

**Estudo Comparativo dos Parâmetros de Maquinagem
e Lubrificação MQL numa Liga de Alumínio**

José Paulo Lopes Pereira

Relatório da Dissertação Final apresentada à:
**Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Instituto Politécnico de Bragança**

para obtenção do grau de Mestre em:

Engenharia Industrial
Área de Especialização em Engenharia Mecânica

Outubro 2021

Estudo Comparativo dos Parâmetros de Maquinagem e Lubrificação numa Liga de Alumínio

José Paulo Lopes Pereira

Relatório da Dissertação Final apresentada à:
**Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Instituto Politécnico de Bragança**

para obtenção do grau de Mestre em:

Engenharia Industrial
Área de Especialização em Engenharia Mecânica

Orientador:

Professor Doutor João Eduardo Pinto Castro Ribeiro

Dedico este trabalho a quem tudo devo:

À minha Mãe, ao meu Pai e à minha Irmã

Agradecimentos

A elaboração da presente dissertação, só foi possível devido à ajuda de várias pessoas e entidades.

Começo por agradecer ao meu orientador, professor João Ribeiro, que desde o início se mostrou interessado e dedicado em orientar-me, transmitindo-me vários conhecimentos e disponibilizando o seu tempo e os seus contactos para que fosse possível obter os equipamentos necessários à realização desta dissertação.

Ao Engenheiro Jorge Paulo, técnico do laboratório de Tecnologia Mecânica, por toda a sua disponibilidade, ajuda, e transmissão de conhecimentos durante a realização dos ensaios práticos neste laboratório.

Ao Brigantia EcoPark, por ter emprestado a câmara termográfica, sendo que, só assim, foi possível fazer a análise das temperaturas.

À Universidade do Minho, pela cedência do laboratório de Órgãos de Máquinas e Tribologia, mais concretamente ao Professor José Gomes, e ao Engenheiro Sérgio Carvalho, pelas dicas sobre tribologia e pela ajuda na preparação e execução dos ensaios de tribologia.

Aos meus amigos “do secundário”, por toda a motivação que me deram para seguir os estudos e querer sempre mais e melhor.

Um grande agradecimento aos meus amigos Emanuel e Tiago que me acompanharam durante o percurso académico, sem eles não teria vindo para Bragança.

À minha namorada Ana Beatriz, por todo o apoio, paciência e por todas as palavras de incentivo e ânimo ao longos destes anos.

De uma forma especial, quero agradecer à minha melhor amiga e irmã, Ana Cristina, por todo o apoio e motivação. Aos meus pais, Maria José e Paulo Jorge, por todos os esforços que fazem diariamente para nos proporcionar a melhor educação possível, pelo seu apoio, amor, motivação e por tudo o que sou, devo-o a eles.

Resumo

Face à grande evolução tecnológica e econômica, a competitividade entre as empresas torna-se cada vez maior sendo necessário manter uma boa qualidade final do produto. Nos processos de maquinagem, a qualidade final do produto é influenciada pelos parâmetros de maquinagem e pela utilização dos fluidos de corte. O MQL tem sido uma alternativa à maquinagem a seco, uma vez que utiliza apenas uma pequena quantidade de lubrificante.

Neste trabalho pretende-se comparar a maquinagem de um bloco de uma liga de alumínio a seco, com óleo de corte convencional e com águas ruças, com dois caudais distintos, determinando as combinações ideais de corte para diminuir a temperatura e a rugosidade superficial, com o objetivo de estudar a viabilidade das águas ruças serem utilizadas na maquinagem como fluido de corte. Realizaram-se, também, ensaios de tribológicos de deslizamento entre esfera cerâmica e disco de aço inoxidável para avaliar as propriedades de lubrificação das águas ruças.

As combinações ideais mostraram-se constantes independentemente do fluido lubrificante e do caudal utilizado. Verificou-se que a penetração é o parâmetro com maior influência no aumento da temperatura, e a velocidade de avanço é o parâmetro com mais influência no aumento da rugosidade. Tendo em conta os ensaios tribológicos, verificou-se que as águas ruças têm propriedades de lubrificação pouco satisfatórias.

Com a análise de resultados verificou-se que as águas ruças têm boas propriedades no que toca à diminuição das temperaturas de corte, contudo, relativamente à diminuição da rugosidade as suas propriedades são menores. Como principal conclusão, pode afirmar-se que a utilização de águas ruças, sem qualquer tratamento, tem uma baixa lubricidade, contudo, com a utilização de aditivos, acredita-se numa melhoria desta propriedade.

Palavras-Chave: Maquinagem, MQL, Lubrificação, Temperatura de corte, Rugosidade superficial, Atrito

Abstract

Because of the great technological and economic evolution, the competitiveness between companies is becoming ever greater and it is necessary to maintain a good final quality of the product. In machining processes, the final product quality is influenced by the machining parameters and the use of cutting fluids. MQL has been an alternative to dry machining as it uses only a small amount of lubricant.

This work intends to compare the machining of an aluminum block dry, with conventional cutting oil and with, olive oil mill wastewater with two different flow rates, determining the ideal cutting combinations to reduce temperature and surface roughness, to study the feasibility of olive oil mill wastewater being used in machining as a cutting fluid. Tribology sliding tests between ceramic sphere and stainless-steel disc were also carried out to evaluate the lubrication properties of olive oil mill wastewater.

The ideal combinations were constant regardless of the lubricating fluid and the flow rate used. It was found that penetration is the parameter with the greatest influence on the increase in temperature, and the feed rate is the parameter with the greatest influence on the increase in roughness. Considering the tribology tests, it was found that olive oil mill wastewater has unsatisfactory lubricating properties.

With the analysis of the results, it was verified that the olive oil mill wastewater has good properties in what concerns the reduction of the cutting temperatures, however, about the reduction of the roughness its properties are smaller. As a main conclusion, it can be stated that the use of olive oil mill wastewater, without any treatment, has a low lubricity, however, with the use of additives, it is believed to improve this property

Keywords: Machining, MQL, Lubrication, Cutting temperature, Surface roughness, Friction

Índice

1. Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos	3
1.3 Estrutura da Dissertação.....	4
2. Conceitos Teóricos.....	5
2.1 Processos de Fabrico	5
2.1.1 Maquinagem.....	5
2.1.2 Fresagem	7
2.2 Fluidos de Corte	10
2.2.1 Fluidos de Corte Líquidos	12
2.3 Águas Ruças.....	15
2.4 Métodos de Aplicação dos Fluidos de Corte na Maquinagem Tradicional.....	16
2.4.1 Maquinagem a Seco	17
2.4.2 <i>MQL</i>	17
2.5 Acabamento Superficial	19
2.5.1 Rugosidade Superficial	20
2.5.2 Rugosímetro	23
2.6 Temperatura na Maquinagem e Termografia.....	23
2.7 Tribologia.....	25
2.8 Método Taguchi	27
2.8.1 Matrizes Ortogonais	28
2.8.2 Razão Sinal/Ruído.....	28
2.9 Análise da Variância (ANOVA)	29
3. Materiais e Métodos	31
3.1 Materiais e Equipamentos	31
3.2 Métodos e Procedimentos	35
3.2.1 Arranjo Ortogonal de Taguchi	35
3.2.2 Procedimento Prático	37

