

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

OTIMIZAÇÃO DO TORNEAMENTO DE ACABAMENTO A SECO E COM MQL NAS
LIGAS DE ALUMÍNIO 6082-T6 E 7075-T6 UTILIZANDO BOX-BEHNKEN DESIGN

Por

Everton Cristiano Feix

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, Setembro de 2019.

OTIMIZAÇÃO DO TORNEAMENTO DE ACABAMENTO A SECO E COM MQL NAS
LIGAS DE ALUMÍNIO 6082-T6 E 7075-T6 UTILIZANDO BOX-BEHNKEN DESIGN

por

Everton Cristiano Feix
Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. André João de Souza

Aprovada por:

Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez.....PROMEC / UFRGS

Prof. Dr. Lincoln Cardoso BrandãoPPMEC / UFSJ

Prof. Dr. Wisley Falco Sales.....FEMEC / UFU

Prof. Dr. Fernando Marcelo Pereira
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 27 de Setembro de 2019.

AGRADECIMENTOS

Ao professor orientador, Dr. André João de Souza, pelos ensinamentos, incentivo, paciência e orientação para realização do trabalho.

Aos professores da banca, Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez, Dr. Lincoln Cardoso Brandão e Dr. Wisley Falco Sales, pelas contribuições a esse trabalho.

À UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul) e ao PROMEC (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica), pela oportunidade e pelo ensino de qualidade disponibilizado.

Ao técnico do LAUS (Laboratório de Automação em Usinagem) da UFRGS, Guilherme Vargas Schirmer, pelo auxílio técnico na execução dos experimentos.

Ao bolsista do LATRIB (Laboratório de Tribologia) da UFRGS, Victor Provensi Mondin, pelo tempo despendido auxiliando nas medições dos corpos de prova.

Ao colega da pós-graduação, Eng. Valmor Schirmann Filho, pelo companheirismo, amizade e auxílio ao longo da pós-graduação.

Aos meus pais, Ângela e Carlinhos, pelo amor incondicional, ensinamentos, oportunidades e por mostrar o valor do trabalho e da honestidade.

A todos que, direta ou indiretamente, auxiliaram nesse trabalho.

RESUMO

A usinagem de acabamento ocupa um papel importante quando a superfície é de alumínio. As ligas de alumínio possuem características que as tornam, em determinadas aplicações, ótimas substitutas do aço, pois além de menor peso específico, pode também agregar boas características químicas, mecânicas e estéticas ao produto final. Particularidades dessas ligas como, por exemplo, ductilidade, muitas vezes acabam por dificultar o acabamento da superfície obtida por torneamento (presença de riscos e rebarbas). As escolhas da ferramenta e dos parâmetros de corte também influenciam na qualidade da superfície torneada. Assim, buscou-se determinar a combinação ideal destes parâmetros (velocidade de corte v_c , avanço f e profundidade de corte a_p) no torneamento de acabamento das ligas de alumínio 6082-T6 e 7075-T6. Estas variáveis de controle (entrada) em três níveis cada foram combinados e aleatorizados por meio do projeto de experimento Box-Behnken considerando, como variáveis de resposta (saída), os parâmetros de rugosidade média (R_a) e média parcial (R_z) obtidos por interferometria. Foi utilizado um inserto de metal-duro sem revestimento nas condições de corte a seco e com mínima quantidade de lubrificante (MQL). Em todos os passes realizados com MQL, a vazão do fluido foi de 100 ml/h a uma pressão de 5 bar. Após a usinagem de cada amostra, a análise topográfica 3D da textura da superfície usinada e a avaliação qualitativa dos cavacos gerados foram efetuadas. Como resultado, para o torneamento da liga 6082-T6 com parâmetros otimizados ($v_c = 300$ m/min, $f = 0,05$ mm/rev e $a_p = 0,5$ mm), os menores valores de rugosidade obtidos foram $R_a = 0,29$ μm e $R_z = 1,52$ μm (ambos com MQL). Já no torneamento da liga 7075-T6, os parâmetros otimizados ($v_c = 300$ m/min, $f = 0,05$ mm/rev e $a_p = 1,4$ mm) geraram os menores valores de $R_a = 0,21$ μm e $R_z = 1,52$ μm no corte a seco. Em ambos os casos, a otimização dos parâmetros de corte minimizou a ocorrência de ranhuras (riscos) e rebarbas na superfície usinada, resultando em uma melhor qualidade da mesma. Já os cavacos gerados não apresentaram alterações geométricas significativas com a otimização.

Palavras-chave: Torneamento de acabamento; Ligas de alumínio 6082-T6 e 7075-T6; Mínima quantidade de lubrificante; Box-Behnken Design.

ABSTRACT

Finishing machining plays an important role when the surface is aluminum. Aluminum alloys have characteristics that make them, in specific applications, great substitutes for steel as well as lower specific weight; it can add good chemical, mechanical, and aesthetic characteristics to the final product. Particularities of these alloys, such as ductility, often make it hard to finish the surface obtained by turning (scratches and burrs). The choices of the cutting tool and parameters also influence the machined surface quality. Thus, we sought to determine the ideal combination of these cutting parameters (cutting speed v_c , feed rate f , depth of cut a_p) in the finishing turning of 6082-T6 and 7075-T6 aluminum alloys. These input control variables at three levels each were combined and randomized using the Box-Behnken Design of experiments. The output response variables (R_a and R_z roughness parameters) were obtained by interferometry. An uncoated carbide insert was used under dry and minimum quantity lubricant (MQL) cutting conditions. In all steps performed with MQL, the fluid flow rate was 100 ml/h at a pressure of 5 bar. After the machining of each sample, the 3D topographic analysis of the surface texture and the qualitative evaluation of the generated chips were performed. As a result, for the 6082-T6 alloy turning with optimized parameters ($v_c = 300$ m/min, $f = 0.05$ mm/rev, and $a_p = 0.5$ mm), the lowest roughness values obtained were $R_a = 0.29$ μm and $R_z = 1.52$ μm (both with MQL). In the 7075-T6 alloy turning, the optimized parameters ($v_c = 300$ m/min, $f = 0.05$ mm/rev, and $a_p = 1.4$ mm) generated the lowest values $R_a = 0.21$ μm and $R_z = 1.52$ μm in dry cutting. In both cases, the optimization of the cutting parameters minimized the occurrence of grooves (scratches) and burrs on the machined surface, resulting in better quality. The chips generated did not show significant geometric changes with the optimization.

Keywords: Finish turning; 6082-T6 and 7075-T6 aluminum alloy; Minimum quantity lubrication; Box-Behnken Design.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Objetivo Principal.....	3
1.2	Objetivos Secundários	3
1.3	Organização do Trabalho.....	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	Alumínio e suas Ligas	4
2.1.1	Ligas de Alumínio 6082-T6 e 7075-T6	6
2.2	Usinagem Ambientalmente Amigável	9
2.2.1	Usinagem a Seco.....	10
2.2.2	Usinagem com Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL)	11
2.3	Geração do Cavaco.....	12
2.3.1	Formas de Cavacos	14
2.4	Textura da Superfície Usinada	15
2.4.1	Rugosidade da Superfície	17
2.5	Projeto e Análise de Experimentos.....	19
2.5.1	Box-Behnken Design.....	20
2.5.2	Análise de Variância.....	21
2.5.3	Diagrama de Pareto.....	21
2.5.4	Coefficiente de Determinação.....	22
3	MATERIAIS E MÉTODOS	23
3.1	Materiais e Equipamentos	23
3.2	Procedimento Experimental	26
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	29
4.1	Rugosidade da Superfície Usinada	29
4.1.1	Rugosidade na Liga 6082-T6.....	31
4.1.2	Rugosidade na Liga 7075-T6.....	33
4.2	Topografia da Superfície Usinada	36
4.2.1	Topografia da Superfície no 6082-T6.....	36
4.2.2	Topografia da Superfície no 7075-T6.....	37
4.3	Cavacos.....	38

4.4	Otimização dos Parâmetros de Corte	39
4.4.1	Parâmetros Otimizados para o Torneamento do 6082-T6.....	40
4.4.2	Parâmetros Otimizados para o Torneamento do 7075-T6.....	43
5	CONCLUSÕES.....	48
5.1	Sugestões para Trabalhos Futuros	48
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49
	APÊNDICE A Valores de Rugosidade Medidos com o Rugosímetro	59
	APÊNDICE B ANOVA da Usinagem do 6082-T6.....	60
	APÊNDICE C ANOVA da Usinagem do 7075-T6	62
	APÊNDICE D Topografias das Superfícies Usinadas do 6082-T6	64
	APÊNDICE E Topografias das Superfícies Usinadas do 7075-T6	66
	APÊNDICE F Quadros dos Cavacos Gerados na Usinagem do 6082-T6	68
	APÊNDICE G Quadros dos Cavacos Gerados na Usinagem do 7075-T6	70

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Gráficos de superfície de contorno com $f = 0,15$ mm/rev.....	7
Figura 2.2	Valores de rugosidade obtidas no torneamento da liga 7075-T6 com a aplicação de diferentes meios lubrificantes.....	8
Figura 2.3	Direções possíveis de aplicação do fluido de corte.....	12
Figura 2.4	Mecanismo de formação de cavacos.....	13
Figura 2.5	Influência do avanço e da profundidade de corte na geometria do cavaco.....	14
Figura 2.6	Formas do cavaco.....	15
Figura 2.7	Sentido do cavaco.....	15
Figura 2.8	Perfil de superfície.....	16
Figura 2.9	Parâmetro de rugosidade R_a	18
Figura 2.10	Valores típicos de Rugosidade média R_a para vários processos de usinagem. ...	18
Figura 2.11	Parâmetro de rugosidade R_z	19
Figura 2.12	Projeto de BBD para três fatores.....	20
Figura 3.1	(a) Geometria dos corpos de prova (unidades em mm); (b) Torno CNC Mazak QTN 100-II.....	24
Figura 3.2	Inserto de metal-duro Iscar [®] modelo VCGT 160404-AS classe IC20.....	24
Figura 3.3	Equipamentos para medição e análise da rugosidade: (a) Interferômetro Bruker [®] ContourGT; (b) Rugosímetro Mitutoyo [®] modelo SJ-201P.....	25
Figura 3.4	Sistema MQL da Quimatic [®] /Tapmatic [®] : (a) Fluido para Serrar e Usinar Alumínio; (b) Nebulizador IV.....	25
Figura 3.5	Posição de aplicação do fluido de corte: (a) distância e ângulo do bico aspersor de MQL e a ferramenta; (b) visão frontal bocal do nebulizador/inserto.....	26
Figura 3.6	Câmera fotográfica Sony [®] DSC – H300.....	26
Figura 4.1	Comparação gráfica entre as rugosidades obtidas nas amostras torneadas das ligas 6082-T6 e 7075-T6.....	30
Figura 4.2	Gráficos de Pareto da usinagem do 6082-T6 realizado a seco e com MQL.....	32
Figura 4.3	Gráfico de contorno do torneamento do 6082-T6 realizado a seco e com MQL.....	33
Figura 4.4	Gráfico de Pareto da usinagem do 7075-T6 realizado a seco e com MQL.....	34
Figura 4.5	Gráfico de contorno do torneamento do 7075-T6 realizado a seco e com MQL.....	35
Figura 4.6	Topografia da superfície do 6082-T6 para valores extremos de R_a e R_z	36

Figura 4.7	Topografia da superfície do 7075-T6 para valores extremos de R_a e R_z	37
Figura 4.8	Comparação entre os dados observados e estimados para a liga 6082-T6.....	41
Figura 4.9	Quadro de topografias de superfície após as otimizações para 6082-T6.	42
Figura 4.10	Quadro das imagens dos cavacos gerados após as otimizações para 6082-T6.	43
Figura 4.11	Comparação entre os dados observados e estimados para a liga 7075-T6.....	44
Figura 4.12	Quadro de topografias de superfície após as otimizações para 7075-T6.	46
Figura 4.13	Quadro das imagens dos cavacos gerados após as otimizações para 7075-T6.	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Principais elementos de liga das séries de alumínio.	5
Tabela 2.2	Influência dos elementos de liga no alumínio.	6
Tabela 3.1	Composição química e dureza dos materiais dos corpos de prova (% em massa).	23
Tabela 3.2	Níveis dos parâmetros independentes de entrada.	27
Tabela 3.3	Sequência aleatória da matriz de combinações do planejamento Box Behnken.	27
Tabela 4.1	Valores de R_a e R_z obtidos com medição utilizando o interferômetro.	29
Tabela 4.2	Formas dos cavacos.	38
Tabela 4.3	Parâmetros otimizados para a usinagem do 6082-T6.	41
Tabela 4.4	Cavacos gerados na usinagem do 6082-T6 após otimização.	42
Tabela 4.5	Parâmetros otimizados para 7075-T6.	45
Tabela 4.6	Cavacos gerados na usinagem do 7075-T6 após otimização.	46
Tabela A.1	Valores de R_a e R_z obtidos com medição utilizando o rugosímetro.	59
Tabela B.1	ANOVA para valores de R_a na usinagem do 6082-T6 a seco.	60
Tabela B.2	ANOVA para valores de R_z na usinagem do 6082-T6 a seco.	60
Tabela B.3	ANOVA para valores de R_a na usinagem do 6082-T6 com MQL.	61
Tabela B.4	ANOVA para valores de R_z na usinagem do 6082-T6 com MQL.	61
Tabela C.1	ANOVA para valores de R_a na usinagem do 7075-T6 a seco.	62
Tabela C.2	ANOVA para valores de R_z na usinagem do 7075-T6 a seco.	62
Tabela C.3	ANOVA para valores de R_a na usinagem do 7075-T6 com MQL.	63
Tabela C.4	ANOVA para valores de R_z na usinagem do 7075-T6 com MQL.	63
Tabela D.1	Quadro da topografia da superfície usinada a seco na liga 6082-T6.	64
Tabela D.2	Quadro da topografia da superfície usinada com MQL na liga 6082-T6.	65
Tabela E.1	Quadro da topografia da superfície usinada a seco na liga 7075-T6.	66
Tabela E.2	Quadro da topografia da superfície usinada com MQL na liga 7075-T6.	67
Tabela F.1	Quadro mostrando o cavaco do torneamento a seco na liga 6082-T6.	68
Tabela F.2	Quadro mostrando o cavaco do torneamento com MQL na liga 6082-T6.	69
Tabela G.1	Quadro mostrando o cavaco do torneamento a seco na liga 7075-T6.	70
Tabela G.2	Quadro mostrando o cavaco do torneamento com MQL na liga 7075-T6.	71

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AA	<i>Aluminum Association, Inc</i>
ABAL	Associação Brasileira do Alumínio
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Al	Alumínio
BBD	<i>Box-Behnken Design</i>
Bi	Bismuto
Cr	Cromo
CRYO	Criogenia
Cu	Cobre
DOE	Projeto de experimento
DRY	Usinagem a seco
Fe	Ferro
GRA	<i>Grey Relational Analysis</i>
HPAJ	Jato de ar pressurizado
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
Mg	Magnésio
Mg ₂ Si	Silicato de magnésio
Mn	Manganês
MQL	Mínima quantidade de lubrificação
MSR	Metodologia de superfície de resposta
NBR	Norma Brasileira
NDM	Usinagem Quase-Seca
Ni	Níquel
Pb	Chumbo
RQL	Quantidade Reduzida de Lubrificante
Si	Silício
Sn	Estanho
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Zn	Zinco

LISTA DE SÍMBOLOS

a_p	Profundidade de corte, [mm]
f	Avanço de corte, [mm/rev]
F	Valor F calculado
GDL	Graus de liberdade
l_n	Comprimento de avaliação, [mm]
l_r	Comprimento de amostragem, [mm]
MQ	Média quadrada
Q	Taxa de remoção de material, [cm ³ /min]
R^2	Coefficiente de determinação, [%]
$R^2_{aj.}$	Coefficiente de determinação ajustado, [%]
R_a	Rugosidade média, [μm]
R_z	Rugosidade média parcial, [μm]
SQ	Soma dos quadrados
v_c	Velocidade de corte, [m/min]
ϕ	Ângulo de cisalhamento, [°]

1 INTRODUÇÃO

O alumínio (Al) é o terceiro metal mais abundante na crosta terrestre [Santos Jr. et al., 2016]. Ao final do século XIX, suas características físico-químicas já o tornavam um forte concorrente do aço nas indústrias [ABAL, 2017], principalmente em componentes automotivos, aeroespaciais, recipientes de armazenamentos e aplicações marítimas [Rajendra e Deepak, 2016]. Com densidade aproximada de apenas 1/3 da densidade do aço, o alumínio despertou a atenção do setor de transportes que sempre está em busca de novas soluções a fim de viabilizar operações de trabalho ou produção, pois a utilização do alumínio permite a diminuição do peso e, conseqüentemente, uma economia de combustível.

A usinagem representa uma parcela muito significativa dentre os processos de fabricação [Santos e Sales, 2007]. Dentre estes, tem-se o torneamento, responsável por grande parte da produção de perfis cilíndricos e cônicos produzidos pela indústria metal-mecânica.

Para uma aplicação do alumínio, é de suma importância que se tenham informações suficientes para seu processamento [Heinz et al., 2000; ABAL, 2017]. Sabe-se que parâmetros de entrada em um processo de torneamento estão diretamente ligados ao acabamento (textura e integridade) da superfície final gerada (parâmetro de saída), mas ao se buscar informações mais detalhadas sobre o torneamento de acabamento nas ligas de alumínio 6082-T6 e 7075-T6, depara-se com a falta de informações.

A importância de contribuir com o conhecimento científico no torneamento de acabamento das ligas 6082-T6 e 7075-T6 justifica-se pelo fato de a rugosidade da superfície usinada ser um critério de qualidade na avaliação de um produto. Os dois parâmetros de rugosidade mais utilizados nas indústrias são a rugosidade média (R_a) e a rugosidade média parcial (R_z) [Horváth e Drégelyi-Kiss, 2015]. A obtenção de baixos valores de rugosidade nas ligas de alumínio 6082-T6 e 7075-T6 é motivada por haver aplicações principalmente nas indústrias de transporte, onde a condição de trabalho é afetada pela textura do componente.

Na busca de baixos valores de R_a e R_z ao torneiar ligas de alumínio, percebe-se uma grande dificuldade no controle do cavaco. Este tende a ser do tipo longo ou emaranhado, que dificulta o cisalhamento e, conseqüentemente, prejudica a qualidade da superfície da peça.

A fim de se obterem resultados satisfatórios de acabamento em usinagem, recomenda-se uma seleção adequada de parâmetros de entrada combinada, se possível, com o corte a seco. Conforme Pattnaik et al., 2018, o corte a seco é sempre aconselhável no torneamento de alumínio, pois agrega características favoráveis como menor custo, não polui a atmosfera e não é prejudicial à saúde.

Entretanto, o uso de fluidos de corte é comum na usinagem, encarecendo o processo e deixando um legado ambiental prejudicial quando uma técnica ambientalmente amigável não é selecionada. Porém, segundo Trent e Wright, 2000, há também pontos positivos da sua utilização nas operações de corte; esse fluido auxilia na formação do cavaco, evita o aquecimento excessivo na zona de corte, impede distorções na peça, diminui o coeficiente de atrito nas interfaces cavaco-ferramenta e ferramenta-peça, e aumenta a vida útil da ferramenta.

Dependendo do processo, o uso reduzido (RQL) ou mínimo (MQL) de fluido de corte¹ é considerado um passo intermediário importante sob o ponto de vista ambiental, além de promover as características positivas geradas pela aplicação por métodos tradicionais (isto é, em abundância) [Çakır et al., 2009; Moreira, 2012].

A execução de experimentos a fim de obter as melhores superfícies usinadas acarreta em um número muito elevado de testes. Para contornar este problema, o Projeto de Experimento (DOE) é altamente utilizado em estudos para otimização de processos, pois diminui o número de testes e auxilia na interpretação da influência dos fatores independentes de um processo sobre os fatores dependentes [Horváth e Drégelyi-Kiss, 2015; Madhavi et al., 2017].

Como as variáveis de resposta (p. ex. rugosidade) no torneamento de acabamento são influenciadas por diversas variáveis controláveis de entrada (velocidade de corte v_c , avanço f , profundidade de corte a_p , meio lubrificante etc.), diferentes técnicas matemáticas e estatísticas podem ser utilizadas como ferramenta de análise – uma delas é a Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) [Montgomery, 1991]. O projeto de experimentos Box-Behnken (BBD), usado na MSR, possibilita estruturar as combinações de três ou mais fatores controláveis em três níveis cada com objetivo de identificar as influências destes sobre a variável de resposta de determinado processo e, assim, otimizá-lo. Segundo Ferreira et al., 2007, este método de otimização estatística necessita de um número reduzido de combinações de fatores, ocasionando em gasto mínimo de tempo e recursos necessários para sua aplicação.

Problemas de otimização devem ser interpretados como a busca por valores de variáveis que resultam na minimização ou maximização de determinadas funções dentro de um domínio, definido através de restrições tecnológicas, físicas ou normativas [Lobato, 2008]. Nem sempre o ótimo é alcançado, embora seja sempre uma meta para melhorar resultados já existentes.

¹ NDM (Usinagem Quase-Seca) engloba aplicações com vazões menores que 0,05 l/h; MQL (Mínima Quantidade de Lubrificante) compreende vazões entre 0,05 e 0,5 l/h; RQL (Quantidade Reduzida de Lubrificante) abrange vazões entre 0,5 e 5 l/h [Souza et al., 2016].

Com base no que foi apresentado, este trabalho busca enriquecer o conhecimento científico referente ao torneamento de acabamento das ligas de alumínio 6082-T6 e 7075-T6 (tendo em vista a falta de trabalhos publicados nesta área) com o intuito de determinar valores de otimização para esse processo sob as condições de corte a seco e com MQL.

1.1 Objetivo Principal

Otimizar, através do BBD, os parâmetros de corte (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte) do processo de torneamento a seco e com MQL das ligas de alumínio 6082-T6 e 7075-T6 visando obter valores mínimos de rugosidade R_a e R_z .

1.2 Objetivos Secundários

- Investigar os aspectos topográficos 3D da superfície torneada das ligas 6082-T6 e 7075-T6 a fim de verificar em quais condições de corte o processo demonstra-se estável.
- Classificar o cavaco gerado no processo em relação ao seu tipo, assim como identificar os conjuntos de variáveis de entrada que possam propiciar uma quebra e formação de um cavaco satisfatório para o processo de torneamento das ligas 6082-T6 e 7075-T6.

1.3 Organização do Trabalho

O trabalho está disposto em capítulos, conforme descrição a seguir.

- Capítulo 1. Introdução e apresentação do tema expondo sua relevância juntamente com os objetivos propostos.
- Capítulo 2. Revisão da literatura específica, expondo informações relevantes ao desenvolvimento deste trabalho, assim como informações de trabalhos que o precedem.
- Capítulo 3. Materiais e métodos citados, detalhados e utilizados para a realização do experimento, coleta de dados e análise dos mesmos.
- Capítulo 4. Resultados obtidos apresentados por meio de análise estatística, comparando assim os métodos a seco e com MQL no torneamento das ligas 6082-T6 e 7075-T6. A influência das variáveis entrada sobre as de saída é ressaltada. Modelos de otimização para o torneamento das duas ligas usadas neste trabalho também são expostos.
- Capítulo 5. Conclusões do estudo são apresentadas de forma objetiva, assim como sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentadas algumas informações teóricas que servem como referencial teórico para o trabalho realizado: São elas: (i) alumínio e suas ligas, (ii) usinagem ambientalmente amigável, (iii) geração do cavaco, (iv) textura da superfície usinada, e (v) projeto e análise de experimentos.

2.1 Alumínio e suas Ligas

O alumínio e suas ligas possuem grande versatilidade de aplicações. Isto se deve às suas boas propriedades físicas e químicas, baixa densidade quando comparada ao aço, resistência à corrosão e aparência (quando a questão estética é relevante) [ASM Handbook, 1990].

Ainda no seu estágio de produção, o alumínio encontra-se no estado fundido, tendo a capacidade de dissolver outros metais e substâncias metalóides que podem ser adicionados. Uma das principais funções das ligas de alumínio é aumentar sua resistência mecânica sem que as outras propriedades sejam prejudicadas [ABAL, 2017].

O alumínio puro (Al) possui propriedades mecânicas relativamente baixas, que são melhoradas adicionando outros elementos como cobre (Cu), manganês (Mn), silício (Si), magnésio (Mg), zinco (Zn) etc. formando assim as ligas de alumínio [Deepak e Rajendra, 2016].

A classificação do alumínio e suas ligas é baseada no sistema proposto pela *Aluminum Association, Inc. (AA)* com título denominado de *Aluminium and aluminium alloys – Chemical Composition*. Baseado neste sistema de classificação, inicialmente no Brasil ela foi reproduzida pela ABNT através da norma NBR ISO 6834, 2006, mais tarde atualizada pela atual NBR ISO 209, 2010, que estabelece a classificação da composição química destes, sendo a classificação subdividida nos grupos de ligas fundidas e ligas trabalháveis [Vicentini, 2013].

De acordo com Almeida, 2015 e Bonfitto, 2016, quatro dígitos designam as ligas de alumínio conforme Tabela 2.1. O primeiro dígito corresponde ao principal elemento de adição na liga (exceto o 1xxx que indica o alumínio puro ou não ligado). O segundo dígito, se igual a zero, indica que as impurezas presentes são naturais do processo de fabricação; se diferente de zero, indica apenas alguma alteração de elemento de liga. O terceiro e quarto dígitos não possuem nenhuma relevância especial; porém, servem para identificar as diferentes ligas de alumínio dentro do mesmo grupo.

Tabela 2.1 – Principais elementos de liga das séries de alumínio [NBR ISO 6834, 2006].

Série	Principal Elemento de Liga
1xxx	Alumínio \geq 99%
2xxx	Cobre
3xxx	Manganês
4xxx	Silício
5xxx	Magnésio
6xxx	Magnésio / Silício
7xxx	Zinco
8xxx	Outros elementos

De acordo com Santos e Sales, 2007, a usinabilidade pode ser associada com a facilidade ou a dificuldade de usinar determinado material. Para saber o quanto um material é de fácil usinagem em comparação com outro, alguns pontos devem ser observados, como:

- tipo e forma do cavaco;
- máxima taxa de remoção de material;
- força e potência de usinagem necessárias;
- temperatura de corte;
- vida da ferramenta;
- propriedades físicas ou mecânicas dos materiais;
- integridade superficial da peça usinada;
- formação de rebarbas;
- estabilidade química e metalúrgica do material da peça.

Segundo Trent e Wright, 2000, o alumínio engloba características que o classificariam como um material de boa usinabilidade. Isto se deve ao fato de que alguns fatores favorecem a usinagem desse material como o baixo ponto de fusão (baixa temperatura gerada na usinagem).

Porém, Diniz et al., 2013, ressaltam que se o alumínio e suas ligas forem avaliados com critérios de usinabilidade baseados na rugosidade da peça e na característica do cavaco gerado, pode-se dizer que este material não possui boa usinabilidade. Isto se deve ao fato de que, em condições normais, a rugosidade da superfície usinada não é satisfatória, somado ao fato de o cavaco formado ser longo.

Na Tabela 2.2 observa-se como os principais elementos de liga adicionados no alumínio influenciam na sua usinabilidade.

