido de corte foi feita através de três bicos posicionados a aproximadamente 120° para refrigeração com fluido em abundância e com dois bicos posicionados a aproximadamente 180° para usinagem com MQL.

Após a montagem, o batimento da ferramenta foi medido utilizando-se um relógio comparador com resolução 0,001mm. O batimento encontrado foi de 0,015mm.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para identificar a influência da combinação de fatores a análise de variância foi calculada até as interações de terceira ordem, considerando um intervalo de confiança de 95%. A tabela 4 mostra os pares de testes utilizados com seus respectivos parâmetros de corte para o diâmetro e desvio de circularidade.

TABELA 4 - Parâmetros de corte dos pares de testes para o diâmetro e desvio de circularidade

Par	TESTE	RÉPLICA	V_C (m/min)	f_z (mm/rev)	a_p (mm)
1	1	9	842	0,30	0,40
2	2	4	1263	0,15	0,65
3	3	13	842	0,15	0,65
4	5	16	842	0,15	0,40
5	6	7	1263	0,15	0,40
6	8	10	1263	0,30	0,65
7	11	15	842	0,30	0,65
8	12	14	1263	0,30	0,40

FONTE: O AUTOR

4.1 Análise do Comportamento do Diâmetro

Os gráficos 1, 2 e 3 mostram os valores dos pares testados para as técnicas de usinagem com MQL, Fluido e à seco, respectivamente.

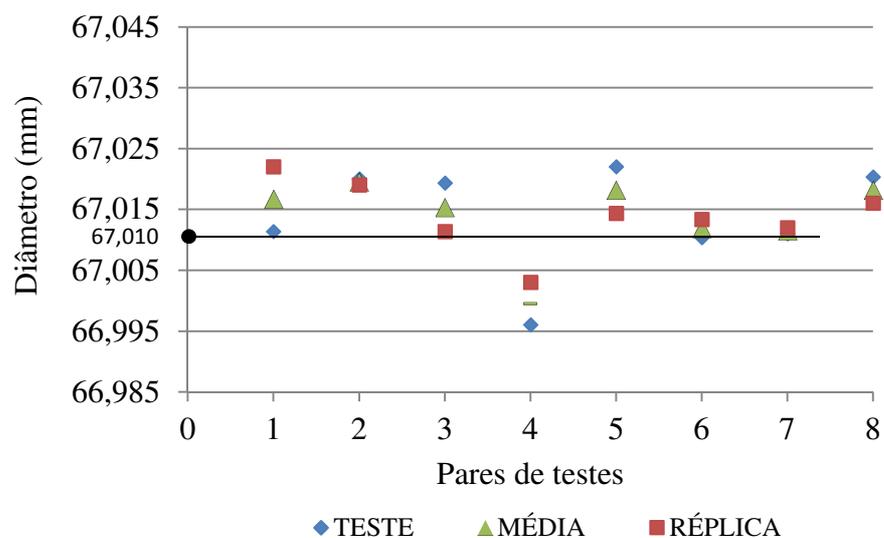


GRÁFICO 1 – Valores dos pares de testes para a usinagem com MQL.

FONTE: O AUTOR

Nota-se no gráfico 1 que houve uma boa repetibilidade entre os valores do teste e réplica, exceto para o par 1, que corresponde às peças 1 e 9, cuja diferença foi de 0,011 mm.

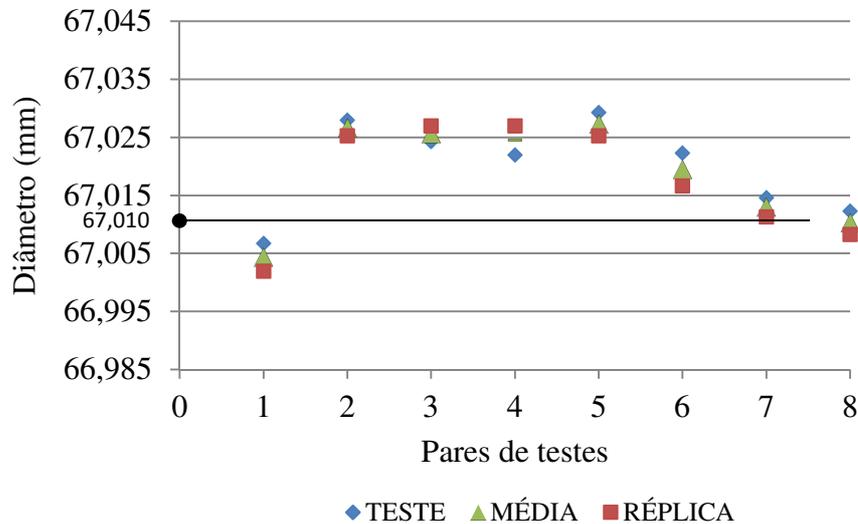


GRÁFICO 2 - Valores dos pares de testes para a usinagem com Fluido.

FONTE: O AUTOR

Nota-se que os valores obtidos na usinagem com Fluido para o par 1, peças 1 e 9, foram menores que o diâmetro da ferramenta. Resultado similar foi encontrado por Yan *et al.* (2013), onde o diâmetro obtido para um dos testes realizados foi menor que o diâmetro da ferramenta. Este resultado foi obtido utilizando-se os menores parâmetros de corte, V_C e a_p . Embora estes autores tenham classificado como complexa a mecânica do corte envolvida, a ocorrência de adesão de material na superfície de corte poderia ser uma explicação, uma vez que altos valores de rugosidade e cilindridade foram encontrados nos testes realizados. Semelhantemente, neste trabalho, a combinação de baixa velocidade de corte e profundidade de corte com alto avanço, também resultou em diâmetro menor que o diâmetro da ferramenta. Da mesma forma, as rugosidades, R_a , R_z e R_t apresentaram os mais altos valores para o par 1, ou seja, peças 1 e 9, como mostra a tabela 5. Como pode ser visto nos gráficos do apêndice A, o avanço foi o único fator significativo para a técnica de usinagem com Fluido.

TABELA 5 - Valores de Rugosidade para a técnica de usinagem com Fluido de corte

Parâmetros de Corte					Rugosidade						
V_C (m/min)	f_z (mm/rev)	a_p (mm)	Par	Peças		R_a (μm)		R_z (μm)		R_t (μm)	
842	0,3	0,4	1	1	9	2,2	2,2	10	9	13	10
1263	0,15	0,65	2	2	4	0,8	0,6	4	3	6	4
842	0,15	0,65	3	3	13	0,6	0,6	3	4	4	4
842	0,15	0,4	4	5	16	0,8	0,7	7	8	15	14
1263	0,15	0,4	5	6	7	1,2	1	6	6	9	8
1263	0,3	0,65	6	8	10	1,9	1,8	11	10	13	14
842	0,3	0,65	7	11	15	1,8	1,8	10	10	13	10
1263	0,3	0,4	8	12	14	1,8	1,6	10	9	13	10

A usinagem com MQL também apresentou valores de diâmetro menores que do diâmetro da ferramenta nas peças 5 e 16, par 4. Nota-se que estes valores correspondem à combinação dos menores parâmetros de corte, V_C (842 m/min), f_z (0,15 mm/rev) e a_p (0,4 mm.).

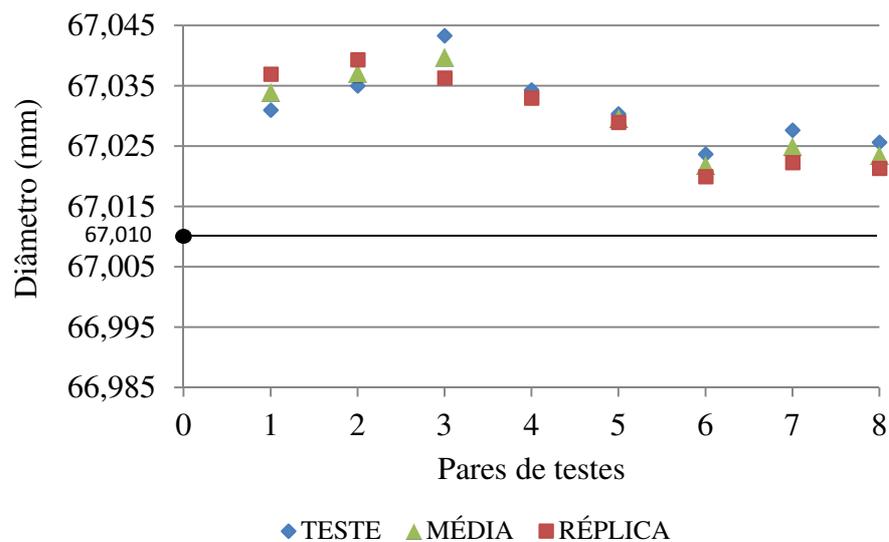


GRÁFICO 3 - Valores dos pares de testes para a usinagem à seco.

FONTE: O AUTOR

Percebe-se também um comportamento similar de redução do diâmetro com o aumento dos parâmetros de corte entre as técnicas com Fluido e à seco a partir dos pares 4 e 5, os quais correspondem, em geral, às combinações dos maiores parâmetros de corte considerados, principalmente V_C (1263 m/min) e f_z (0,30 mm/rev). Porém, levando-se em consideração as condições dos experimentos realizados para a usinagem com fluido em abundância, ou seja, aplicação externa feita com três bicos, a baixa pressão e ferramenta de

corte com uma aresta de corte, o fluido de corte pode não ter alcançado a aresta de corte, contudo, os dados mostram que os valores encontrados com a usinagem com Fluido são menores que os alcançados pela usinagem à seco, o que comprova a influencia da refrigeração no processo de usinagem.

A tabela 6 mostra os valores de *P-Valor* relativos à análise de variância (ANOVA) para cada técnica de usinagem.

TABELA 6 - ANOVA: Valores de *P-Valor* para o diâmetro

Fonte	Graus de liberdade	MQL	Fluido	Seco
Modelo	7	0,029	0,000	0,004
Linear	3	0,105	0,000	0,002
V_C	1	<u>0,024</u>	<u>0,024</u>	<u>0,014</u>
f_z	1	0,541	<u>0,000</u>	<u>0,001</u>
a_p	1	0,541	<u>0,015</u>	0,656
Interações de 2º ordem	3	0,016	0,138	0,022
$V_C * f_z$	1	<u>0,046</u>	0,298	0,312
$V_C * a_p$	1	0,116	0,972	0,218
$f_z * a_p$	1	<u>0,012</u>	<u>0,038</u>	<u>0,006</u>
Interações de 2º ordem	1	0,172	0,891	0,382
$V_C * f_z * a_p$	1	0,172	0,891	0,382
Erro	8			
Total	15			

FONTE: O AUTOR

Os fatores que apresentaram significância estatística referem-se aos valores de *P-Valor* menores que o nível de significância adotado, $\alpha = 0,05$, os quais foram destacados na tabela 5 para facilitar a visualização. Para a técnica de usinagem Com Fluido todos os três fatores, V_C , f_z e a_p foram significativos, bem como a interação entre $f_z * a_p$. Esta tendência não se repetiu na técnica com MQL, cujas variações na significância dos fatores demonstram a diferença no comportamento da usinagem em relação à técnica com Fluido.

Para a técnica com MQL os fatores com maior influência foram: V_C e as interações entre $V_C * f_z$ e $f_z * a_p$.

Já a usinagem à seco apresentou significância para V_C e f_z e a interação de grau 2 entre $f_z * a_p$.