4. Resultados Obtidos.....	45
4.1 Resultados Obtidos na Maquinagem.....	45
4.2 Resultados Obtidos no Estudo Tribológico.....	49
5. Análise e Discussão de Resultados	53
5.1 Análise e Discussão dos Resultados da Maquinagem – Método de Taguchi.....	53
5.1.1 Razão Sinal/Ruído Taxa de Produção	53
5.1.2 Razão Sinal/Ruído Rugosidade Superficial e Temperatura	55
5.1.2.1 Testes a Seco	56
5.1.2.2 Testes com Balis Mafcool 51 com Caudal 50 ml/h.....	58
5.1.2.3 Testes com Balis Mafcool 51 com Caudal 100 ml/h.....	60
5.1.2.4 Testes com Águas Ruças com Caudal 50 ml/h	62
5.1.2.5 Testes com Águas Ruças com Caudal 100 ml/h	64
5.1.3 Análise ANOVA	66
5.2 Comparação dos Fluidos Lubrificantes.....	71
5.3 Análise dos Resultados Obtidos nos Ensaio Tribológicos.....	77
5.4 Análise das Aparas	80
6. Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros.....	82
6.1 Conclusões	82
6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros.....	84
Referências	85
Anexos.....	89

Índice de Figuras

Figura 1 Exemplos de apara [23].	6
Figura 2 Representação dos movimentos de fresagem [21].	8
Figura 3 Fresagem cilíndrica e frontal [21].	8
Figura 4 Tipos de fresagem cilíndrica: (a) empurrar e (b) puxar [27].	9
Figura 5 Sistemas de MQL externa e interna [39].	19
Figura 6 Ilustração medição da rugosidade média [43].	22
Figura 7 Esquema simplificado de uma câmara infravermelha [47].	24
Figura 8 Exemplos de materiais detetores e suas respostas espectrais em relação às bandas de ondas médias (MW) e ondas longas (LW) de infravermelho [47].	24
Figura 9 Pintura de baixo-relevo mostrando o derrame de água para reduzir o atrito (Egito 2.400 AC)[49].	25
Figura 10 Esquema dos quatro principais modos de desgaste [49].	26
Figura 11 Atomizador (Dispositivo MQL).	32
Figura 12 Rugosímetro Mitutoyo SJ-301 e detetor.	33
Figura 13 Câmara termográfica FLIR SC7000.	34
Figura 14 Tribómetro PLINT TE 67 e sistema de aquisição de dados.	35
Figura 15 Esfera de alumina.	35
Figura 16 Disco em aço inoxidável.	35
Figura 17 Filtragem águas ruças com coador.	38
Figura 18 Filtragem águas ruças com pano de cozinha.	38
Figura 19 Filtragem de águas ruças com tecido de nylon.	38
Figura 20 Filtragem de águas ruças com filtro interior de máscara descartável.	38
Figura 21 Zona de corte isolada.	39
Figura 22 Medição da rugosidade em cada passagem.	40
Figura 23 Representação das regiões de medição da rugosidade.	40
Figura 24 Análise de temperaturas software ResearchIR Max.	41
Figura 25 Montagem do disco.	43
Figura 26 Lavagem da esfera.	43
Figura 27 Montagem dos componentes.	43
Figura 28 Ensaio tribológico a seco.	43
Figura 29 Reservatório para lubrificante.	44
Figura 30 Exemplo de ensaio tribológico com lubrificante.	44
Figura 31 Evolução do coeficiente de atrito durante o deslizamento a seco.	49
Figura 32 Evolução do coeficiente de atrito durante o deslizamento com Balis Mafcool 51 – 1º ensaio.	50

Figura 33 Evolução do coeficiente de atrito durante o deslizamento com Balis Mafcool 51 – 2º ensaio.....	50
Figura 34 Evolução do coeficiente de atrito durante o deslizamento com águas ruças – 1º ensaio.	51
Figura 35 Evolução do coeficiente de atrito durante o deslizamento com águas ruças – 2º ensaio.	51
Figura 36 Evolução do coeficiente de atrito durante o deslizamento com água destilada.	52
Figura 37 Razão S/N média em relação à taxa de produção para cada parâmetro de corte.	55
Figura 38 Valores de S/N para rugosidade e temperatura no ensaio a seco para cada parâmetro.	58
Figura 39 Valores de S/N para rugosidade e temperatura no ensaio com Balis Mafcool 51 (50 ml/h) para cada parâmetro.....	60
Figura 40 Valores de S/N para rugosidade e temperatura no ensaio com Balis Mafcool 51 (100 ml/h) para cada parâmetro.....	62
Figura 41 Valores de S/N para rugosidade e temperatura no ensaio com águas ruças (50 ml/h) para cada parâmetro.	64
Figura 42 Valores de S/N para rugosidade e temperatura no ensaio com águas ruças (100 ml/h) para cada parâmetro.	66
Figura 43 Rugosidade média nos testes de confirmação.....	72
Figura 44 Temperatura média nos testes de confirmação.	73
Figura 45 Rugosidade média para os 5 grupos de ensaios.	74
Figura 46 Temperatura média para os 5 grupos de ensaios.	75
Figura 47 Manchas na face maquinada provocadas pelas águas ruças.	76
Figura 48 Manchas provocadas pelas águas ruças na mesa de fresar.	76
Figura 49 Manchas provocadas pelas águas ruças no carrinho porta peças.....	76
Figura 50 Peça maquinada com Balis Mafcool 51.....	76
Figura 51 Comparação dos ensaios tribológicos.....	77
Figura 52 Coeficientes de atrito médio em regime estacionário.	78
Figura 53 Esfera cerâmica após ensaios tribológicos.....	79
Figura 54 Pistas de desgaste no disco.	79

Índice de Tabelas

Tabela 1 Ordens de grandeza de defeitos para superfícies maquinadas [29].	20
Tabela 2 Classes e valores da rugosidade segundo a Norma ISO 1302.	21
Tabela 3 Análise ANOVA.	29
Tabela 4 Matrizes ortogonais de Taguchi em função dos parâmetros e dos níveis.	36
Tabela 5 Valores dos níveis para cada parâmetro.	36
Tabela 6 Matriz de Taguchi utilizada.	36
Tabela 7 Matriz L9 de Taguchi com os parâmetros de maquinagem selecionados.	37
Tabela 8 Condições de lubrificação para cada matriz de Taguchi L9.	37
Tabela 9 Estudo dos caudais no atomizador MQL.	38
Tabela 10 Valores em rotações por minuto utilizados nos ensaios de tribologia.	42
Tabela 11 Valores de taxa de produção obtida com a matriz ortogonal de Taguchi.	45
Tabela 12 Valores de rugosidades e temperaturas obtidos nos ensaios a seco.	46
Tabela 13 Valores de rugosidade e temperatura obtidos nos ensaios com óleo de corte convencional com caudal de 50 ml/h.	46
Tabela 14 Valores de rugosidade e temperatura obtidos nos ensaios com óleo de corte convencional com caudal de 100 ml/h.	47
Tabela 15 Valores de rugosidade e temperatura obtidos nos ensaios com águas ruças com caudal de 50 ml/h.	48
Tabela 16 Valores de rugosidade e temperatura obtidos nos ensaios com águas ruças com caudal de 100 ml/h.	48
Tabela 17 Valor da razão S/N para a taxa de produção.	54
Tabela 18 Resultados S/N para cada parâmetro para a taxa de produção.	54
Tabela 19 Valor da razão S/N para a rugosidade superficial e temperatura das aparas no ensaio a seco.	56
Tabela 20 Resultados S/N para cada parâmetro para a rugosidade média e temperatura média nos ensaios a seco.	57
Tabela 21 Valor da razão S/N para a rugosidade superficial e temperatura das aparas no ensaio com Balis Mafcool 51 (50 ml/h).	59
Tabela 22 Resultados S/N para cada parâmetro para a rugosidade média e temperatura média nos ensaios com Balis Mafcool 51 (50 ml/h).	59
Tabela 23 Valor da razão S/N para a rugosidade superficial e temperatura das aparas no ensaio com Balis Mafcool 51 (100 ml/h).	61
Tabela 24 Resultados S/N para cada parâmetro para a rugosidade média e temperatura média nos ensaios com Balis Mafcool 51 (100 ml/h).	61