Tabela 2.2 – Influência dos elementos de liga no alumínio [Diniz et al., 2013].

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

2.1.1 Ligas de Alumínio 6082-T6 e 7075-T6

A liga de alumínio 6082-T6 pertence a série 6xxx (os elementos principais são Mg e Si). Nas proporções requeridas destes dois elementos forma-se o silicato de magnésio (Mg_2Si), possibilitando a realização de tratamento térmico nesta liga. Conforme Gonçalves e Silva, 2013, o teor de Si normalmente aumenta a abrasividade do material, enquanto o Mg aumenta a resistência mecânica sem diminuir a ductilidade. Segundo Barletta et al., 2006, dentre as ligas da série 6xxx, a liga 6082-T6 se destaca pela extensa difusão comercial oriundas de suas propriedades mecânicas (as quais são citadas por Ruan et al., 2012, como sendo boa ductilidade, boa resistência à corrosão, boa soldabilidade e boa usinabilidade).

O sufixo T na liga 6082-T6 indica que o metal passou por tratamentos térmicos para que sua resistência fosse melhorada. A nomenclatura T6, mais especificamente, refere-se a produtos solubilizados e envelhecidos artificialmente [ABAL, 2017].

Garcia et al., 2019, estudaram a otimização dos parâmetros de corte no torneamento de acabamento a seco e com RQL (vazão de 1,0 l/h e pressão de 500 kPa) da liga 6082-T6. Foram considerados três níveis de velocidade de corte ($v_c = 300, 600, 900$ m/min), três de avanço ($f = 0,05, 0,15, 0,25$ mm/rev) e três de profundidade de corte ($a_p = 0,5, 1,25, 2,0$ mm). Após a otimização por Box-Behnken Design (BBD), concluiu-se que a combinação dos de parâmetros para a obtenção da menor rugosidade no torneamento a seco ($R_a = 0,44$ μ m e $R_z = 2,73$ μ m) foi $v_c = 851$ m/min, $f = 0,07$ mm/rev e $a_p = 2$ mm. Quando utilizado RQL ($R_a = 0,18$ μ m e $R_z = 0,96$ μ m), os parâmetros otimizados foram $v_c = 403$ m/min, $f = 0,05$ mm/rev e $a_p = 0,5$ mm. A Figura 2.1 mostra os gráficos de superfície apresentados pelos autores.

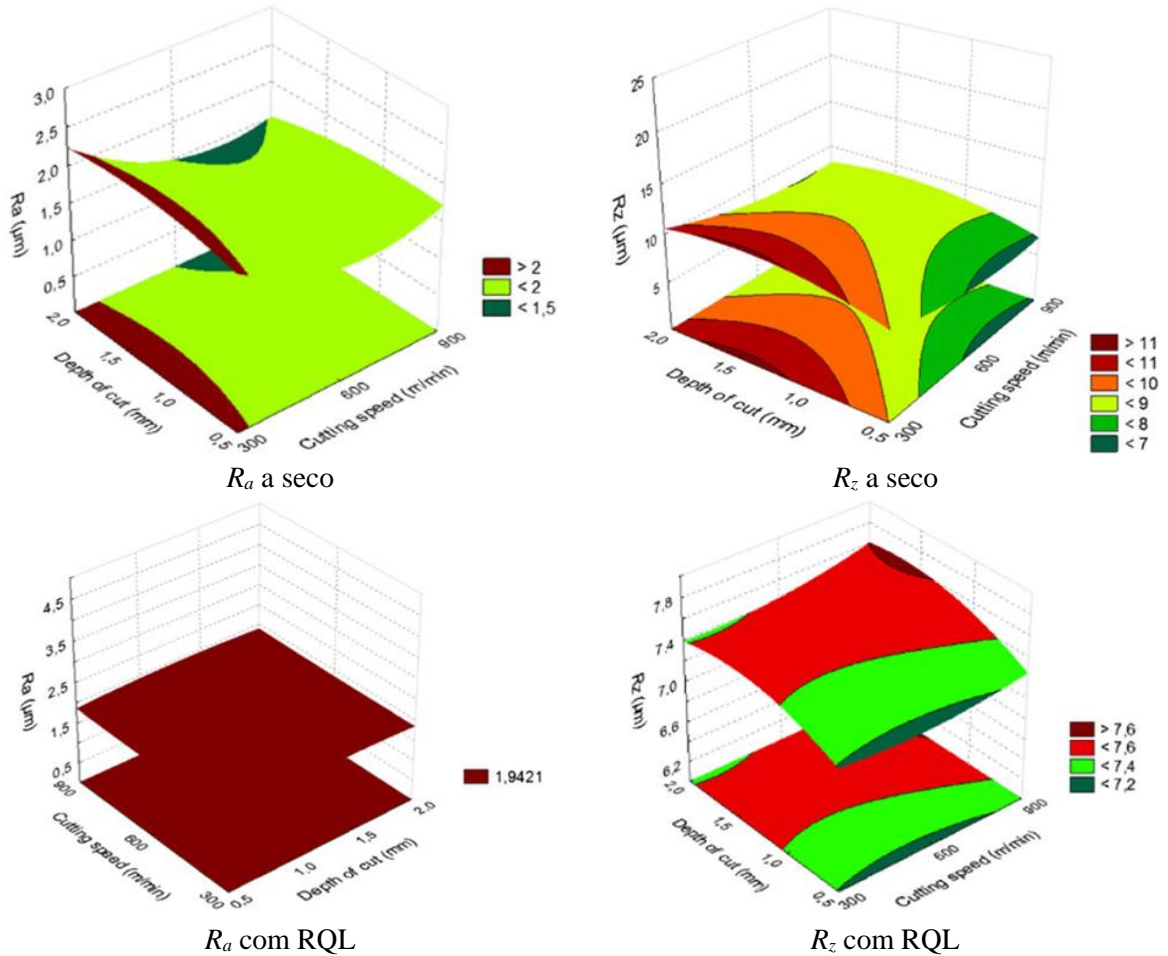


Figura 2.1 – Gráficos de superfície de contorno com $f = 0,15$ mm/rev [Garcia et al., 2019].

No corte a seco, tem-se uma grande região central do gráfico em que variações em v_c e a_p não alteram significativamente a rugosidade R_a . Para R_z , à medida em que a v_c e a_p aumentam, há uma tendência para que R_a diminua, visto que maior v_c contribui para o direcionamento do cavaco para longe da zona de corte, evitando que este enrole na peça e consequentemente risque-a. Para a condição com RQL, v_c e a_p não afetaram o valor de R_a (resultados semelhantes foram obtidos para R_z). A aplicação do fluido contribuiu para a expulsão do cavaco [Oliveira e Alves, 2007], o que tornou v_c menos responsável por esta tarefa (logo, menos significativa).

Após uma pesquisa em trabalhos publicados nos últimos anos constatou-se uma gama de trabalhos publicados desenvolvendo o conhecimento científico sobre a liga 6082-T6, porém em sua grande maioria oriundos do processo de soldagem. Visto esta lacuna de conhecimento sobre o torneamento desta liga, acredita-se que este trabalho possa somar ao aumento do conhecimento para melhorar a usinagem e aplicação desta liga.

A liga de alumínio 7075-T6 pertence a série 7xxx, tendo como elemento de liga principal o Zn, que por si só não exerce influência apreciável na microestrutura da liga. Porém

a adição de elementos como Mg, Cu e Cr permite-se a obtenção de uma liga endurecida por precipitação. Conforme Oliveira, 2015, quando acrescentado Mg a esta liga, tem-se como resultado uma liga termicamente tratável, com tenacidade e resistência mecânica elevada. A adição de 1 a 2% de Cu aumenta as propriedades de resistência da liga; já o Cr melhora a resistência à corrosão sob tensão da liga. Estas são denominadas ligas “tratáveis” termicamente com resistência mecânica equivalente à do aço estrutural [ABAL, 2017].

Dentre todas as ligas de alumínio, a 7075 é a que possui maior resistência mecânica. O tratamento térmico T6 (solubilizado e envelhecido artificialmente) lhe confere uma resistência à tração de 572 MPa, valor muito além de alguns aços doces ($< 0,15\% C$) [Vázquez et al., 2019]. Por isso, essa liga é utilizada em estruturas sob altas tensões, com aplicações em engrenagens, eixos, peças aeronáuticas e aeroespaciais [Oliveira, 2015; Singh et al., 2019].

Rotella, 2019, estudou de que maneira os valores de rugosidade R_a e R_z são afetados pelos diferentes meios lubrificadorres aplicados no torneamento da liga 7075-T6. O material foi ensaiado com três diferentes velocidades de corte ($v_c = 90, 120, 150$ m/min) mantendo avanço e profundidade de corte fixos (respectivamente $f = 0,15$ mm/rev e $a_p = 0,05$ mm). Os ensaios utilizaram corte a seco (DRY), criogenia (CRYO com 1200 kPa, sem especificação do gás utilizado), mínima quantidade de lubrificante (MQL com 60 ml/h e 700 kPa) e jato de ar pressurizado (HAPAJ com 700 kPa). O autor concluiu que a CRYO proporcionou os menores valores de rugosidade, como mostra a Figura 2.2, pois o resfriamento criogênico auxilia o processo de cisalhamento durante o corte. A aplicação de criogenia pode resultar em uma reorientação da microestrutura entre os planos do material, como resultado tem-se uma orientação mais propícia para o escorregamento dos planos.

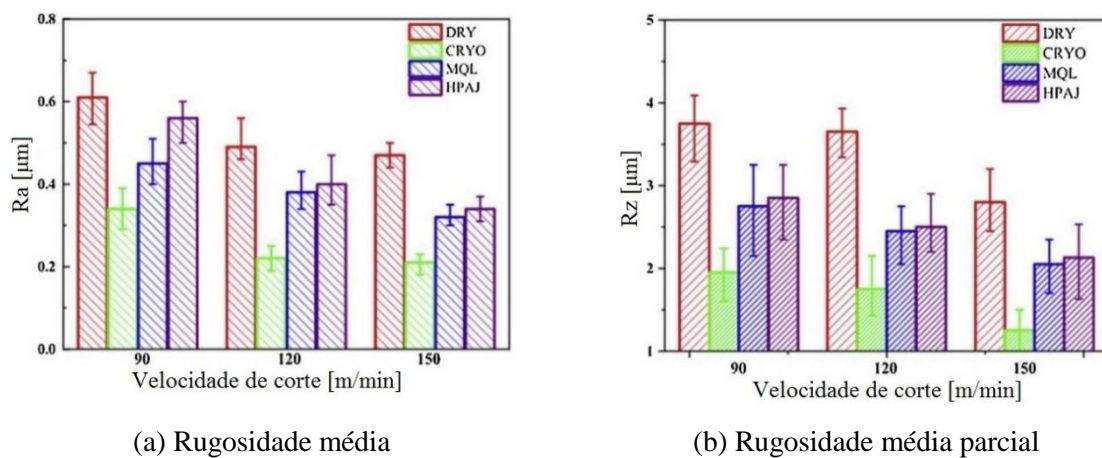


Figura 2.2 – Valores de rugosidade obtidas no torneamento da liga 7075-T6 com a aplicação de diferentes meios lubrificadorres [Adaptado de Rotella, 2019].

Rayakar et al., 2015, utilizaram *Grey Relational Analysis* (GRA) para estudar o torneamento da liga 7075-T6. As condições de corte a seco e com fluido abundante foram ensaiadas, além da utilização de insertos com e sem revestimento. Concluíram que a condição a seco utilizando ferramenta sem revestimento proporcionou os menores valores de rugosidade. O menor valor encontrado foi $R_a = 0,29 \mu\text{m}$ aplicando $v_c = 200 \text{ m/min}$, $f = 0,1 \text{ mm/rev}$ e $a_p = 1 \text{ mm}$. Pelos dados apresentados por Rayakar et al., 2015, deduz-se que quando utilizado o inserto com revestimento PVD de AlTiN ocorreu uma afinidade química entre o inserto e a peça, auxiliando o aumento de rugosidade nos experimentos.

Rao e Allamrajub, 2017, avaliaram a microdureza, a tensão residual e a rugosidade gerada no torneamento a seco da liga 7075-T6. Durante o estudo, foram ensaiados valores de $v_c = 50 \sim 300 \text{ m/min}$ e $a_p = 0,3 \sim 0,9 \text{ mm}$ com avanço fixo ($f = 0,05 \text{ mm/rev}$). Como resultado, os menores valores de rugosidade observados foram $R_a = 0,57 \mu\text{m}$ e $R_z = 3,19 \mu\text{m}$ para os menores níveis de v_c (50 m/min) e a_p (0,3 mm). Isto se deve ao fato de que, quando v_c e a_p eram aumentados, a microdureza diminuía devido ao efeito da geração e dissipação de calor sobre a superfície usinada, dificultando assim a obtenção de uma superfície menos rugosa.

2.2 Usinagem Ambientalmente Amigável

A usinagem envolve a ação de corte na separação do cavaco da peça usinada, resultando no atrito nas interfaces cavaco-ferramenta e ferramenta-peça. Conforme Kilic e Raman, 2007, é de suma importância olhar atentamente para este atrito gerado, uma vez que isso afeta a escolha da ferramenta, dos parâmetros de corte, e do uso ou não de algum fluido de corte.

Tem-se como comum o uso de fluidos de corte na usinagem. O seu emprego se justifica porque melhora os aspectos tribológicos, diminui o atrito na zona de corte, aumenta a vida da ferramenta, minimiza a geração de calor durante o processo e auxilia na remoção dos cavacos – aprimora a eficiência do sistema como um todo [Oliveira e Alves, 2007].

O alumínio e suas ligas têm baixa dureza e baixo ponto de fusão quando comparado à maioria dos aços, o que possibilita que seja usinado sem a necessidade de uso de fluido de corte em abundância, visto que altos esforços e altas temperaturas não são gerados durante o corte, respectivamente. Sendo assim, técnicas de aplicação de fluido de corte com vazões menores ou até mesmo o corte a seco passam a ganhar espaço no torneamento do alumínio, pois geram uma redução nos custos de produção e de descarte do fluido.

Além disso, indústrias do setor metal mecânico atualmente recebem cobranças para se adequarem e cumprirem as normas regidas por legislações ambientais. Para que possam

cumprir tais exigências, tais empresas buscam a fabricação sustentável [Nur et al., 2015]. De acordo com Dixit et al., 2012, a usinagem ambientalmente amigável está incluída no conceito de fabricação sustentável; porém, sustentabilidade é um termo abrangente. Como descrito por Mikhailova, 2014, sustentabilidade é a capacidade de se sustentar, de se manter. Benerjee, 2002, cita que sustentabilidade considera a conciliação do crescimento econômico com a manutenção do meio ambiente, além de um foco na justiça social e no desenvolvimento humano, assim como a distribuição e a utilização equilibrada de recursos com um sistema de igualdade social.

2.2.1 Usinagem a Seco

Parte da indústria metal mecânica usa a fabricação sustentável como uma diretriz importante na sua produção e desenvolvimento de novas tecnologias [Liang et al., 2019]. Conforme Krolczyk et al., 2017, a meta em tornar um processo mais limpo não implica necessariamente em maiores investimentos. A usinagem a seco pode ser um exemplo disso.

A usinagem a seco é o principal objetivo ecológico. Porém, isto não é possível para todas as operações. A dificuldade do corte a seco do alumínio não se relaciona ao seu grau de dureza ou aos esforços gerados no processo de corte. Parte do problema enfrentado no torneamento a seco de ligas de alumínio é proveniente das características físicas do material (baixo ponto de fusão e alta condutividade térmica) que podem causar empenamento quando a peça tiver baixo diâmetro. Outro problema enfrentado ocorre na formação e na expulsão do cavaco gerado, podendo este se enroscar na peça e afetar a qualidade da superfície do material.

Durante o torneamento, principalmente no corte a seco, o calor gerado no processo de deformação do cavaco provoca o seu amolecimento, facilitando o corte em materiais com dureza elevada [Machado, 2009]. Em materiais dúcteis como o caso do alumínio, prefere-se que este efeito não ocorra, pois conforme Zeilmann et al., 2010, o aumento de temperatura pode resultar na formação de cavacos em formas indesejadas, dificultando a remoção dos mesmos.

Pesquisas do setor de usinagem têm focado seu trabalho para melhorar as condições econômicas e ecológicas dos processos. Os fluidos de corte convencionais não apenas têm restrições ambientais e de saúde, mas também são caros devido às normas rígidas de descarte. Assim, o corte a seco nos processos de usinagem é preferível sempre que possível porque, por menor que seja o descarte de fluidos de corte, eles impõem uma ameaça ao meio ambiente por serem nocivos e não biodegradáveis em grande parte dos casos [Sharif et al., 2016].

2.2.2 Usinagem com Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL)

Além da questão ambiental, a aplicação de fluido de corte em abundância torna-se ineficaz em altas velocidades de corte, devido ao fato de o fluido não alcançar as áreas de calor críticas, isto porque a alta rotação da peça inibe a atuação eficaz do fluido na interface cavaco-ferramenta [Sharma et al., 2015; Paul et al., 2000]. Assim, a usinagem com mínima quantidade de lubrificante (MQL) surge como uma alternativa para atingir o objetivo desejado, pois é muito difícil eliminar por completo o emprego de fluidos de corte em determinadas aplicações [Machado et al., 2009]. Logo, o seu uso em quantidades reduzidas é considerado como um passo intermediário [Moreira, 2012].

O progresso na aplicação de MQL e do corte a seco é relativamente lento devido à falta de pensamento tribológico de especialistas [Astakhov, 2007]. No entanto, para as empresas, os custos relacionados aos fluidos de corte representam uma grande parcela do custo total de usinagem que, com a consequente necessidade de diminuição e/ou eliminação do uso dos mesmos, acabam por incentivar a aplicação de MQL [Dhar et al., 2006].

Junto com o surgimento e migração cada vez maior para técnicas de usinagem sustentáveis, não há uma padronização no que diz respeito a nomenclatura e faixas de vazão durante o processo de corte. Como exemplo tem-se a aplicação de MQL em trabalho compreendendo faixas de vazão de 10 a 100 ml/h [Pereira et al., 2015], 30 a 100 ml/h [Sharma et al., 2016], 5 a 200 ml/h [Stephenson e Agapiou, 2016], 50 a 250 ml/h [Chetan et al., 2018], entre outros. Por outro lado, alguns autores delimitam de modo mais claro a vazão para cada sistema de lubrificação. Souza et al., 2016, e Telles, 2018, adotam a faixa de vazão de 50 a 500 ml/h para MQL, padrão este que será utilizado neste trabalho.

A usinagem com MQL é um processo de fabricação ambientalmente amigável que usa quantidades muito pequenas de fluidos de corte [Kardekar, 2005]. Esta técnica consiste na atomização de uma quantidade mínima de óleo, na zona de corte, geralmente conduzida por um jato de ar comprimido [Teixeira Filho, 2006]. Conforme citado por Liew, 2004, para ser capaz de formar um filme lubrificante, o fluido de corte deve penetrar na interface cavaco-ferramenta, mas não precisa necessariamente fazer isto no estado líquido. Lubrificantes também podem cumprir satisfatoriamente essa tarefa no estado de gasoso ou de vapores.

O MQL pode ser aplicado em diferentes direções. Embora não exista um consenso em relação à melhor direção de aplicação do fluido de corte, na Figura 2.3 observam-se as três direções viáveis para o processo de corte, pois segundo Bertoncini, 2007, são esses os locais onde se concentram as fontes geradoras de calor na zona de corte.

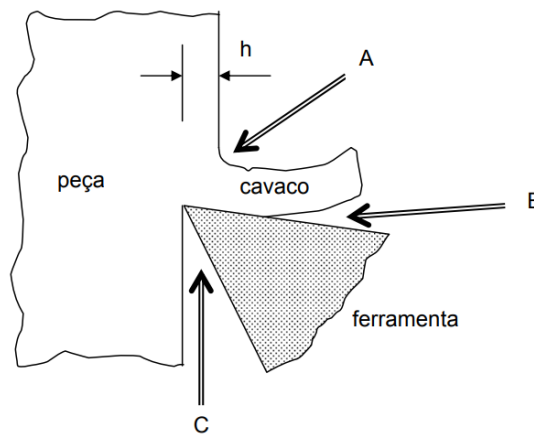


Figura 2.3 – Direções possíveis de aplicação do fluido de corte [Machado et al., 2009].

A direção A é a mais tradicional, citando ainda que esta posição pode ser prejudicada caso sejam produzidos cavacos emaranhados, pois estes prejudicam o acesso do fluido à interface ferramenta/cavaco [Machado et al., 2009]. Assim, a direção A procura atingir a zona de cisalhamento primária, acessível somente pelas costas do cavaco [Bertoncini, 2007]. Dixit et al., 2012, ainda cita que esta é a posição mais propícia em favorecer o enrolamento do cavaco, pois enquanto a parte inferior do cavaco aumenta sua temperatura (dilata) a sua parte superior é resfriada (encrua) ocasionando no enrolamento do cavaco. A direção B aponta para a interface cavaco-ferramenta nas imediações da zona de cisalhamento secundária, ajudando assim a remover seu calor gerado [Bertoncini, 2007; Dixit et al., 2012]. Esta direção apresenta a desvantagem de aplicação do fluido no sentido contrário ao do cavaco, sendo eficiente apenas para aplicações de fluido sob elevada pressão [Machado et al., 2009]. Já a direção C é a de maior dificuldade de aplicação, porém fica relativamente protegida de uma colisão com os cavacos. Machado et al., 2009, cita que esta posição tende a reduzir o desgaste de flanco da ferramenta de corte, contribuindo assim para melhora da superfície usinada.

O uso de MQL implica em várias vantagens, como redução do uso de fungicidas e biocidas, redução do volume total de fluido gasto, economia de tempo com limpeza das peças ao final do processo, menor manutenção do fluido, além de não necessitar de sistemas de circulação e filtragem do fluido [Klocke et al., 2000]. Logo, tem-se uma redução direta no custo do processo – uma das principais vantagens da sua utilização [Tawakoli et al., 2011].

2.3 Geração do Cavaco

O material removido de uma peça durante o processo de usinagem é definido como cavaco. No torneamento, a formação de cavaco se dá por cisalhamento imposto por uma

ferramenta de geometria definida [Shaw, 2005; Santos e Sales, 2007]. A formação do cavaco influencia diversos fatores como desgaste da ferramenta, esforços de corte, calor gerado na usinagem, penetração do fluido de corte, etc. [Diniz et al., 2013]. Em geral, a formação do cavaco nas condições normais de usinagem se processa da seguinte forma [Ferraresi, 1995; Machado et al., 2009; Diniz et al., 2013]:

- Uma pequena porção de material (ainda unida a peça) é recalcada contra a superfície de saída da ferramenta devido à penetração da ferramenta na peça.
- A deformação plástica resultante dessa penetração aumenta progressivamente até que as tensões de cisalhamento se tornem suficientemente grandes a ponto de iniciar um deslizamento entre a porção de material recalcada e a peça. A Figura 2.4 mostra os planos instantâneos de ruptura e de propagação de trincas chamada de zona de cisalhamento primária. Esta zona é definida pelo ângulo de cisalhamento (ϕ) formado entre o plano de cisalhamento e a direção da velocidade de corte (v_c).

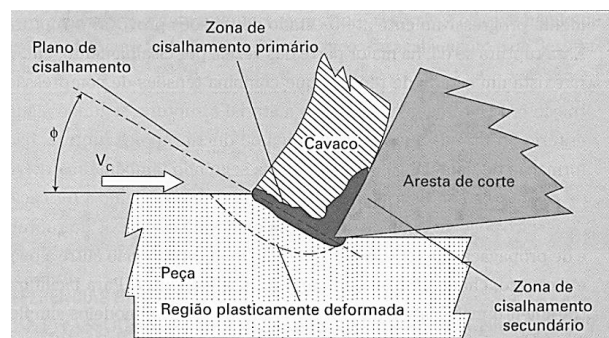


Figura 2.4 – Mecanismo de formação de cavacos [Machado et al., 2009].

- Continuando a penetração, haverá uma ruptura parcial ou completa do material na região de cisalhamento, dependendo naturalmente da ductilidade do material e das condições de usinagem. Conforme Schuitek, 1997, por possuir uma capacidade de deformação maior que os materiais frágeis, o alumínio faz com que essa ruptura aconteça imediatamente à frente da aresta de corte da ferramenta.
- Devido ao movimento relativo ferramenta/peça, inicia-se o escorregamento da porção deformada e rompida de material (cavaco) sobre a superfície de saída da ferramenta.

Os estudos sobre geração de cavaco nos processos de usinagem não são recentes; porém, suas aplicações são diretamente ligadas com o avanço de novas tecnologias. Smith, 1989, já relacionava a profundidade de corte (a_p) e o avanço (f) com a forma da seção do cavaco (largura

b e espessura h , respectivamente) conforme mostra a Figura 2.5. De modo geral, cavacos longos causam maiores transtornos quanto à qualidade da superfície usinada.

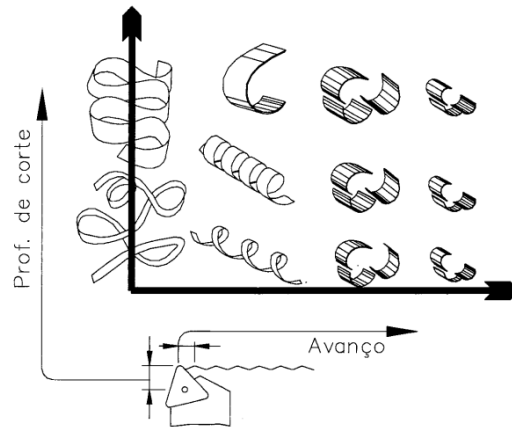


Figura 2.5 – Influência do avanço e da profundidade de corte na geometria do cavaco [Smith, 1989].

Como o tipo resultante de cavaco depende principalmente do grau de ductilidade do material usinado, cavacos contínuos são gerados basicamente em materiais dúcteis. Para as ligas de alumínio, quando não se utilizam meios para alteração do tipo de cavacos, são esperados cavacos longos e contínuos, pois sua ductilidade dificulta a quebra [Schuitek, 1997].

2.3.1 Formas de Cavacos

A norma NBR ISO 3685, 2017, classifica o cavaco formado de acordo com seu tipo e forma em um sistema de codificação numérica para os tipos de cavacos comumente observados, conforme Figura 2.6. A norma cita ainda que um terceiro dígito é adicionado para designar tanto o sentido em que flui o cavaco ^(a) ou o modo de quebra do mesmo ^(b).

- ^(a) O sentido de cavaco é caracterizado pelo terceiro dígito conforme os itens a seguir e esquematizado o pela Figura 2.7a.
 - 1 Longe da peça e na direção do movimento de avanço.
 - 2 No sentido da peça e na direção do movimento de avanço.
 - 3 No sentido da peça e oposto à direção do movimento de avanço
 - 4 Longe da peça e oposto à direção do movimento de avanço.
- ^(b) O modo de quebra (subdivisão adicional) é representado pelo terceiro dígito de acordo com os itens que se seguem e ilustrado pela Figura 2.7b.
 - 5 Quebrado contra a superfície transitória.

- 6 Quebrado contra a superfície de flanco.
- 7 Quebrado contra a superfície de trabalho.
- 8 Quebrado contra a superfície usinada.