Os gráficos 4, 5 e 6 mostram a análise dos dados de distribuição e resíduos para as usinagens com MQL, Fluido e Seco, respectivamente, os quais são importantes para a

validação do cálculo estatístico. Em todos os casos, os dados cumpriram os requisitos de distribuição normal e resíduos sem padrão de comportamento. Isso pode ser verificado pela utilização da distribuição de Anderson-Darling cujo valor de P-Valor é maior que o nível de significância adotado, $\alpha = 0,05$. A distribuição dos resíduos de forma aleatória comprova a ausência de padrão de comportamento, o qual poderia corresponder a ocorrência de vários pontos sucessivos na parte superior ou inferior do gráfico, ou mesmo apresentar um padrão de repetição de uma sequência de pontos.

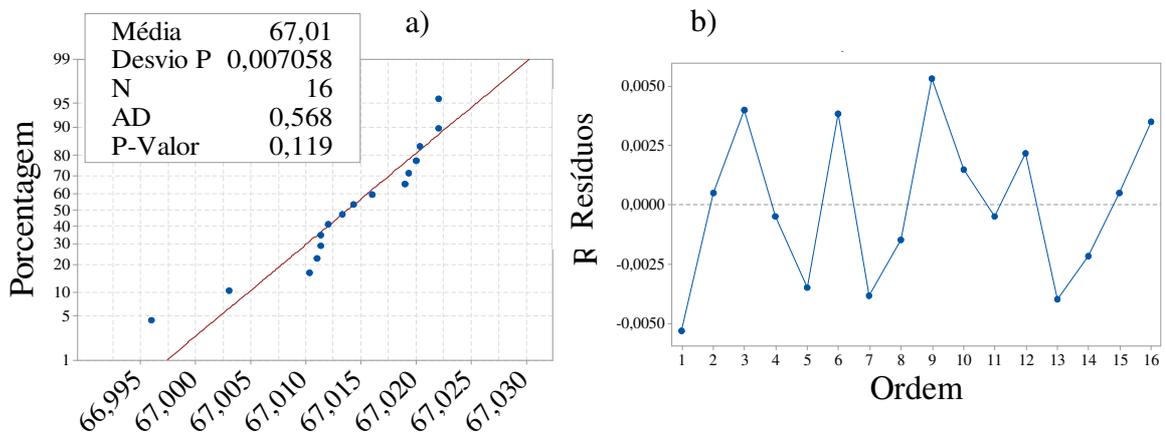


GRÁFICO 4 – Análise da distribuição dos e resíduos para o diâmetro na usinagem com MQL, a) distribuição normal dos valores, b) distribuição dos resíduos.

FONTE: O AUTOR

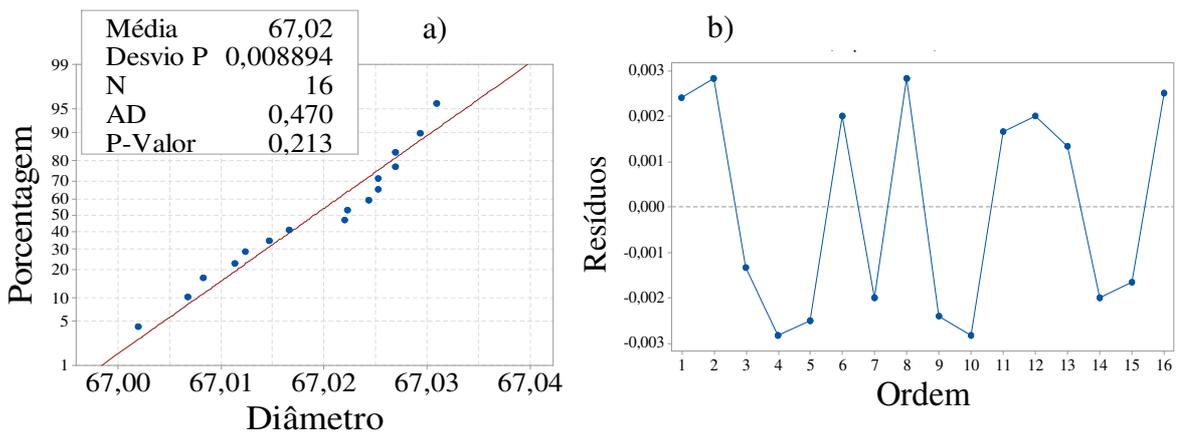


GRÁFICO 5 – Análise da distribuição dos e resíduos para o diâmetro na usinagem com Fluido, a) distribuição normal dos valores, b) distribuição dos resíduos.

FONTE: O AUTOR

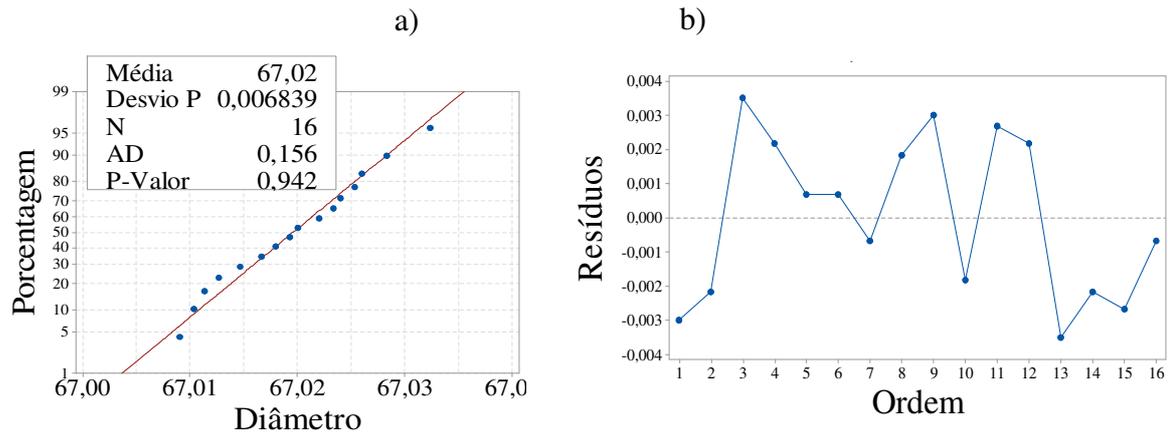


GRÁFICO 6 – Análise da distribuição dos e resíduos para o diâmetro na usinagem à seco, a) distribuição normal dos valores, b) distribuição dos resíduos.

FONTE: O AUTOR

O gráfico 7 mostra os fatores que apresentaram significância estatística para a usinagem com MQL.

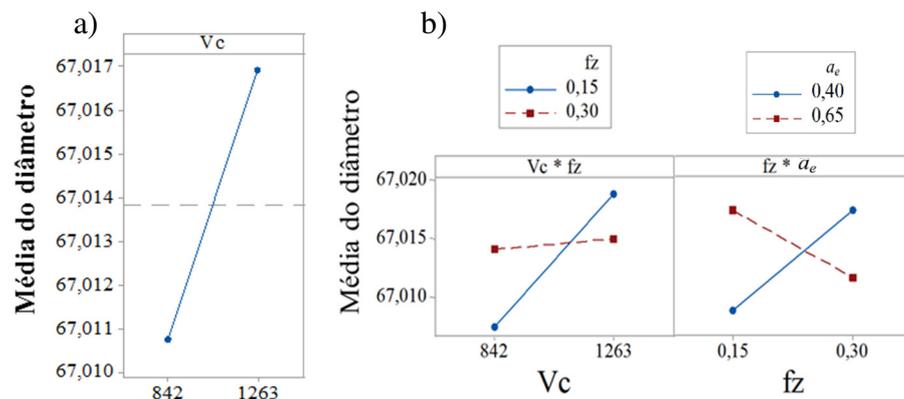


GRÁFICO 7 - Parâmetros significativos sobre o diâmetro na técnica de usinagem com MQL: a) linear b) interações de segunda ordem.

FONTE: O AUTOR

Como pode ser visto no gráfico 7a), o diâmetro tende a aumentar cerca de 0,006 mm com aumento de V_c . Entre as interações de segunda ordem, gráfico 7b), nota-se o aumento do diâmetro com aumento de V_c para $f_z = 0,15$ mm. Já a redução do diâmetro está relacionada com a combinação de maiores f_z e a_p .

O gráfico 8 mostra o resultados dos fatores significativos para usinagem com Fluido.

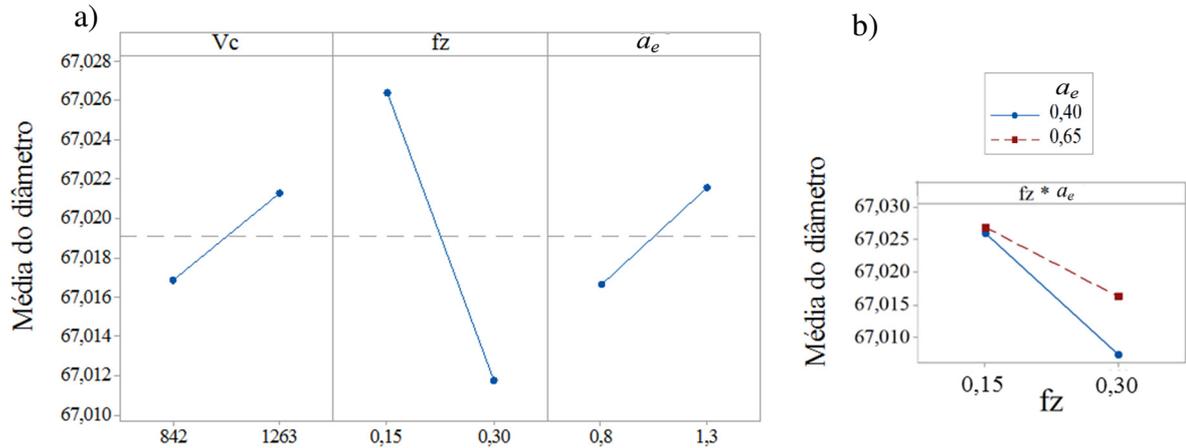


GRÁFICO 8 - Parâmetros significativos sobre o diâmetro na técnica de usinagem com fluido: a) linear b) interação de segunda ordem.

FONTE: O AUTOR

Comportamento semelhante à usinagem com MQL pode ser observado no que se refere à V_c , f_z e a combinação de $f_z * a_p$, mesmo f_z não tendo sido significativo. Nota-se que o diâmetro tende a reduzir com o aumento de f_z linearmente e também quando combinado com a_p . Entre as técnicas de usinagem MQL e com Fluido nota-se que a velocidade de corte exerce a mesma influência, que pode ser visto pelo valor do incremento no diâmetro com o aumento da velocidade de corte, em média de 0,005 mm para ambas as técnicas.

A mesma relação de aumento do diâmetro com o aumento da velocidade evidenciado nos gráficos 7 e 8 foi encontrada por Bezerra *et al.* (2013) na usinagem de mandrilamento de liga de alumínio-silício tanto para a velocidade quanto para o avanço. O aumento da velocidade de corte provoca um aumento tanto da temperatura de corte quanto o aumento do batimento da ferramenta, gerando maiores diâmetros. Como encontrado na literatura, que a técnica de usinagem com MQL produz maiores temperaturas de corte que a técnica Com Fluido, esperava-se encontrar neste trabalho maiores diâmetros para a usinagem com MQL, porém, percebe-se que os resultados foram muitos similares embora nem todos os parâmetros de corte tenham sido significativamente iguais para ambas as técnicas. Porém, estes resultados são contrários aos encontrados por Yan *et al.* (2013) quando usinando liga de alumínio-silício com barra de mandril com diâmetro de 33 mm e 6 arestas de corte. Estes autores encontram uma tendência de redução do diâmetro com o aumento da velocidade de corte em todas as faixas de avanço estudadas, embora os diâmetros tenham sido sempre maiores que o diâmetro da ferramenta, exceto em um dos testes. Os resultados de Bezerra *et al.* (2009) foram encontrados utilizando barra de mandril com 12 mm de diâmetro e 8 arestas de corte.