Tabela 25 Valor da razão S/N para a rugosidade superficial e temperatura das aparas no ensaio com águas ruças (50 ml/h).	63
Tabela 26 Resultados S/N para cada parâmetro para a rugosidade média e temperatura média nos ensaios com águas ruças (50 ml/h).....	63
Tabela 27 Valor da razão S/N para a rugosidade superficial e temperatura das aparas no ensaio com águas ruças (100 ml/h).	65
Tabela 28 Resultados S/N para cada parâmetro para a rugosidade média e temperatura média nos ensaios com águas ruças (100 ml/h).....	65
Tabela 29 Combinações ótimas.....	67
Tabela 30 ANOVA para taxa de produção.	67
Tabela 31 ANOVA para temperatura e rugosidade - ensaios a seco.	68
Tabela 32 ANOVA para temperatura e rugosidade - Balis Mafcool 51 (50 ml/h).	68
Tabela 33 ANOVA para temperatura e rugosidade - Balis Mafcool 51 (100 ml/h).	69
Tabela 34 ANOVA para temperatura e rugosidade - águas ruças (50 ml/h).....	70
Tabela 35 ANOVA para temperatura e rugosidade - águas ruças (100 ml/h).....	70
Tabela 36 Resultados obtidos nos ensaios de confirmação.....	71
Tabela 37 Rugosidade e temperatura média em cada grupo de ensaios.....	73
Tabela 38 Representação das aparas obtidas nos 45 ensaios realizados.	80
Tabela 39 Ilustração das aparas nos ensaios de confirmação.....	81

Abreviaturas

a_e - Profundidade de corte axial

a_p - Profundidade de corte radial

D – Diâmetro

f_z - Avanço por dente

h – Hora

m – Metros

min – Minutos

ml – Mililitros

mm – Milímetros

MQ - Média dos quadrados

SQL – Quantidade mínima de lubrificante

n - Velocidade de rotação

R_a – Rugosidade média

rpm - Rotações por minuto

R_t – Rugosidade total

R_y – Rugosidade máxima

SQ_a – Soma dos quadrados do fator

SQ_e – Soma dos quadrados do erro

SQ_t – Soma dos quadrados total

T_p - Taxa de produção

V_c - Velocidade de corte

V_f - Velocidade de avanço

Z_n - Número de dentes

μm – Micrómetros

1. Introdução

1.1 Enquadramento

Atualmente, devido à grande evolução tecnológica e económica, as empresas vêem-se obrigadas a competir cada vez mais entre si, tendo como necessidade obter uma melhor relação custo/benefício. Para que se consiga aumentar esta relação, é necessário obter produtos de boa qualidade com o custo e tempo de fabrico o mais reduzido possível [1]. Por outro lado, as diretivas da União Europeia têm vindo a ser cada vez mais exigentes para que a produção seja ambientalmente sustentável, valorizando a reutilização dos materiais [2], paralelamente, os consumidores têm, hoje em dia, uma consciência mais crítica e exigente relativamente às indústrias mais poluentes [3].

A maquinagem é um dos processos mais comuns na indústria e requer cada vez mais produtividade e qualidade. Como processo de maquinagem tradicional, destaca-se a fresagem, que é um processo de fabrico muito utilizado na indústria metalomecânica [4], nomeadamente, na automóvel e aeroespacial. A fresagem é um processo de fabrico por arranque de aparas (remoção de material) a partir de uma peça em bruto (primário) [5].

A qualidade final dos componentes fresados é medida pelo toleranciamento dimensional, geométrico e rugosidade superficial. No caso particular da rugosidade superficial, constata-se que um baixo valor de rugosidade superficial tem um forte impacto no custo e qualidade do produto. Contudo, para se conseguir um bom acabamento superficial é crucial ajustar os parâmetros de maquinagem antes de se iniciar o processo. Estabelecer os parâmetros de maquinagem ideais, tem sido um problema com que as empresas se deparam ao longo dos anos e são uma grande preocupação nos ambientes industriais, pois os custos associados às operações interferem diretamente com os lucros das empresas fazendo com que estas se mantenham a competir no mercado. O mecanismo por trás da formulação da rugosidade superficial é muito dinâmico e complexo, por isso, é muito difícil determinar o seu valor através de análises teóricas. Para contornar a formulação teórica, geralmente, utilizam-se métodos experimentais de “tentativa-erro” para estabelecer os parâmetros de maquinagem que permitam obter a qualidade superficial pretendida. Infelizmente, este método é ineficaz e ineficiente, pois requer bastante tempo e número elevado de testes para se determinar o valor pretendido [6,7]. Todavia, a qualidade das superfícies é bastante importante na fresagem, verificando-se que, quando as superfícies das peças ficam com bom acabamento superficial, há uma melhoria na resistência à fadiga e resistência à corrosão [8,9]. A rugosidade superficial também afeta outras funções do componente, tal como, os contactos entre as peças, atrito, reflexo da luminosidade, transferência de calor e capacidade de reter e distribuir um lubrificante [10].

Durante os processos de maquinagem, incluindo na fresagem, existe um coeficiente de atrito elevado entre a ferramenta de corte e a peça, que tem como consequência a geração de calor. Este calor produz um impacto negativo na qualidade final da peça, além de aumentar o consumo de energia. A geração de calor deve ser controlada, por isso, são estudados bastantes sistemas de arrefecimento que são aplicados entre a ferramenta e a peça que servirão, também, de lubrificante. Alguns exemplos de sistemas de lubrificação são a refrigeração criogénica, o MQL (quantidade mínima de lubrificante), a refrigeração a alta pressão, o refrigerante/lubrificante sólido e a refrigeração molhada para fazer frente à maquinagem a seco. Cada um destes sistemas tem as suas características em termos de custos, consumo, eficiência e impactos ambientais [11].

O método tradicional de refrigeração mais utilizado é a técnica de refrigeração molhada (por inundação) no qual são utilizados fluidos de corte [12].

Nos últimos 150 anos, os fluidos de corte têm vindo a ser muito utilizados nos processos de maquinagem tendo como principal função lubrificar, arrefecer e remover as aparas da zona de corte [13]. No início da sua utilização, aplicavam-se óleos simples com uma escova para lubrificar e arrefecer a ferramenta. Com o passar dos tempos, foi-se adicionando gorduras de animais para melhorar as propriedades de lubrificação dos óleos e, atualmente, com o avanço científico, tecnológico e com o grande desenvolvimento da indústria metalúrgica, os óleos de corte foram melhorados significativamente. Nesse sentido, foram adicionadas misturas especiais de aditivos químicos, bem como, desenvolvidos lubrificantes à base de água para atender às necessidades desta indústria. Existem vários tipos de fluidos de corte no mercado dos quais destacam-se os fluidos miscíveis em água, que se incluem os óleos solúveis, sintéticos e semi-sintéticos que são utilizados em mais de 80% das aplicações [14].

Para além da lubrificação, arrefecimento e remoção de aparas, referidos anteriormente, os fluidos de corte têm, também, outras funções tal como a inibição da corrosão e remoção de contaminantes. Contudo, os fluidos de corte não têm só vantagens, estes possuem algumas desvantagens que estão ligadas, principalmente, com os riscos para a saúde que podem provocar nos operadores das máquinas que estão expostos a estes fluidos e, também, os riscos ambientais devido à libertação dos fluidos que podem transportar metais e componentes químicos perigosos, entre outros. Deste modo, as leis e normas que abrangem a segurança industrial e a proteção ambiental têm colocado uma grande pressão nas empresas [15].