1 Cavaco em fita ^a	2 Cavaco tubular ^a	3 Cavaco tipo espiral	4 Cavaco tipo anéis helicoidais ^a	5 Cavaco tipo cônico helicoidal ^a	6 Cavaco em arco ^b	7 Cavaco fragmentado	8 Cavaco agulha
1.1 Longo	2.1 Longo	3.1 Plano	4.1 Longo	5.1 Longo	6.1 Conectado		
1.2 Curto	2.2 Curto	3.2 Cônico	4.2 Curto	5.2 Curto	6.2 Desconectado (vírgula)		
1.3 Emaranhado	2.3 Emaranhado		4.3 Curto	5.3 Curto			

Figura 2.6 – Formas do cavaco [NBR ISO 3685, 2017].

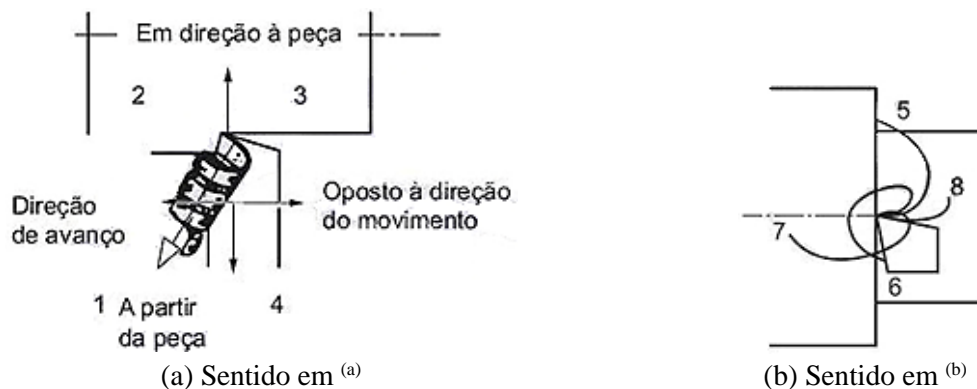


Figura 2.7 – Sentido do cavaco [NBR ISO 3685, 2017].

2.4 Textura da Superfície Usinada

De acordo com Machado et al., 2009, o acabamento de uma superfície usinada é a combinação de vários fatores que são divididos em rugosidade, ondulações, marcas e falhas. Ondulações consistem de irregularidades superficiais ou erros geométricos cujos espaçamentos

são maiores que as irregularidades consideradas rugosidades. Já marcas e falhas são interrupções não intencionais, inesperadas e indesejáveis na topografia típica de uma superfície.

A rugosidade da superfície usinada é um critério comum para acabamento em processos de torneamento [NBR ISO 3685, 2017]. Normalmente, ondulações e falhas devem ser evitadas, pois representam um erro do processo. A rugosidade, por sua vez, é um parâmetro especificado de acordo com a aplicação da superfície [Machado et al., 2009]. O torneamento costuma gerar superfícies danificadas nos componentes fabricados devido à remoção de material da peça ocorrer por cisalhamento [Santos e Sales, 2017]. Portanto, para Bordinassi, 2006, a escolha correta dos parâmetros de corte é essencial para se obter superfícies com qualidades desejadas.

Para mensurar quantitativamente esta rugosidade, é necessário analisar o perfil da superfície. Usualmente, o perfil a ser medido é aquele que se encontra perpendicular às ranhuras da superfície, como mostra a Figura 2.8 [NBR ISO 4287, 2002].

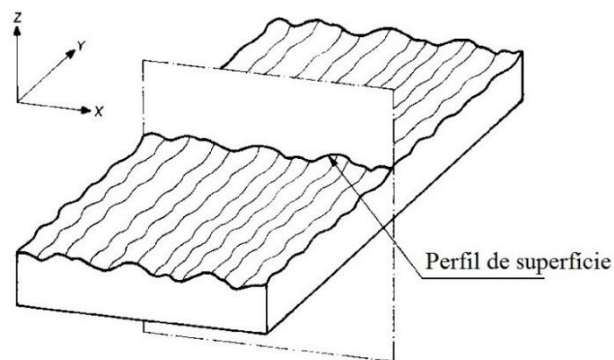


Figura 2.8 – Perfil de superfície [NBR ISO 4287, 2002].

Conforme Machado et al., 2009, a rugosidade é afetada por um elevado número de variáveis e é avaliada por diferentes parâmetros classificados em:

- Parâmetros de amplitude: alturas dos picos, profundidades dos vales ou ambos, sem considerar o espaçamento entre as irregularidades ao longo da superfície.
- Parâmetros de espaço: espaçamento do desvio do perfil ao longo da superfície.
- Parâmetros híbridos: combinação dos parâmetros de amplitude e de espaço.

A rugosidade da superfície gerada por torneamento é formada por fenômenos que ocorrem na aresta de corte da ferramenta e que, por sua vez, estão relacionados diretamente ao comportamento do material que está sendo usinado [Schuitek, 1997]. Em ligas de alumínio, por exemplo, o baixo ponto de fusão e a alta condutividade térmica implicam em exigir da liga que será usinada uma dureza igual ou superior a 80 HB. Em ligas onde este valor não é atingido,

tem-se grande tendência à formação de aresta postiça de corte (APC) na ferramenta, dificultando a obtenção de baixos valores de rugosidade na peça [Diniz et al., 2013].

Outra recomendação para evitar a aparição da APC na usinagem de ligas de alumínio é garantir um bom cisalhamento do cavaco. Para isso, a ferramenta de corte deve ter ângulos (saída e inclinação) bastante positivos (direcionar o cavaco para longe da zona de corte), aresta afiada e material constituinte adequado. O material típico para a ferramenta é o metal-duro Classe N sem revestimento. Exceção é a ferramenta para a usinagem de ligas de alumínio-silício (Série 4xxx possui alta abrasividade) que necessita revestimento à base de diamante policristalino. Deve optar-se por ferramentas sem revestimento, pois os revestimentos costumam ter titânio (grande afinidade química com o alumínio); além disso, estes deixam a aresta de corte menos afiada [Diniz et al., 2013].

2.4.1 Rugosidade da Superfície

Uma série de fatores justifica a medição da textura de uma peça, pois a qualidade obtida está relacionada diretamente com as características do processo [Santos e Sales, 2007].

Para mensurar a rugosidade de uma superfície é necessário o entendimento de algumas definições fundamentais ditadas pela norma NBR ISO 4287, 2002, como por exemplo:

- *Cut-off* (λ_c): representa o máximo espaçamento entre as irregularidades que serão parte do cálculo de rugosidade.
- Comprimento de amostragem (l_r): é o comprimento na direção do eixo das abscissas usado para identificar irregularidades características do perfil sob avaliação.
- Comprimento de avaliação (l_n): é entendido como sendo o comprimento na direção do eixo das abscissas usado para estabelecer o perfil sob avaliação e contém um ou mais comprimentos de amostragem.

Conforme a NBR ISO 4288, 2008, é recomendado que $l_n = 5 \cdot l_r$ para se obter maior confiança dos dados. Santos e Sales, 2007, citam também que, para um perfil periódico², é importante que se tenha $l_r \geq 2,5 \cdot S_m$.

Segundo Horváth e Drégelyi-Kiss, 2015, nas indústrias os dois parâmetros de rugosidade de superfície mais utilizados para analisar o perfil da superfície são as rugosidades R_a (rugosidade média) e R_z (rugosidade média parcial).

² É comum obter um perfil periódico em processos de torneamento. Assim, o espaçamento médio entre os picos de rugosidade (S_m) corresponde numericamente ao avanço por volta da ferramenta (f).

Conforme Lizardo, 2010, a rugosidade média (R_a), é provavelmente o mais antigo conceito de rugosidade ainda em uso. Isto se deve à facilidade de cálculo, mesmo com aparelhos analógicos simples. De acordo com a norma NBR ISO 4287, 2002, R_a é definido como a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de amostragem (Figura 2.9). As faixas de rugosidades médias típicas para alguns processos são representadas na Figura 2.10.

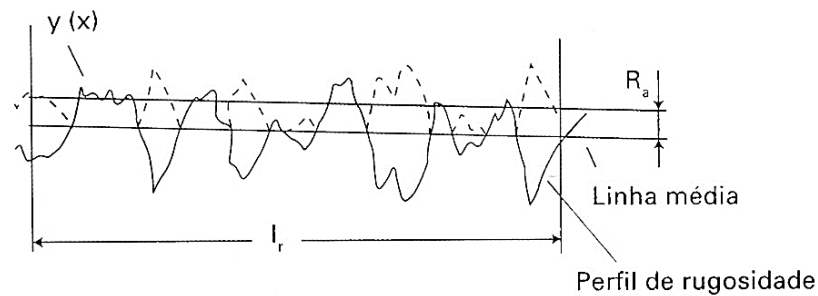


Figura 2.9 – Parâmetro de rugosidade R_a [Machado et al., 2009].

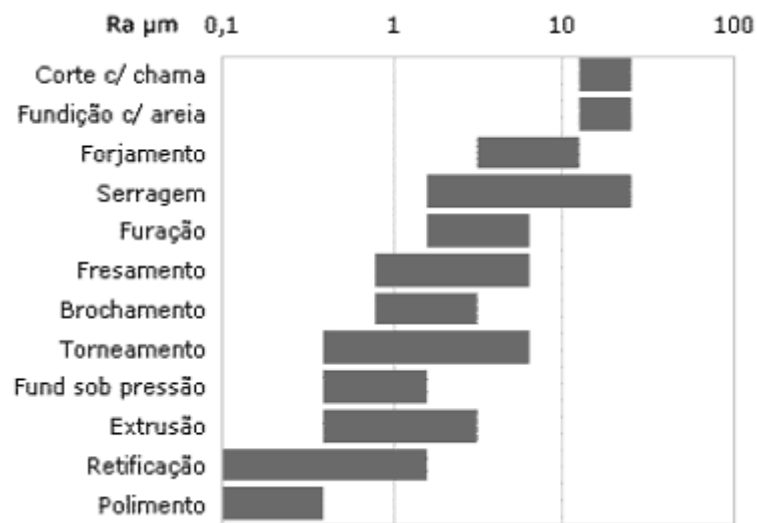


Figura 2.10 – Valores típicos de Rugosidade média R_a para vários processos de usinagem [Lima e Corrêa, 2008].

Conforme Espanhol, 2008, as vantagens do parâmetro R_a se resumem no fato de ser o parâmetro de medição mais utilizado em todo o mundo e aplicável à maioria dos processos de fabricação. Além disso, os riscos superficiais inerentes ao processo não alteram substancialmente o seu valor e, para a maioria das superfícies, o valor de rugosidade está de acordo com a curva de Gauss (que caracteriza a distribuição de amplitudes). Como desvantagem, o valor de R_a representa a média aritmética da rugosidade em um dado comprimento de avaliação (l_n). Por isso, se um pico ou vale não típico aparecer na superfície, o

valor da média não sofrerá grande alteração, ocultando tal efeito. Para alguns processos de fabricação, como na fabricação de peças sinterizadas em que há uma frequência muito alta de picos ou vales, o parâmetro também não é adequado.

Já R_z é definido como a distância média entre os 5 picos mais altos e os 5 vales mais profundos dentro do comprimento de avaliação (Figura 2.11) [NBR ISO 4287, 2002].

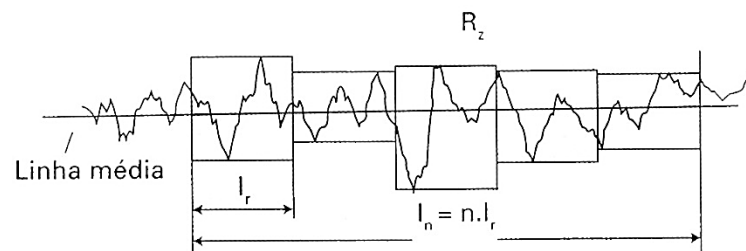


Figura 2.11 – Parâmetro de rugosidade R_z [Machado et al., 2009].

Carter, 2015, menciona que o parâmetro R_z pode ser empregado nos casos em que pontos isolados não influenciam na função da peça a ser controlada. Como vantagem, R_z indica a distribuição média da superfície vertical e que riscos isolados serão considerados apenas parcialmente, de acordo com o número destes. Além disso, define muito bem a superfície em perfis periódicos. Como desvantagem, nem todos os equipamentos fornecem este parâmetro, podendo R_z avaliar também erros que não representam a superfície como um todo.

Machado et al., 2009, mostra que diversas organizações possuem normas técnicas para a avaliação da rugosidade de superfícies, entre elas ISO, DIN e JIS. Neste trabalho será usado a norma ISO como referência para a determinação dos valores de rugosidades apresentados.

2.5 Projeto e Análise de Experimentos

A execução de experimentos pode ser bastante demorado e até inviável economicamente dependendo do número de ensaios e do valor dos materiais consumidos. Nesses casos, aconselha-se o uso de Projeto de Experimentos (DOE) para diminuir o número de ensaios e gerar dados para uma avaliação apropriada dos resultados [Horváth e Drégelyi-Kiss, 2015].

Além disso, o DOE utiliza métodos matemáticos que permitem avaliar a relevância e a significância estatística dos efeitos e das interações dos fatores em estudo. A partir disto são estabelecidas condições ótimas a fim de alcançar uma melhor resposta [Ferreira et al., 2007]. Dentre esses métodos matemáticos tem-se a Metodologia de Superfície de Resposta (MSR).

A MSR tem por objetivo avaliar graficamente os efeitos dos parâmetros na resposta, possibilitando produzir as condições operacionais ótimas para o processo, além de gerar uma

região do espaço em que a combinação dos parâmetros de entrada torne os requisitos do processo satisfatórios [Montgomery, 2007]. Visando facilitar o entendimento destas regiões, a MSR pode fornecer superfícies tridimensionais e gráficos de contorno.

O BBD é um projeto experimental para MSR que utiliza ferramentas estatísticas como a análise de variância (ANOVA) para avaliar a significância de um fator, o gráfico de Pareto para uma melhor visualização e entendimento dos resultados do experimento, e o coeficiente de determinação (R^2), que verifica se o modelo estatístico se ajusta aos dados experimentais.

2.5.1 Box-Behnken Design

Entre os anos de 1958 e 1960, George E. P. Box e Donald Behnken desenvolveram o projeto de experimento Box-Behnken Design (BBD) [Nguyen e Borkowski, 2008].

O BBD pertence a uma classe de projetos de segunda ordem baseados em modelos fatoriais incompletos de três níveis [Box e Behnken, 1960]. Para três fatores, sua representação gráfica é demonstrada pela Figura 2.12.

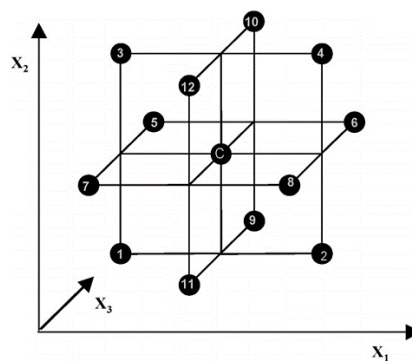


Figura 2.12 – Projeto de BBD para três fatores [Ferreira et al., 2007].

BBD é um método de otimização estatístico para obtenção das melhores condições que tem influência em um determinado processo. Dentre suas vantagens está o fato de não conter uma combinação de fatores que estão simultaneamente em seu maior ou em seu menor nível, evitando, desta forma, condições extremas que podem conduzir a resultados insatisfatórios. Outro ponto positivo é o número reduzido de ensaios, tornando-o assim mais eficiente que outros métodos que utilizam um fatorial completo [Ferreira et al., 2007]. No caso, o número de experimentos (N) requeridos é definido conforme a Equação 2.1, onde k é o número de fatores e C_0 é o número de repetições do ensaio no ponto central [Perveen e Jahan, 2018].

$$N = 2k \cdot (k - 1) + C_0 \quad (2.1)$$

2.5.2 Análise de Variância

Desenvolvida pelo estatístico inglês Ronald A. Fisher, a análise de variância (ANOVA), embora tenha uma história recente, é provavelmente o método estatístico mais amplamente utilizado para testes de hipóteses com diversas áreas de aplicação, incluindo a engenharia [Stahle e Wold, 1989; Doane e Seward, 2014].

A ANOVA é uma ferramenta para comparação de vários grupos ou estratos de interesse [Montgomery, 1991]. Se o teste estatístico gera hipótese nula, conclui-se que as diferenças observadas entre as médias amostrais são devidas às variações aleatórias na amostra, portanto indicam que o fator não influencia a resposta. No caso de rejeição da hipótese nula, conclui-se que o fator é significativo [Stevenson, 2001].

O parâmetro de teste utilizado pela ANOVA para verificar a igualdade entre as médias baseia-se na relação existente entre a variação “entre” um tratamento (SQent) e a variação “dentro” de tratamentos (SQerro) [Montgomery e Runger, 2003]. O SQent é o quadrado médio devido ao “tratamento” (cada possível valor de um fator ou combinação de fatores), e o MQ é a “média quadrada” dentro dos tratamentos. A estatística F é a razão da variância devido ao tratamento pela variância devido ao erro [Doane e Seward, 2014]. O valor F , quando comparado com um valor F crítico (definido segundo o nível de significância e o número de graus de liberdade), possibilita a aceitação ou rejeição da hipótese nula, acerca da igualdade entre as médias dos níveis dos fatores [Balestrassi, 2003].

As hipóteses a serem testadas são [Spiegel, 1993; Downing e Clark, 2011]:

- H_0 : as médias são iguais;
- H_1 : pelo menos uma das médias é diferente.

Considera-se “ α ” como sendo o nível de significância. Se o valor-p (probabilidade de significância) for maior que “ α ”, aceita-se H_0 . Já se o valor-p for menor que “ α ”, rejeita-se H_0 .

Conclusões obtidas a partir da ANOVA apresentam um nível de confiança determinado pelo analista [Paese et al., 2001]. Como exemplo, tem-se que a rugosidade de uma diferente superfície pode diferir de outra significativamente a um nível de confiança de 95%, isto quando aplicados diferentes parâmetros no processo de usinagem.

2.5.3 Diagrama de Pareto

O diagrama de Pareto é um gráfico de barras que dispõe a informação de forma a tornar evidente e visual a priorização de ações. A informação assim disposta também permite o estabelecimento de metas numéricas viáveis de serem alcançadas [Werkema, 1995].

A construção do diagrama de Pareto baseia-se no Princípio de Pareto, em que 80% dos problemas são ocasionados por 20% das causas, ou seja, são poucas causas que originam a maioria dos problemas. Assim, os problemas referentes à qualidade podem ser classificados em duas categorias: os poucos vitais, que representam poucos problemas que resultam em grandes perdas, e os muitos triviais, que representam muitos problemas que resultam em poucas perdas [Oakland, 2003]. Desta forma, o diagrama de Pareto tem larga aplicação em problemas relacionados à qualidade.

A utilização dessa ferramenta permite indicar quais os parâmetros de entrada e interações tem influencias significativas sobre cada variável de resposta. A partir disto, torna-se fácil identificar a ação a ser realizada nos parâmetros de entrada do processo para obter maiores alterações nas respostas [Carpinetti, 2012].

2.5.4 Coeficiente de Determinação

O coeficiente de determinação (R^2) representa a porcentagem da variação da variável dependente, que é possível ser explicada pela equação de regressão [Downing e Clark, 2011]. Em outras palavras, R^2 é utilizado para determinar se o modelo matemático ajusta bem os dados do experimento: quanto mais alto o valor de R^2 , melhor o ajuste [Montgomery e Runger, 2013]. O R^2 pertence ao intervalo [0;1] e quanto mais próximo de 1, melhor o ajuste do modelo considerado [Charnet et al., 1999]. Modelos com valores de $R^2 > 70\%$ podem ser considerados como adequados [Montgomery, 2007].

O coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}) corresponde ao coeficiente múltiplo de determinação R^2 modificado de modo a levar em conta o número de variáveis e o tamanho da amostra. Tem-se a importância de ajustar R^2 pelo fato dele não penalizar o seu valor caso variáveis independentes sejam adicionadas ao modelo [Theil, 1978].

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A experimentação foi realizada no Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS-UFRGS) em que foram realizados ensaios para a otimização do torneamento de acabamento a seco e com MQL em duas ligas de alumínio utilizando Box-Behnken Design.

3.1 Materiais e Equipamentos

Os materiais utilizados foram barras de ligas de alumínio 6082-T6 e 7075-T6. A Tabela 3.1 apresenta a composição química e dureza das ligas utilizadas, comparando-as com os níveis aceitos pela norma NBR ISO 209, 2010. A composição química das duas ligas foi obtida utilizando um espectrômetro de emissão atômica BRUKER Q2 ION. A microdureza foi medida em um microdurômetro Insize com carga aplicada de 0,3 kgf em um tempo de 10 s na escala Vickers. Foram feitas três indentações por amostra e realizada a média destes valores.

Tabela 3.1 – Composição química e dureza dos materiais dos corpos de prova (% em massa).

Ligas		Si	Mg	Fe	Mn	Cr	Cu	Ti	Zn	Dureza (HB)
6082-T6	Utilizada	0,92	0,68	0,23	0,55	0,01	0,04	0,03	0,01	105
	Norma	0,7-1,3	0,6-1,2	< 0,5	0,4-1,0	< 0,25	< 0,1	< 0,1	< 0,2	> 90
7075-T6	Utilizada	0,08	2,11	0,17	0,17	0,18	1,77	0,06	5,7	155
	Norma	< 0,4	2,1-2,9	< 0,5	< 0,3	0,18-0,28	1,2-2,0	< 0,2	5,1-6,1	> 135

A Figura 3.1a ilustra a geometria do corpo de prova e as regiões definidas como amostras (comprimentos de 10 mm) para a realização do experimento.

Para a realização dos experimentos foi utilizado o Torno CNC Mazak[®] modelo QTN 100-II (Figura 3.1b). Este possui rotação máxima de 6000 rpm e potência máxima de 23,5 kVA. Foi utilizado o contraponto rotativo do torno durante todos os passes realizados.

A ferramenta de corte escolhida para a realização de todos os passes do experimento foi o inserto intercambiável Iscar[®] modelo VCGT 160404-AS classe IC20 (Figura 3.2a). Este inserto é de metal-duro e sem cobertura, com geometria indicada para o torneamento de alumínio e suas ligas. Possui aresta sem arredondamento, raio de ponta $r_e = 0,4$ mm, ângulos de saída (γ) e inclinação (λ) positivos. O inserto foi montado no porta-ferramentas Black Tools[®], modelo SVJBL-2020-K16, com ângulo de posição de $\chi_r = 93^\circ$. Níveis recomendados pelo

fabricante dos parâmetros de corte: $v_c = 300 \sim 1000$ m/min, $f = 0,05 \sim 0,25$ mm/rev, $a_p = 0,5 \sim 3,0$ mm.

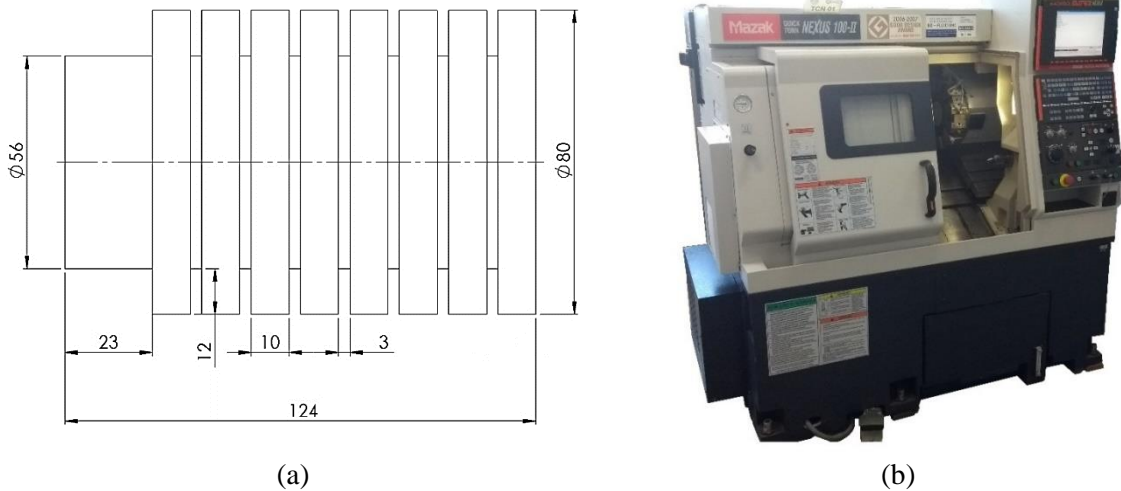


Figura 3.1 – (a) Geometria dos corpos de prova (unidades em mm);
(b) Torno CNC Mazak QTN 100-II.



Figura 3.2 – Inseto de metal-duro Iscar® modelo VCGT 160404-AS classe IC20.

Por meio de um interferômetro foi realizada uma análise topográfica 3D da textura da superfície usinada. O interferômetro utilizado foi o modelo ContourGT-K da marca Bruker® (Figura 3.3a). Foi utilizado uma lente de 2,5x com zoom digital de 1,0x e resolução lateral de 3,998 μm . A medição da rugosidade da superfície é realizada por este equipamento através da emissão de feixes de laser. Para geração das imagens 3D e análise do relatório gerado pelo interferômetro foi utilizado o *software* Vision64 Map™ do mesmo fabricante do equipamento.

Para a aquisição dos dados de comparação com os de rugosidade R_a e R_z obtidos por interferometria foi utilizado o rugosímetro da marca Mitutoyo® modelo SJ-201 com resolução de 0,01 μm (Figura 3.3b). Para sua utilização, devido aos valores de avanço empregados ($f_{max} = 0,25$ mm/volta) e perfil de rugosidade periódico ($S_m = f$) aplicou-se um comprimento de amostragem $l_e = 0,8$ mm ($l_e \geq 3,2 \cdot S_m$) e um comprimento de avaliação $l_n = 5 \cdot l_e = 4,0$ mm.

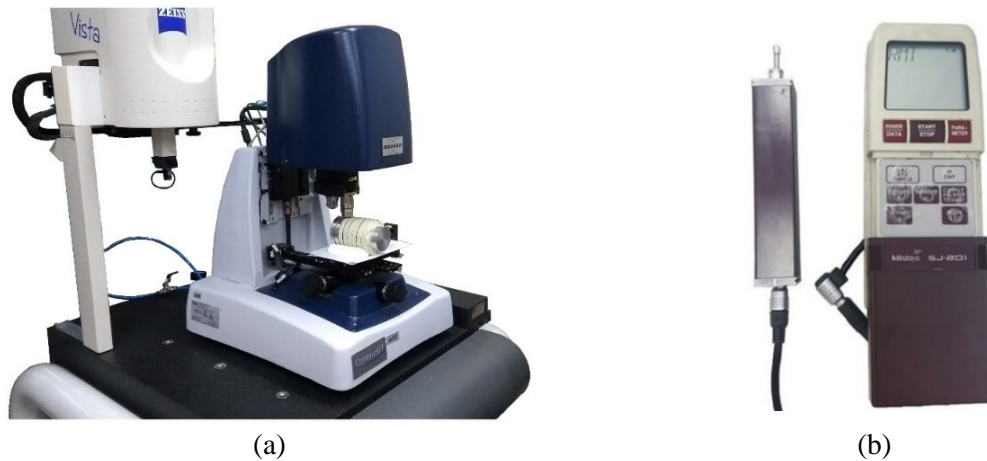


Figura 3.3 – Equipamentos para medição e análise da rugosidade: (a) Interferômetro Bruker® ContourGT; (b) Rugosímetro Mitutoyo® modelo SJ-201P.