Em relação ao avanço, os resultados encontrados por Yan *et al.* (2013) mostraram uma alternância na tendência de aumento ou redução dependendo da rotação (velocidade corte) adotada, porém, comparando os resultados para a mesma faixa de rotação (4000 e 6000 rpm) o aumento do avanço provocou um aumento no diâmetro, resultado este contrário ao encontrado no presente trabalho. Resultados similares foram encontrados por Bezerra *et al.* (2013), para o avanço, ou seja, maiores avanços tendem a reduzir o diâmetro. Isso porque maiores avanços reduzem o tempo de contato com peça, o que reduz os efeitos do aquecimento provocados pela velocidade de corte, além de contribuir para o aumento da área de contato da ferramenta, o que influenciaria na estabilidade do corte. Isso pode ser verificado pela análise da combinação com f_z e a_p tanto na técnica de usinagem com MQL quanto na com Fluido. Nota-se que a utilização do maior avanço com o maior profundidade de corte resultou em menores diâmetros. Como evidenciado na literatura e mais especificamente por Jun *et al.* (2006), o aumento do avanço pode contribuir para maior estabilidade do corte devido à redução da vibração, principalmente dos harmônicos, causada pelo aumento da massa a ser cortada e consequente do maior “aprisionamento” da ferramenta no furo. No estudo realizado por estes autores evidenciou-se uma redução dos deslocamentos da ferramenta após a entrada no furo em comparação com a rotação livre.

O gráfico 9 mostra os resultados dos fatores significativos para usinagem à seco.

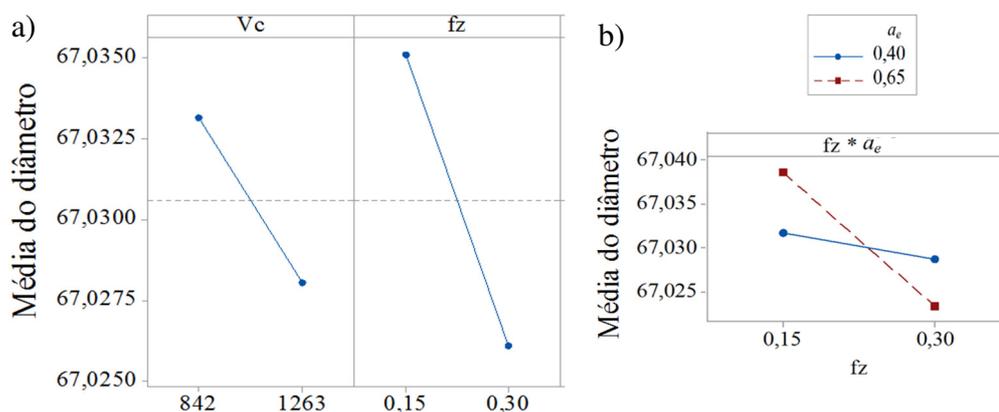


GRÁFICO 9 - Parâmetros significativos sobre o diâmetro na técnica de usinagem à seco: a) linear b) interação de segunda ordem.

FONTE: O AUTOR

Nota-se que o maior diâmetro encontrado entre as usinagens com MQL e Fluido é menor que o mínimo encontrado na técnica à seco, o que demonstra maior eficiência destas técnicas em relação à Seco.

O efeito final da similaridade no comportamento entre as usinagens Com Fluido e à seco é devido a maior contribuição do avanço na redução do diâmetro, comparativamente com a menor influência do aumento do diâmetro devido à velocidade de corte e profundidade de corte. Isso pode ser confirmado pelos valores de *P-Valor* apresentados na tabela 5, para a usinagem à seco, cujo percentual de contribuição é de 72,01% para o avanço, contra 6,66% de V_C , 8,26% de a_p e 5,23% de $f_z * a_p$, conforme calculado pela equação 4 (OKASHA⁶ *et al.* 2012 apud REZENDE 2016).

$$\text{contribuição (\%)} = \frac{\text{Soma dos quadrados individuais}}{\text{Soma dos quadrados total}} \quad (4)$$

A técnica de usinagem a seco apresentou fatores significativos similares à usinagem com Fluido, exceto para a velocidade de corte, que apresentou comportamento inverso. Essa inversão no comportamento do diâmetro com o aumento da velocidade de corte pode estar relacionada a redução do torque e do empuxo devido ao aumento da temperatura de corte que por sua vez reduz as forças de corte e de avanço em consequência da redução da resistência mecânica do material. Desta forma, com menores forças atuando, menor é o efeito da vibração gerada no corte e consequentemente maior a estabilidade do corte. Este efeito foi observado na usinagem à seco, pois à baixas velocidades de corte e avanços, o diâmetro aumenta cerca de 0,023 mm do diâmetro da ferramenta, reduzindo este aumento para cerca de 0,013 mm do diâmetro da ferramenta, principalmente quando se considera o efeito combinado de f_z com a_p . Neste caso, os menores valores de diâmetro foram encontrados quando combinado com o maior valor de a_p .

O aumento de f_z provoca um aumento da espessura do cavaco, o que torna o corte mais efetivo. Resultado semelhante também foi obtido por Wang *et al.* (2013) nos testes realizados no mandrilamento de liga de alumínio-silício. Os autores concluíram que partículas de silício presentes na matriz de liga de alumínio seriam mais facilmente cortadas que arrancadas em razão da redução da resistência mecânica causada pelo aumento da temperatura.

⁶ OKASHA, M. M. *et al.*. Mechanical Microdrilling of negative-tapered laser-predrilled holes: a new approach for burr minimization. *Int J Adv Manuf Technol* (2012) 61:213–225.

4.2 Análise do Comportamento do desvio de circularidade

O gráfico 10 mostra os resultados dos pares de testes para a usinagem com MQL.

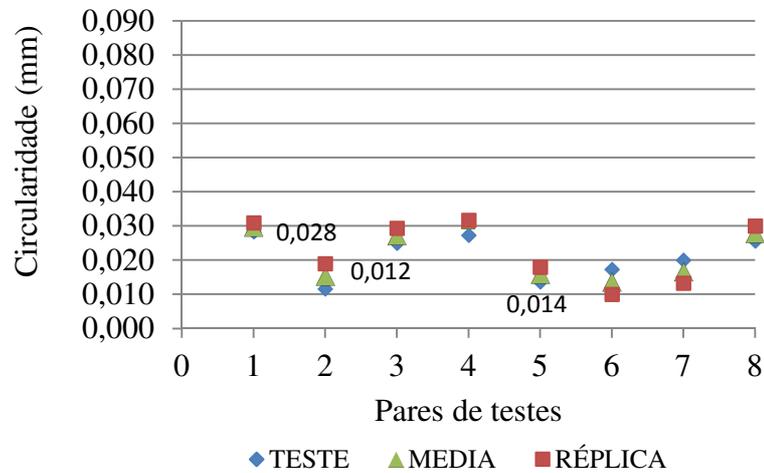


GRÁFICO 10 - Valores dos pares de testes para a circularidade na usinagem com MQL.

FONTE: O AUTOR

Para a usinagem com MQL observa-se uma maior diferença entre os valores dos pares de testes em relação às demais técnicas utilizadas, em média de 0,007 mm. O par 1 apresentou um dos maiores valores de desvio de circularidade, estando este associado ao comportamento do diâmetro, par 1, o qual apresentou valor abaixo do diâmetro da ferramenta, conforme apresentado na seção 4.1. Na citação feita anteriormente, Yan *et al.* (2013), encontrou maior valor de desvio de circularidade também onde o diâmetro encontrado foi menor que o diâmetro da ferramenta, estando este efeito associado, possivelmente, à ocorrência de adesão de material na aresta de corte.

O gráfico 11 mostra os valores dos pares testados para técnica de usinagem com Fluido. Observa-se uma boa repetibilidade entre valores, porém a maioria dos valores ficou acima da tolerância especificada para o desvio de circularidade (0,015mm).

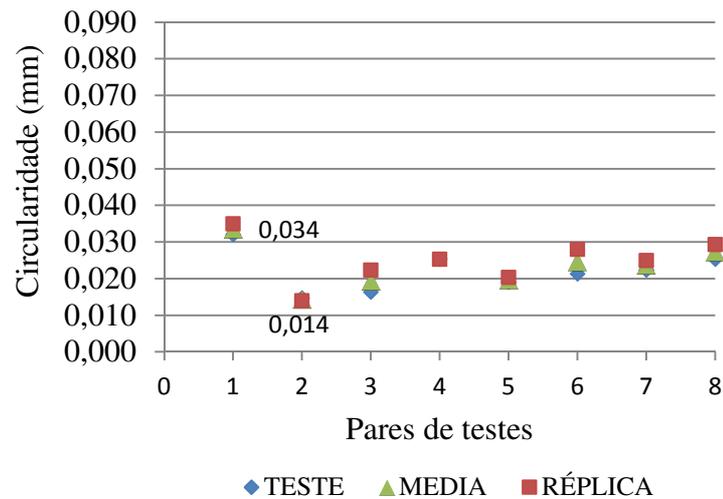


GRÁFICO 11 - Valores dos pares de testes para a circularidade na usinagem com Fluido.

FONTE: O AUTOR

O gráfico 12 mostra os valores dos pares de testes para a usinagem à seco. Nota-se que o menor valor médio, 0,016 mm e o maior valor médio encontrado de 0,074 mm, correspondem aos menores valores de V_C (842 m/min) e a_p (0,4) mm.

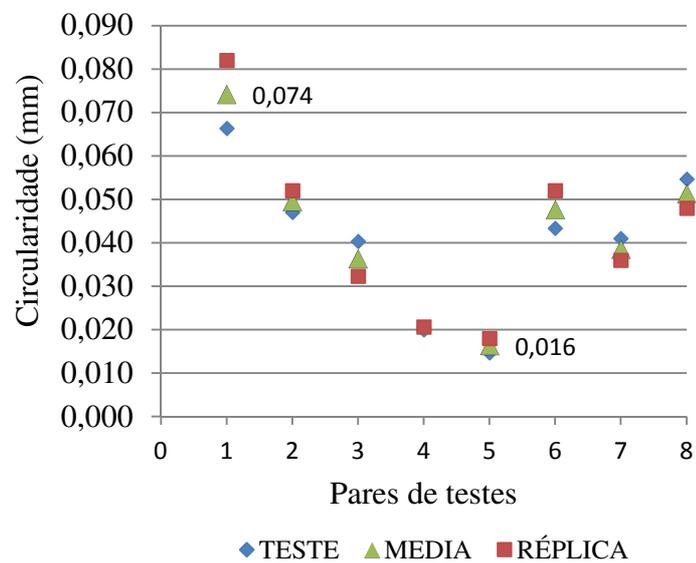


GRÁFICO 12 - Valores dos pares de testes para a circularidade na usinagem à seco.

FONTE: O AUTOR

A tabela 7 mostra os valores da análise de variância, ANOVA, para as técnicas estudadas, cujos valores de *P-Valor* menores que o nível de significância estabelecido, $\alpha = 0,05$ denotam a significância estatística do parâmetro de corte.

TABELA 7 - ANOVA: Valores de *P-Valor* para desvio de circularidade

Fonte	Graus de liberdade	MQL	Fluido	Seco
Modelo	7	0,007	0,000	0,000
Linear	3	0,004	0,000	0,000
V_C	1	0,004	0,003	0,695
fz	1	1,000	0,000	0,000
a_p	1	0,004	0,000	0,400
Interações de 2° ordem	3	0,021	0,000	0,000
$V_C * fz$	1	0,027	0,002	0,073
$V_C * a_p$	1	0,933	0,095	0,002
$fz * a_p$	1	0,013	0,000	0,000
Interações de 2° ordem	1	0,705	0,061	0,217
$V_C * fz * a_p$	1	0,705	0,061	0,217
Error	8			
Total	15			

FONTE: O AUTOR

Os gráficos 13, 14 e 15 mostram os resultados de distribuição e resíduos para a validação do cálculo estatístico, cuja comprovação pode ser feita pela distribuição normal encontrada, calculada pela distribuição de Anderson-Darling e pela distribuição dos resíduos em forma aleatória, ou seja, sem nenhum padrão de comportamento definido. A distribuição normal é validada pelo valor de *P-Valor* maior que o nível de significância adotado, $\alpha = 0,05$.