Para contornar os riscos presentes na utilização dos fluidos de corte surge o MQL, ou seja, quantidade mínima de lubrificante, que aparece, pela primeira vez, na literatura em 1993 por Weck and Koch aplicado à lubrificação de rolamentos [16]. Tal como o nome indica, este sistema de lubrificação pretende utilizar uma quantidade muito reduzida de fluido de corte, entre os 6 e os 100 ml/h [17]. As partículas de lubrificante são atomizadas devido ao efeito de Venturi que é

conseguido utilizando ar comprimido, minimizando, assim, o impacto dos fluidos de corte na saúde e no ambiente [18]. O MQL é uma opção para conseguir uma produção mais limpa e mais saudável. Neste sistema de lubrificação, uma pequena percentagem de fluido é envolta num *spray* de ar comprimido, aplicando uma camada fina de lubrificante entre o material a ser maquinado e a ferramenta, diminuindo o atrito e o calor entre a ferramenta de corte e a peça. Atualmente, este sistema é mais aplicado em operações de maquinagem leves, que gerem pouco calor, no entanto, têm sido desenvolvidas pesquisas e testes de modo a alargar este sistema a operações de maquinagem mais intensas [19]. Para efetuar os estudos de quantificação da quantidade mínima de lubrificante é necessário realizar ensaios experimentais como objetivo de otimizar parâmetros de maquinagem. Nesse sentido, têm-se utilizado várias técnicas que permitem minimizar o número de ensaios experimentais, mas, simultaneamente, garantindo resultados robustos que podem ser extrapolados para as aplicações de casos reais, em ambiente industrial. Das várias técnicas de otimização aplicadas a este tipo de estudos, tem-se destacado o método de Taguchi. O método de Taguchi pode ser utilizado para definir as matrizes ortogonais dos ensaios experimentais no qual é possível fazer a combinação de vários parâmetros para obter uma combinação ótima para um determinado fator que está a ser estudado, por exemplo, a rugosidade. O método de Taguchi pode, ainda, ser associado a ferramentas estatísticas como, por exemplo, a análise ANOVA, no qual é possível modelar alguma incerteza dos resultados práticos de modo a extrapolar para resultados futuros [20].

1.2 Objetivos

Durante a elaboração deste trabalho foi estudada a otimização de parâmetros de maquinagem e de lubrificação numa liga de alumínio durante o processo de fresagem. O principal objetivo deste trabalho consiste na comparação entre a eficácia da utilização de um fluido de base natural (águas ruças) e um óleo de corte industrial, tendo como referência a maquinagem a seco (sem fluido de refrigeração). Os parâmetros de controlo do processo de maquinagem foram a rugosidade superficial, a temperatura de saída da apara e temperatura da interface ferramenta/peça. Paralelamente, efetuou-se a otimização dos parâmetros de corte e avaliou-se a viabilidade da utilização das águas ruças como fluido de corte.

De modo a reduzir os impactos ambientais causados pelos fluidos de corte utilizou-se a técnica de MQL como técnica de lubrificação e, por isso, foi também estudada a eficácia da lubrificação/refrigeração por MQL quando comparada com a maquinagem a seco.

1.3 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação está dividida em 6 capítulos, estruturados na seguinte forma:

- No primeiro capítulo (**Introdução**) é feita uma pequena introdução, de modo a enquadrar o que será estudado e a definir os objetivos do trabalho.
- No segundo capítulo (**Conceitos Teóricos**) é feita uma pesquisa e revisão bibliográfica onde são descritos os conceitos teóricos fundamentais relativos ao trabalho desenvolvido nesta dissertação. Este capítulo é iniciado com uma introdução conceitos básicos de maquinagem, focando-se, fundamentalmente, na fresagem. De seguida, estudam-se os tipos de fluidos de corte e introduz-se a possibilidade de as águas ruças serem usadas como fluido de corte. Os métodos de aplicação destes fluidos é o próximo passo, no qual se foca na utilização do MQL. Como os resultados são todos em consequência da análise da rugosidade superficial e das temperaturas aborda-se também estes temas. Por último, são apresentados alguns conceitos básicos de tribologia e uma breve descrição do método de Taguchi.
- No terceiro capítulo (**Materiais e Métodos**) faz-se uma descrição dos materiais utilizados e dos métodos que foram usados para preparação e elaboração dos ensaios experimentais.
- No quarto capítulo (**Resultados Obtidos**) são apresentados todos os valores obtidos dos ensaios experimentais realizados em laboratório.
- No quinto capítulo (**Análise e Discussão dos Resultados**) são analisados e comparados todos os resultados obtidos com a ajuda de gráficos e tabelas.
- No sexto capítulo (**Conclusão e Proposta para Trabalhos Futuros**) são apresentadas as principais conclusões que foram possíveis retirar após a análise dos resultados, são, também, realizadas propostas de trabalhos futuros.

2. Conceitos Teóricos

Com o intuito de melhor compreensão da presente dissertação, neste capítulo serão abordados os conceitos teóricos utilizados no caso de estudo.

Inicialmente, serão abordados os conceitos básicos de maquinagem, mais especificamente da fresagem, operação na qual o estudo se foca. De seguida, os fluidos de corte e seus métodos de aplicação, na qual se engloba o MQL, o sistema que será utilizado e estudado. Ainda sobre os lubrificantes, serão abordadas as águas ruças, um desperdício da produção de azeite em que se estuda a viabilidade deste desperdício para o uso, como lubrificante, na maquinagem. Será, também, abordado o método de Taguchi que foi utilizado no planeamento dos ensaios experimentais.

2.1 Processos de Fabrico

Os processos de fabrico podem ser classificados como processos com e sem arranque de aparta. Nos processos sem arranque de aparta destaca-se por exemplo o forjamento, a laminagem, a extrusão, o estiramento, a embutidura, a fundição e a soldadura, entre outros. Já nos processos por arranque de aparta pode-se destacar, por exemplo, o torneamento, a furação, a fresagem, o aplainamento, a serragem, a retificação e a eletroerosão [21].

As operações de maquinagem aplicam-se quando se pretende conferir a uma peça a forma, as dimensões e o acabamento pretendido através do arranque de aparta. A aparta refere-se a parcelas de metal que são removidos da peça pela ferramenta, podendo apresentar formas irregulares [22].

2.1.1 Maquinagem

Entende-se por maquinagem todos os processos de fabrico por arranque de aparta.

A maquinagem é usada para obter peças com formas complexas, com uma tolerância geométrica e dimensional muito reduzida e com um bom acabamento superficial. Na maioria dos casos inicia-se o processo de fabrico com um procedimento primário, utilizando um processo sem arranque de aparta, como, por exemplo, a fundição para gerar um esboço, de seguida, segue-se um processo secundário com arranque de aparta para maquinar a peça pretendida [21].

Na maquinagem é possível obter superfícies de peças em série, com baixo custo e obter peças, praticamente, com qualquer forma geométrica a partir de um bloco de material metálico.

Nestas operações, uma porção de material é retirado pela ação da ferramenta (ferramenta de corte), produzindo a apara, que pode ter várias formas, como é possível ver na figura 1.

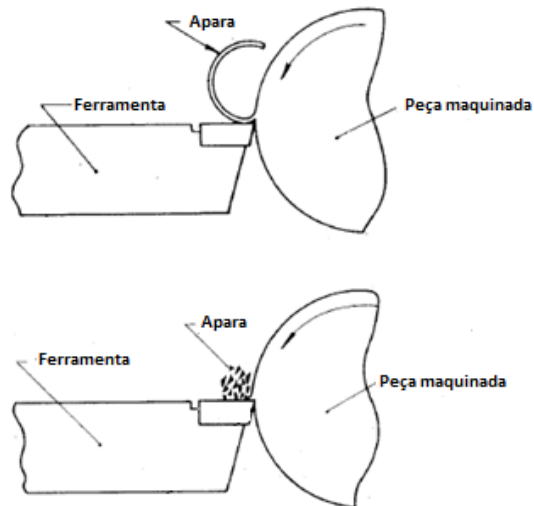


Figura 1 Exemplos de apara [23].

Com o intuito de aliviar o esforço humano, aumentar a produção e diminuir os custos, a maquinagem é feita por máquinas-ferramentas [21]. O número de operações de maquinagem é muito vasto, assim como, a variedade de máquinas e ferramentas de corte.