O fluido lubrificador utilizado em MQL foi o Fluido para Serrar e Usinar Alumínio Quimatic®/Tapmatic® (Figura 3.4a) de base sintética, isento de solvente nocivos ou metais pesados. É indicado para empresas que trabalham com sistemas de gerenciamento SMS (Segurança, Meio ambiente e Saúde) ou que têm certificação ISO 14000 e/ou ISO 18000. Contém aditivo anti-névoa que atua em conjunto com o sistema. Para a aplicação do fluido em mínima quantidade utilizou-se o Nebulizador IV (Figura 3.4b) do mesmo fabricante.



Figura 3.4 – Sistema MQL da Quimatic®/Tapmatic®: (a) Fluido para Serrar e Usinar Alumínio; (b) Nebulizador IV.

Na realização da usinagem com MQL definiu-se como padrão uma vazão de 100 ml/h [Souza et al., 2016] e uma pressão de 500 kPa, permitindo assim que o nebulizador direcionasse o fluido sem gotejar. O fluido foi aplicado perpendicularmente ao inserto a uma distância de 40 mm entre o bocal do nebulizador e a interface ferramenta-peça (Figura 3.5).

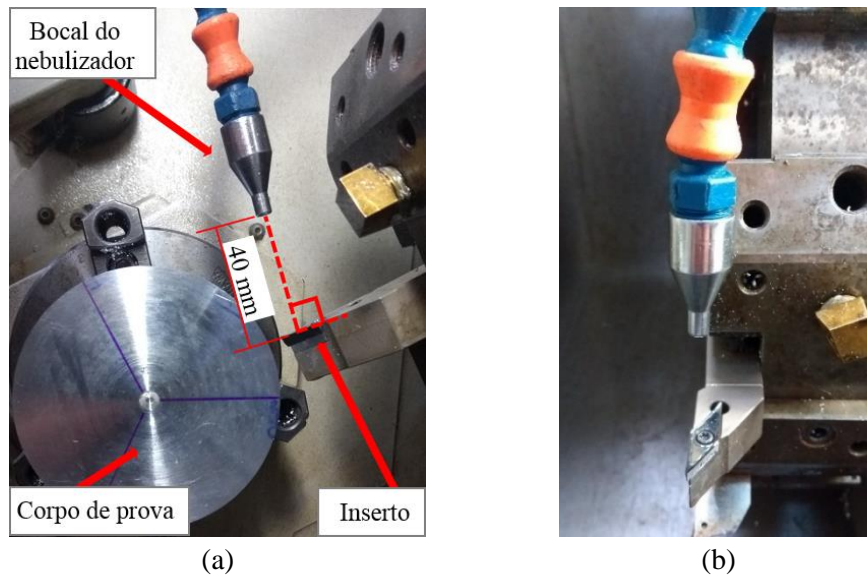


Figura 3.5 – Posição de aplicação do fluido de corte: (a) distância e ângulo do bico aspersor de MQL e a ferramenta; (b) visão frontal bocal do nebulizador/inserto.

Para a coleta das imagens do cavaco utilizou-se a câmera fotográfica digital Sony[®] modelo DSC-H300 (Figura 3.6), a qual possui resolução de 20,1 MP e zoom óptico de 35x.



Figura 3.6 – Câmera fotográfica Sony[®] DSC – H300.

3.2 Procedimento Experimental

Para a definição das condições de acabamento no processo de torneamento das ligas de alumínio 6082-T6 e 7075-T6 foram definidas três variáveis controláveis de entrada do processo (velocidade de corte v_c , avanço f , profundidade de corte a_p) em três níveis cada dentro do intervalo recomendado pelo fabricante do inserto conforme Tabela 3.2.

Logo, o número de passes necessários a serem realizados foi dado pela Equação 2.1, totalizando 15 combinações, realizadas em ordem aleatória para as variáveis apresentadas, ordenadas conforme Tabela 3.3.

Tabela 3.2 – Níveis dos parâmetros independentes de entrada.

Fatores	Notação	Unidade	Níveis dos Parâmetros Independentes		
			Baixo (-1)	Central (0)	Alto (+1)
Velocidade de corte	v_c	m/min	300	600	900
Avanço por volta	f	mm/rev	0,05	0,15	0,25
Profundidade de corte	a_p	mm	0,50	1,25	2,00

Tabela 3.3 – Sequência aleatória da matriz de combinações do planejamento Box Behnken.

Passes	v_c (m/min)	f (mm/rev)	a_p (mm)	Passes	v_c (m/min)	f (mm/rev)	a_p (mm)
1	600	0,15	1,25	9	300	0,15	2,00
2	300	0,05	1,25	10	900	0,15	2,00
3	900	0,05	1,25	11	600	0,05	0,50
4	300	0,25	1,25	12	600	0,25	0,50
5	900	0,25	1,25	13	600	0,05	2,00
6	300	0,15	0,50	14	600	0,25	2,00
7	900	0,15	0,50	15	600	0,15	1,25
8	600	0,15	1,25				

Após preparados os corpos de prova como ilustrado na Figura 3.1, os mesmos foram submetidos aos ensaios de torneamento para aquisição dos dados de saída. Cada uma das ligas de alumínio foi submetida às mesmas 15 combinações dos parâmetros de entrada (v_c, f, a_p) tanto no corte a seco quanto com MQL.

O cavaco gerado em cada um dos passes realizados no torneamento das ligas de alumínio foi coletado, fotografado e catalogado segundo sua forma, obedecendo os parâmetros de classificação ditados pela norma NBR ISO 3685, 2017. Todas as etapas de execução, condições de corte e aquisição dos dados foram fielmente reproduzidas para as duas ligas.

A parte experimental deste trabalho foi realizada em quatro etapas:

1^a) Torneamento a seco. Em cada liga foi aplicado os mesmos parâmetros de corte (v_c, f, a_p) segundo Box-Behnken Design (BBD), ou seja, foram realizados 15 passes em ambas as ligas. Após cada passe realizado (amostra gerada) mediu-se no Torno CNC (sem retirada da peça) as rugosidades R_a e R_z com o rugosímetro na região central de cada corpo de prova, após coletou-se amostras do cavaco gerado.

2^a) Torneamento com MQL. Reprodução das mesmas condições ensaiadas na 1^a Etapa.

- 3^a) Análise topográfica da superfície usinada. Após a usinagem de todas as amostras de ambas as ligas, obtiveram-se os perfis 3D das texturas das superfícies e adquiriu-se os valores de R_a e R_z com a utilização do interferômetro.
- 4^a) Otimização. Após a análise dos resultados das etapas anteriores, modelos foram gerados via BBD visando a otimização dos parâmetros (v_c, f, a_p) com base na menor rugosidade gerada.

As análises estatísticas dos dados coletados e as determinações dos parâmetros de otimização para cada liga de alumínio e cada condição de lubrificação foram realizadas através do *software* Minitab[®] 18.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos no torneamento de acabamento a seco e com MQL para cada superfície usinada das ligas de alumínio 6082-T6 e 7075-T6, visando otimizar os parâmetros de entrada (v_c, f, a_p). Os resultados serão expostos através dos valores de rugosidade R_a e R_z , gráficos, imagens, perfis topográficos 3D e análise dos cavacos.

4.1 Rugosidade da Superfície Usinada

A Tabela 4.1 apresenta os valores de rugosidade obtidos em cada um dos 15 passes realizados nas ligas torneadas utilizando interferometria. Cada uma das superfícies torneadas também teve sua rugosidade mensurada por meio de um rugosímetro, conforme Apêndice A, para uma comparação entre os valores obtidos com cada equipamento.

Tabela 4.1 – Valores de R_a e R_z obtidos com medição utilizando o interferômetro.

Amostras (Passes)	v_c (m/min)	f (mm/rev)	a_p (mm)	6082-T6				7075-T6			
				Seco		MQL		Seco		MQL	
				R_a (μm)	R_z (μm)	R_a (μm)	R_z (μm)	R_a (μm)	R_z (μm)	R_a (μm)	R_z (μm)
1	600	0,15	1,25	1,19	5,90	1,05	5,03	1,95	7,71	1,91	7,51
2	300	0,05	1,25	0,38	1,96	0,30	1,77	0,24	1,55	0,32	1,75
3	900	0,05	1,25	0,39	1,95	0,96	2,60	0,31	1,80	0,32	2,76
4	300	0,25	1,25	3,95	16,82	3,02	15,75	5,17	21,82	4,84	20,39
5	900	0,25	1,25	3,86	16,93	2,94	15,72	5,24	21,70	4,89	20,44
6	300	0,15	0,50	1,23	5,85	0,94	4,74	1,95	8,04	1,84	7,05
7	900	0,15	0,50	1,19	5,74	0,98	5,09	1,97	7,84	1,86	7,34
8	600	0,15	1,25	1,24	6,47	0,95	4,78	2,00	7,63	1,84	7,47
9	300	0,15	2,00	1,34	6,88	1,05	5,10	1,94	7,60	1,99	7,83
10	900	0,15	2,00	1,22	5,95	1,02	5,09	1,95	7,69	2,03	7,89
11	600	0,05	0,50	0,36	1,93	0,29	1,54	0,30	1,86	0,25	1,61
12	600	0,25	0,50	3,72	16,60	2,82	15,17	5,25	21,77	4,83	19,51
13	600	0,05	2,00	0,37	2,14	0,33	2,11	0,31	1,82	0,27	1,63
14	600	0,25	2,00	4,10	16,97	3,03	16,58	5,29	21,99	2,49	14,36
15	600	0,15	1,25	1,23	5,97	0,94	4,64	2,01	7,71	1,89	7,45

Comparando-se a Tabela 4.1 com o Apêndice A nas mesmas condições de corte, observa-se que valores mensurados com cada um dos equipamentos de medição não foi o

mesmo. Os valores obtidos com o rugosímetro resultaram em valores inferiores de rugosidade em relação aos gerados pela medição com o interferômetro. Esta diferença justifica-se pelo mecanismo de medição do rugosímetro.

Conforme Mitutoyo, 2004, o apalpador esférico com ponta de diamante de raio 5 μm desliza linearmente sobre a superfície do mensurando a uma velocidade média de 0,5 mm/s aplicando uma carga de 4 mN. Isso pode impedir que a ponta detecte determinadas texturas. Além disso, este contato pode modificar a geometria da superfície na usinagem de materiais dúcteis e de baixa dureza. Já o interferômetro, por realizar a medição sem contato, não tem esse problema. Por outro lado, a medição do interferômetro é feita por área, e a curvatura da superfície convexa dificulta a leitura nas bordas desta área.

Devido à baixa dureza do alumínio, quando o apalpador mensurou as amostras dos corpos de prova, perceberam-se sinais de esmagamento do material na superfície medida, isto porque a ponta de diamante do apalpador possui dureza muito superior à das ligas de alumínio utilizadas. Sendo assim, optou-se por utilizar apenas os valores obtidos com o interferômetro (em regiões diferentes) para a análise estatística e a otimização neste trabalho.

A Figura 4.1 apresenta graficamente os valores de rugosidade obtidos com o interferômetro das amostras torneadas das ligas 6082-T6 e 7075-T6.

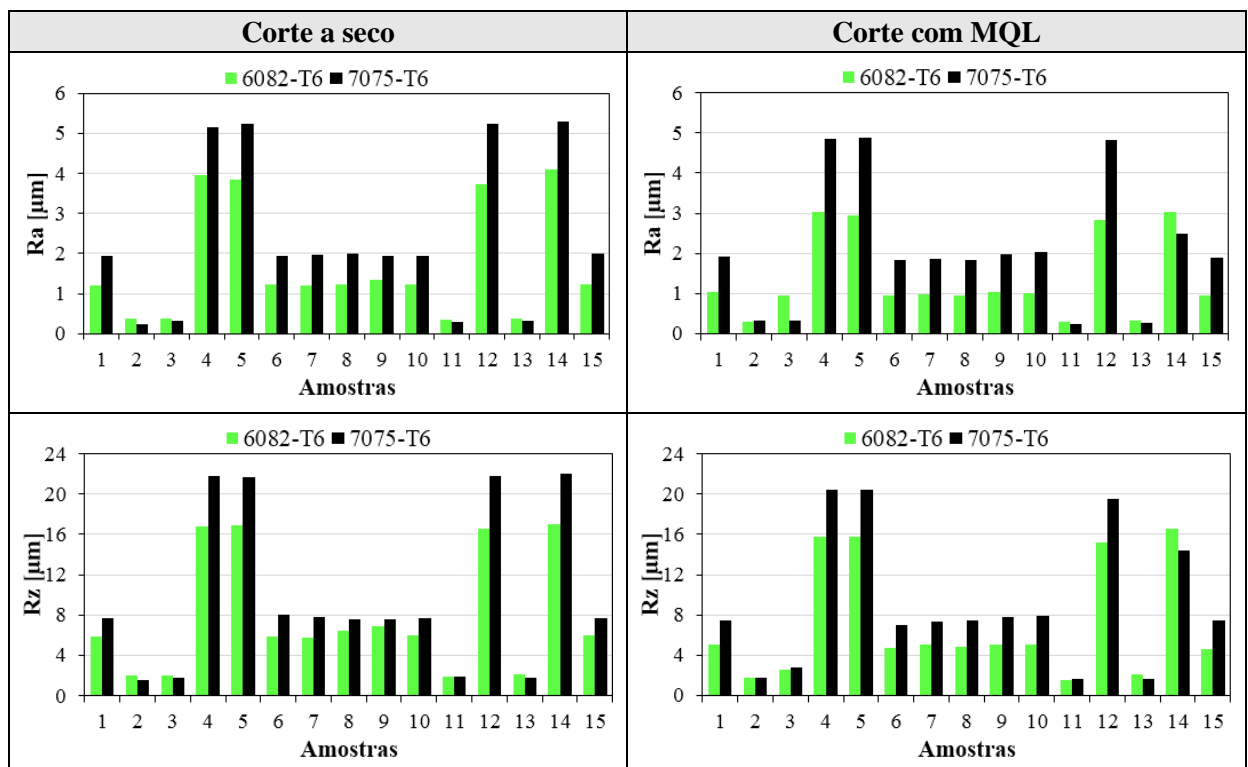


Figura 4.1 – Comparação gráfica entre as rugosidades obtidas nas amostras torneadas das ligas 6082-T6 e 7075-T6.

Evidenciou-se (Tabela 4.1 e Figura 4.1) que quanto menor o avanço (f), menor a rugosidade (R_a e R_z) gerada em ambos os materiais.

Nota-se pelos gráficos que os valores de rugosidade obtidos no torneamento da liga 6082-T6 foram em geral menores que os gerados na liga 7075-T6. Entretanto, as exceções aparecem quando o menor nível de avanço é aplicado (amostras 2, 3, 11, 13). Exemplos:

R_a no torneamento a seco da amostra:

- 2 ($v_c = 300$ m/min, $f = 0,05$ mm/rev, $a_p = 1,25$ mm), o valor medido é 58% menor no 7075-T6 que no 6082-T6.
- 7 ($v_c = 900$ m/min, $f = 0,15$ mm/rev, $a_p = 0,5$ mm), o valor mensurado é 40% menor no 6082-T6 que no 7075-T6.

R_a no torneamento com MQL da amostra:

- 3 ($v_c = 900$ m/min, $f = 0,05$ mm/rev, $a_p = 1,25$ mm), o valor coletado é 200% menor no 7075-T6 que no 6082-T6.
- 15 ($v_c = 600$ m/min, $f = 0,15$ mm/rev, $a_p = 1,25$ mm), o valor registrado é 50% menor no 6082-T6 que no 7075-T6.

4.1.1 Rugosidade na Liga 6082-T6

Observa-se pela Tabela 4.1 e pela Figura 4.1 para o torneamento de acabamento (a seco e com MQL) no 6082-T6 que ambas as condições lubrificantes geraram os menores valores de rugosidade no passe 11. Na condição a seco, as rugosidades apresentaram os valores $R_a = 0,36$ μm e $R_z = 1,93$ μm . Através da análise de variância (ANOVA), tem-se no Apêndice B que a porcentagem da contribuição do avanço sobre a média de R_a é de 88,75% e R_z de 91,31% na condição de usinagem a seco, f é o parâmetro significativo. Quando aplicado o sistema MQL no torneamento da liga 6082-T6, o fluido diminuiu os valores de rugosidade em comparação à condição a seco, apresentando $R_a = 0,29$ μm e $R_z = 1,54$ μm . Conforme Apêndice B, a porcentagem da contribuição do avanço sobre a média de R_a é de 84,24% e sobre R_z de 86,19% no torneamento utilizando MQL.

Nos gráficos de Pareto (Figura 4.2), as barras que cruzam a linha de referência (em **2,57**), são consideradas estatisticamente significativas (valor-p $\leq 0,05$). Assim, somente os efeitos linear e quadrático do avanço (f e $f \times f$) são significativos sobre a rugosidade R_z nos cortes a seco (Figura 4.2b) e com MQL (Figura 4.2d) do 6082-T6. Verificou-se também que o efeito linear da profundidade de corte (a_p) foi parcialmente significativo ($0,05 < \text{valor-p} < 0,10$) sobre R_z em ambas as condições lubrificantes.

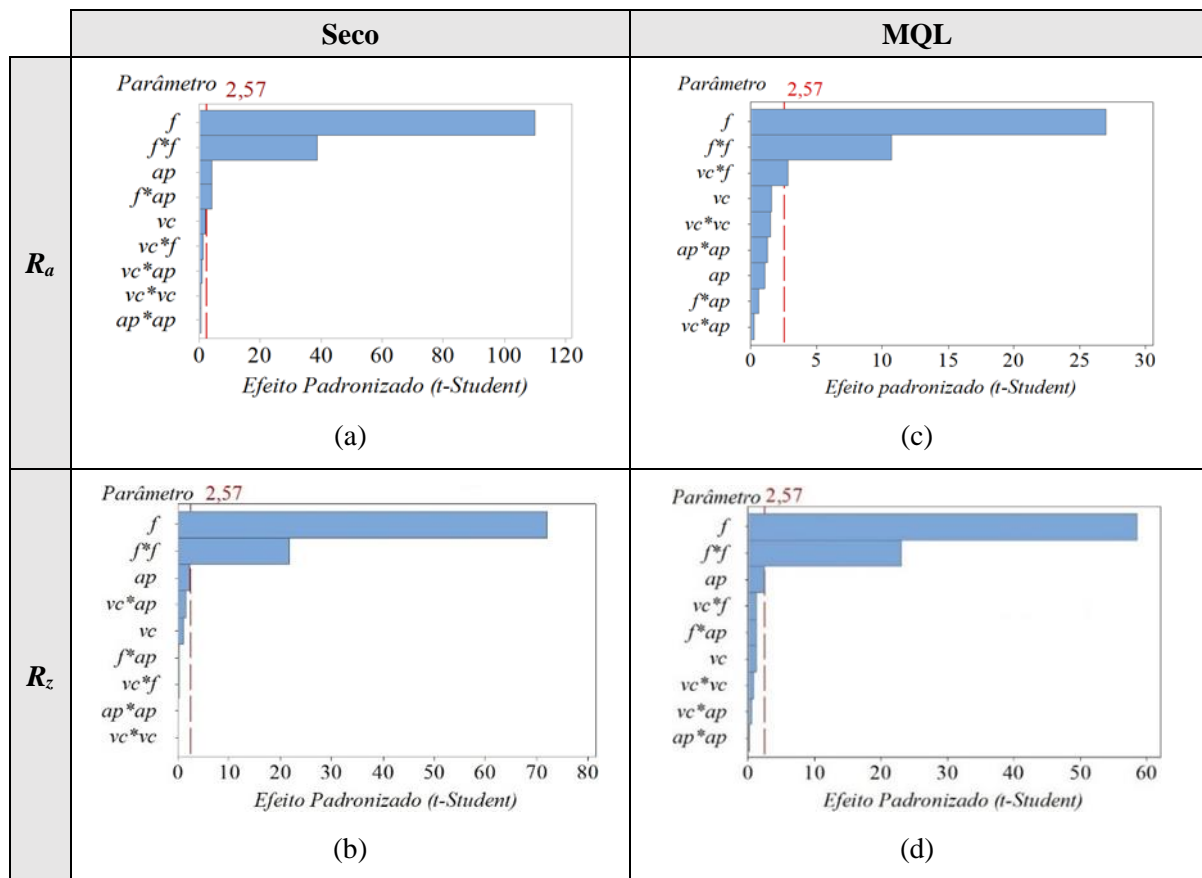


Figura 4.2 – Gráficos de Pareto da usinagem do 6082-T6 realizado a seco e com MQL.

Além dos efeitos linear e quadrático de f , a interação $f \times a_p$ também foi significativa sobre a rugosidade R_a nos cortes a seco (Figura 4.2a) e com MQL (Figura 4.2c). Notou-se que o efeito linear de a_p também foi significativo, mas somente na condição a seco.

Para verificar se o modelo se ajusta aos dados, os coeficientes de determinação R^2 e R^2_{aj} também foram encontrados (Apêndice B) – ambos com valores superiores a 98,4% tanto para R_a quanto para R_z nas condições a seco e com MQL. Como os valores foram relativamente próximos, considerou-se que não houve variáveis em excesso no modelo.

Fixando-se o avanço em $f = 0,05$ mm/rev (parâmetro significativo com o nível que gera melhor acabamento), tem-se na Figura 4.3 o gráfico de contorno da interação $v_c \times a_p$.

No corte a seco (Figura 4.3a e 4.3b), próximo ao nível de parâmetros altos ensaiados, tem-se uma faixa de valores de v_c e a_p comum entre R_a e R_z para uma obtenção de superfície de menor rugosidade. Com a aplicação de MQL, para valores de R_a (Figura 4.3c), percebe-se que pequenas variações na v_c já alteram a resposta, enquanto que a a_p passa a exercer uma influência maior apenas quando $v_c < 500$ m/min, sendo as menores rugosidades apontadas para os limites mínimos de a_p e v_c . Efeito semelhante ocorre em R_z (Figura 4.3d), onde o gráfico indica as

menores rugosidades próximo aos limites mínimos ensaiados, porém com a necessidade de uma alteração muito maior da velocidade de corte para alteração da resposta.

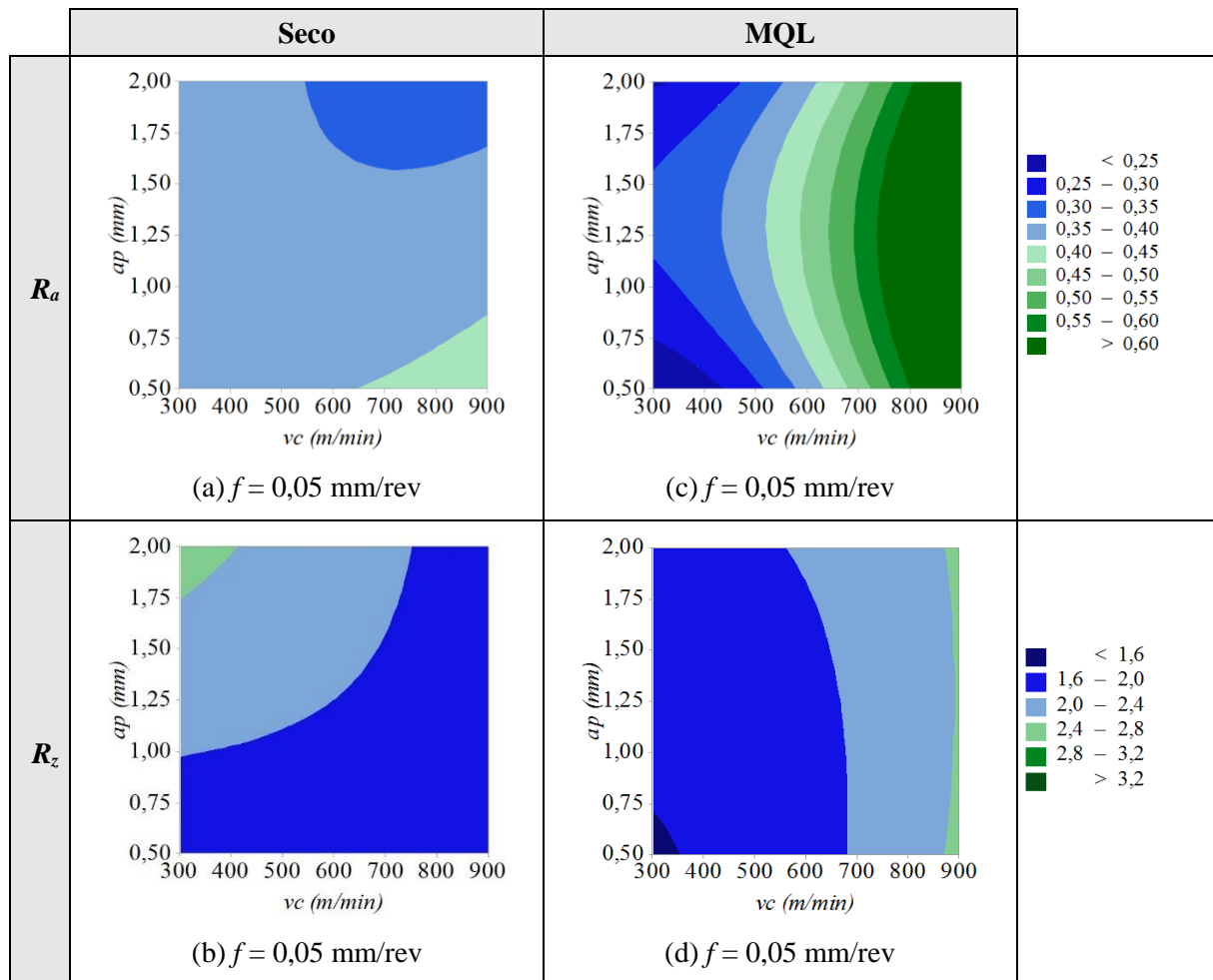


Figura 4.3 – Gráfico de contorno do torneamento do 6082-T6 realizado a seco e com MQL.

Embora Garcia et al., 2019, tenham utilizado RQL e $f = 0,15$ mm/rev na geração dos gráficos de superfície, sua pesquisa indica um comportamento semelhante à Figura 4.3, tendo atenuada a influência de a_p na rugosidade R_a quando se aplicou MQL. Já v_c teve que se manter em valores menores para que o MQL pudesse atuar mais significativamente na zona de corte.

4.1.2 Rugosidade na Liga 7075-T6

Como observado na Tabela 4.2, no torneamento a seco da liga de alumínio 7075-T6, os menores valores de rugosidade foram encontrados no passe 2 com R_a e R_z apresentando valores de $0,24 \mu\text{m}$ e $1,55 \mu\text{m}$ respectivamente com torneamento a seco. Os melhores valores obtidos com aplicação de MQL foram de $R_a = 0,25 \mu\text{m}$ e $R_z = 1,61 \mu\text{m}$.