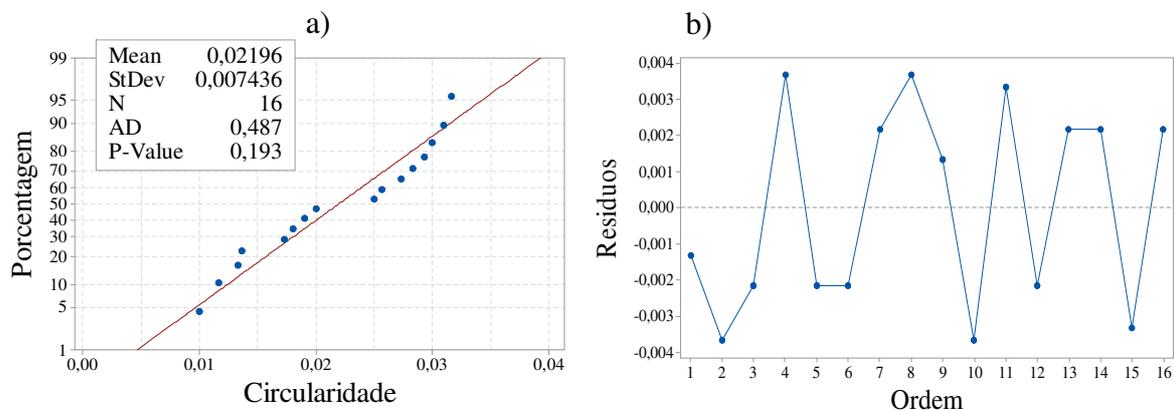


GRÁFICO 13 - Análise da distribuição dos e resíduos para a circularidade na usinagem com MQL, a) distribuição normal dos valores, b) distribuição dos resíduos.

FONTE: O AUTOR

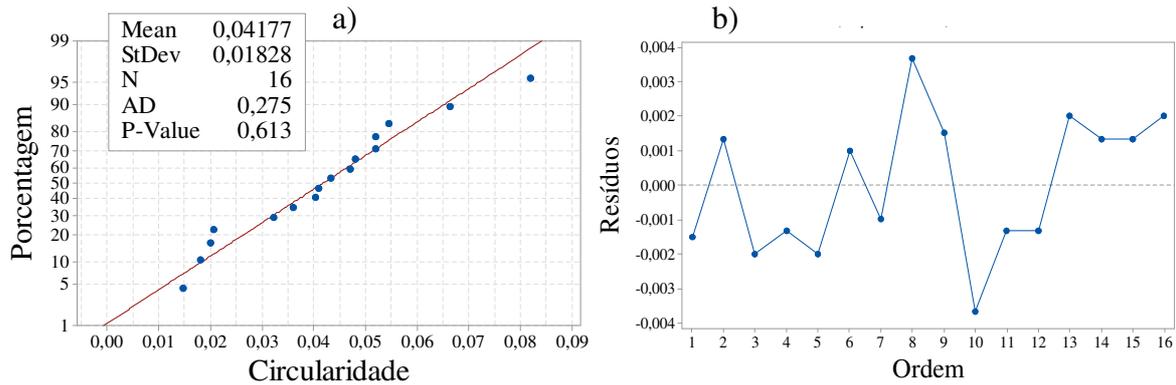


GRÁFICO 14 - Análise da distribuição dos resíduos para a circularidade na usinagem com Fluido, a) distribuição normal dos valores, b) distribuição dos resíduos.

FONTE: O AUTOR

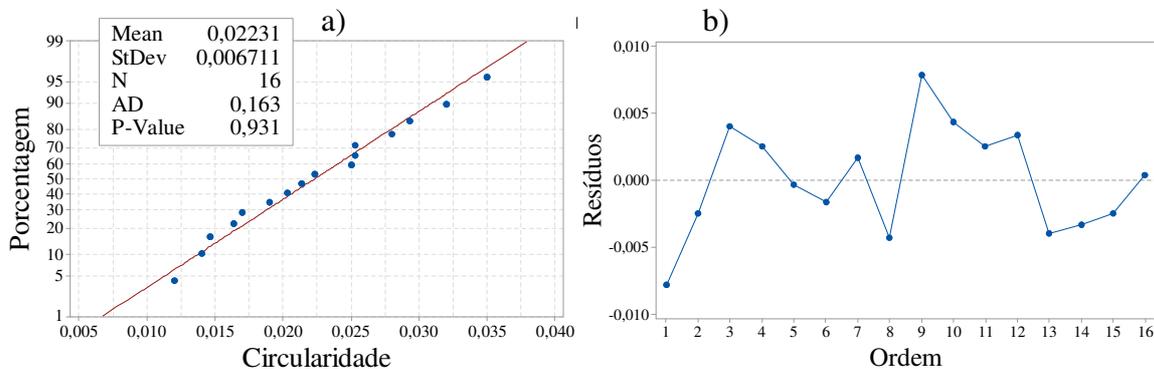


GRÁFICO 15 - Análise da distribuição dos e resíduos para a circularidade na usinagem à seco, a) distribuição normal dos valores, b) distribuição dos resíduos.

FONTE: O AUTOR

Os parâmetros significativos para a usinagem com Fluido foram os mesmos encontrados para o diâmetro, ou seja, V_C , f_z , a_p e as combinações V_C*f_z e f_z*a_p ,

Para a usinagem com MQL os fatores significativos foram V_C , a_p e as combinações V_C*f_z e f_z*a_p . Já para a usinagem à seco somente f_z foi significativo como efeito linear e as interações V_C*a_p e f_z*a_p como efeitos de segunda ordem. Nota-se que os fatores significativos lineares apresentaram alta significância em todas as técnicas de usinagem, devido aos baixos valores de *P-Valor*, o que demonstra alta influência dos parâmetros de corte sobre o desvio de circularidade

O gráfico 16 mostra os efeitos individuais dos fatores significativos e interações de grau 2, evidenciados na tabela 6, para a usinagem com MQL.

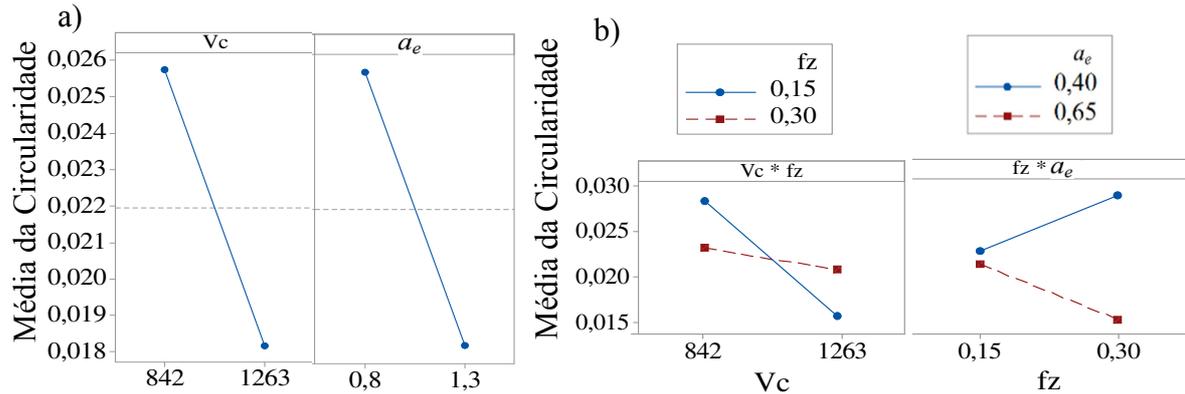


GRÁFICO 16 - Parâmetros significativos para a circularidade na técnica de usinagem com MQL: a) linear b) interação de segunda ordem.

FONTE: O AUTOR

Comparando os valores do gráfico do diâmetro (gráfico 7) com o gráfico 16 observa-se uma inversão na tendência, pois, o desvio de circularidade reduz com o aumento da velocidade de corte, assim como ocorreu com a profundidade de corte. Este comportamento pode estar ligado à adesão de liga de alumínio na aresta de corte, bem como à ocorrência de aresta postiça de corte (APC), sobretudo à baixas velocidades, o que provocaria um aumento do desvio de circularidade do furo. Como a APC tende a reduzir com o aumento de V_C , o desvio de circularidade tende a reduzir.

A redução do desvio de circularidade com o aumento da profundidade de corte na usinagem com MQL está relacionada com o aumento da espessura do cavaco, que pode ser confirmada pela análise da interação entre f_z e a_p , pois os menores valores de desvio de circularidade foram obtidos com os maiores valores destes parâmetros. Estes resultados são similares aos encontrados por Chiffre *et al.* (2009). Nos estudos realizados por estes autores, cinco condições de corte diferentes, utilizando MQL, com aplicação externa, foram testadas, combinando dois níveis de profundidade de corte ($a_p = 0,1$ e $0,05$ mm) com dois níveis de avanço ($f_z = 0,3$ e $0,2$ mm/rev). Entre outros resultados apontados pelos autores, a utilização de baixos valores de a_p tais como: $0,05$ mm não são recomendados devido à redução da espessura do cavaco aumentar a probabilidade recalque de material, dependendo do raio de aresta da ferramenta.

O gráfico 17 mostra os efeitos individuais e as interações dos fatores significativos para a usinagem com Fluido.

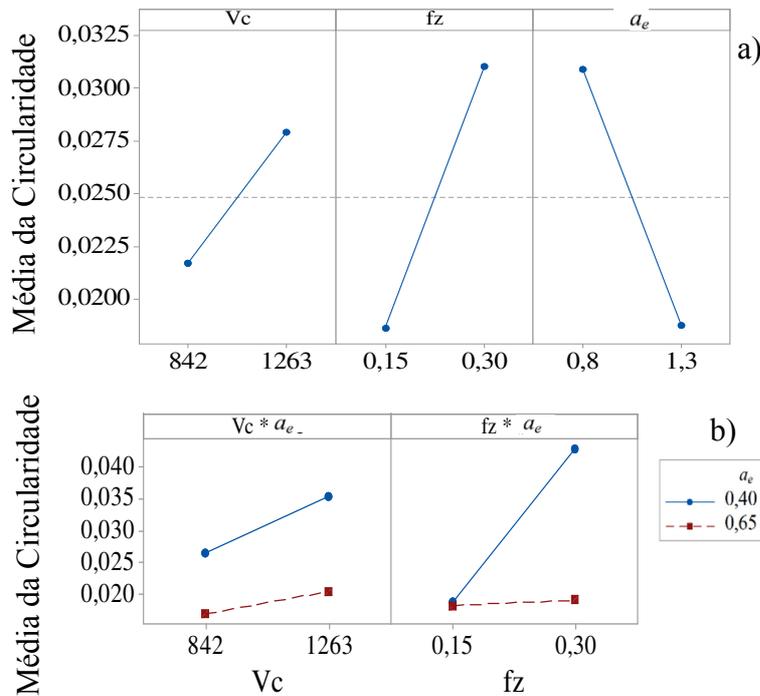


GRÁFICO 17 - Parâmetros significativos para a circularidade na técnica de usinagem com Fluido: a) linear b) interação de segunda ordem.