Máquinas-ferramentas, segundo João Furtado Henriques (1892-1969), são “Conjunto de órgãos de suporte e órgãos de transmissão delineadas e ordenadas de forma a poderem fixar o material a cortar e comunicar à ferramenta a energia necessária ao corte, ou pela relatividade das ações, comunicar ao material a energia necessária para ele se mover de encontro à ferramenta que o vai cortar” e segundo N.N. Chernov “São máquinas que, arrancando aparas da peça em bruto (de acordo com o desenho da execução), permitem obter, com a precisão exigida, uma peça de forma e dimensões necessárias” [21].

Nestas máquinas, é possível a realização de diversas operações de maquinagem como por exemplo:

- Torneamento, é utilizado quando se pretende obter peças com superfícies de revolução, no qual a peça roda em torno do eixo principal de rotação da máquina, e a ferramenta desloca-se segundo determinadas trajetórias.

- Aplainamento, é utilizado quando é pretendida a obtenção de superfícies regradadas, e por isso é utilizado um movimento retilíneo alternativo da peça ou da ferramenta, e pode ser aplicado no sentido horizontal ou vertical.
- Furação, destina-se à execução de furos, por norma cilíndricos, na peça ou na ferramenta. Nesta operação a ferramenta (broca) roda em torno de um eixo e, ao mesmo tempo, a peça ou a ferramenta deslocam-se numa trajetória retilínea paralela ou coincidente ao eixo principal da máquina.
- Mandrilagem, aplica-se para obtenção de superfícies de revolução utilizando uma ou várias ferramentas.
- Fresagem, utiliza-se quando se pretende obter superfícies variadas, superfícies planas ou curvas, entalhes ou ranhuras.
- Serragem, em que com o auxílio de uma ferramenta cortante de reduzida espessura, corta-se a peça. A peça pode deslocar-se ou ficar parada, enquanto a ferramenta possui um movimento de rotação, retilíneo ou ambos.
- Brochagem, utilizado para obter peças de superfícies variadas, com utilização de uma ferramenta multi-cortante. A peça ou a ferramenta deslocam-se numa trajetória retilínea, coincidente ou paralela ao eixo da ferramenta.
- Roscagem, utilizada para obter roscas. São utilizadas ferramentas helicoidais de passo uniforme.
- Retificação, aplica-se para obter superfícies lisas (com baixa rugosidade). É um processo de maquinagem por abrasão na qual utiliza uma ferramenta abrasiva circular, denominada de mó, que possui um movimento de rotação e desloca-se juntamente com a peça, segundo uma trajetória previamente determinada [23].

2.1.2 Fresagem

A Fresagem consiste num processo de maquinagem por arranque de aparar e tem-se tornado numa operação de maquinagem cada vez mais universal, com grandes evoluções das máquinas-ferramentas, controlos e ferramentas de corte, sendo um dos processos mais versáteis da maquinagem com grande eficiência na remoção de material. O processo de fresagem é executado através de um movimento coordenado entre uma ferramenta rotativa com várias arestas e o avanço da peça, fornecendo um bom acabamento superficial, precisão dimensional e a flexibilidade na geração de diversas formas geométricas, tais como, superfícies planas ou curvas,

entalhes ou ranhuras, engrenagens e, também, é possível efetuar processos de mandrilagem, serragem e roscagem [21,24,25].

O material é removido através de uma ferramenta que possui um movimento circular, denominado por fresa e que é composta por diversas arestas cortantes. Cada uma destas arestas remove uma pequena porção de material em cada volta. O movimento na peça é dado através da mesa de trabalho que efetua o movimento de avanço [26].

Na figura 2 é possível observar principais movimentos de fresagem. Em “a” tem-se o movimento de avanço, movimento este que é dado à peça pela mesa de trabalho. Em “b” tem-se o movimento principal ou de corte, ou seja, o movimento de rotação dado à ferramenta de corte (fresa). Em “c” é o curso útil da navalha [21].

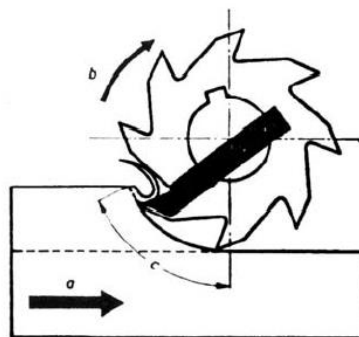


Figura 2 Representação dos movimentos de fresagem [21].

O processo de fresagem pode ser efetuado de duas formas distintas, fresagem cilíndrica ou fresagem frontal (figura 3). Na fresagem cilíndrica o eixo da fresa está paralelo à superfície de trabalho da peça, deste modo, a fresadora suporta uma carga irregular devido à forma em vírgula das aparas. Neste processo as peças maquinadas irão apresentar uma ligeira ondulação. Por outro lado, na fresagem frontal o eixo da fresa está disposto perpendicularmente à superfície de trabalho e, deste modo, cada navalha arranca uma avara de espessura uniforme. Como tal, a carga que a fresadora suporta é uniforme. Neste processo de fresagem, obtém-se um rendimento de corte da avara cerca de 15 a 20% superior à fresagem cilíndrica. O acabamento superficial é superior comparado com o processo de fresagem frontal e, assim, para maquinar superfícies planas deve-se optar, sempre que possível, pela fresagem frontal [21].



Figura 3 Fresagem cilíndrica e frontal [21].

A fresagem cilíndrica pode-se ainda dividir em dois tipos, a empurrar e a puxar. O que varia nestes dois processos é a forma como a navalha penetra na peça que está a ser maquinada. O processo mais vulgar é a empurrar, no qual a apara é arrancada inicialmente pela região mais delgada e antes das navalhas da fresa penetrarem na peça, resvalam pela superfície de trabalho. O processo menos utilizado é a puxar, no qual as navalhas da fresa atacam a apara na parte mais espessa. Deste modo, a peça é comprimida contra o seu apoio e, assim, presta-se à fresagem de peças mais delgadas e para grandes profundidades de corte. Como tal, é necessário um maior cuidado durante o processo e fresagem (o fuso da mesa da máquina não deve de ter folgas) [21].

Na figura 4 é possível observar os dois modos de fresagem cilíndrica onde, em “a” é fresagem cilíndrica a empurrar e em “b” é a fresagem cilíndrica a puxar.

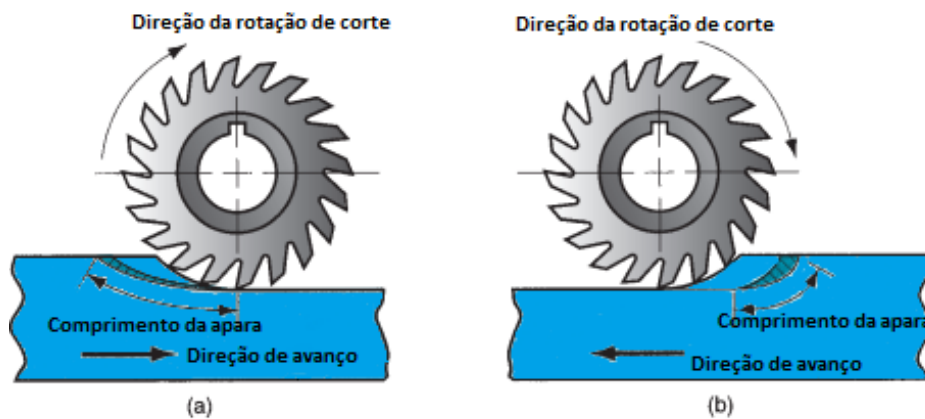


Figura 4 Tipos de fresagem cilíndrica: (a) empurrar e (b) puxar [27].

Os principais parâmetros de fresagem focam-se na velocidade de corte e de avanço.