De acordo com a ANOVA apresentada no Apêndice C, o parâmetro f obteve maior influência nos valores de rugosidade, onde para a condição a seco apresentou uma proporção de significância de 95,35% em R_a e de 92,93% em R_z . Com aplicação de MQL, ao analisar-se R_a , nota-se o avanço novamente como o parâmetro de corte mais significativo (86,96% de influência). Na Figura 4.4, observa-se que o parâmetro f como a única variável independente para um nível de significância de 5%. Verificaram-se também efeitos parcialmente significativos sobre R_a de $v_c \times v_c$ no corte a seco e da combinação $f \times a_p$ no corte com MQL.

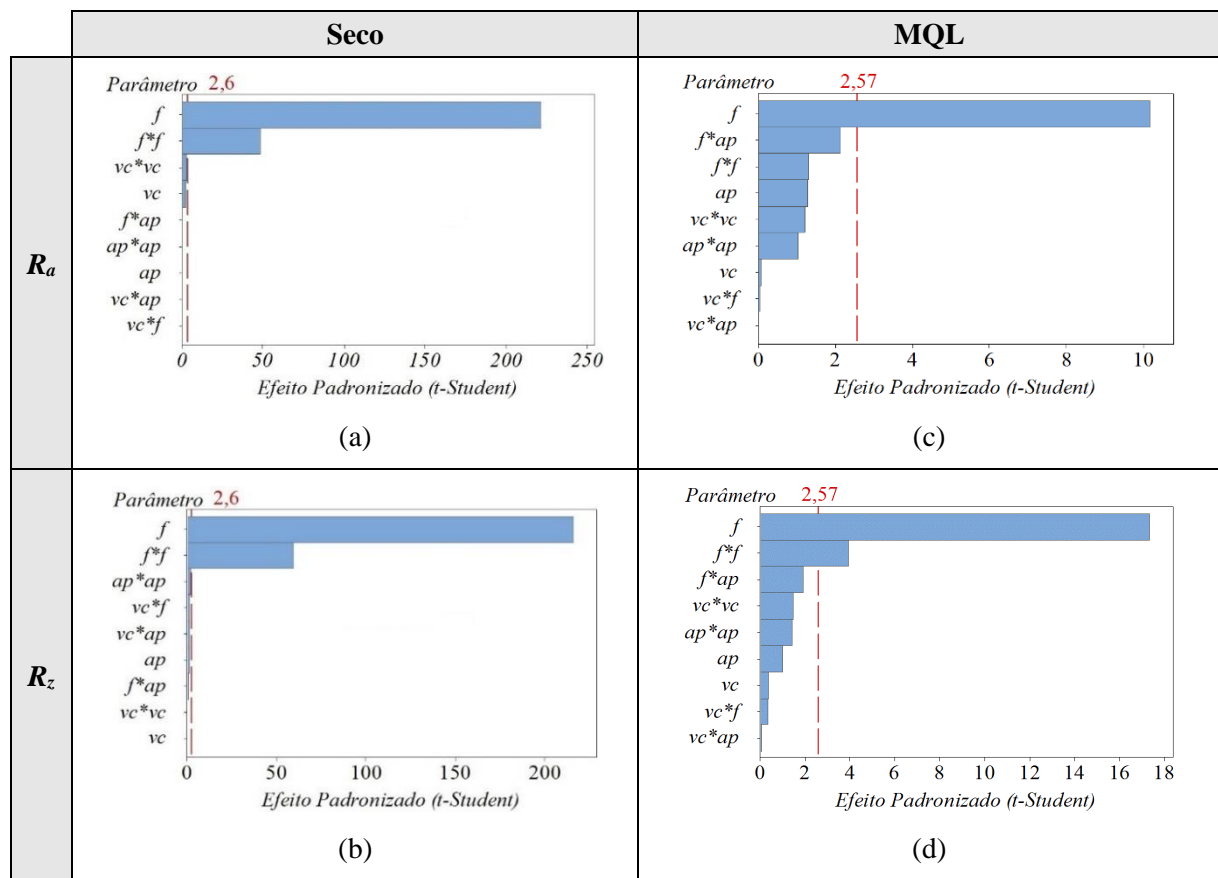


Figura 4.4 – Gráfico de Pareto da usinagem do 7075-T6 realizado a seco e com MQL.

Observa-se que os valores de R^2 e R^2_{aj} . (Apêndice C), se mantiveram acima de 95,76% e relativamente próximos, com exceção de R_a com aplicação de MQL ($R^2 = 95,79\%$ e $R^2_{aj} = 88,20\%$). Entretanto, conforme Montgomery, 2007, valores de $R^2 \geq 70\%$ representam que o modelo é adequado. Isto, somado ao tamanho do espaçamento entre R^2 e R^2_{aj} , considerou-se que não houve variáveis em excesso no modelo.

Fixando-se o avanço em $f = 0,05$ mm/rev (parâmetro significativo), tem-se na Figura 4.5 o gráfico de contorno da interação de velocidade de corte e profundidade de corte.

No torneamento a seco (Figura 4.5a), tem-se uma faixa de valores de $a_p = 0,6 \sim 2,0$ mm e $v_c = 500 \sim 800$ m/min em que a rugosidade R_a tende a permanecer entre $0,30$ e $0,32 \mu\text{m}$. Neste modelo, percebe-se que para atingir valores de rugosidade média abaixo de $0,26 \mu\text{m}$, sugere-se $v_c \cong 300$ m/min. Rayakar et al., 2015, obtiveram uma rugosidade $R_a = 0,29 \mu\text{m}$ no corte a seco com $v_c = 200$ m/min, condizendo assim com este trabalho. Na Figura 4.5c e 4.5d forma-se um padrão semelhante nos gráficos de contorno. Com $f = 0,05$ mm/rev fixo, as menores rugosidades R_z (Figura 4.5d) são observadas próximas aos limites inferiores de a_p enquanto a v_c permanece próxima ao nível médio. No gráfico de R_a (Figura 4.5c), as faixas compreendendo as menores rugosidades são mais flexíveis, permitindo a obtenção de $R_a \leq 0,26 \mu\text{m}$ com valores de $v_c = 450 \sim 750$ m/min e $a_p = 0,5 \sim 1,1$ mm.

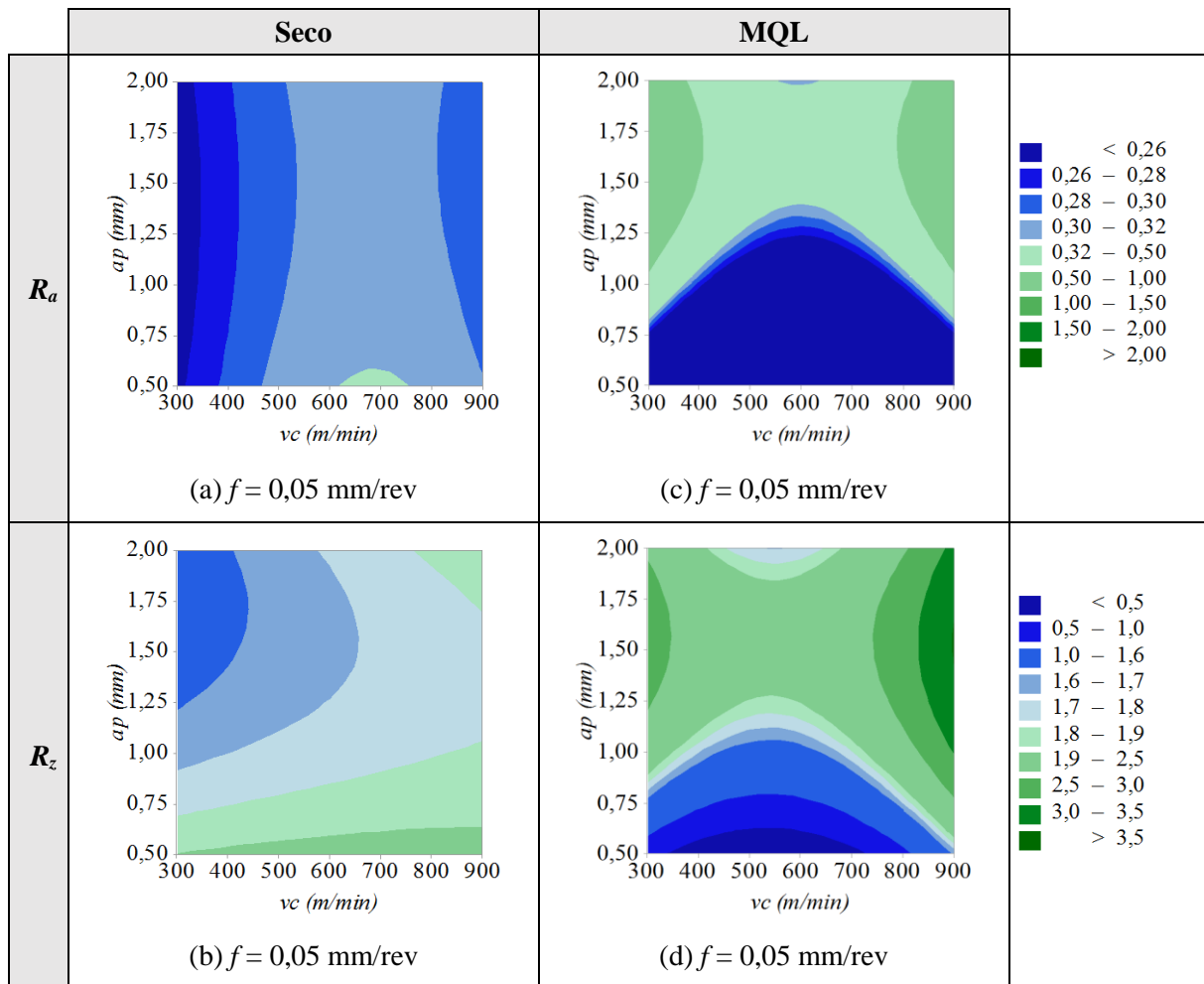


Figura 4.5 – Gráfico de contorno do torneamento do 7075-T6 realizado a seco e com MQL.

4.2 Topografia da Superfície Usinada

Nos Apêndices D e E tem-se os quadros contendo todas as topografias de superfície realizadas nos corpos de prova (6082-T6 e 7075-T6 respectivamente). Nas seções a seguir serão expostas apenas as topografias relevantes dentre todas as combinações ensaiadas.

4.2.1 Topografia da Superfície no 6082-T6

Na Figura 4.6 observam-se as imagens da topografia do passe 11 em comparação com a maior rugosidade, passe 14. Devido à forma cilíndrica dos corpos de prova, a modelagem da superfície apresenta alguns sinais de ruído oriundas do processo de interferometria nas extremidades da área analisada.

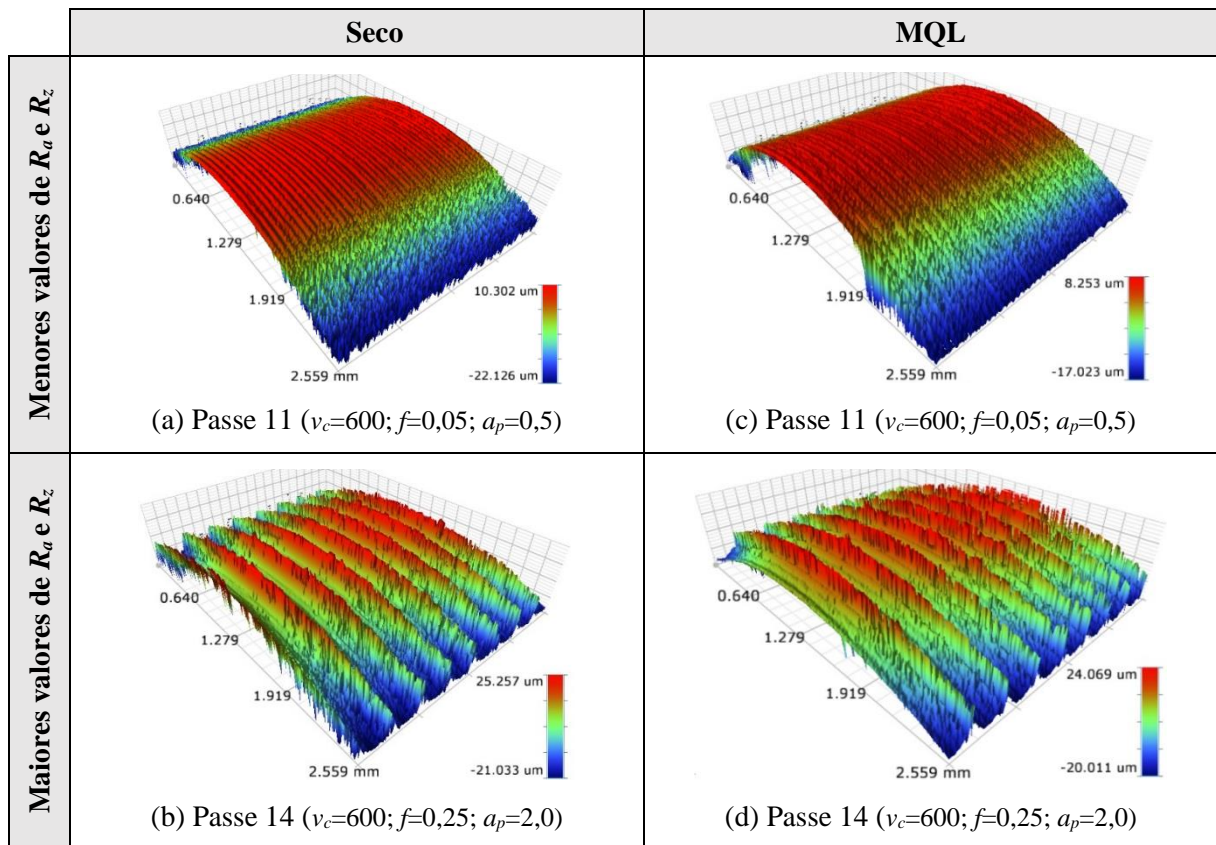


Figura 4.6 –Topografia da superfície do 6082-T6 para valores extremos de R_a e R_z .

Observa-se que, devido à diferença de parâmetros de corte, a geometria da ferramenta fica muito mais demarcada sobre a superfície no passe 14. Nota-se também a textura dos picos e vales, que por sua vez demonstram um processo de corte mais estável no passe 11.

Quando comparada a condição a seco com a aplicação do sistema MQL, não se tem uma diferença visual grande. Logo, em ambas as condições de corte no passe 11, conforme Figura 4.6, apresentam um processo de corte estável com valores próximos de picos e vales.

4.2.2 Topografia da Superfície no 7075-T6

A Figura 4.7 mostra as imagens da topografia da superfície usinada do 7075-T6. Diferente dos passes no 6082-T6, a menor rugosidade foi no passe 2.

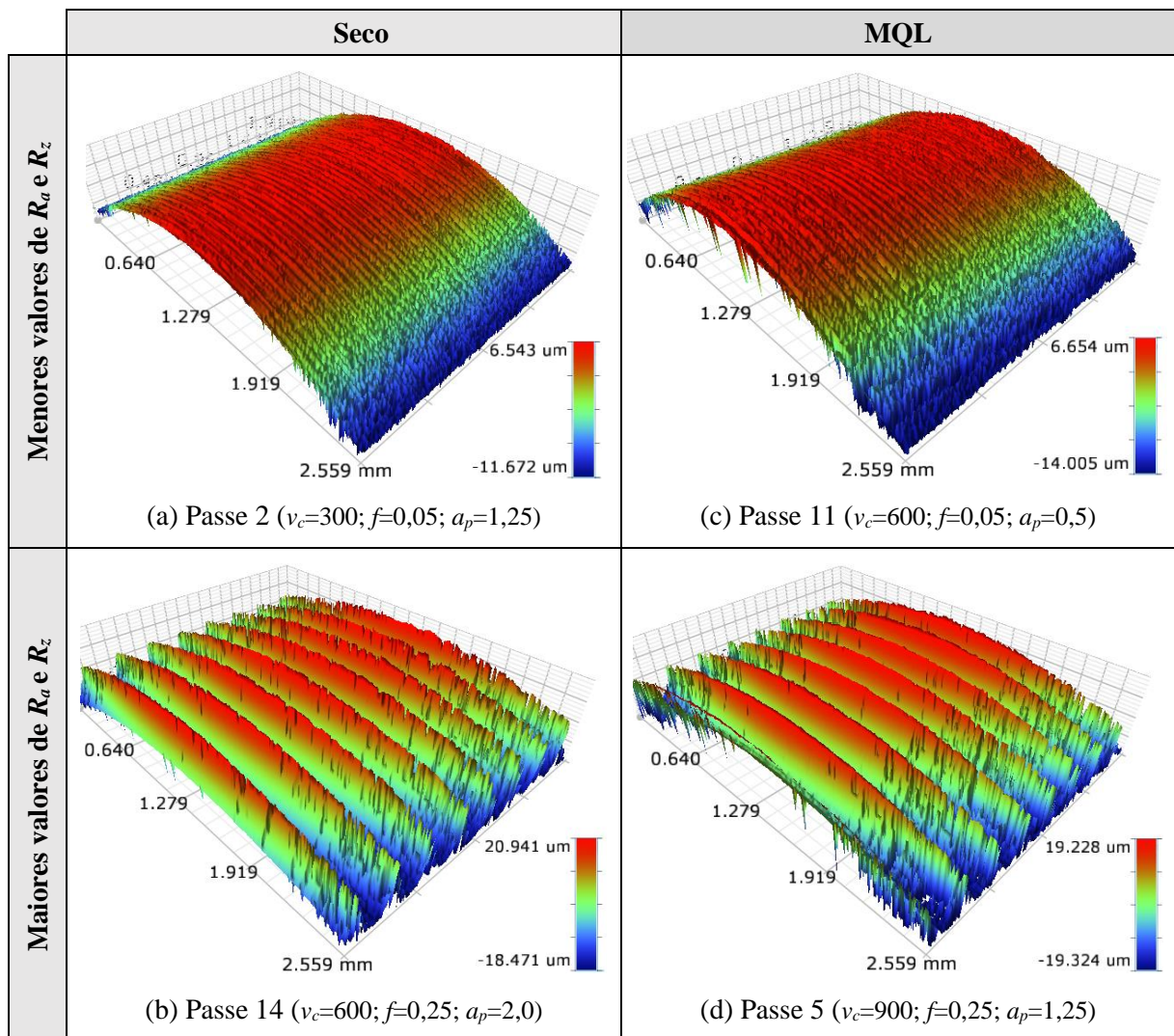


Figura 4.7 –Topografia da superfície do 7075-T6 para valores extremos de R_a e R_z .

Na condição a seco, a liga de alumínio 7075-T6 apresentou após a usinagem uma rugosidade menor que com MQL. Isto é observado ao se comparar a topografia das duas condições na Figura 4.7. O fato de a liga 7075-T6 apresentar maior dureza contribui para um corte cisalhante melhor no torneamento desta liga. Em materiais com menor dureza durante a

deformação no processo de corte, o material do cavaco é encruado, aumentando assim sua resistência. Deste modo, ao invés de ocorrer apenas o cisalhamento, o arrancamento de material também ocorre [Sousa, 2013; Baptista, 2002].

4.3 Cavacos

Após a análise e classificação do cavaco, observa-se um cavaco com dificuldade de quebra, onde nem mesmo a aplicação de MQL fez com que sua quebra ocorresse dentro dos padrões desejados (cavaco quebradiço) conforme imagens mostradas nos Apêndices F (6082-T6) e G (7075-T6). Este fenômeno repetiu-se em ambas as ligas de alumínio torneadas.

Por outro lado, a aplicação de MQL foi atuante no trabalho de expulsar o cavaco da zona de corte e/ou impedir que ele se enrolasse na peça em rotação. Este efeito é confirmado através da Tabela 4.2. Vê-se através do último número utilizado na classificação do cavaco o efeito do MQL mencionado a cima, que é de movimento para longe da peça. Logo, a aplicação do fluido contribuiu para diminuir a quantidade de riscos provocados na superfície final da peça usinada.

Tabela 4.2 – Formas dos cavacos.

Amostras	v_c (m/min)	f (mm/rev)	a_p (mm)	6082-T6		7075-T6	
				Seco	MQL	Seco	MQL
1	600	0,15	1,25	1.3.2	1.3.4	4.1.4	4.2.4
2	300	0,05	1,25	4.3.3	4.1.4	1.3.3	1.3.3
3	900	0,05	1,25	1.3.3	1.3.4	1.3.3	1.1.4
4	300	0,25	1,25	4.1.3	1.1.4	2.3.4	2.3.3
5	900	0,25	1,25	1.1.4	4.1.4	2.2.4	2.2.3
6	300	0,15	0,50	1.3.4	1.3.4	4.3.4	4.1.4
7	900	0,15	0,50	1.3.4	1.3.4	4.2.3	4.2.4
8	600	0,15	1,25	1.3.2	1.3.4	4.1.4	4.2.4
9	300	0,15	2,00	1.3.3	1.3.4	1.3.3	1.3.4
10	900	0,15	2,00	1.3.4	1.3.4	6.2.8	6.2.7
11	600	0,05	0,50	1.3.4	4.3.4	1.3.3	1.3.4
12	600	0,25	0,50	1.3.4	1.1.4	4.2.3	6.2.7
13	600	0,05	2,00	1.3.3	1.3.4	1.3.3	1.3.4
14	600	0,25	2,00	4.2.3	4.2.4	2.2.4	2.2.4
15	600	0,15	1,25	1.3.2	1.3.4	4.1.4	4.2.4

Na Tabela 4.2, constata-se que para o torneamento do 6082-T6 todos os cavacos gerados foram em fita ou de anéis helicoidais, onde apenas o passe 14 apresentou um cavaco mais curto em comparação com os demais. Ao se observar o sentido em que o cavaco é projetado, caracterizado pelo terceiro dígito, nota-se a influência da aplicação de MQL durante o

torneamento desta liga de alumínio. Isto porque em todos os passes com MQL, o sentido de projeção do cavaco foi para longe da peça e oposto à direção do movimento de avanço.

Ao se analisar a formação e o comportamento do cavaco do 7075-T6, na Tabela 4.2, apenas no passe 12 a forma do cavaco alterou-se de maneira significativa entre os cortes a seco e com MQL, mudando de anéis helicoidais para cavaco em arco. Avaliando os ensaios com a liga 7075-T6, ao contrário da liga 6082-T6, não se pode afirmar que a aplicação de MQL atuou de modo discrepante na formação e expulsão do cavaco para longe da zona de corte.

Nota-se que no torneamento da liga 7075-T6, os passes que obtiveram os melhores cavacos (passes 4, 5, 7, 10, 12, 14) não foram os que resultaram em melhores rugosidades. As melhores rugosidades foram sempre geradas com $f = 0,05$ mm, enquanto que os melhores cavacos com $f = 0,15$ mm e $f = 0,25$ mm. De acordo com Smith, 1989, isto se justifica pelo fato de avanços menores permitirem que o cavaco do alumínio se deforme demasiadamente antes de seu rompimento, dificultando ou até mesmo impedindo sua quebra, enquanto que avanços maiores prejudicam a qualidade da superfície torneada.

Ao observar-se a Tabela 4.2 juntamente com o Apêndice F, nota-se que para a liga 6082-T6 este efeito do avanço em níveis mais altos não foi suficiente na obtenção de um cavaco quebradiço. Um dos fatores que justifica a diferença na formação dos cavacos entre as duas ligas estudadas é a influência dos diferentes teores dos elementos de liga. Como exemplo disto, conforme Tabela 3.1, tem-se uma concentração muito maior de Cu na liga 7075-T6 (1,77 % em massa) do que na 6082-T6 (0,04 % em massa). Conforme Diniz et al., 2013, o cobre está diretamente relacionado com a usinabilidade de ligas de alumínio, pois forma o elemento CuAl_2 que atua como um fragilizador do cavaco.

Outra diferença entre as duas ligas trata-se da dureza. A liga 6082-T6 apresenta uma dureza de 105 HB enquanto que a liga 7075-T6 possui 155 HB. Conforme Schuitek, 1997, essa menor dureza aumenta ainda mais a capacidade de deformação impedindo que o cavaco atinja seu ponto de ruptura. Neste caso a diferença de dureza é resultado do diferente teor de zinco presente a mais na liga 7075-T6 do que na liga 6082-T6.

4.4 Otimização dos Parâmetros de Corte

Realizou-se a otimização dos níveis das variáveis de entrada (v_c , f , a_p) no torneamento a seco e com MQL das duas ligas (6082-T6 e 7075-T6) em função das variáveis de resposta R_a e R_z (menor é melhor) através do Minitab® 18, tendo como ponto de partida os dados obtidos com a combinação aleatória dos parâmetros de corte via Box-Behnken Design (BBD).

4.4.1 Parâmetros Otimizados para o Torneamento do 6082-T6

A Figura 4.8 mostra a comparação dos dados estimados pelos modelos de regressão linear múltipla (Equação 4.1 a 4.4) com os dados observados. A dispersão entre os valores estimados e os observados ocorre devido à presença do erro experimental nos efeitos dos fatores sobre as variáveis resposta. Foi realizada uma otimização dos parâmetros focada na rugosidade R_a (menor é melhor) e outra focada para obter R_z (menor é melhor).

- Modelo 1 $\Rightarrow R_a$ (seco):

$$0,744 - 0,000081 v_c - 10,642 f - 0,082 a_p + 90,88 f^2 + 0,0156 a_p^2 - 0,000833 v_c f - 0,000089 v_c a_p + 1,233 f a_p \quad (4.1)$$

- Modelo 2 $\Rightarrow R_z$ (seco):

$$1,76 + 0,00062 v_c - 26,19 f + 0,8 a_p + 330,3 f^2 - 0,012 a_p^2 + 0,001 v_c f - 0,000911 v_c a_p + 0,53 f a_p \quad (4.2)$$

- Modelo 3 $\Rightarrow R_a$ (MQL):

$$0,18 - 0,0001 v_c - 6,27 f + 0,406 a_p + 0,000001 v_c^2 + 72,25 f^2 - 0,151 a_p^2 - 0,00617 v_c f - 0,000078 v_c a_p + 0,567 f a_p \quad (4.3)$$

- Modelo 4 $\Rightarrow R_z$ (MQL):

$$2,97 + 0,00006 v_c - 50,03 f + 0,036 a_p + 0,000002 v_c^2 + 399,4 f^2 + 0,07 a_p^2 - 0,00717 v_c f - 0,0004 v_c a_p + 2,8 f a_p \quad (4.4)$$

A Tabela 4.3 mostra os resultados otimizados da liga 6082-T6 obtidos com os ensaios de verificação dos parâmetros de corte gerados pelo método de otimização BBD para as condições a seco e com MQL.

Nota-se que a combinação otimizada 2 ($v_c = 633$ m/min, $f = 0,05$ mm/rev, $a_p = 1,1$ mm) apresentou os menores valores de rugosidade R_a (0,31 μm) e R_z (1,80 μm) para o torneamento da liga 6082-T6 a seco. Na otimização desta liga com a aplicação de 100 ml/h de fluido lubrificador, a combinação 3 ($v_c = 300$ m/min, $f = 0,05$ mm/rev, $a_p = 0,5$ mm) apresentou os menores valores de R_a (0,29 μm) e R_z (1,52 μm).

Percebe-se também que com aplicação de MQL (combinações otimizadas 3 e 4) tem-se uma redução de v_c e a_p . Altas velocidades de corte dificultam a penetração do fluido na zona de corte [Suarez, 2012], justificando sua diminuição na otimização para a liga 6082-T6. Menores

profundidades de corte fizeram com que o cavaco tivesse menor área para realizar a troca térmica, favorecendo assim seu resfriamento e auxiliando no processo curvatura do cavaco.