FONTE: O AUTOR

Os resultados da usinagem com Fluido apresentaram tendências opostas em relação à usinagem com MQL para a velocidade de corte, porém, nota-se que para a menor velocidade corte o valor de desvio de circularidade é similar, ou seja, ambas as usinagem começam com valores médios entre 0,020 e 0,026 mm, sendo que para a usinagem com Fluido os valores tendem a aumentar com a velocidade de corte. Comportamento similar para velocidade de corte foi encontrado por Yan *et al.* (2013), considerando a mesma faixa de rotação estudada no presente trabalho, ou seja, 4000 e 6000 rpm. Nesta faixa houve aumento do desvio de circularidade com o aumento da velocidade de corte. Porém, para f_z os resultados destes autores apresentaram alternância entre aumento e redução, para a mesma faixa de rotação analisada. A 4000 rpm o desvio de circularidade aumenta com o aumento de f_z , porém, a 6000 rpm o desvio de circularidade reduz com o aumento de f_z .

O gráfico 18 mostra os efeitos individuais e as interações dos fatores significativos para a usinagem à seco.

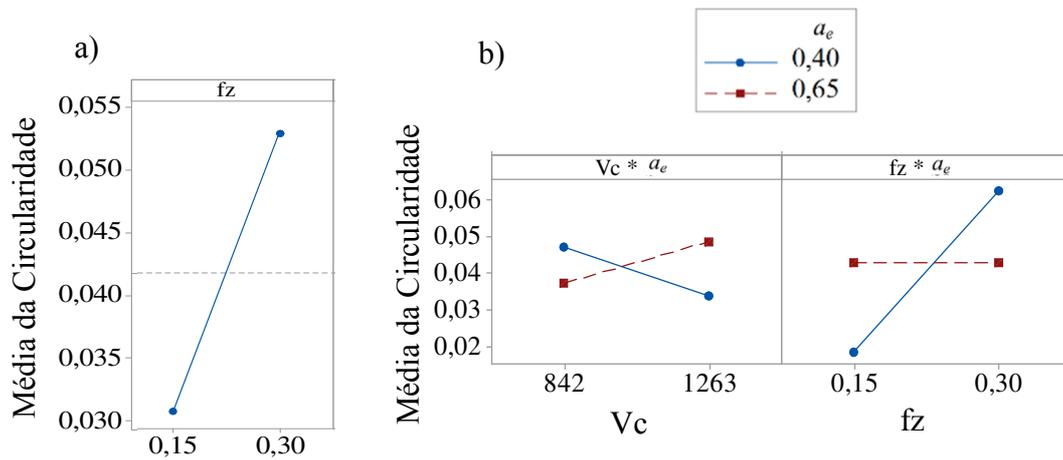


GRÁFICO 18 - Parâmetros significativos para a circularidade na técnica de usinagem à seco: a) linear b) interação de segunda ordem.

FONTE: O AUTOR

O aumento do desvio de circularidade com o aumento de f_z é bastante substancial, cerca 0,02 mm, valor este superior à própria tolerância. Este resultado é oposto ao encontrado para o diâmetro, que tende a reduzir com aumento de f_z . Esta inversão nas tendências é extremamente prejudicial ao processo, pois dificulta o ajuste dos parâmetros, uma vez que ambos, desvio de circularidade e diâmetro definem as características qualitativas do produto.

4.3 Análise da ferramenta de corte

A fim de verificar o estado final da ferramenta após as usinagens bem como a ocorrência de adesão de liga de alumínio e desgaste na aresta de corte, foram feitas imagens em microscópio ótico e MEV com EDX. A figura 52 mostra a imagem do perfil da aresta de corte do PCD feita ao microscópio ótico. Da análise desta figura percebe-se apenas microlascamentos na aresta de corte. A figura 53 mostra as imagens de MEV com análise de EDX na qual é possível verificar a ocorrência de adesão de liga de alumínio na aresta de corte, porém nenhum desgaste significativo pôde ser observado. Contudo, não é possível determinar em qual etapa dos experimentos esta adesão tenha ocorrido, uma vez que todos os testes foram executados sequencialmente, iniciando pela usinagem à seco, seguido dos testes com MQL e por ultimo com Fluido.

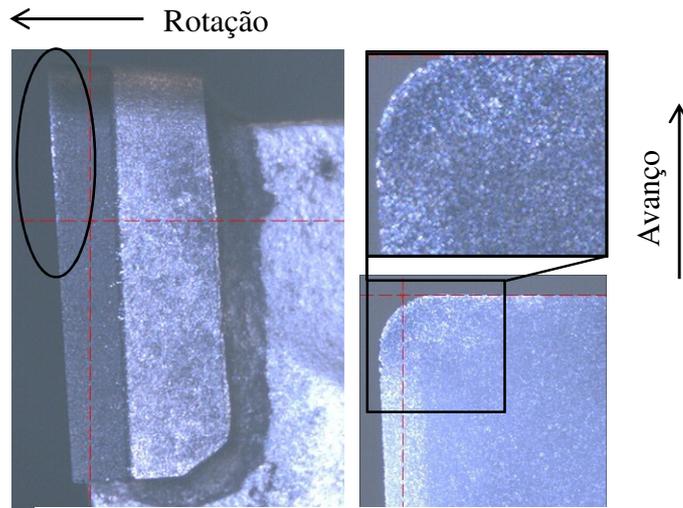


FIGURA 52 –Imagem da aresta de corte do PCD após os testes de usinagem.

FONTE: O AUTOR

As imagens mostram uma sequência de ampliações das regiões selecionadas e evidenciadas em cada parte da figura. A figura 53d mostra o ponto de adesão de liga de alumínio onde foi feita a análise de EDX e a figura 53e mostra toda a região de aderência bem como a profundidade aproximada da camada de liga de alumínio aderida, em média de $100\mu\text{m}$. Esta camada de liga de alumínio aderida provoca um aumento do diâmetro da ferramenta e poderia ser responsável pela inversão no comportamento da tendência do desvio de circularidade entre as usinagens com Fluido e MQL, pois o desvio de circularidade tende a diminuir com o aumento de V_C para a técnica com MQL e aumentar para a técnica com Fluido. Neste caso a adesão poderia ter ocorrido da usinagem com MQL e influenciado a usinagem com Fluido.

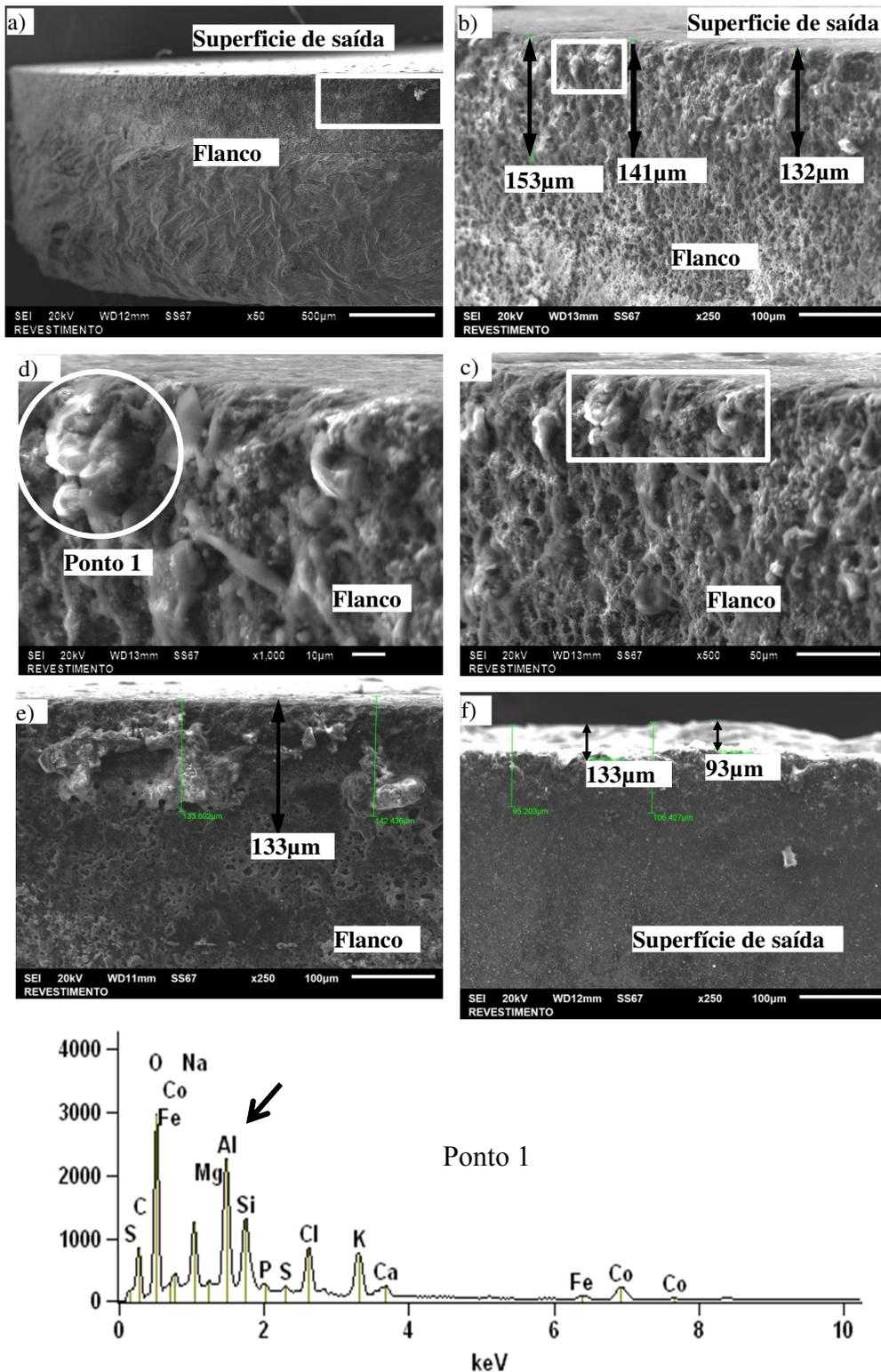


FIGURA 53 – Análise da aresta de corte da plaqueta de PCD e evidenciando adesão de liga de alumínio, a) Região de corte, ampliação 50X, b) Detalhe evidenciado em a), ampliação 250X, c) detalhe evidenciado em b), ampliação 500X, d) detalhe evidenciado em c), ampliação 1000X, e) Distância em relação a superfície de saída, ampliação 250X, f) Profundidade da região de liga de alumínio aderido no flanco.

FONTE: O AUTOR

4.4 Análise do Desempenho das Técnicas de Usinagem

Os gráficos 19, 20 e 21 mostram os valores otimizados para as três técnicas de usinagem, MQL, Fluido e Seco, respectivamente. Tendo em vista que o desempenho da usinagem deve ser considerado para ambas as características, os valores foram ajustados simultaneamente para minimizar o desvio de circularidade e valor alvo para o diâmetro de 67,015mm, utilizando a função “resposta otimizada” do Minitab® versão 17.