A velocidade de rotação (equação 1) é o número de rotações por unidade de tempo e está diretamente relacionada com a velocidade de corte e o diâmetro da fresa. A velocidade de corte é o percurso realizado por uma navalha da fresa em m/min. Geralmente, a velocidade de corte é convertida em velocidade de rotação, uma vez que, na maioria das fresadoras, é possível apenas controlar a velocidade de rotação. Contudo, no catálogo das ferramentas é informada a velocidade de corte máxima possível para essa ferramenta, assim, é possível relacionar estes parâmetros através da equação (1).

$$n = \frac{V_c \times 1000}{\pi \times D} \quad (1)$$

Em que:

(V_c) é a velocidade de corte em [m/min]

(n) é a velocidade de rotação em [rpm]

(D) é o diâmetro da fresa em [mm]

A velocidade de avanço é dada em mm/min e é influenciado pelo tipo de fresa, profundidade de corte, qualidade de acabamento, potência da máquina, material da fresa e da peça.

É possível determinar a velocidade de avanço pela equação (2)

$$V_f = n \times Z_n \times f_z \quad (2)$$

Em que:

V_f é a velocidade de avanço em [mm/min]

n é a velocidade de rotação em [rpm]

Z_n é o número de dentes

f_z é o avanço por dente em [mm/t]

A taxa de produção (T_p) refere-se à velocidade de processamento de uma máquina durante um período de tempo. Deste modo, esta taxa deve ser maximizada de maneira a aumentar o volume de material removido por unidade de tempo (equação 3).

$$T_p = \frac{a_p \times a_e \times V_f}{1000} \quad (3)$$

Em que:

T_p é a taxa de produção em [cm³/min]

a_p é a profundidade de corte radial em [mm]

a_e é a profundidade de corte axial em [mm]

V_f é a velocidade de avanço em [mm/min]

2.2 Fluidos de Corte

A utilização de fluidos de corte na maquinagem começou a ser estudo em 1894 por Frederick Winlow Taylor, que verificou que quando se aplicava grandes quantidades de água na

região de corte, era possível aumentar a velocidade de corte em 33%, mantendo a vida útil da ferramenta [28]. A ideia inicial da utilização de água tinha como objetivo conseguir diminuir o efeito indesejável das altas temperaturas (refrigeração) sobre a ferramenta e, assim, a água transportaria uma parte do calor gerado durante o corte do material. Mais tarde, com o intuito de diminuir o atrito (lubrificação) entre a peça e a ferramenta surgem os óleos gordos aplicados em todas as operações de maquinagem, com baixas velocidades de corte e pequenas secções. Com a melhoria de materiais para as ferramentas, possibilitou-se o aumento das velocidades de corte e, conseqüentemente, surgiu a necessidade de aumentar os estudos e desenvolvimentos para novos fluidos de corte. Começou-se por estudar aditivos químicos para satisfazer as necessidades nas operações de maquinagem mais pesadas [22].

A utilização da lubrificação/refrigeração na maquinagem tem, assim, estes dois principais objetivos: reduzir o atrito e diminuir a temperatura. O atrito gerado pelo escorregamento da peça sobre a face de ataque da ferramenta de corte e deformação plástica da peça, gera calor, com a aplicação de um lubrificante/refrigerante na zona de corte, melhora o corte e permite que seja possível obter um melhor acabamento superficial na maquinagem de baixa/média velocidade. Assim, o efeito lubrificante baixa o coeficiente de atrito na interface peça/face de ataque da ferramenta de corte, diminuindo a formação de aresta postiça. O efeito refrigerante diminui as temperaturas de corte e, deste modo, é possível a utilização de velocidades de corte mais elevadas preservando a ferramenta de corte [29].

Além dos dois aspetos já referidos da utilização de fluidos de corte, este tem mais funções, no que toca à melhoria dos processos de maquinagem. Estas funções podem-se classificar em funções de carácter funcional, ou seja, facilitam o processo de maquinagem, conferindo um melhor rendimento e funções de carácter económico possibilitando, assim, uma maquinagem mais económica.

As melhorias de carácter funcional distinguem-se pela redução do coeficiente de atrito entre a ferramenta e a peça, expulsão da peça da região de corte, refrigeração da ferramenta, refrigeração da peça que está a ser trabalhada, melhor acabamento superficial e refrigeração da máquina-ferramenta. As melhorias de carácter económico distinguem-se pela redução do consumo de energia de corte, redução dos custos de ferramentas nas operações e impedimento da corrosão da peça a ser maquinada [22].

Uma utilização correta dos fluidos de corte permite aumentar a vida útil da ferramenta ou, para a mesma vida útil, aumentar a velocidade de corte. Os principais efeitos desejados da aplicação dos fluidos de corte não são tanto os de diminuir a força e potência de corte, mas, principalmente, aumentar a vida das ferramentas de corte. Adicionalmente, verifica-se melhorias na qualidade superficial e na produtividade, protegendo a peça contra a oxidação evitando o

sobreaquecimento da peça e da ferramenta e remover as aparas, sob a ação mecânica do fluido de corte [29].

Existem diversas formas de classificar os fluidos de corte, no entanto não existe uma normalização. Embora a utilização de lubrificantes de corte gasosos e sólidos seja descrita na literatura técnica, os fluidos de corte líquidos são os mais utilizados na maquinagem [28,29].

2.2.1 Fluidos de Corte Líquidos

A ação física provocada pelos fluidos de corte líquidos é obtida por uma redução do coeficiente de atrito e pela sua função de refrigeração. No entanto, a aplicação de fluidos de corte líquidos também terá uma ação química que ocorrerá quando os fluidos de corte são constituídos por elementos suscetíveis de reagir com os constituintes na superfície do metal que está a ser trabalhado, ou na superfície nascente da aparta. Ocorre uma reação que separa a face de ataque da ferramenta de corte com a aparta. Os fluidos de corte líquidos possuem ainda uma ação mecânica, removendo as aparas da zona de corte [29].

Os fluidos de corte dividem-se, principalmente, em quatro grupos, os óleos puros, óleos emulsionáveis (emulsões), óleos sintéticos e óleos semi-sintéticos [15].

2.2.1.1 Óleos Puros

Os óleos puros, na sua maioria de origem mineral, têm apresentado grande interesse devido à sua variedade e baixo custo, todavia, é possível misturar a estes óleos minerais óleos de origem animal ou vegetal [29]. Os primeiros lubrificantes a serem empregues na maquinagem foram os óleos de origem vegetal e animal, no entanto, devido ao seu elevado custo e à rápida deterioração estes óleos tornaram-se inviáveis. Hoje em dia estes óleos são utilizados como aditivos aos óleos minerais. Os óleos minerais são hidrocarbonetos obtidos a partir da refinação do petróleo, e as suas propriedades dependem do comprimento da cadeia, da estrutura molecular e do grau de refinação. Ultimamente, estes óleos tem vindo a ser substituídos pelos óleos emulsionáveis, devido ao elevado custo, risco de incêndios, porém têm pouca eficiência na maquinagem a altas velocidades de corte, baixo poder de refrigeração, podem provocar fumos e também riscos à saúde para os operadores [28].

2.2.1.2. Óleos Emulsionáveis

Os óleos emulsionáveis são os óleos que é possível misturar com água e formar uma emulsão. Apesar da água ser um dos melhores agentes de refrigeração, esta provoca a oxidação nas superfícies da máquina, nas peças e tem um valor baixo de lubrificação. As características da água podem ser melhoradas, quando são acrescentados agentes antioxidantes e lubrificantes [29].

Nestes óleos obtém-se uma emulsão de pequeníssimas partículas de óleo em água, e são

utilizados, principalmente, na maquinagem de alta velocidade. A proporção da mistura varia de 1 a 20% de óleo diluído em água, onde as emulsões mais fracas são mais indicadas para operações de maquinagem mais leves, em que é necessário maior refrigeração relativamente à lubrificação e as emulsões mais fortes são utilizadas em casos de maquinagem com maiores velocidades [29].