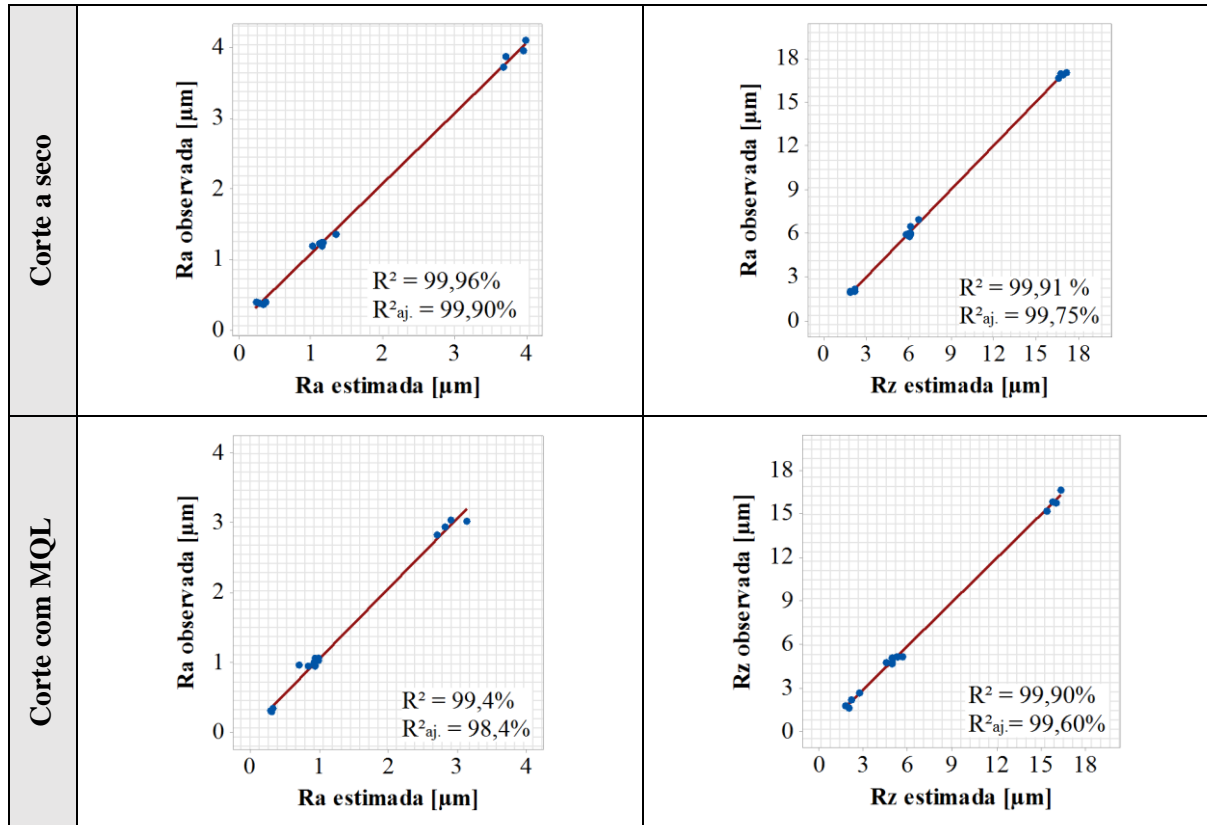


Figura 4.8 – Comparação entre os dados observados e estimados para a liga 6082-T6.

Tabela 4.3 – Parâmetros otimizados para a usinagem do 6082-T6.

Combinação	Seco		MQL					
	1	2	3	4				
v_c (m/min)	609	633	300	300				
f (mm/rev)	0,06	0,05	0,05	0,06				
a_p (mm)	1,3	1,1	0,5	0,5				
Q (cm ³ /min)	47,5	34,8	7,5	9,0				
Valores obtidos de rugosidade (μm)	R_a	R_z	R_a	R_z	R_a	R_z	R_a	R_z
	0,34	3,32	0,31	1,80	0,29	1,52	0,31	1,54

Analisando-se os valores tabelados, a combinação que gerou as menores rugosidades não é a mesma que apresenta parâmetros de corte que favorecem uma maior produtividade. Além de apresentar valores próximos ao R_a e R_z da combinação 3, a combinação 2 tem maiores v_c (633 m/min) e a_p (1,1 mm) que resultam em uma maior taxa de remoção de material ($Q_2 >$

Q_3) e maior produtividade. Observa-se que $Q_2 = 34,8 \text{ cm}^3/\text{min}$ é aproximadamente 4,5 vezes maior que $Q_3 = 7,5 \text{ cm}^3/\text{min}$. Logo, tem-se uma boa alternativa quando o acabamento da superfície não é unicamente o objetivo principal do torneamento.

Observando as topografias geradas pelos parâmetros otimizados (Figura 4.9), tem-se um corte que se apresenta estável, onde as irregularidades deixadas na superfície da peça usinada são apenas da ferramenta e não de riscos na superfície provocadas pelo cavaco.

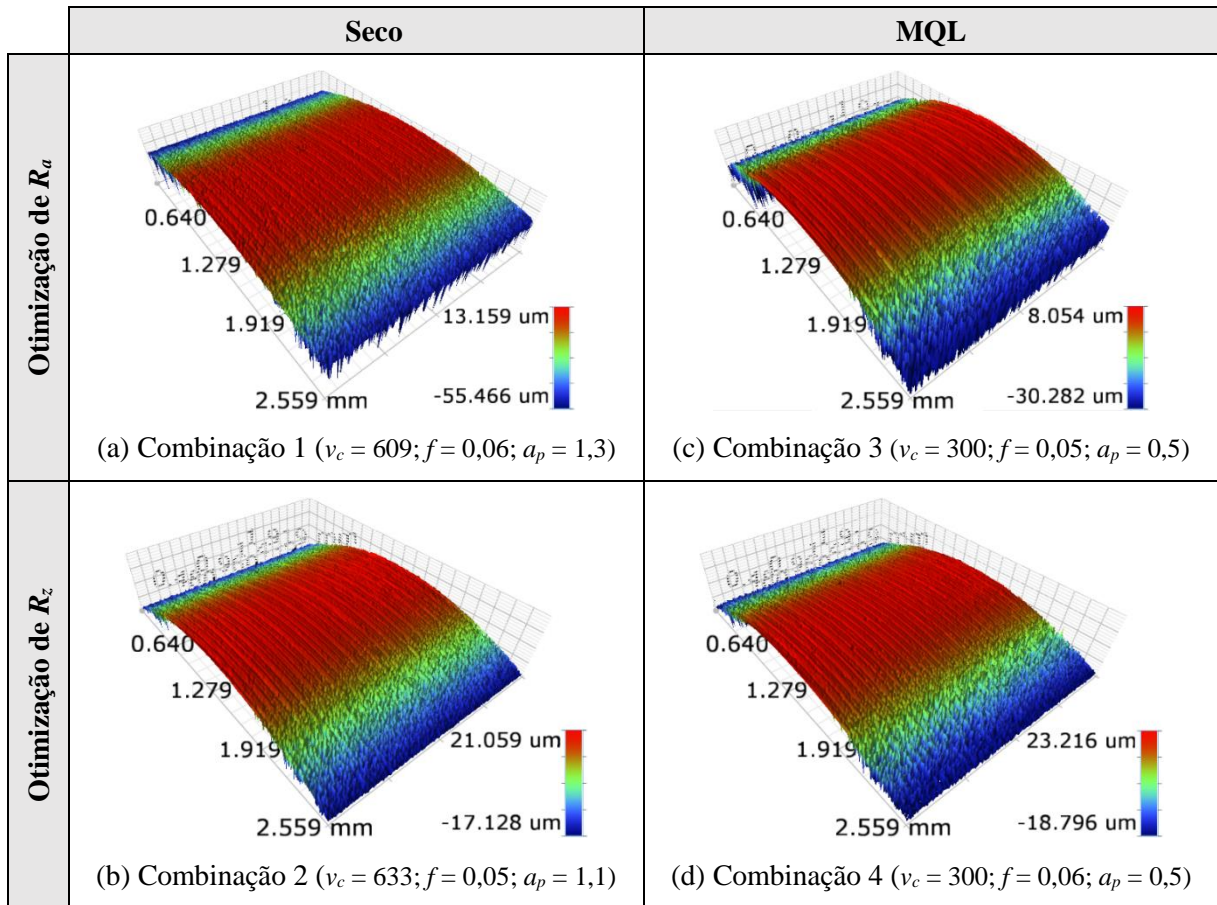


Figura 4.9 – Quadro de topografias de superfície após as otimizações para 6082-T6.

Na Figura 4.10 observam-se as imagens registradas dos cavacos gerados após a aplicação dos parâmetros de otimização para a liga de alumínio 6082-T6 e na Tabela 4.4 como esses cavacos foram classificados.

Tabela 4.4 – Cavacos gerados na usinagem do 6082-T6 após otimização.

Condição Lubrificante	Seco		MQL	
Combinação	1	2	3	4
Forma do cavaco	1.2.4	1.2.4	1.2.4	4.2.4

As combinações otimizadas 1, 2 e 3 resultaram em formas de cavacos em fita (iniciando com dígito 1) nas condições ensaiadas, com exceção da combinação 4 que gerou um cavaco do tipo anéis helicoidais curtos (iniciando com o dígito 4). Os quatro resultados apontaram uma diminuição do cavaco tipo emaranhado ou longo que prejudicam o processo de cisalhamento e podem apresentar perigo para o operador da máquina.

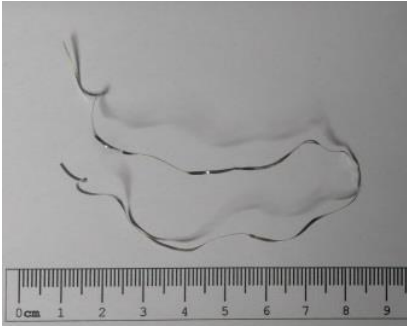
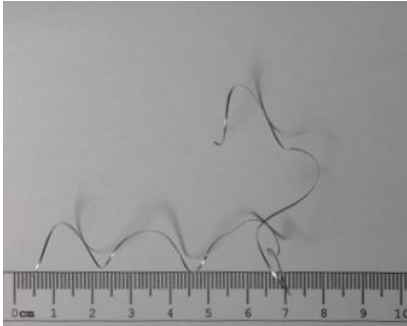
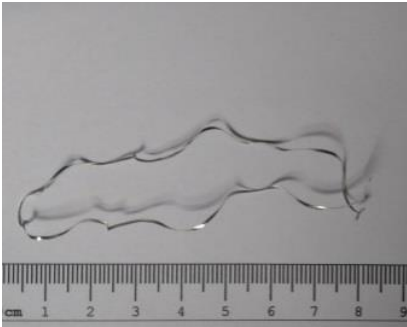
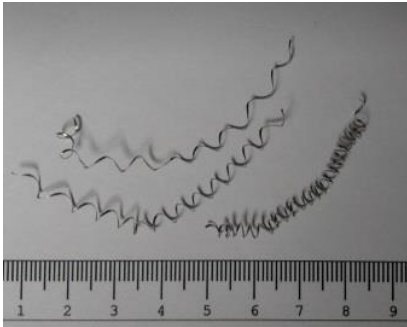
	Seco	MQL
Otimização de R_a	 <p>(a) Combinação 1 ($v_c = 609$; $f = 0,06$; $a_p = 1,3$)</p>	 <p>(c) Combinação 3 ($v_c = 300$; $f = 0,05$; $a_p = 0,5$)</p>
Otimização de R_z	 <p>(b) Combinação 2 ($v_c = 633$; $f = 0,05$; $a_p = 1,1$)</p>	 <p>(d) Combinação 4 ($v_c = 300$; $f = 0,06$; $a_p = 0,5$)</p>

Figura 4.10 – Quadro das imagens dos cavacos gerados após as otimizações para 6082-T6.

4.4.2 Parâmetros Otimizados para o Torneamento do 7075-T6

A Figura 4.11 mostra a dispersão entre os valores estimados através dos modelos de regressão (Equação 4.5 a 4.8) e os observados experimentalmente.

Na Tabela 4.5 tem-se as combinações otimizadas dos parâmetros de corte para ambas condições ensaiadas (seco e com MQL) para o torneamento de acabamento da liga 7075-T6. Novamente realizou-se a otimização dos parâmetros focada nos menores valores de rugosidade R_a e R_z . Isto também é demonstrado pelos valores de R^2 e R^2_{aj} disponíveis no Apêndice C.

- Modelo 5 $\Rightarrow R_a$ (seco):

$$-0,118 + 0,000629 v_c + 0,787 f - 0,0346 a_p + 79,42 f^2 + 0,0119 a_p^2 - 0,000011 v_c a_p + 0,1 f a_p \quad (4.5)$$

- Modelo 6 $\Rightarrow R_z$ (seco):

$$2,241 + 0,00029 v_c - 20,45 f - 0,951 a_p + 405,08 f^2 + 0,224 a_p^2 - 0,00308 v_c f + 0,000322 v_c a_p + 0,867 f a_p \quad (4.6)$$

- Modelo 7 $\Rightarrow R_a$ (MQL):

$$-0,74 - 0,00459 v_c + 18,3 f + 2,13 a_p + 0,000004 v_c^2 + 37,1 f^2 - 0,518 a_p^2 + 0,00042 v_c f + 0,00002 v_c a_p - 7,87 f a_p \quad (4.7)$$

- Modelo 8 $\Rightarrow R_z$ (MQL):

$$-1,04 - 0,0119 v_c + 25,9 f + 6,56 a_p + 0,000012 v_c^2 + 280,4 f^2 - 1,78 a_p^2 - 0,008 v_c f - 0,00026 v_c a_p - 17,23 f a_p \quad (4.8)$$

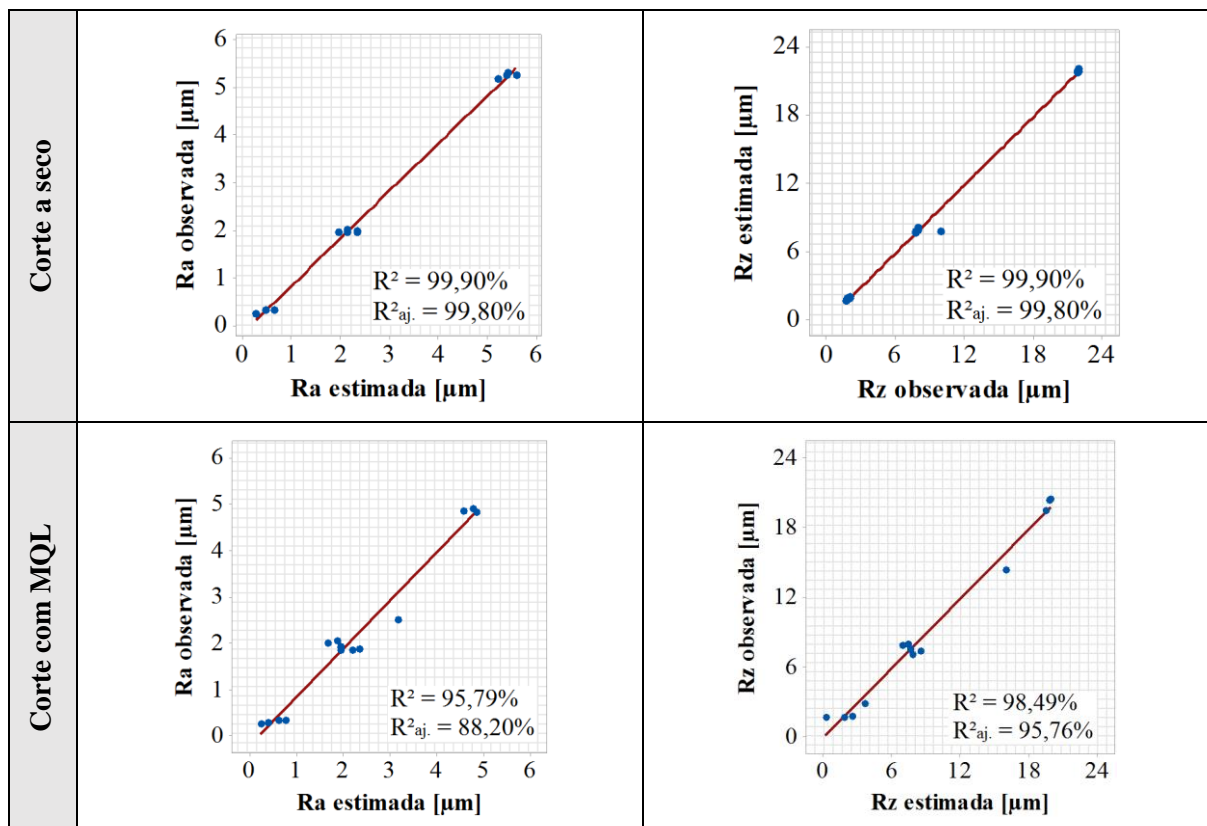


Figura 4.11 – Comparação entre os dados observados e estimados para a liga 7075-T6.

Tabela 4.5 – Parâmetros otimizados para 7075-T6.

Combinação	Seco		MQL					
	5	6	7	8				
v_c (m/min)	300	300	603	554				
f (mm/rev)	0,05	0,05	0,05	0,05				
a_p (mm)	1,4	1,8	0,5	0,5				
Q (cm ³ /min)	21,0	27,0	15,1	13,8				
Valores obtidos de rugosidade (μm)	R_a	R_z	R_a	R_z	R_a	R_z	R_a	R_z
	0,21	1,52	0,45	1,91	0,30	2,05	0,25	1,55

Nota-se que a combinação otimizada 5 ($v_c = 300$ m/min, $f = 0,05$ mm/rev, $a_p = 1,4$ mm) gerou os menores valores de rugosidade R_a (0,21 μm) e R_z (1,52 μm) para o corte a seco da liga 7075-T6. Na otimização com MQL, a combinação 8 ($v_c = 554$ m/min, $f = 0,05$ mm/rev, $a_p = 0,5$ mm) apresentou os menores valores de R_a (0,25 μm) e R_z (1,55 μm). Esses baixos valores de rugosidade encontrados são bem expressivos. Exemplo disso é o trabalho de Routella, 2019, que encontrou valores maiores no torneamento a seco ($R_a \cong 0,45$ μm , $R_z \cong 2,75$ μm) e com MQL ($R_a \cong 0,30$ μm , $R_z \cong 2,0$ μm); o valor de R_a obtido com CRYO se equipara aos valores encontrados com as combinações otimizadas.

Outros autores aplicaram velocidades de corte menores do que as encontradas pelos modelos de otimização deste trabalho. Rayakar et al., 2015, utilizou $v_c = 200$ m/min obtendo $R_a = 0,29$ μm no corte a seco da liga 7075-T6. Rao e Allamrajubm, 2017, tornearam 7075-T6 com $v_c = 50$ m/min obtendo valores ainda maiores de R_a (0,57 μm) e R_z (3,19 μm).

A otimização da liga 7075-T6 no corte a seco requereu uma velocidade de corte menor se comparado com MQL, porque baixa v_c não contribuiu com o aumento da temperatura na zona de corte. Com isto, a liga de alumínio não teve sua dureza reduzida, possibilitando um corte cisalhante sem o arrancamento de material e favorecendo a redução de rugosidade. Quando aplicado MQL a uma v_c mais alta, houve maior dificuldade de o fluido penetrar na interface cavaco-ferramenta para exercer seu papel lubrificante [Suarez, 2012], justificando assim a menor rugosidade no corte a seco.

Analisando-se os valores da Tabela 4.5 sob o ponto de vista produtivo, percebe-se que a combinação otimizada 5, além de gerar os menores valores de R_a e R_z , também apresenta uma taxa de remoção de material relativamente alta ($Q = 21$ cm³/min) quando comparada às outras condições que apresentaram valores de R_a e R_z próximos.

Observando as topografias geradas (Figura 4.12), constata-se um processo de corte que se apresenta estável, onde riscos não comprometem de modo significativo a superfície usinada.

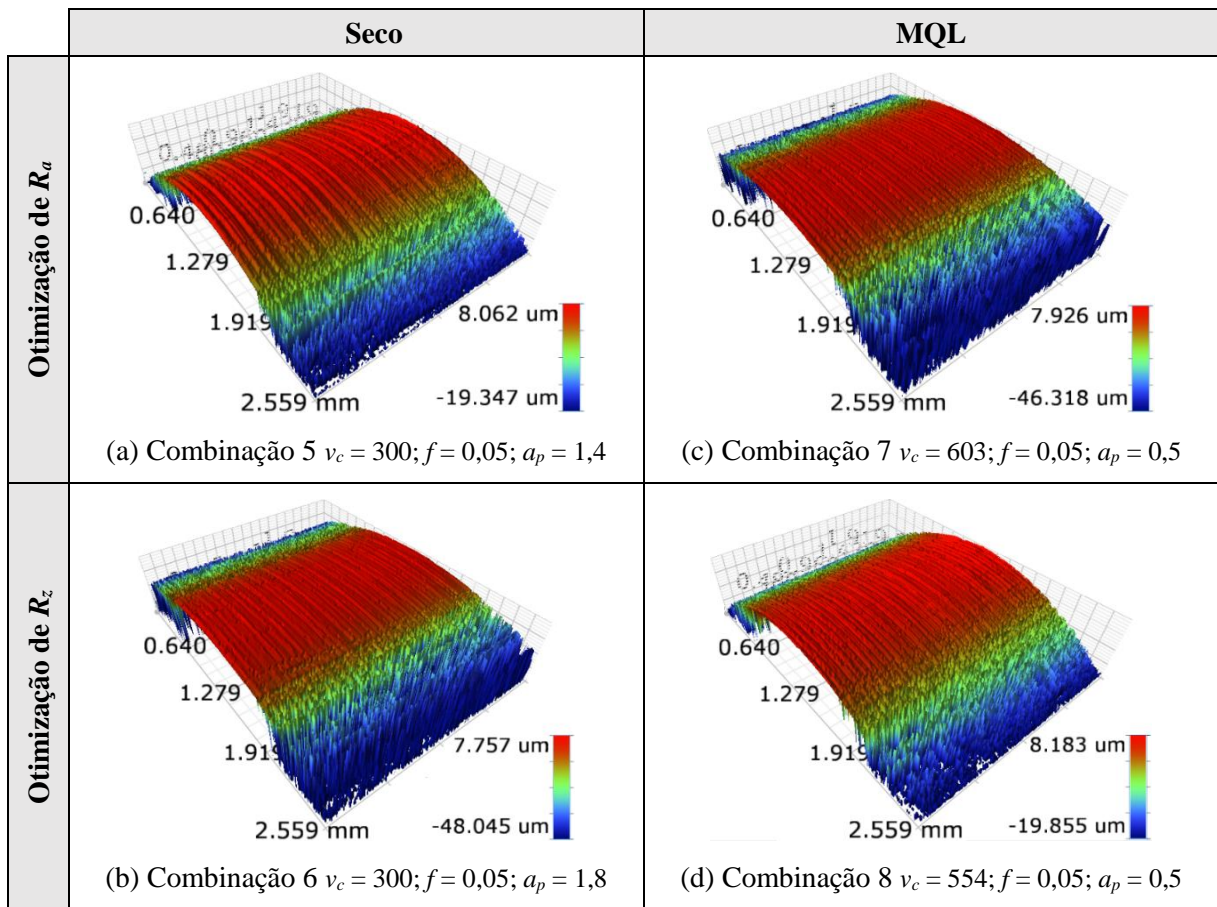


Figura 4.12 – Quadro de topografias de superfície após as otimizações para 7075-T6.

Na Figura 4.13 observam-se imagens dos cavacos gerados após a aplicação dos parâmetros de otimização para a liga de alumínio 7075-T6 e na Tabela 4.6 é exposto a classificação dos cavacos gerados a partir da otimização dos parâmetros de corte da liga de alumínio 7075-T6. Dentre essas amostras, a combinação 8 foi a que apresentou maior facilidade de quebra, gerando um cavaco em fita curto (1.2.4). As demais três situações apresentaram um cavaco não desejável, sendo ele longo ou emaranhado.

Tabela 4.6 – Cavacos gerados na usinagem do 7075-T6 após otimização.

Condição Lubrificante	Seco			MQL	
Combinação	5	6	7	8	
Forma do cavaco	1.3.4	1.1.4	1.3.4	1.2.4	

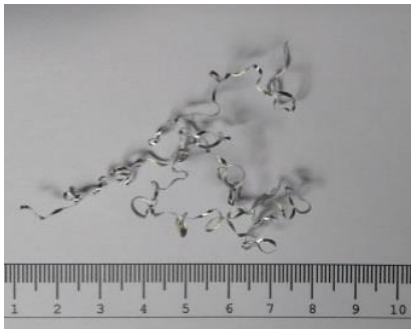

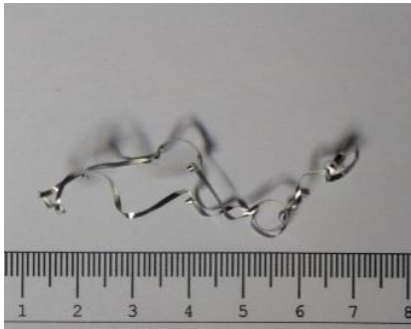

	Seco	MQL
Otimização de R_a	 <p>(a) Combinação 5 ($v_c = 300; f = 0,05; a_p = 1,4$)</p>	 <p>(c) Combinação 7 ($v_c = 603; f = 0,05; a_p = 0,5$)</p>
Otimização de R_z	 <p>(b) Combinação 6 ($v_c = 300; f = 0,05; a_p = 1,8$)</p>	 <p>(d) Combinação 8 ($v_c = 554; f = 0,05; a_p = 0,5$)</p>

Figura 4.13 – Quadro das imagens dos cavacos gerados após as otimizações para 7075-T6.

As amostras de cavaco resultantes das ligas 6082-T6 e 7075-T6 apontaram resultados não totalmente satisfatórios. Ao observar-se a composição química de ambas (Tabela 3.1), nota-se que entre os elementos que auxiliam na quebra do cavaco, o Zn se encontra em um percentual maior na liga 7075-T6, enquanto que o Mn e o Fe são mais abundantes na 6082-T6.

Neste trabalho, o Zn teve papel mais ativo no auxílio da quebra do cavaco, pois combinado na liga 7075-T6 lhe conferiu maior dureza [Sousa, 2013]. Isto pode ser observado nas imagens do Apêndice F (6082-T6) – cavacos mais longos – quando comparadas com as do Apêndice G (7075-T6).