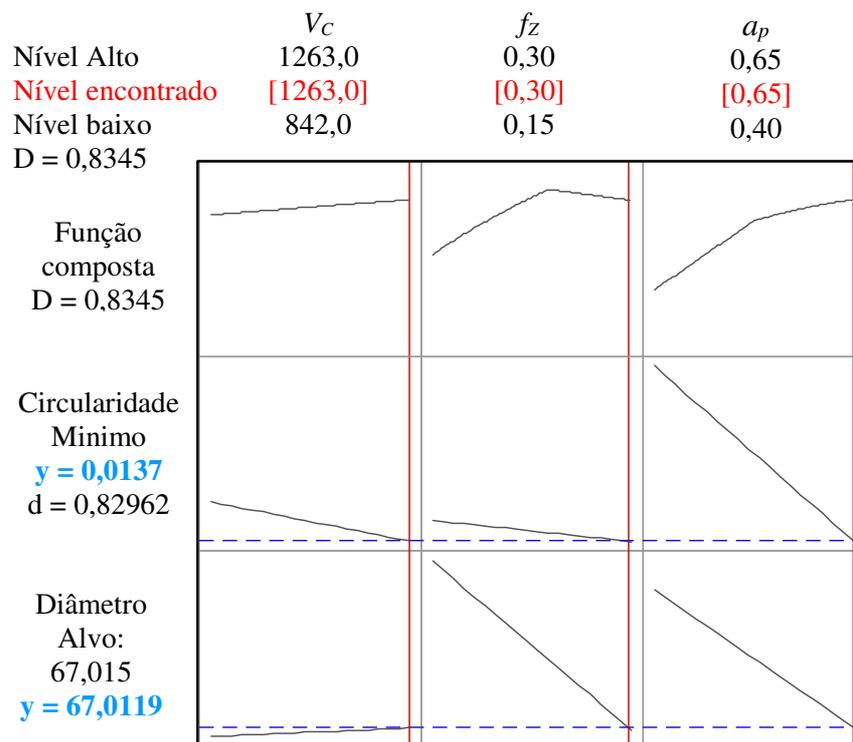


GRÁFICO 19 - parâmetros de corte otimizados para diâmetro e circularidade para usinagem com MQL.

FONTE: O AUTOR

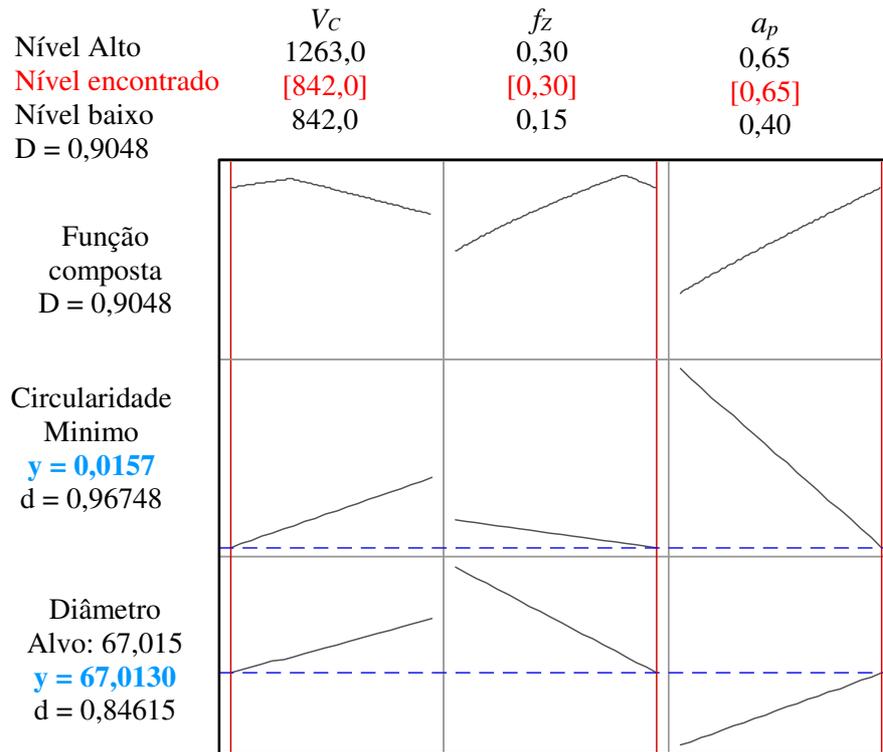


GRÁFICO 20 - parâmetros de corte otimizados para diâmetro e circularidade para usinagem com Fluido.

FONTE: O AUTOR

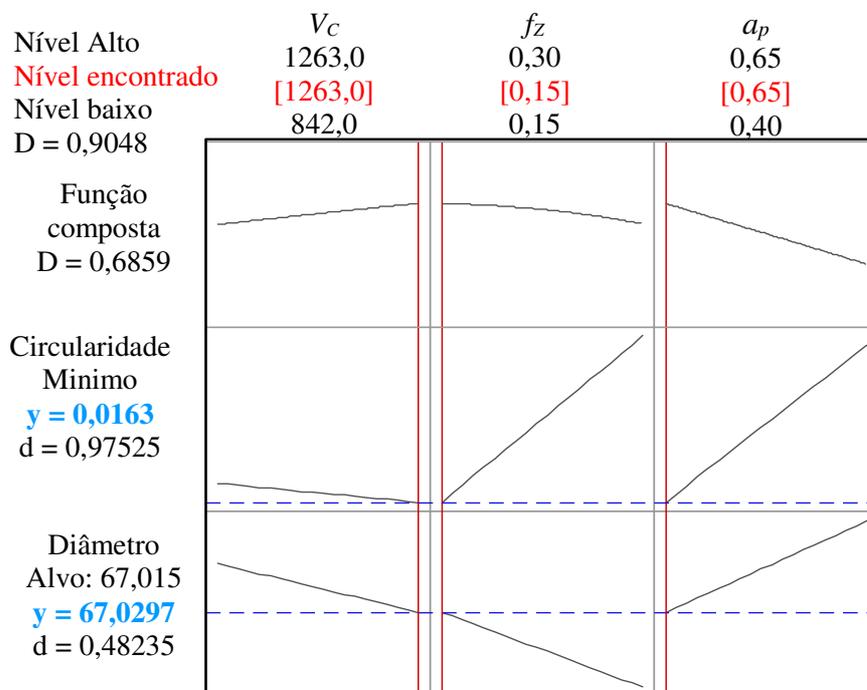


GRÁFICO 21 - parâmetros de corte otimizados para diâmetro e circularidade para usinagem à seco.

FONTE: O AUTOR

Pela análise comparativa dos valores dos três gráficos, nota-se que a usinagem com MQL teve um desempenho superior em relação à usinagem com fluido e a seco. Para os valores ajustados, seria possível utilizar os máximos parâmetros de corte para a usinagem com MQL, o que resultaria em menor tempo de usinagem, 0,5 segundos. Para a usinagem com fluido, os parâmetros de corte otimizados resultariam em um tempo de usinagem de 0,75 segundos, em função da utilização do menor valor para V_C .

Em relação à usinagem à seco os resultados otimizados ficaram acima da tolerância estabelecida para o desvio de circularidade e no limite superior para o diâmetro, cujos valores encontrados foram 0,0163 mm para desvio de circularidade e 67,0297 mm para o diâmetro. Isso porque nos pares testados 4 e 5 os valores de desvio de circularidade obtidos foram entre 0,015 e 0,021 mm, o que contribuiu para redução dos valores otimizados calculados.

A fim de comparar o desempenho das técnicas de usinagem, bem como a possibilidade de substituição, principalmente entre as usinagens com MQL e Fluido, dois testes de hipóteses foram realizados, os quais avaliaram as médias dos dados de cada técnica. A tabela 8 mostra os resultados para média, desvio padrão, máximo e mínimo calculados para o diâmetro e desvio de circularidade em cada uma das técnicas de usinagem.

TABELA 8 - Dados do diâmetro e desvio de circularidade para cálculo do teste de hipóteses de média

	Diâmetro			Desvio de circularidade		
	MQL	Fluido	Seco	MQL	Fluido	Seco
Média	67,014	67,019	67,031	0,021	0,022	0,043
Desvio Padrão	0,007	0,009	0,007	0,007	0,007	0,018
Valor MAX	67,022	67,031	67,043	0,031	0,035	0,082
Valor MIN	66,996	67,002	67,020	0,010	0,012	0,015

A tabela 9 mostra os resultados do cálculo dos testes de hipóteses de média para as técnicas MQL versus Fluido e MQL versus Seco para diâmetro e desvio de circularidade.

TABELA 9 - Resultados de *P-Valor* para o teste de hipóteses de média para o diâmetro e desvio de circularidade

Característica	Análise	Hipóteses testadas	<i>P-Valor</i> encontrado
Diâmetro	MQL x Fluido	$H_0: \mu_{MQL} = \mu_{Fluido}$ $H_1: \mu_{MQL} \neq \mu_{Fluido}$	0,073
	MQL x Seco	$H_0: \mu_{MQL} = \mu_{Seco}$ $H_1: \mu_{MQL} \neq \mu_{Seco}$	0,000
Desvio de circularidade	MQL x Fluido	$H_0: \mu_{MQL} = \mu_{Fluido}$ $H_1: \mu_{MQL} \neq \mu_{Fluido}$	0,429
	MQL x Seco	$H_0: \mu_{MQL} = \mu_{Seco}$ $H_1: \mu_{MQL} \neq \mu_{Seco}$	0,001

FONTE: O AUTOR

Os *P-Valores* maiores que o nível de significância adotado, $\alpha = 0,05$, indicam a impossibilidade de rejeição da hipótese nula, H_0 , ou seja, conforme estabelecido no planejamento dos experimentos, quadro 5. Sendo assim, conclui-se que os valores encontrados tanto para diâmetro quanto para desvio de circularidade das usinagens com MQL e Fluido fazem parte da mesma população e, portanto, são comutáveis, o que significa que ambas as técnicas são compatíveis e a usinagem com MQL pode substituir a usinagem com Fluido.

Os *P-Valores* menores que 0,05 indicam a rejeição da hipótese nula e consequentemente a aceitação da hipótese alternativa, H_1 . Isto significa que os valores encontrados para as técnicas MQL e Seco não pertencem à mesma população e, portanto não são comutáveis. Isso significa que a usinagem com MQL não poderia ser substituída pela usinagem a seco.

5 CONCLUSÃO

Design of Experiments (DOE) e análise de variância (NOVA) foram as ferramentas utilizadas para planejamento e execução dos testes necessários para estudo da qualidade de furos sede de rolamento de peças produzidas em liga de alumínio na operação de mandrilamento utilizando ferramenta de PCD. A influência dos parâmetros de corte e a avaliação da viabilidade de substituição da técnica de usinagem com Fluido pela técnica com MQL foram avaliadas, sendo possível estabelecer as seguintes conclusões:

- . A velocidade de corte, V_c , foi o parâmetro significativo comum entre as técnicas de usinagem tanto para o diâmetro quanto para o desvio de circularidade, exceto para o desvio de circularidade na usinagem à seco.
- . O diâmetro tende a aumentar com o aumento da velocidade de corte para as usinagens com MQL e Fluido e reduzir para a usinagem à seco.
- . O desvio de circularidade tende a reduzir com o aumento da velocidade de corte para a usinagem com MQL e aumentar com o aumento da velocidade de corte para a usinagem à seco.
- . O avanço por volta, f_z , foi o parâmetro que exerceu maior influência em relação à velocidade de corte, independente da tendência, tanto para o diâmetro quanto para o desvio de circularidade.
- . O diâmetro tende a reduzir com o aumento do avanço por volta para as usinagens com Fluido e à seco. Situação inversa ocorreu com o desvio de circularidade, pois o aumento do avanço provocou um aumento do desvio de circularidade.
- . A profundidade de corte foi o fator mais influente para o desvio de circularidade nas técnicas MQL e à seco com tendência a redução com o aumento da profundidade de corte, possivelmente devido à maior estabilidade gerada no corte em decorrência do aumento da espessura do cavaco e consequente redução da vibração da ferramenta.
- . A profundidade de corte foi o parâmetro menos influente entre as usinagens, porém apresentou grande interação de segunda ordem com V_c e f_z .
- . A usinagem com MQL apresentou resultados similares à usinagem com Fluido, conforme comprovado pelo teste de hipóteses de média. Os parâmetros de corte otimizados para

desvio de circularidade e diâmetro ficaram dentro das tolerâncias especificadas, resultando em menor tempo de corte, 0,5s para usinagem MQL e 0,75s para usinagem com Fluido, em função da utilização da máxima velocidade de corte. Conseqüentemente, a usinagem com MQL é mais produtiva que a usinagem com fluido, considerando as condições testadas.