A estabilidade destas emulsões deve-se ao desenvolvimento de uma camada elétrica na interface óleo/água, e devido a forças repulsivas entre os glóbulos da mesma carga evitam a coalescência destes. Para evitar os efeitos negativos da água (oxidação das peças por exemplo), são acrescentados aditivos anticorrosivos, tais como nitrito de sódio [28].

2.2.1.3. Óleos Sintéticos

Os óleos sintéticos são compostos por materiais orgânicos e inorgânicos dissolvidos em água [30]. Estes fluidos são, geralmente, compostos por aminas e nitritos, que impedem a corrosão, fosfatos e boratos, que baixam a dureza da água, sabões e agentes de molhabilidade, que lubrificam e diminuem a tensão superficial, glicóis que atuam como agentes aglomerantes e germicidas para controlar a geração de bactérias [29].

As principais vantagens dos óleos sintéticos (químicos) são a elevada capacidade de refrigeração, uma longa vida útil do óleo, e possuem uma ação que atua como detergente que mantém as tubagens de lubrificação da máquina desobstruídas [29].

2.2.1.4. Óleos Semi-sintéticos

Os óleos sintéticos podem, ainda, dividir-se em óleos semi-sintéticos, que são a combinação dos óleos sintéticos com emulsões, possuindo um baixo teor de óleo, mas um alto teor de emulsificante e de agente ativo [30]. Os óleos semi-sintéticos podem apresentar uma composição de 5% a 50% de óleo mineral, no fluido concentrado, além dos aditivos e compostos químicos que de são dissolvidos na água formando moléculas individuais [28].

Em suma, os fluidos de corte líquidos devem ter, pelo menos, uma das seguintes características:

- Elevada condutibilidade térmica.
- Elevado calor específico.
- Elevada fluidez.
- Elevada viscosidade.
- Elevado poder molhante.
- Elevadas características anti sépticas.

Além destas características deve-se garantir que:

- Ponto de inflamação elevado (para não haver risco de inflamação durante a maquinagem)
- Estabilidade química dentro da faixa de temperaturas de trabalho, de modo a evitar a formação de sólidos ou resíduos gumosos, para não entupir canalizações, nem gerar partículas que desgastem as guias das máquinas-ferramentas.
- Do ponto de vista higiénico não devem ter maus cheiros, nem provocar dermatoses (alguns lubrificantes podem provocar a geração de bactérias e fungos que são prejudiciais à saúde dos operários).
- Não provocar corrosão quer seja nas peças ou nas máquinas-ferramentas [29].

Apesar de todas as vantagens dos fluidos de corte, estes possuem algumas desvantagens quando atingem o final da sua vida útil. Se largados em ambientes não controlados podem originar a criação de bactérias e, por exemplo, quando evaporam podem causar sérios problemas na saúde, sobretudo, problemas respiratórios e infeções na pele [12]. Além disso, a reciclagem dos fluidos de corte é muito complicada e com um preço bastante elevado, o que leva a impactos ambientais [18].

Os riscos para a saúde estão, sobretudo, ligados à exposição direta com o fluido, através do contacto com a pele, a inalação do vapor gerado durante a maquinagem devido às elevadas temperaturas, ou de aerossóis. Este contacto com o fluido pode causar irritações de pele, nos pulmões, nos olhos, no nariz e na garganta, e problemas mais graves como dermatite, acne, asma, pneumonia, irritação do trato respiratório e, até, o aparecimento de cancro foram associados à exposição aos fluidos de maquinagem. A gravidade dos problemas varia consoante o tempo de exposição, o tipo de fluido e o tipo de contaminação[31,32].

Cerca de 85% dos lubrificantes de corte utilizados em todo o mundo são à base de petróleo, o que provoca vários impactos ambientais, principalmente, quando estes são derramados imprópriamente o que resulta numa contaminação a nível do solo e das águas, tendo consequências a nível da contaminação da cadeia alimentar. Como alternativa aos fluidos de corte à base do petróleo, têm sido estudados óleos vegetais, que são renováveis, menos tóxicos e biodegradáveis [33].

2.2.1.5. Fluidos de Base Vegetal

A utilização de óleos vegetais tem ganho popularidade, pois estes possuem boas propriedades naturais, tais como, boa lubrificação, bom índice de viscosidade e alto ponto de inflamação, no entanto, possuem baixa estabilidade à oxidação a elevadas temperaturas. Têm sido estudados, entre outros, o óleo de canola, soja e colza que, atualmente, demonstram ser uma alternativa viável, no que toca a proteção ambiental [34,35].

Os óleos vegetais são constituídos, principalmente, por triglicerídeos (moléculas de glicerol com três ácidos gordos, de cadeia longa ligados aos grupos de hidroxila por éster). A estrutura de triglicerídeos fornece boas qualidades de lubrificação, devido às longas cadeias de ácidos gordos que criam uma película de lubrificante, de alta resistência interagindo fortemente com as superfícies metálicas, reduzindo o atrito. Deste modo, pode-se concluir que os ácidos gordos são considerados essenciais no que diz respeito a lubrificação [33].

2.3 Águas Ruças

As águas ruças são de cor vermelha, escura ou preta e referem-se às águas residuais que resultam do processo de extração de azeite, constituindo um dos principais efluentes mais problemáticos nos países produtores de azeite. Devido ao elevado conteúdo orgânico, e uma difícil biodegradabilidade, que surge como consequência da presença de compostos fenólicos, estas águas mostram um grande poder de contaminação, uma vez que estes compostos apresentam propriedades antioxidantes, responsáveis por efeitos tóxicos contra microrganismos e plantas [36-38].

Os principais países produtores de azeite são Espanha, Itália, Grécia, Tunísia e Portugal, e estima-se que, anualmente, são gerados cerca de 30 milhões de m³ por ano de águas ruças. Em Portugal, estima-se que esse valor seja entre 100 mil e 350 mil de m³/ano, gerando um grande problema para a indústria produtora de azeite, pois, devido à utilização de elevadas quantidades de água, tem como consequência a produção de elevadas quantidades de águas ruças. Deste modo, é gerado um grande impacto ambiental, uma vez que, não existe uma solução que seja considerada eficiente e, economicamente, viável para tratar estas águas[36-38].

Devido à complexa composição química presente nestas águas, o seu tratamento é dificultado. A composição química varia consoante o tipo de azeitona, o sistema de cultivo, o grau de maturação do fruto e o tipo de processo de extração [37].

São constituídas, na sua maioria, por água (83-96%), matéria orgânica (3,5-15%) e sais minerais (0,5-2%). Em relação à carga orgânica possuem valores de carência de oxigénio (CQO) entre os 50 e 150 g l⁻¹ com um pH a variar entre 4 e 6. Contêm, também, elevadas quantidades de proteínas, lípidos, polissacarídeos e compostos fitotóxicos que têm, como consequência, a inibição da germinação e do crescimento de plantas [37].

O processo de produção de azeite começa pela filtragem, limpeza e lavagem das azeitonas, de seguida, as azeitonas são moídas em moinhos metálicos, para permitir a libertação das gotas de azeite, resultando uma pasta. Depois ocorre um batimento contínuo e lento dessa pasta com um aquecimento de 30°C para aumentar a libertação das gotas de azeite. O próximo

passo é fazer com que a pasta sofra uma separação de fases, podendo esse processo ocorrer de 3 maneiras diferentes: sistema tradicional de prensas, sistema de centrifugação de três fases e sistema de centrifugação de duas fases [36].

O sistema tradicional de prensas é o mais antigo, a pasta é espalhada em camadas finas, sobre discos de um material filtrante, colocando uns sobre os outros formando uma pilha. Essa pilha é comprimida por uma prensa hidráulica, ajudando na separação da parte sólida, que fica retida nos filtros, da parte líquida (azeite e água de composição das azeitonas). Essa parte líquida é drenada e depois por decantação ou centrifugação separa-se a água do azeite.