5 CONCLUSÕES

As principais conclusões obtidas a partir da otimização do torneamento de acabamento a seco e com MQL nas ligas de alumínio 6082-T6 e 7075-T6 utilizando o projeto de experimentos Box-Behnken são apresentadas abaixo:

- Na usinagem do 6082-T6, a combinação otimizada 3 ($v_c = 300$ m/min, $f = 0,05$ mm/rev, $a_p = 0,5$ mm $\Rightarrow Q = 7,5$ cm³/min) com aplicação de MQL foi a que alcançou os menores valores de rugosidade ($R_a = 0,29$ μ m e $R_z = 1,52$ μ m). Já no corte a seco, os menores valores ($R_a = 0,31$ μ m e $R_z = 1,80$ μ m) foram com a combinação 2 ($v_c = 633$ m/min, $f = 0,05$ mm/rev, $a_p = 1,1$ mm $\Rightarrow Q = 34,8$ cm³/min).
- A combinação 2 torna-se a melhor escolha para o torneamento de acabamento da liga 6082-T6, pois oferece maior produtividade (maior taxa de remoção de material em comparação à combinação 3), dispensa o uso de MQL, e os valores gerados de R_a e R_z se aproximam satisfatoriamente dos menores resultados encontrados neste trabalho.
- Na usinagem do 7075-T6, a combinação otimizada 5 ($v_c = 300$ m/min, $f = 0,05$ mm/rev, $a_p = 1,4$ mm $\Rightarrow Q = 21$ cm³/min), realizando o corte a seco, foi o que alcançou os menores valores de rugosidades ($R_a = 0,21$ μ m, $R_z = 1,52$ μ m). A utilizar MQL, os menores valores ($R_a = 0,25$ μ m e $R_z = 1,55$ μ m) foram gerados com a combinação 8 ($v_c = 554$ m/min, $f = 0,05$ mm/rev, $a_p = 0,5$ mm $\Rightarrow Q = 13,8$ cm³/min).
- A combinação 5 torna-se a melhor escolha no torneamento de acabamento da liga 7075-T6, pois além de dispensar o uso de MQL, também gera uma maior taxa de remoção de material (comparado à combinação 8) e melhor de qualidade superficial.
- Tanto a otimização de resposta proposta pelo Box-Behnken quanto a aplicação de MQL com vazão de 100 ml/h e pressão de 5 bar aplicado perpendicularmente à interface ferramenta/peça com distância de aplicação fixada em 40 mm entre o bocal do nebulizador e a zona de corte, não foram totalmente eficazes na quebra do cavaco obtido no torneamento das ligas 6082-T6 e 7075-T6.

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

- Utilizar outros DOE, a fim de se obter uma maior flexibilidade quanto a otimização dos parâmetros de entrada do experimento.
- Realizar o experimento com diferentes posições do bocal do nebulizador e diferentes distancias entre ele e a zona de corte.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira do Alumínio. **ABAL Alumínio: Características químicas e físicas**. <http://abal.org.br/aluminio/caracteristicas-quimicas-e-fisicas/ligas/>, 2017, Acesso em 01-11-2018.

ABAL Alumínio: Características químicas e físicas. <http://abal.org.br/aluminio/caracteristicas-quimicas-e-fisicas/temperas/>, 2017, Acesso em 05-12-2018.

Almeida, D. T. **Análise microestrutural e avaliação mecânica de juntas soldadas por fricção e mistura mecânica (FSW) da liga de alumínio 5182-O**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 4287. **Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade**, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2002.

NBR ISO 209. **Alumínio e suas ligas – Composição química**, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2010.

NBR ISO 3685. **Ensaio de vida da ferramenta de ponta única para torneamento**, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017.

NBR ISO 4288. **Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil – Regras e procedimentos para avaliação da rugosidade**, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008.

NBR ISO 6834. **Alumínio e suas ligas – Classificação da composição química**, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2006.

ASM Handbook. **Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials**, vol. 2 of ASM Handbook, Ohio, 10th edition, 1990.

Astakhov, V. P. Editorial: tribology at the forefront of study and research on metal cutting, **International Journal Machining and Machinability of Materials**, vol. 2, p. 309-315, 2007.

Balestrassi, P. P. Estatística Aplicada. Apostila do Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Departamento de Produção, UNIFEI, Itajubá – MG, 2003.

Banerjee, S. B. Organisational strategies for sustainable development: developing a research agenda for the new Millennium, **Australian Journal of Management**, vol. 27, p.105-117, 2002.

Baptista, A. L. B. Aspectos metalúrgicos na avaliação da usinabilidade de aços, **Revista Escola de Minas**, vol. 55, p.103-109, 2002.

Barletta, M., Costanza, G. e Pilini, R. Al₂O₃ thin coating of AA 6082-T6 components using a fast regime fluidized bed, **Thin Solid Films**, vol. 515, p. 141-151, 2006.

Bertoncini, A. R. A. **Efeito das diferentes direções de aplicação de jato de fluido de corte no torneamento de um aço de difícil usinagem**. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual Paulista, 2007.

Bonfitto, G. B. B. **Estudo do comportamento mecânico da liga Al-Mg-Si 6005A solubilizada e envelhecida**. Dissertação de mestrado, Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2016.

Bordinassi, E. C. **Contribuição ao estudo da integridade superficial de um aço inoxidável super-duplex após usinagem**. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, 2006.

Box, G. E. P. e Behnken, D. W. Some New Three Level Design for the Study of Quantitative Variables, **Technometrics**, vol. 2, p. 455-475, 1960.

Çakır, A., Yağmur, S., Kavak, N., Küçüktürk, G. e Şeker, U. The effect of minimum quantity lubrication under different parameters in the turning of AA 7075 and AA 2024 aluminium alloys, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 84, p. 2515–2521, 2016.

Carpinetti, L. C. R. **Gestão da qualidade: conceitos e técnicas**. Atlas. S.A., São Paulo, 2ª edição, 2012.

Carter, M. A. **Telecurso 2000 – Metrologia Aula 19**, https://www.grima.ufsc.br/capp/rugosidade/aula19_ParametrosDeRugosidade.pdf, Acesso em: 13-11-2018.

Charnet, R., Bonvino, H., Freire, C. A. L e Charnet, E. M. R. **Análise de modelos de regressão linear com aplicações**. Unicamp, Campinas, 2nd edition, 1999.

Chetean, Ghosh, S., Rao, P. V. Specific cutting energy modeling for turning nickel-based Nimonic 90 alloy under MQL condition, **International Journal of Mechanical Sciences**, vol.146/147, p. 25-38, 2018.

Deepak, D. and Rajendra B. Optimization of Machining Parameters for Turning of Al6061 using Robust Design Principle to minimize the surface roughness, **Procedia Technology**, vol. 24, p. 372-378, 2016.

Dhar, N. R., Kamruzzaman, M. e Mahiuddin Ahmed. Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear and surface roughness in turning AISI-4340 steel, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 172, p. 299-304, 2006.

Diniz, A. E., Marcondes, F. C. e Coppini, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. Artliber, São Paulo, 8ª edição, 2013.

Dixit, U. S., Sarma, D. K. e Davim, J. P. **Environmentally Friendly Machining**, Springer, London, 1rd edition, 2012.

Doane, D. P. e Seward, L. E. **Estatística aplicada à administração e economia**. AMGH, Porto Alegre, 4er edition, 2014.

Downing, D. e Clark, J. **Estatística Aplicada**. Saraiva, São Paulo, 3rd edition, 2011.

Espanhol, V. **Análise dos esforços de corte e acabamento superficial no torneamento de aço com ferramenta de superfície lisa e com quebra-cavaco**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.

Ferraresi, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. Edgard Blücher Ltda., São Paulo, 1rd edition, 1995.

Ferraresi, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. Edgard Blücher, São Paulo, 16rd edition, 2013.

Ferreira, S. L. C, Bruns, R. E., Ferreira, H. S., Matos, G. D., David, J. M., Brandão, G. C., da Silva, E. G. P., Portugal, L. A., Reis, P. S., Souza, A. S. e dos Santos, W. N. L. Box-Behnken desing: An alternative for the optimization of analytical methods, **Analytica Chimica Acta**, vol. 597, p. 179-186, 2007.

Garcia, R. F., Feix, E. C., Mendel, H. T., Gonzalez, A. R. e Souza, A. J. Optimization of cutting parameters for finish turning of 6082-T6 aluminum alloy under dry and RQL conditions, **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, vol. 41, p. 317-327, 2019.

Gonçalves, R. A., Silva, M. B. Investigation of Machinability in Dry Cutting of Aluminum Alloys of 6XXX Series, **Transactions of the North American Manufacturing Research Institution of SME**, vol. 41, p. 258-265, 2013.

Heinz, A., Haszler, A., Keidel, C., Moldenhauer, S., Benedictus, R. e Miller, W. S. Recent development in aluminium alloys for aerospace applications, **Materials Science and Engineering A**, vol. 280, p. 102-107, 2000.

Horváth, R. e Drégelyi-Kiss, A. Analysis of surface roughness of aluminum alloys fine turned: United phenomenological models and multi-performance optimization, **Measurement**, vol. 65, p. 181-192, 2015.

Kardekar, A. D. **Modeling and optimization of machining performance measures in face milling of automotive aluminum alloy A380 under different lubrication/cooling conditions for sustainable manufacturing**, Dissertação de mestrado, Universidade de Kentucky, 2005.

Kilic, D. S. e Raman, S. Observations of the tool–chip boundary conditions in turning of aluminum alloys, **Wear**, vol. 262, p. 889-904, 2007.

Klocke, F., Beck, T., Eisenblatter, G., Fritsch, R., Lung, D. e Pohls, M. Applications of minimal quantity lubrication (MQL) in cutting and grinding, **12th International Colloquium Industrial and Automotive Lubrification**, p. 11-13, 2000.

Krolczyk, G.M., Nieslony, P., Maruda, R. W. e Wojciechowski, S. Dry cutting effect in turning of a duplex stainless steel as a key factor in clean production, **Journal of Cleaner Production**, vol. 142, p. 3343-3354, 2017.

Liang, X., Liu, Z., Liu, W. e Li, X. Sustainability assessment of dry turning Ti-6Al-4V employing uncoated cemented carbide tools as clean manufacturing process, **Journal of Cleaner Production**, vol. 214, p. 279-289, 2019.

Liew, W. Y. H. The effect of air in the machining of aluminium alloy, **Tribology Letters**, vol.17, p. 41-49, 2004.

Lima, F. E. e Corrêa, M. Correlação entre os parâmetros de rugosidade: uma abordagem matemática, **Revista Tecnologia**, vol. 29, p. 110-116, 2008.

Lizardo, B. F. **Estudo sobre a influência de parâmetros de usinagem na furação dos polímeros UHMW, POM e PTFE**. Dissertação de mestrado, Universidade Católica de Minas Gerais, 2010.

Lobato, F. S. **Otimização Multi-objetivo para o Projeto de Sistemas de Engenharia**. Tese de doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, 2008.

Machado, A. R., Abrão, A. M., Coelho, R. T. e Silva, M. B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. Edgard Blucher, São Paulo, 1rd edition, 2009.

Madhavi, S. K., Sreeramulu, D. e Venkatesh, M. Evaluation of Optimum Turning Process of Process Parameters Using DOE and PCA Taguchi Method, **Materials Today: Proceedings**, vol. 4, p. 1937-1946, 2017.

Mikhailova, I. Sustentabilidade: evolução dos conceitos teóricos e os problemas da mensuração prática, **Revista Economia e Desenvolvimento**, vol. 16, p. 22-41, 2004.

Mitutoyo. **Medidor de Rugosidade Superficial Modelo SJ-201: Manual do usuário**. Mitutoyo America Corporation, 2004.

Montgomery, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. John Wiley & Sons, New York, 3rd edition, 1991.

Montgomery, D. C. e Runger, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. LTC, Rio de Janeiro, 2nd edition, 2003.

Montgomery, D. C. **Applied Statistics and Probability for Engineers**. John Wiley & Sons, Hoboken, 4th edition, 2007.

Montgomery, D. C. e Runger, G. C. **Applied statistics and probability for engineers**, Hoboken, 6th edition, 2013.

Moreira, L. T. S. **A influência da aplicação de fluido de corte no torneamento da liga de alumínio AA 7075**. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual Paulista, 2012.

Nguyena, N. e Borkowskib, J. J. New 3-level response surface designs constructed from incomplete block designs, **Journal of Statistical Planning and Inference**, vol. 138, p. 294-305, 2008.

Nur, R., Kurniawan, D., Noordin, M. Y. e Izman, S. Optimizing power consumption for sustainable dry turning of treated aluminum alloy, **Procedia Manufacturing**, vol. 2, p. 558-562, 2015.

Oakland, J. S. **Statistical Process Control**. Butterworth-Heinemann, Oxford, 5rd edition, 2003.

Oliveira, J. F. G. e Alves, S. M. Adequação ambiental dos processos usinagem utilizando Produção mais limpa como estratégia de gestão ambiental, **Produção**, vol. 17, p. 129-138, 2007.

Oliveira, J. F. **Estudo do fresamento de acabamento da liga de alumínio aeronáutico 7075-T6**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Itajubá, 2015.

Paese, C., Caten, C. T. e Ribeiro, J. L. D. Aplicação da Análise de Variância na Implantação do CEP, **Revista Produção**. Vol. 11, p. 17-26, 2001.

Pattanaik, S. K., Bhoi, N. K., Padhi, S., Sarangi, S. K. Dry machining of aluminum for proper selection of cutting tool: tool performance and tool wear, **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. Vol. 98, p. 1-11, 2018.

Paul, S., Dhar, N. R. e Chattopadhyay, A. B. Chattopadhyay, Beneficial effects of cryogenic cooling over dry and wet machining on tool wear and surface finish in turning AISI 1060 steel, **Proceedings of the ICAMT**, vol. 1, p. 209-2014, 2000.

Pereira, O., Català, P., Rodríguez, A., Ostra, T., Vivancos, J., Rivero, A. e López-de-Lacalle, L. N. The use of hybrid CO₂+MQL in machining operations, **Procedia Engineering**, vol. 123, p. 492-499, 2015.

Perveen, A. e Jahan, M. P. Modeling and optimization of crater size generated during micro- EDM of Ti alloy using Response surface method, **Materials Today: Proceedings**, vol. 5, p. 18307-18314, 2018.

Rajendra, B., Deepak, D. Optimization of Process Parameters for Increasing Material Removal Rate for Turning Al6061 Using S/N ratio, **Procedia Technology**, vol. 24, p. 399 – 405, 2016.

Raykar, S. J., D'Addona, D. M. e Mane, A. M. Multi-objective optimization of high speed turning of Al 7075 using grey relational analysis, **Procedia CIRP**, vol. 33, p. 293-298, 2015.

Rao, K. S. S. e Allamraju, K. V. Effect on Micro-Hardness and Residual Stress in CNC Turning Of Aluminium 7075 Alloy, **Materials Today: Proceedings**, vol. 4, p. 975-981, 2017.

Rotella, G. Effect of surface integrity induced by machining on high cycle fatigue life of 7075-T6 aluminum alloy, **Journal of Manufacturing Processes**, vol. 42, p. 83-91, 2019.

Ruan, Y., Qui, X. M., Gong, W. B., Sun, D. Q. e Lí, Y. P. Mechanical properties and microstructures of 6082-T6 joint welded by twin wire metal inert gas arc welding with the SiO₂ flux, **Materials & Design**, vol. 35, p. 20-24, 2012.

Santos Jr., M. C., Machado, A. R., Sales, W. F., Barrozo, M. A. S. e Ezugwu E. O. Machining of aluminum alloys: a review, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 86, p. 3067–3080, 2016.

Santos, S. C., Sales, W. F. **Aspectos Tribológicos da Usinagem dos Materiais**. Artliber Editora Ltda., São Paulo, 1st edition, 2007.

Schuitek, A. J. **Usinabilidade de ligas de alumínio tratáveis termicamente**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 1997.

Sharif, M. N., Pervaiz, S. e Deiab, I. Potential of alternative lubrication strategies for metal cutting processes: a review, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 89, p. 2447-2479, 2017

Sharma, A. K., Tiwari, A. K. e Dixit, A. R. Effects of Minimum Quantity Lubrication (MQL) in machining processes using conventional and nanofluid based cutting fluids: A comprehensive review, **Journal of Cleaner Production**, vol. 127, p. 1-18, 2016.

Sharma, V. S., Singh, G. e Sørby, K. A Review on Minimum Quantity Lubrication for Machining Processes, **Materials and Manufacturing Processes**, vol. 30, p. 935-953, 2015.

Shaw, M. C. **Metal Cutting Principles**. Oxford University Press, Ney York, 2nd edition, 2005.

Singh, A. K., Datta, S., Chattopadhyay, A., Riddick, J. C. e Hall, A. J. Fatigue crack initiation and propagation behavior in Al – 7075 alloy under in-phase bending-torsion loading, **International Journal of Fatigue**, vol. 126, p. 346-356, 2019.

Smith, G. T. **Advanced machining: the handbook of cutting technology**. IFS Publications, 1989.

Sousa, M. N. **Influência das propriedades mecânicas das ligas de alumínio na usinabilidade - Foco no grau de recalque, na dimensão da zona de fluxo e na microdureza dos cavacos**. Tese de doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, 2013.

Souza, A. J., Rodrigues, R. I. e Rosa, G. C. Verificação das forças geradas no torneamento a seco, com fluido em abundância e em quantidade reduzida do aço AISI 420C utilizando ferramenta wiper, **IX Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, Fortaleza, 2016.

Stahle, L. e Wold, S. Analysis of variance (ANOVA). **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, vol. 6, 259–272, 1989.

Stephenson, D. A. e Agapiou, J. S. **Metal Cutting Theory and Practice**. Boca Raton, CRC Press, 3rd edition, 2016.

Stevenson, W. J. **Estatística aplicada à administração**. Harbra, São Paulo, 1 rd edition, 2001.

Suarez, M. P. **Influência da texturalização a laser em ferramentas de metal-duro revestidas na usinagem do aço ABNT 1050**. Tese de doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, 2012

Spiegel, M. R. **Estatística**. Makron Books, São Paulo, 3rd edition, 1993.

Tawakoli, T., Hadad, M., Sadeghi, M. H., Daneshi, A. e Sadeghi, B. Minimum quantity lubrication in grinding: effects of abrasive and coolant–lubricant types, **Journal of Cleaner Production**, v. 19, p. 2088-2099, 2011.

Teixeira Filho, F. **A utilização de fluido de corte no fresamento do aço inoxidável 15-5PH**. Tese de doutorado, Universidade Estadual de Campinas, 2006.

Telles, F. **Avaliação da rugosidade no torneamento de acabamento em titânio comercialmente puro grau 4 sob uma perspectiva de usinagem ambientalmente amigável**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018.

Theil, H. Principles of Econometrics. New York: Jonh Wilwey & Sons, 1978.

Trent, E. M. and Wright, P. K. **Metal Cutting**. Butterworth-Heinemann, Boston, 4 rd edition, 2000.

Vázquez, J., Carpinteri, A., Bohórques, L. e Vantadori, S. Fretting fatigue investigation on Al 7075-T651 alloy: Experimental, analytical and numerical analysis, **Tribology International**, vol. 135, p. 478-487, 2019.

Vicentini, R. **Desenvolvimento de suporte cerâmico para aplicação em soldas unilaterais em ligas de alumínio**. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2013.

Werkem. M. C. C. **Ferramentas estatísticas básicas para o gerenciamento de processos**. Fundação Cristiano Ottoni, Belo Horizonte, 2 rd edition, 1995.

Zeilmann, R. P., Vacaro, T., Tomé, A. e Bordin, F. Redução da utilização de fluidos de corte: uma abordagem ecológica na gestão de processos de usinagem, **II Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente**, Bento Gonçalves, 2010.

APÊNDICE A – Valores de Rugosidade Medidos com o Rugosímetro

Tabela A.1 – Valores de R_a e R_z obtidos com medição utilizando o rugosímetro.

Amostras (Passes)	v_c (m/min)	f (mm/rev)	a_p (mm)	6082-T6				7075-T6			
				Seco		MQL		Seco		MQL	
				R_a (μm)	R_z (μm)	R_a (μm)	R_z (μm)	R_a (μm)	R_z (μm)	R_a (μm)	R_z (μm)
1	600	0,15	1,25	1,42	6,36	1,07	5,08	2,01	7,28	2,06	7,52
2	300	0,05	1,25	0,54	3,04	0,13	0,85	0,12	0,84	0,18	1,30
3	900	0,05	1,25	0,58	3,84	0,14	0,97	0,15	1,03	0,16	1,17
4	300	0,25	1,25	4,43	18,31	3,15	15,67	5,38	21,01	5,22	20,45
5	900	0,25	1,25	4,25	16,76	3,16	15,35	5,46	21,33	4,92	19,77
6	300	0,15	0,50	1,98	9,57	0,97	4,38	2,02	8,09	2,12	11,01
7	900	0,15	0,50	1,33	6,13	1,06	4,70	2,19	7,81	2,05	7,38
8	600	0,15	1,25	1,41	6,60	1,29	5,74	2,01	7,03	1,78	7,14
9	300	0,15	2,00	4,52	5,52	1,05	4,76	2,09	7,32	2,24	9,77
10	900	0,15	2,00	1,34	6,29	1,09	4,87	2,09	7,48	2,09	7,79
11	600	0,05	0,50	0,47	2,83	0,12	0,77	0,18	1,23	0,14	0,93
12	600	0,25	0,50	3,41	14,40	3,20	14,25	5,72	21,35	5,20	19,15
13	600	0,05	2,00	0,59	3,52	0,29	2,07	0,32	1,72	0,31	1,84
14	600	0,25	2,00	4,46	18,39	3,46	17,55	5,50	22,19	2,90	15,35
15	600	0,15	1,25	1,41	7,06	0,96	4,31	2,00	7,02	1,97	7,41

APÊNDICE B – ANOVA da Usinagem do 6082-T6

Tabela B.1 – ANOVA para valores de R_a na usinagem do 6082-T6 a seco.

Fator	GDL	SQ	MQ	F	Valor-p	Proporção (%)
v_c (m/min)	1	0,007	0,007	3,490	0,121	0,024
f (mm/rev)	1	24,957	24,957	12085,770	< 0,001	88,751
a_p (mm)	1	0,035	0,035	17,000	0,009	0,124
$v_c \times v_c$	1	0,001	0,001	0,470	0,523	0,003
$f \times f$	1	3,049	3,049	1476,61	< 0,001	10,842
$a_p \times a_p$	1	0,001	0,001	0,140	0,727	0,003
$v_c \times f$	1	0,002	0,002	1,210	0,321	0,007
$v_c \times a_p$	1	0,001	0,001	0,770	0,419	0,003
$f \times a_p$	1	0,034	0,034	16,570	0,010	0,121
Erro	5	0,010	0,002	-	-	-
Total	14	28,120				
$R^2 = 99,96\%$				$R^2_{aj.} = 99,90\%$		

Tabela B.2 – ANOVA para valores de R_z na usinagem do 6082-T6 a seco.

Fator	GDL	SQ	MQ	F	Valor-p	Proporção (%)
v_c (m/min)	1	0,110	0,110	1,300	0,306	0,022
f (mm/rev)	1	440,154	440,154	5182,960	< 0,001	91,311
a_p (mm)	1	0,414	0,414	4,880	0,078	0,086
$v_c \times v_c$	1	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,992	0,000
$f \times f$	1	40,291	40,291	474,43	< 0,001	8,360
$a_p \times a_p$	1	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,967	0,000
$v_c \times f$	1	0,004	0,004	0,040	0,845	0,001
$v_c \times a_p$	1	0,168	0,168	1,980	0,218	0,035
$f \times a_p$	1	0,006	0,006	0,080	0,795	0,001
Erro	5	0,425	0,085	-	-	-
Total	14	482,035				
$R^2 = 99,91\%$				$R^2_{aj.} = 99,75\%$		

Tabela B.3 – ANOVA para valores de R_a na usinagem do 6082-T6 com MQL.

Fator	GDL	SQ	MQ	F	Valor-p	Proporção (%)
v_c (m/min)	1	0,043	0,043	2,580	0,169	0,294
f (mm/rev)	1	12,326	12,326	730,410	< 0,001	84,240
a_p (mm)	1	0,020	0,020	1,190	0,326	0,137
$v_c \times v_c$	1	0,039	0,039	2,300	0,190	0,266
$f \times f$	1	1,927	1,927	114,220	< 0,001	13,170
$a_p \times a_p$	1	0,027	0,027	1,580	0,264	0,184
$v_c \times f$	1	0,137	0,137	8,110	0,036	0,936
$v_c \times a_p$	1	0,001	0,001	0,070	0,798	0,007
$f \times a_p$	1	0,007	0,007	0,430	0,542	0,048
Erro	5	0,084	0,017	-	-	-
Total	14	14,632				
		$R^2 = 99,4\%$		$R^2_{aj.} = 98,4\%$		

Tabela B.4 – ANOVA para valores de R_z na usinagem do 6082-T6 com MQL.

Fator	GDL	SQ	MQ	F	Valor-p	Proporção (%)
v_c (m/min)	1	0,162	0,162	1,460	0,281	0,037
f (mm/rev)	1	380,880	380,880	3415,560	< 0,001	86,190
a_p (mm)	1	0,684	0,684	6,140	0,056	0,155
$v_c \times v_c$	1	0,082	0,082	0,740	0,430	0,018
$f \times f$	1	58,905	58,905	528,23	< 0,001	13,330
$a_p \times a_p$	1	0,006	0,006	0,050	0,831	0,001
$v_c \times f$	1	0,185	0,185	1,660	0,256	0,042
$v_c \times a_p$	1	0,032	0,032	0,290	0,613	0,007
$f \times a_p$	1	0,176	0,176	1,580	0,264	0,040
Erro	5	0,558	0,112	-	-	-
Total	14	441,922				
		$R^2 = 99,9\%$		$R^2_{aj.} = 99,6\%$		

APÊNDICE C – ANOVA da Usinagem do 7075-T6

Tabela C.1 – ANOVA para valores de R_a na usinagem do 7075-T6 a seco.

Fator	GDL	SQ	MQ	F	Valor-p	Proporção (%)
v_c (m/min)	1	0,004	0,004	3,620	0,116	0,008
f (mm/rev)	1	48,955	48,955	49037,240	< 0,001	95,354
a_p (mm)	1	< 0,001	< 0,001	0,050	0,832	0,000
$v_c \times v_c$	1	0,006	0,006	6,170	0,056	0,012
$f \times f$	1	2,329	2,329	2332,630	< 0,001	4,540
$a_p \times a_p$	1	< 0,001	< 0,001	0,160	0,702	0,000
$v_c \times f$	1	< 0,001	< 0,001	< 0,001	1,000	0,000
$v_c \times a_p$	1	< 0,001	< 0,001	0,030	0,880	0,000
$f \times a_p$	1	< 0,001	< 0,001	0,230	0,655	0,000
Erro	5	0,005	0,001	-	-	-
Total	14	51,340				
$R^2 = 99,9\%$				$R^2_{aj} = 99,8\%$		

Tabela C.2 – ANOVA para valores de R_z na usinagem do 7075-T6 a seco.

Fator	GDL	SQ	MQ	F	Valor-p	Proporção (%)
v_c (m/min)	1	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,959	0,000
f (mm/rev)	1	805,008	805,008	46482,980	< 0,001	92,930
a_p (mm)	1	0,021	0,021	1,210	0,321	0,002
$v_c \times v_c$	1	0,001	0,001	0,060	0,817	0,000
$f \times f$	1	60,588	60,588	3498,490	< 0,001	6,994
$a_p \times a_p$	1	0,058	0,058	3,380	0,126	0,007
$v_c \times f$	1	0,034	0,034	1,980	0,219	0,004
$v_c \times a_p$	1	0,021	0,021	1,210	0,321	0,002
$f \times a_p$	1	0,017	0,017	0,980	0,369	0,002
Erro	5	0,087	0,012	-	-	-
Total	14	866,274				
$R^2 = 99,9\%$				$R^2_{aj} = 99,8\%$		

Tabela C.3 – ANOVA para valores de R_a na usinagem do 7075-T6 com MQL.