- . Desta forma, baseado nos resultados deste trabalho, pode-se afirmar que a usinagem com MQL poderia substituir a usinagem com Fluido.
- . Embora seja necessário um estudo mais detalhado para entender a real influência do fluido de MQL na usinagem, analisando os dados obtidos neste trabalho percebe-se claramente a diferença com a usinagem à seco, o que conduz a conclusão de que houve influência do fluido de corte MQL suficientemente para interferir nos resultados dos experimentos.
- . A técnica de usinagem à seco apresentou os piores resultados, não sendo recomendada para operação de mandrilamento de liga de alumínio, tendo em vista, principalmente, os valores obtidos para o desvio de circularidade, os quais ficaram muito acima da tolerância especificada para a maioria dos testes realizados.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista os resultados obtidos no presente trabalho e a complexidade envolvida na usinagem de ligas de alumínio-silício, pode-se propor alguns tópicos para trabalhos futuros:

- . Estudar a influencia da usinagem com MQL na operação de madrilhamento com aplicação interna de fluido de corte.

- . Avaliar o desempenho das técnicas de usinagem com MQL e Fluido de corte na operação de mandrilamento com diferentes parâmetros de corte, sobretudo para avanço e profundidade de corte.

- . Incluir nas análises de desempenho das técnicas de usinagem a avaliação da microestrutura da superfície usinada para melhor entendimento da mecânica do corte.

- . Estudar a capacidade de penetração do jato de MQL na zona de corte para verificar a influência na temperatura na temperatura de corte, formação da APC e desgaste de ferramenta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAL, 2004. Características químicas e físicas das ligas de alumínio. Disponível em: <http://www.abal.org.br/alumínio/caracteristicas-quimicas-e-fisicas/ligas/>. Acesso em 05/11/15.

AOYAMA T. *Development of a Mixture Supply System for Machining with Minimal Quantity Lubrication*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 51, Issue 1, 2002, Pages 289-292.

ARUMUGAM PRABHU U.; MALSHE Ajay P.; STEPHEN A. BATZER; DEEPAK G. Bhat. *Study of Airborne Dust Emission and Process Performance During Dry Machining of Aluminum-Silicon Alloy with PCD and CVD Diamond-Coated Tools*. Journal of Manufacturing Processes Vol. 5/No. 2, 2003.

ASGHAR Z.; REQUENA G.; KUBEL F. *The role of Ni and Fe aluminides on the elevated temperature strength of an AlSi12 alloy*. Materials Science and Engineering A 527, 2010, 5691–5698.

ASTM HANDBOOK CASTING, 1992, disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt.R&lr=&id=Lskj5k3PSIcC&oi=fnd&pg=PA3&dq=ASM+HANDBOOK+casting+1992+aluminium&ots=FuC67a7zeY&sig=7UF9W47ZGi3X0-9SxKKYp4fnRS0#v=onepage&q=eutectic&f=false>. Acesso em 05/11/15.

BEZERRA A. A.; MACHADO A.R.; SOUZA A.M. Jr.; EZUGWU E.O. *Effects of machining parameters when reaming aluminium- silicon (SAE 322) alloy*. Journal of Material Processing technology 112 (2001)185-198.

BHATTACHARYYA Onik; KAPOOR Shiv G.; DEVOR Richard E. *Mechanistic model for the reaming process with emphasis on process faults*. International Journal of Machine Tools & Manufacture 46, 2006, 836–846.

BRAGA Durval U.; DINIZ Anselmo E.; MIRANDA Gilberto W.A.; COPPINI Nivaldo L. *Using a minimum quantity of lubricant (MQL) and a Diamond coated tool in the drilling of aluminum–silicone alloys*. Journal of Materials Processing Technology 122 (2002) 127–138.

CALATORU, V.D. BALAZINSKI, M. MAYER, J.R.R. *Diffusion wear mechanism during high-speed machining of 7475-T7351 aluminum alloy with carbide end mills*, *Wear* 265, 2008, 1793–1800

CARDOSO Marlon José. *Análise do processo de furação profunda no aço SAE 4144m endurecido utilizando MQL e broca helicoidal revestida*. Dissertação de mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2014, 136p.

CHIFFRE Leonardo De; TOSELLO Guido; PISKA Miroslav; MÜLLER Pavel. *Investigation on capability of the reaming process using minimal quantity lubrication*. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 2 (2009) 47–54.

COELHO R.T.; YAMADA S.; ASPINWALLT D.K.; WISE M.L.H.. *The application of polycrystalline diamond (PCD) tool materials when drilling and reaming aluminium based alloys including MMC*. *Int. J. Mach. Int. J. Mach. Tools Manufact.* Vol. 35 N.5, 1995, pp 761-774.

COZ G. Le; MARINESCU M.; DEVILLEZ A.; DUDZINSKI D.; VELNOM L. *Measuring temperature of rotating cutting tools : Application to MQL drilling and dry milling of aerospace alloys*. *Applied Thermal Engineering* 36 (2012) 434 e 441.

DEBNATH Sujan; REDDY Moola Mohan; YI Qua Sok. *Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: a review*. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 83- 33 e 47.

DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L. *Tecnologia da usinagem dos materiais*. Artiliber Editora Ltda, Campinas, SP, Brasil, 4ª Edição, 2003, p.230-248

DHAR N.R.; ISLAM M.W.; ISLAM S.; MITHU M.A.H. *The influence of minimum quantity of lubrication (MQL) on cutting temperature, chip and dimensional accuracy in turning AISI-1040 steel*. *Journal of Materials Processing Technology* 171 (2006) 93–99.

DUCHOSAL Arnaud; SERRA R.; LEROY R.; HAMDI H. *Numerical optimization of the minimum quantity lubrication (MQL) parameters by inner canalizations and cutting conditions for milling finishing process with Taguchi method*. *Journal of Cleaner Production* , 2015, 1e7.

DUCHOSAL Arnaud; LEROY René; VECCELLIO Lauren; LOUSTE Christophe; RANGANATHAN N. *An experimental investigation on oil mist characterization used in MQL milling process*. Int J Adv Manuf Technol, 2013, 66:1003–1014.

FERNANDES João Candido; GONÇALVES Bruno Bastos; YAGINUMA Gabriel ernando; YAMAMOTO Marcelo Kazuo, 2010. *Óleos de usinagem: tipos, classificação e desempenho*. Universidade Estadual Paulista Faculdade de Engenharia. Disponível em: http://www.feb.unesp.br/jcandido/manutencao/Grupo_18.pdf. Acesso em 15/05/15.

GONÇALVES Penha Suely de Castro. *Boas práticas ambientais na utilização de fluidos de corte nos processos de usinagem*. Dissertação de mestrado. Faculdade de engenharia UNESP. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/90823>, acesso em 15/05/15.

HEATH Peter J. *Developments in applications of PCD tooling*. Journal Materials Processing Technology 116, 2001, 31-38.

HIOKI Daniel, 2006. *Influência dos parâmetros de corte do fresamento HSM sobre o desempenho tribológico do aço AISI H13 endurecido*. Hioki D. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, ed.rev. — São Paulo, 232 p. disponível em: www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3132/tde-12032007.../tese_HIOKI_ed_revisada2.pdf. Acesso em 31/07/2016.

http://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/90823/goncalves_psc_me_bauru.pdf?sequence=1. Acesso em 15/05/16.

HUI Huang Huai. *Simulação da formação de cavacos usando FEM (Finite Element Method) temperatura e força*, 2007. Universidade de São Paulo, disponível em: www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18145/tde...162007/.../huang.pdf, acesso em 04/06/16.

JAYAL Anshu D.; BALAJI A.K. SESEK Richard, GAUL Adam, LILLQUIST Dean R. *Machining Performance and Health Effects of Cutting Fluid Application in Drilling of A390.0 Cast Aluminum Alloy*. Journal of Manufacturing processes. Vol. 9/No. 2 A, 2007.

JUN Martin B.; BHATTACHARYYA Onik; KAPOOR Shiv G.; DEVOR Richard E. *The effects of process faults and misalignments on the cutting force system and hole quality in reaming*. International Journal of Machine Tools & Manufacture 46, (2006) 1281 – 1290.

KELLY J.F. COTTERELL M.G. *Minimal lubrication machining of aluminium alloys*. Journal of Materials Processing Technology 120 (2002) 327–334.

KHALID A.; AL-GHAMDI Asif Iqbal. A sustainability comparison between conventional and high-speed machining. Journal of Cleaner Production 108 (2015) 192e206.

KISHAWY H.A.; DUMITRESCU M.; ELBESTAWI M.A. *Effect of coolant strategy on tool performance, chip morphology and surface quality during high-speed machining of A356 aluminum alloy*. International Journal of Machine Tools & Manufacture 45 (2005) 219–227.

LACALLE L.N.; LOPEZ de Angulo C.; LAMIKIZ A. Sanchez J.A. *Experimental and numerical investigation of the effect of spray cutting fluids in high speed milling*. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 172, 11–15.

LAURO Carlos Henrique; BRANDÃO Lincoln Cardoso; RIBEIRO Sergio Luiz Moni Filho. *Monitoring the temperature of the milling process using infrared camera*. Academic Journals Vol. 8(23), pp. 1112-1120, 18 June, 2013.

LIAO Y.S.; LIN H.M.; CHEN Y.C. *Feasibility study of the minimum quantity lubrication in high-speed end milling of NAK80 hardened steel by coated carbide tool*. International Journal of Machine Tools & Manufacture 47 (2007) 1667 – 1676.

MACHADO, ÁLISSON ROCHA; ABRÃO, ALEXANDRE MENDES; COELHO, REGINALDO TEIXEIRA; SILVA, MÁRCIO BACCI DA. Teoria da Usinagem dos Materiais. São Paulo: Edgard Blucher, 3ª edição, 2015, 408p.

MELLO A.; MACHADO C. A.; LIMA & SILVA A. R.; GUIMARÃES S.M.M. *Estudo da variação de temperatura de corte no fretamento frontal*. 2º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Uberlândia, MG, 2003.

MITUTOYO, 2016 Guia rápido. Disponível em http://www.mitutoyo.com.br/novosite/download/catalogo geral/p2016/56_guiarapido.pdf. Acesso em 16/05/17.

MUNOZ A. A.; SHENG P. *An analytical approach for determining the environmental impact of machining processes*. Journal of Materials Processing Technology 53 (1995) 736 758.

NASCIMENTO F. M. F. *Processamento por Fricção Linear: Caracterização e análise de ligas de liga de alumínio processadas AA5083-O e AA7022-T6*. Universidade técnica de Lisboa, 2007, disponível em: <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395137455865/Disserta%C3%A7%C3%A3o.pdf>. Acesso em 05/11/15.

NIKNAM Seyed Ali; ZEDAN Yasser; SONGMENE Victor. *Machining Burrs Formation & Deburring of Aluminium Alloys*. Light Metal Alloys Applications, chapter 5, 2014.

OBIKAWA Toshiyuk; ASANO Yuki; KAMATA Yasuhiro. *Computer fluid dynamics analysis for efficient spraying of oil mist in finish-turning of Inconel 718*. International Journal of Machine Tools & Manufacture 49, 2009, 971–978.

OIKAWA Marcos Hiroshi; DESTRO Rodrigo Santana; MELO e SOUZA Rogério. *Utilização da mínima quantidade de lubrificação (MQL) no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho em cerâmicas com rebolos diamantados*. V Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, abril de 2009 - Belo Horizonte – MG, disponível em: http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/877/1/ct_ppgem_m_cardoso,%20marlon%20j%c3%b3se_2014.pdf, acesso em 04/06/16.

OLAKANMI E.O.; COCHRANE R.F.; DALGARNO K.W. A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure, and properties. Progress in Materials Science 74, 2015, 401–477.

PARK Kyung-Hee , JORGE Olortegui-Yume, MOON-CHUL Yoon, PATRICK Kwon. *A study on droplets and their distribution for mini mum quantity lubrication (MQL)*. International Journal of Machine Tools & Manufacture 50, 2010, 824 –833.

PARREIRAS L.; SOUZA G. *Avaliação dos Esforços de Corte o Torneamento da Liga de alumínio Silício (A356) com Diferentes Ante ligas*. Universidade Federal de São João Del-Rei, MG, 2014. Disponível em www.ufsj.edu.br/portal2.../Dissertacao%20-%20Luis%20Guilherme.pdf. Acesso em 05/11/15.

PAVEL Müller. Minimum quantity lubrication in reaming. Diploma Thesis, BRNO University of Technology, 2014, 181 p.

PETROVIC Marin, IVANKOVIC Alojz, MURPHY Neal. The mechanical properties of polycrystalline diamond as a function of strain rate and temperature. *Journal of the European Ceramic Society* 32 (2012) 3021–3027.

PHILBIN P.; GORDON S. *Characterisation of the wear behaviour of polycrystalline diamond (PCD) tools when machining wood-based composites*. *Journal of Materials Processing Technology* 162–163, 2005, 665–672.

PRIARONE Paolo C.; ROBIGLIO Matteo; SETTINERI Luca; TEBALDO Vincenzo. *Milling and turning of titanium aluminides by using minimum quantity lubrication*. *Science Direct Procedia CIRP* 24 (2014) 62 – 67.

REQUENA G.; GARCE'S G.; STEPHAN Danko; PIRLING Thilo; BOLLER E.. The effect of eutectic Si on the strength of short -fibre –reinforced Al. *Acta Materialia* 57, 2009, 3199–3210.

REZENDE, Bruna Aparecida. Estudo da furação de um material compósito tipo sanduíche. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, 2016, 110p.

ROSA Vanessa Aparecida de Oliveira, 2014. Métodos de ajuste utilizados nos programas computacionais dedicados a MMC. Simpósio do programa de Pós - Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia.

ROSSI Guilherme Cruz, 2007. *Estudo das forças de corte no processo de fresamento de bordas de chapas utilizadas para a fabricação de tubos de aço com costura*. Dissertação (Mestrado)- Escola Politécnica da Universidade, ed. rev. São Paulo, 129p. Disponível em <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3151/tde-01042008-111246/>. Acesso em 31/07/16.

ROY P.; SARANGI S.K.; GHOSH A.; CHATTOPADHYAY A.K. *Machinability study of pure aluminium and Al–12% Si alloys against uncoated and coated carbide inserts*. *Int. Journal of Refractory Metals & Hard Materials* 27 (2009) 535–544.

SANTOS Sandro Cardoso; SALES, Wisley Falco. *Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais*. São Paulo: Artliber, v. 246, 2007.

SARIKAYA Murat; GÜLLÜ Abdulkadir. *Taguchi design and response surface method ology based analysis of machining parameters in CNC turning under MQL*. Journal of Cleaner Production 65 (2014) 604 e 616.

SILVA NETO, José Fernandes da. Estudo experimental da remoção, por jato de ar comprimido, de detritos na superfície de corte de rebolo diamantado durante a retificação da alumina refrigerada pela técnica MQL. Dissertação (Mestrado)—Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2012, 108 f.

SOKOVIĆ M.; MIJANOVIĆ K. *Ecological aspects of the cutting fluids and its influence on quantifiable parameters of the cutting processes*. Journal of Materials Processing Technology 109 (2001) 181-189.

SUDA S.; YOKOTA H.; INASAKI I.; WAKABAYASHI T. 2002. *A Synthetic Ester as an Optimal Cutting Fluid for Minimal Quantity Lubrication Machining*. Lubricants Research Laboratory, Nippon Mitsubishi Oil Corporation, Yokohama, Japan.

TAI Bruce L.; DAVID A. Stephenson; RICHARD J. Furness; ALBERT J. Shiha. *Minimum Quantity Lubrication (MQL) in Automotive Powertrain Machining*. 6th CIRP International Conference on High Performance Cutting, HPC, 2014.

WAKABAYASHI T.; SUDA S.; INASAKI I.; TERASAKA K.; MUSHA Y.; TODA Y. *Tribological Action and Cutting Performance of MQL Media in Machining of Aluminum*. CIRP Annals manufacturing technology, 2007, vol.56(1) pp 97-100.

WANG Yongguo; CUI Xiliang; XU Hui; JIANG Keren. *Cutting force analysis in reaming of ZL102 aluminium cast alloys by PCD reamer*. Int J Adv Manuf Technol (2013) 67:1509–1516.

WEINERT K.; INASAKI I.; SUTHERLAND J. W.; WAKABAYASHI T. *Dry Machining and Minimum Quantity Lubrication*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 53, Issue 2, 2004, Pages 511-537.

XIAO X.; LEV L.C.; LUKITSCH M.J. *Material transfer during machining of aluminum alloys with polycrystalline diamond*. Cutting Tools Journal of Materials Processing Technology 209 (2009) 5760–5765.

YUAN Xiangping; LI Bin; LI Jianru; YANG Lei. Analysis of the machining characteristics in reaming AlSi12 alloy with PCD reamer. *Int. J. Adv Manuf Technol*, 2013, 69:2387–2399.

APÊNDICE

Resultados da medições de rugosidade R_a , R_b , e R_z para as técnicas de usinagem com MQL, Fluido de corte e a Seco e análise de variância.

TABELA 10 - Resultado da medição de rugosidade para a técnica de usinagem com MQL

Ordem Padrão	Ordem de execução	Parâmetros de Corte			Medições (μm)		
		V_c (m/min)	f_z (mm/rev)	a_p (mm)	R_a	R_z	R_t
3	1	842	0,3	0,4	4,0	15	16
14	2	1263	0,15	0,65	3,9	15	15
2	3	842	0,15	0,65	4,0	16	20
6	4	1263	0,15	0,65	3,5	12	13
9	5	842	0,15	0,4	4,1	18	19
13	6	1263	0,15	0,4	3,9	15	15
5	7	1263	0,15	0,4	4,1	16	19
16	8	1263	0,3	0,65	4,0	15	15
11	9	842	0,3	0,4	3,9	15	15
8	10	1263	0,3	0,65	3,9	15	16
12	11	842	0,3	0,65	3,9	15	16
15	12	1263	0,3	0,4	3,9	15	16
10	13	842	0,15	0,65	3,9	15	15
7	14	1263	0,3	0,4	3,9	15	15
4	15	842	0,3	0,65	4,0	15	16
1	16	842	0,15	0,4	3,3	13	14

TABELA 11 – Resultado da medição de rugosidade para a técnica de usinagem com Fluido de corte

Ordem Padrão	Ordem de execução	Parâmetros de Corte			Medições (μm)		
		V_c (m/min)	f_z (mm/rev)	a_p (mm)	R_a	R_z	R_t
3	1	842	0,3	0,4	2	10	13
14	2	1263	0,15	0,65	0,8	4	6
2	3	842	0,15	0,65	0,6	3	4
6	4	1263	0,15	0,65	0,6	3	4
9	5	842	0,15	0,4	0,8	7	15
13	6	1263	0,15	0,4	1,2	6	9
5	7	1263	0,15	0,4	1	6	8
16	8	1263	0,3	0,65	2,2	11	13
11	9	842	0,3	0,4	2,2	9	10
8	10	1263	0,3	0,65	1,8	10	14
12	11	842	0,3	0,65	1,8	10	13
15	12	1263	0,3	0,4	1,8	10	13
10	13	842	0,15	0,65	0,6	4	4
7	14	1263	0,3	0,4	1,6	9	10
4	15	842	0,3	0,65	1,8	10	10
1	16	842	0,15	0,4	0,7	9	14

TABELA 12 - Resultado da medição de rugosidade para a técnica de usinagem a Seco

Ordem Padrão	Ordem de execução	Parâmetros de Corte			Medições (μm)		
		V_c (m/min)	f_z (mm/rev)	a_p (mm)	R_a	R_z	R_t
3	1	842	0,3	0,4	1,6	9	11
14	2	1263	0,15	0,65	3,8	16	13
2	3	842	0,15	0,65	0,8	5	9
6	4	1263	0,15	0,65	0,6	6	10
9	5	842	0,15	0,4	0,8	5	9
13	6	1263	0,15	0,4	1	6	7
5	7	1263	0,15	0,4	0,6	3	5
16	8	1263	0,3	0,65	2,4	10	13
11	9	842	0,3	0,4	2,6	11	13
8	10	1263	0,3	0,65	2,6	11	13
12	11	842	0,3	0,65	2,4	10	13
15	12	1263	0,3	0,4	2,6	10	13
10	13	842	0,15	0,65	0,6	3	4
7	14	1263	0,3	0,4	3	13	16
4	15	842	0,3	0,65	2,4	11	13
1	16	842	0,15	0,4	0,6	3	4

TABELA 13 – ANOVA: Valores de *P-Valor* para rugosidade com usinagem com MQL

Fonte	Graus de liberdade	R_a	R_z	R_t
Modelo	7	0,785	0,885	0,777
Linear	3	0,832	0,864	0,701
V_C	1	1,000	0,526	0,432
f_z	1	0,378	0,982	0,452
a_p	1	0,983	0,606	0,710
Interações de 2º ordem	3	0,806	0,650	0,630
$V_C * f_z$	1	0,916	0,595	0,511
$V_C * a_p$	1	0,358	0,420	0,332
$f_z * a_p$	1	0,900	0,433	0,613
Interações de 2º ordem	1	0,203	0,614	0,470
$V_C * f_z * a_p$	1	0,203	0,614	0,470
Erro	8			
Total	15			

TABELA 14 ANOVA: Valores de *P-Valor* para rugosidade com usinagem com Fluido de corte

Fonte	Graus de liberdade	R_a	R_z	R_t
Modelo	7	0,000	0,000	0,001
Linear	3	0,000	0,000	0,001
V_C	1	0,409	0,347	0,334
f_z	1	0,000	0,000	0,001
a_p	1	0,092	0,006	0,003
Interações de 2º ordem	3	0,073	0,002	0,001
$V_C * f_z$	1	0,053	0,134	0,043
$V_C * a_p$	1	0,258	0,134	0,015
$f_z * a_p$	1	0,092	0,000	0,001
Interações de 2º ordem	1	0,018	0,347	0,125
$V_C * f_z * a_p$	1	0,018	0,347	0,125
Erro	8			
Total	15			

TABELA 15 ANOVA: Valores de *P- Valor* para rugosidade com usinagem a Seco

Fonte	Graus de liberdade	R_a	R_z	R_t
Modelo	7	0,152	0,085	0,018
Linear	3	0,046	0,033	0,005
V_C	1	0,198	0,156	0,147
f_z	1	0,013	0,011	0,001
a_p	1	0,436	0,327	0,284
Interações de 2º ordem	3	0,777	0,400	0,500
$V_C * f_z$	1	0,652	0,327	0,659
$V_C * a_p$	1	0,652	0,409	0,511
$f_z * a_p$	1	0,436	0,258	0,206
Interações de 2º ordem	1	0,276	0,201	0,104
$V_C * f_z * a_p$	1	0,276	0,201	0,104
Erro	8			
Total	15			