Fator	GDL	SQ	MQ	F	Valor-p	Proporção (%)
v_c (m/min)	1	0,001	0,001	0,000	0,947	0,003
f (mm/rev)	1	31,561	31,561	103,190	< 0,001	86,96
a_p (mm)	1	0,500	0,500	1,630	0,257	1,378
$v_c \times v_c$	1	0,430	0,430	1,410	0,289	1,184
$f \times f$	1	0,510	0,510	1,660	0,254	1,405
$a_p \times a_p$	1	0,312	0,312	1,020	0,358	0,860
$v_c \times f$	1	0,001	0,001	0,000	0,966	0,003
$v_c \times a_p$	1	0,000	0,000	0,000	0,986	0,000
$f \times a_p$	1	1,392	1,392	4,550	0,086	3,835
Erro	5	1,529	0,306	-	-	-
Total	14	36,295				
$R^2 = 95,79\%$				$R^2_{aj.} = 88,20\%$		

Tabela C.4 – ANOVA para valores de R_z na usinagem do 7075-T6 com MQL.

Fator	GDL	SQ	MQ	F	Valor-p	Proporção (%)
v_c (m/min)	1	0,249	0,249	0,130	0,730	0,040
f (mm/rev)	1	560,288	560,288	300,310	< 0,001	90,904
a_p (mm)	1	1,805	1,805	0,970	0,370	0,293
$v_c \times v_c$	1	4,103	4,103	2,200	0,198	0,665
$f \times f$	1	29,034	29,034	15,560	0,011	4,710
$a_p \times a_p$	1	3,717	3,717	1,99	0,217	0,603
$v_c \times f$	1	0,230	0,230	0,120	0,740	0,037
$v_c \times a_p$	1	0,013	0,013	0,010	0,936	0,002
$f \times a_p$	1	6,682	6,682	3,580	0,117	1,084
Erro	5	9,328	1,866	-	-	-
Total	14	616,347				
$R^2 = 98,49\%$				$R^2_{aj.} = 95,76\%$		

APÊNDICE D – Topografias das Superfícies Usinadas do 6082-T6

Tabela D.1 – Quadro da topografia da superfície usinada a seco na liga 6082-T6.

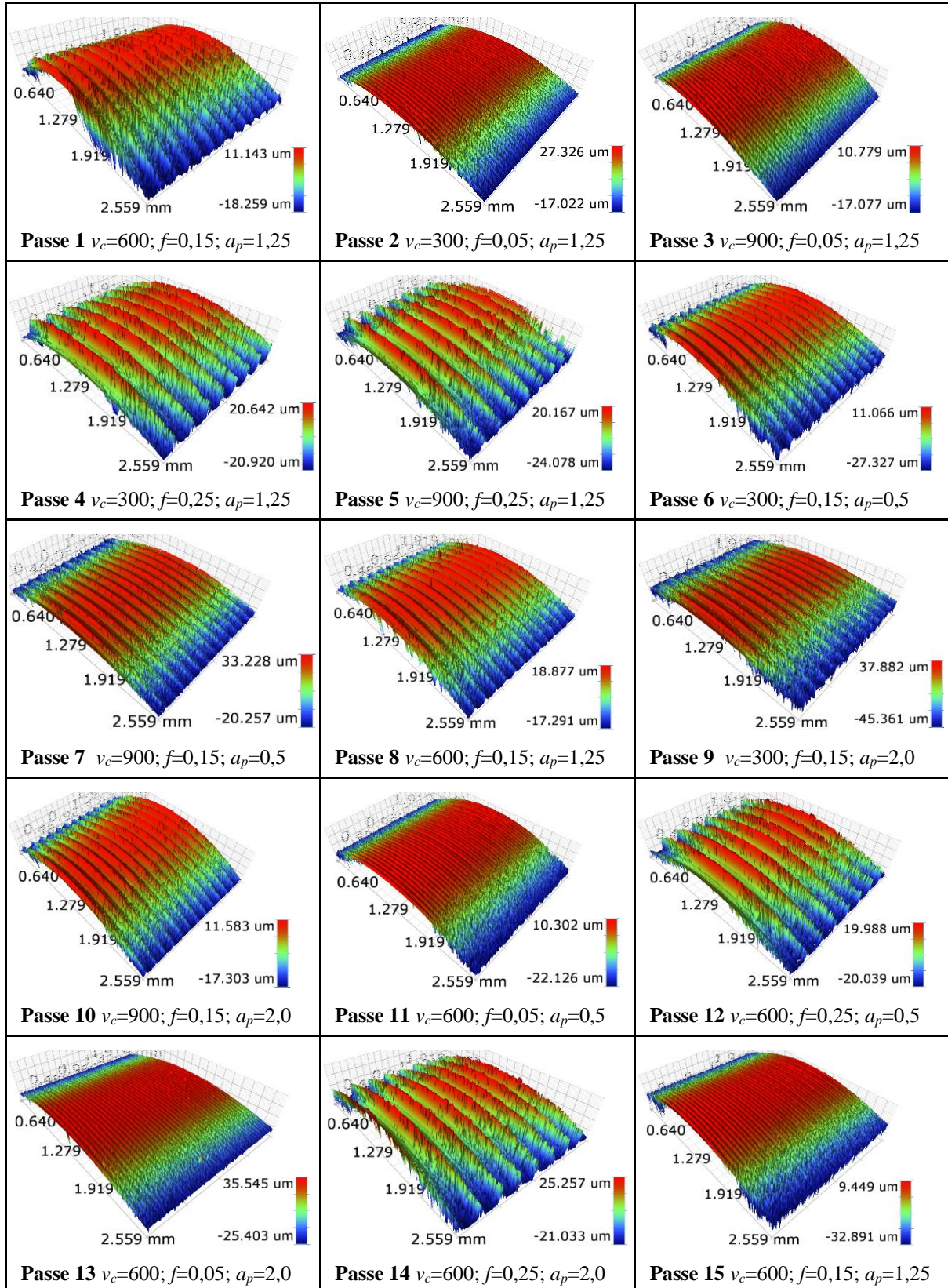
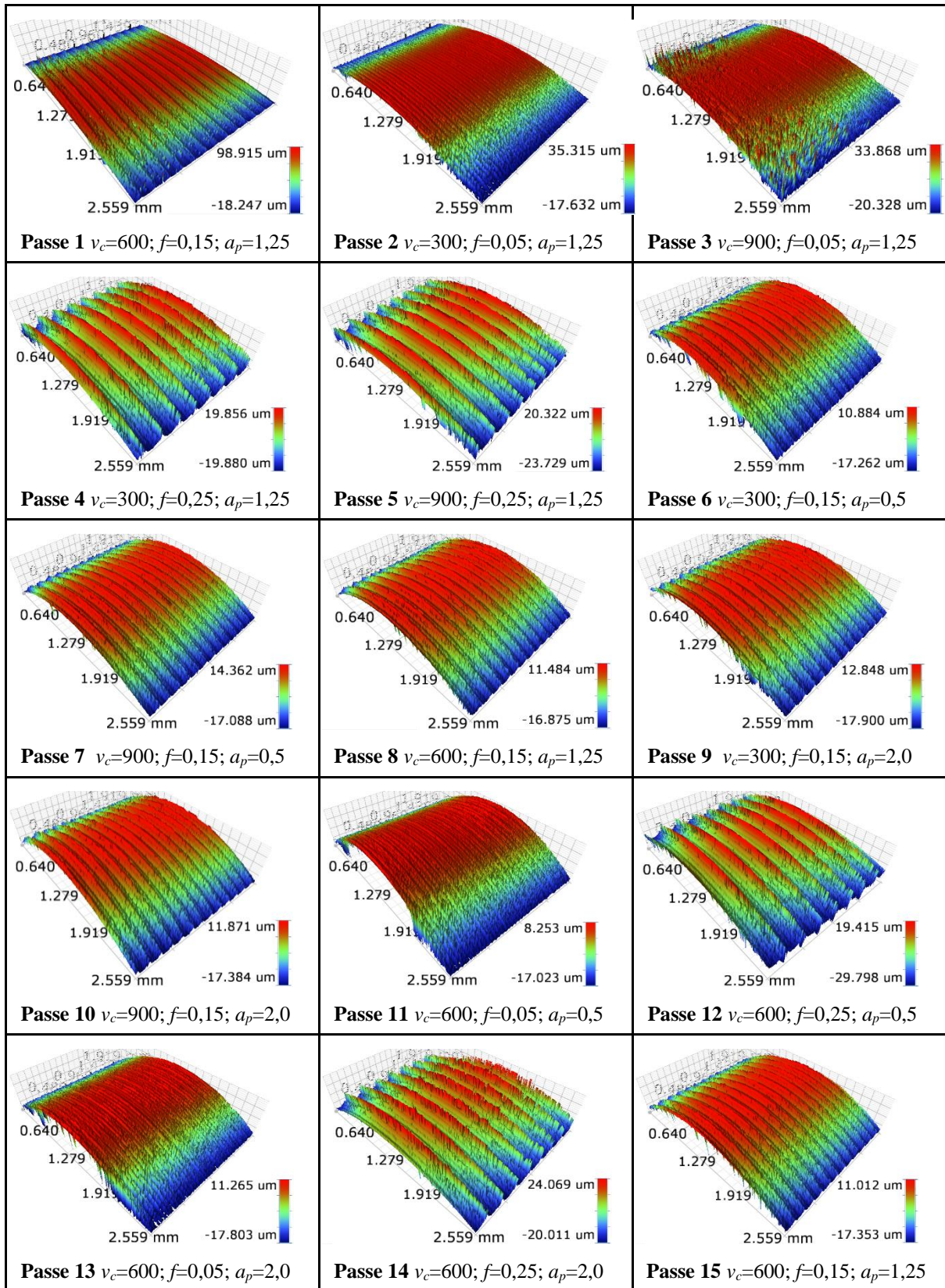


Tabela D.2 – Quadro da topografia da superfície usinada com MQL na liga 6082-T6.



APÊNDICE E – Topografias das Superfícies Usinadas do 7075-T6

Tabela E.1 – Quadro da topografia da superfície usinada a seco na liga 7075-T6.

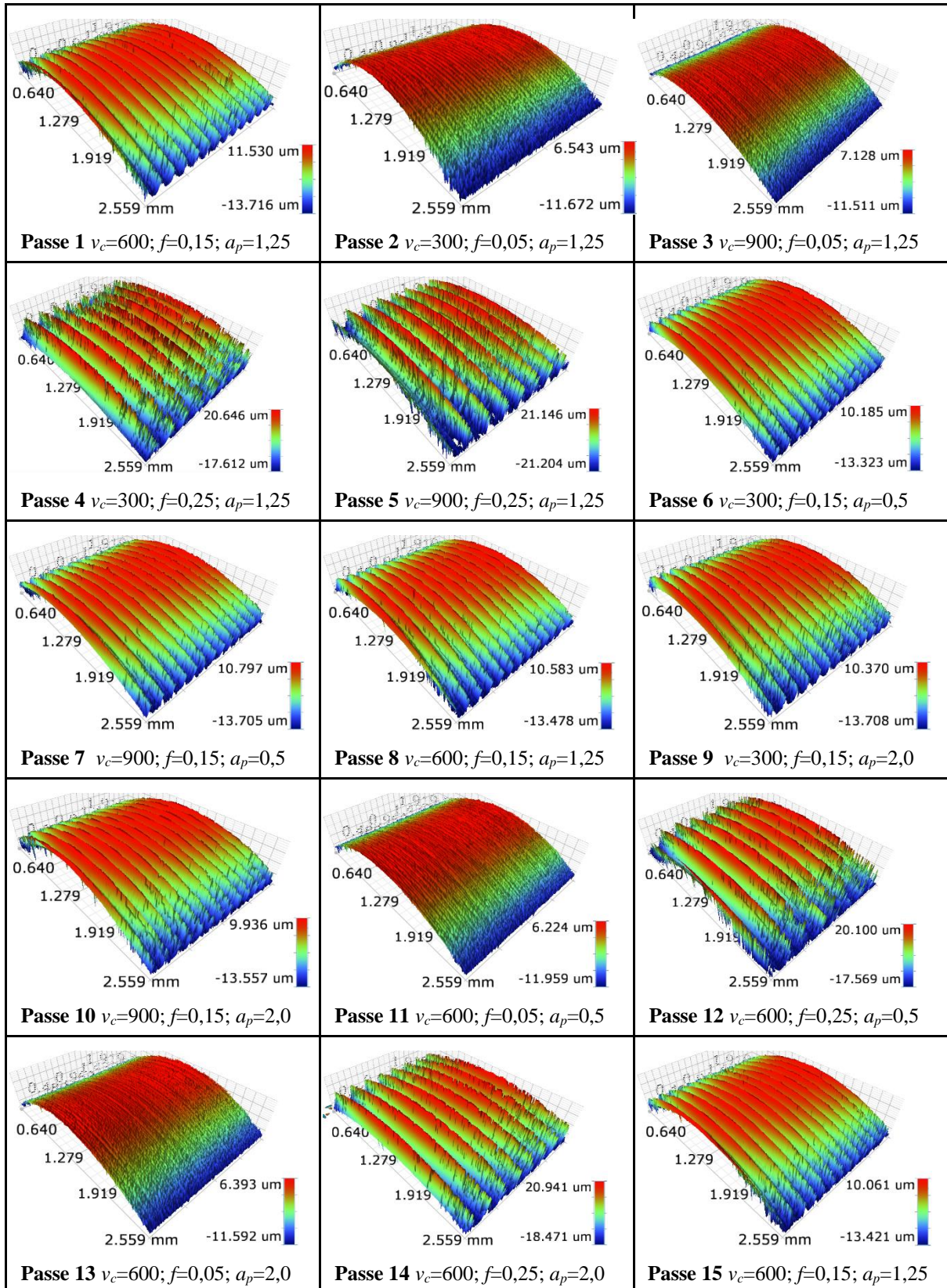
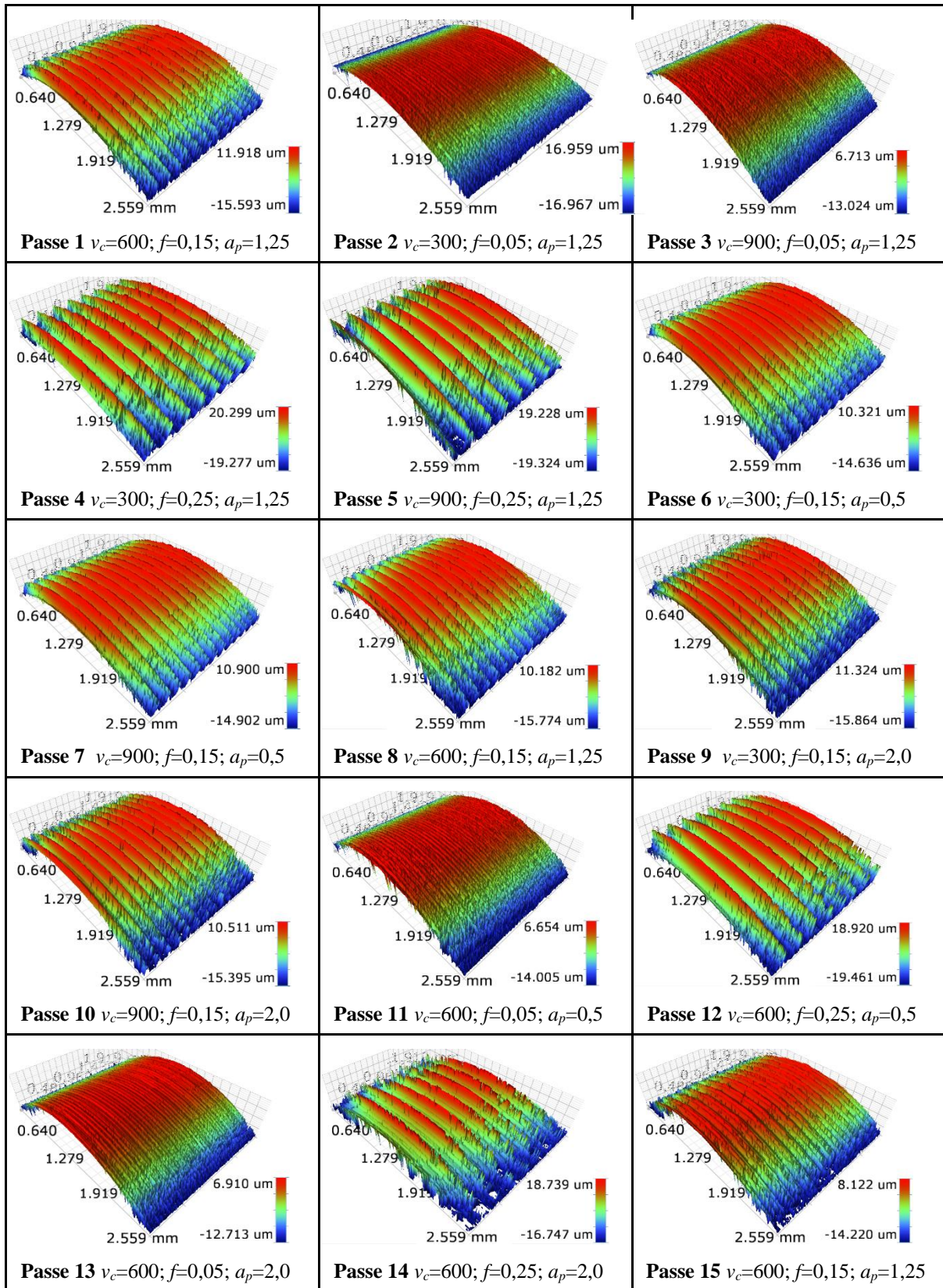

















Tabela E.2 – Quadro da topografia da superfície usinada com MQL na liga 7075-T6.




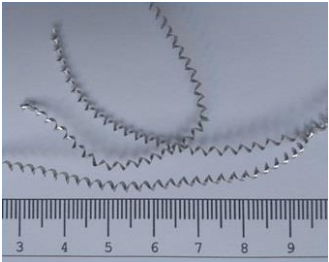


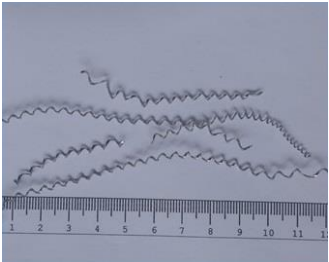
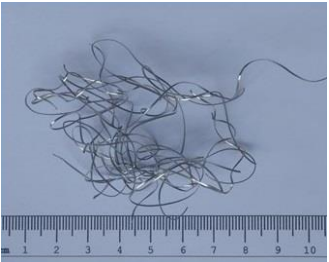
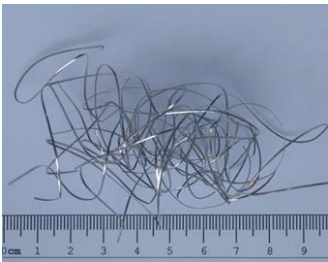

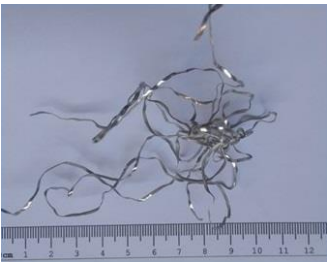
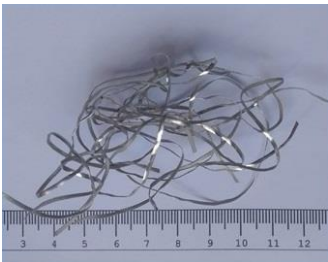
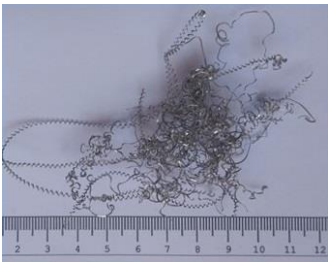
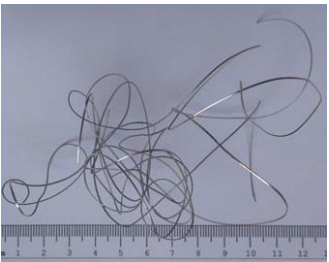



APÊNDICE F – Quadros dos Cavacos Gerados na Usinagem do 6082-T6

Tabela F.1 – Quadro mostrando o cavaco do torneamento a seco na liga 6082-T6.

		
Passe 1 $v_c=600; f=0,15; a_p=1,25$	Passe 2 $v_c=300; f=0,05; a_p=1,25$	Passe 3 $v_c=900; f=0,05; a_p=1,25$
		
Passe 4 $v_c=300; f=0,25; a_p=1,25$	Passe 5 $v_c=900; f=0,25; a_p=1,25$	Passe 6 $v_c=300; f=0,15; a_p=0,5$
		
Passe 7 $v_c=900; f=0,15; a_p=0,5$	Passe 8 $v_c=600; f=0,15; a_p=1,25$	Passe 9 $v_c=300; f=0,15; a_p=2,0$
		
Passe 10 $v_c=900; f=0,15; a_p=2,0$	Passe 11 $v_c=600; f=0,05; a_p=0,5$	Passe 12 $v_c=600; f=0,25; a_p=0,5$
		
Passe 13 $v_c=600; f=0,05; a_p=2,0$	Passe 14 $v_c=600; f=0,25; a_p=2,0$	Passe 15 $v_c=600; f=0,15; a_p=1,25$

*Para v_c unidades expressas em m/min; para f em mm/rev; a_p em mm.

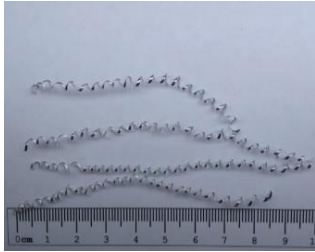


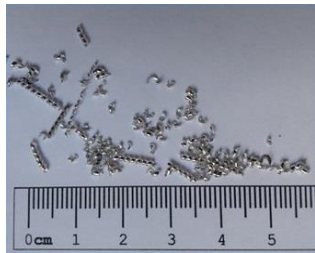



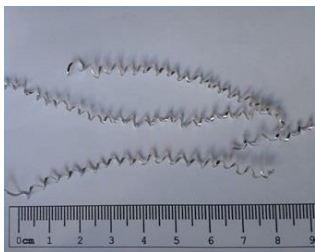


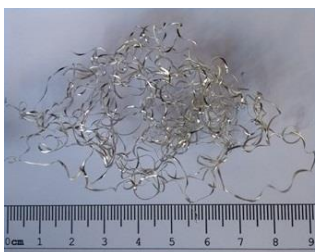



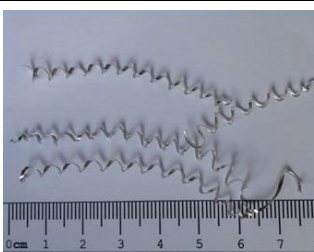
Tabela F.2 – Quadro mostrando o cavaco do torneamento com MQL na liga 6082-T6.

		
Passo 1 $v_c=600; f=0,15; a_p=1,25$	Passo 2 $v_c=300; f=0,05; a_p=1,25$	Passo 3 $v_c=900; f=0,05; a_p=1,25$
		
Passo 4 $v_c=300; f=0,25; a_p=1,25$	Passo 5 $v_c=900; f=0,25; a_p=1,25$	Passo 6 $v_c=300; f=0,15; a_p=0,5$
		
Passo 7 $v_c=900; f=0,15; a_p=0,5$	Passo 8 $v_c=600; f=0,15; a_p=1,25$	Passo 9 $v_c=300; f=0,15; a_p=2,0$
		
Passo 10 $v_c=900; f=0,15; a_p=2,0$	Passo 11 $v_c=600; f=0,05; a_p=0,5$	Passo 12 $v_c=600; f=0,25; a_p=0,5$
		
Passo 13 $v_c=600; f=0,05; a_p=2,0$	Passo 14 $v_c=600; f=0,25; a_p=2,0$	Passo 15 $v_c=600; f=0,15; a_p=1,25$

*Para v_c unidades expressas em m/min; para f em mm/rev; a_p em mm.


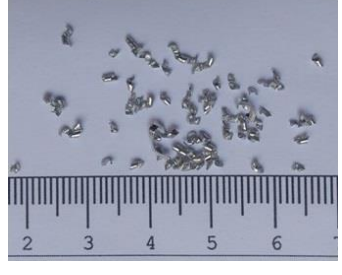
APÊNDICE G – Quadros dos Cavacos Gerados na Usinagem do 7075-T6

Tabela G.1 – Quadro mostrando o cavaco do torneamento a seco na liga 7075-T6.

		
Passo 1 $v_c=600$; $f=0,15$; $a_p=1,25$	Passo 2 $v_c=300$; $f=0,05$; $a_p=1,25$	Passo 3 $v_c=900$; $f=0,05$; $a_p=1,25$
		
Passo 4 $v_c=300$; $f=0,25$; $a_p=1,25$	Passo 5 $v_c=900$; $f=0,25$; $a_p=1,25$	Passo 6 $v_c=300$; $f=0,15$; $a_p=0,5$
		
Passo 7 $v_c=900$; $f=0,15$; $a_p=0,5$	Passo 8 $v_c=600$; $f=0,15$; $a_p=1,25$	Passo 9 $v_c=300$; $f=0,15$; $a_p=2,0$
		
Passo 10 $v_c=900$; $f=0,15$; $a_p=2,0$	Passo 11 $v_c=600$; $f=0,05$; $a_p=0,5$	Passo 12 $v_c=600$; $f=0,25$; $a_p=0,5$
		
Passo 13 $v_c=600$; $f=0,05$; $a_p=2,0$	Passo 14 $v_c=600$; $f=0,25$; $a_p=2,0$	Passo 15 $v_c=600$; $f=0,15$; $a_p=1,25$

*Para v_c unidades expressas em m/min; para f em mm/rev; a_p em mm.

Tabela G.2 – Quadro mostrando o cavaco do torneamento com MQL na liga 7075-T6.

		
Passo 1 $v_c=600$; $f=0,15$; $a_p=1,25$	Passo 2 $v_c=300$; $f=0,05$; $a_p=1,25$	Passo 3 $v_c=900$; $f=0,05$; $a_p=1,25$
		
Passo 4 $v_c=300$; $f=0,25$; $a_p=1,25$	Passo 5 $v_c=900$; $f=0,25$; $a_p=1,25$	Passo 6 $v_c=300$; $f=0,15$; $a_p=0,5$
		
Passo 7 $v_c=900$; $f=0,15$; $a_p=0,5$	Passo 8 $v_c=600$; $f=0,15$; $a_p=1,25$	Passo 9 $v_c=300$; $f=0,15$; $a_p=2,0$
		
Passo 10 $v_c=900$; $f=0,15$; $a_p=2,0$	Passo 11 $v_c=600$; $f=0,05$; $a_p=0,5$	Passo 12 $v_c=600$; $f=0,25$; $a_p=0,5$
		
Passo 13 $v_c=600$; $f=0,05$; $a_p=2,0$	Passo 14 $v_c=600$; $f=0,25$; $a_p=2,0$	Passo 15 $v_c=600$; $f=0,15$; $a_p=1,25$

*Para v_c unidades expressas em m/min; para f em mm/rev; a_p em mm.