Para ajudar o azeite virgem a separar-se da fração sólida é necessário fornecer alguma água, o que leva a que no final do processo se obtenha o azeite virgem, o bagaço das azeitonas seco e as águas ruças, que são compostas pela água usada na lavagem das azeitonas, água de vegetação e a água adicionada ao processo para ajudar na separação das partes.

O sistema de centrifugação de três fases foi desenvolvido nos anos 70. O sistema de extração de azeite é realizado por centrifugação. A pasta da azeitona é colocada numa centrifugadora horizontal, em que devido a alta velocidade, a parte sólida (bagaço da azeitona) é separado da parte líquida (água e azeite) com ajuda de água a cerca de 20-25°C. Esta parte líquida segue para outra centrifugadora onde se separa a água do azeite.

No sistema de centrifugação de duas fases a pasta de azeitona é colocado na centrifugadora, e dá-se a separação da fase líquida da fase sólida, contudo, não é necessário fornecer água. O próximo passo é sujeitar a fase líquida a outra centrifugação de modo a separar o azeite virgem da água, gerando no final os 3 componentes bagaço de azeitona, azeite e águas ruças, que é composta essencialmente pela água da lavagem das azeitonas.

Dos três sistemas destaca-se o sistema de centrifugação de duas fases, sendo este o mais ecológico, produzindo apenas 0,2 m³ de águas ruças por tonelada de azeitona. O sistema de centrifugação de três fases produz cerca de 1 a 1,2 m³ de águas ruças por tonelada de azeitona, enquanto o sistema tradicional de prensas produz cerca de 0,4 a 0,6 m³ de águas ruças por tonelada de azeitona [36].

2.4 Métodos de Aplicação dos Fluidos de Corte na Maquinagem Tradicional

Muitas operações de maquinagem podem ser feitas a “seco”, no entanto com a aplicação de um fluido de corte adequado, geralmente, é possível aumentar a velocidade de corte, a profundidade de corte e vida útil da ferramenta, diminuindo a rugosidade superficial e o consumo de energia. A escolha do fluido de corte merece tanta atenção como a escolha da máquina-ferramenta, as ferramentas e, até mesmo, os parâmetros de maquinagem [30].

Atualmente, na indústria são utilizadas diferentes técnicas para a aplicação dos fluidos de

corde, cada uma com as seus custos, consumo, eficiência, modo de eliminação, e impactos ambientais [11]. As técnicas mais conhecidas são o arrefecimento criogénico [8,37,38], refrigeração a alta pressão [8,37], materiais lubrificantes/refrigerantes sólidos [8], maquinagem a seco [37,38], lubrificação por inundação [8,37] e MQL [39,40,41,42]. Como este trabalho irá centrar-se na utilização da maquinagem a seco e no processo de MQL, far-se-á, se seguida, uma breve apresentação desses processos.

2.4.1 Maquinagem a Seco

A técnica de maquinagem a seco, (*Dry Machining*) não utiliza qualquer sistema de lubrificação e, devido ao interesse em encontrar técnicas de refrigeração/lubrificação mais ecológicas, está a ganhar, cada vez mais, importância na indústria metalomecânica, devido à diminuição do impacto ambiental e do impacto na saúde dos trabalhadores [38].

Neste caso, como não há aplicação de nenhum fluido de corte na zona que está a ser maquinada, não irá haver calor dissipado na interface da ferramenta e da peça, levando, assim, a um aumento de temperatura. Assim sendo, a escolha da ferramenta de corte deve ser selecionada tendo em conta que esta deverá ter uma maior resistência ao desgaste, deve ser capaz de ter maior estabilidade química, resistência à temperatura e alta tenacidade. Geralmente, opta-se por maquinagem a seco quando se trabalha com baixas velocidade de corte e quando não importa a qualidade superficial. As aparas e a peça maquinada não têm contacto com óleos tendo, assim, a vantagem das aparas poderem ser recicladas diretamente para a sucata, e as peças não precisarem de ser lavadas nem desengorduradas [11].

Em suma, a maquinagem a seco previne riscos ambientais e para a saúde, devido à não utilização dos fluidos de corte, no entanto é de esperar valores de temperatura mais elevados, maior desgaste da ferramenta e baixa qualidade superficial [15].

2.4.2 MQL

A sigla *MQL* significa “*Minimum Quantity Lubrication*”, ou seja, a Quantidade Mínima de Lubrificação. Tal como o nome sugere, o termo MQL refere-se a uma quantidade muito pequena do fluido de corte, com um caudal entre os 6 e os 100 ml/h [17], (sendo que este caudal pode ser maior por um curto período de tempo, dependendo do tamanho da ferramenta, podendo ser superiores a 150 ml/h [39]), aplicado através de um fluxo de ar comprimido com a pressão a

variar entre 2 e 6 bar [40], resultando na formação de um aerossol que é aplicado diretamente na zona de corte [11]. O MQL pode ser uma alternativa à maquinagem por inundação e à maquinagem a seco, pois com a ajuda de ar comprimido a alta velocidade (100 m/s) uma pequena quantidade de fluido de corte é injetado em forma de gotas ultrafinas para a zona de corte [38].

Neste sistema de lubrificação o aerossol ao ser aplicado diretamente na zona de corte, cria uma camada fina de lubrificante entre o material e a ferramenta, diminuindo o atrito e o calor entre a ferramenta de corte e a peça [19].

A maquinagem com a utilização do MQL foi aceite como uma forma limpa de maquinagem, no contexto da produção sustentável, baseada na preservação ambiental em conformidade pela norma ISO 14000 [17]. A utilização desta técnica de lubrificação tem bastantes vantagens, basta comparar com a lubrificação por inundação, em que o caudal de fluido de corte é na ordem dos 20 l/min, ou seja, 1200 l/h. No caso do MQL reduz-se esse caudal para 100 ml/h, ou seja 0,1 l/h.

No caso da maquinagem por inundação, é necessário que as fábricas sejam equipadas de infraestruturas significativas ao nível de filtragem, recuperação e tratamento da água que é misturada no fluido de corte. É necessário controlar o fluido de corte para prevenir o crescimento de bactérias e fungos sendo que, como já referido, o fluido de corte poder provocar danos na saúde dos operadores e impactos ambientais. Com a utilização de MQL, por usar a quantidade muito pequena de fluido é possível reduzir estas desvantagens dos fluidos de corte [41].

Neste método, as aparas são projetadas em várias direções para o espaço de trabalho da máquina, ao contrário da lubrificação por inundação em que são arrastadas. Além de utilizar uma quantidade de fluido de corte muito pequena, passam a existir gotículas em suspensão, devido à pulverização do aerossol no espaço de trabalho da máquina. Caso não exista uma vedação estanque e um sistema de extração, os operadores podem inalar estas gotículas e provocar graves problemas de saúde. Como já referido, na lubrificação por inundação o contacto direto dos operadores com o fluido de corte pode provocar doenças na pele, com a utilização do MQL apesar de se reduzir esse risco, podem haver alguns resíduos de lubrificante na peça maquinada [42].

Com a evolução dos processos de lubrificação, verifica-se que esta técnica de lubrificação pode ser uma boa solução entre a lubrificação por inundação e a maquinagem a seco [42].

A aplicação do MQL divide-se em 2 métodos, aplicação interna e aplicação externa (figura 5):

- ✓ Na aplicação interna o fluido passa por dentro da ferramenta até à área de aplicação, ocorrendo um contacto direto entre o fluido de corte, a peça a ser maquinada e a ferramenta, levando a que haja uma melhor troca de calor e melhor lubrificação. Este

sistema é mais caro mas mais eficiente [39].

- ✓ A aplicação externa é apropriada para máquinas que não tenham o sistema de aplicação interna instalado, sendo assim um sistema mais versátil de ser aplicado em máquinas-ferramentas tradicionais como torno, fresadora, furadora e serrote [39].

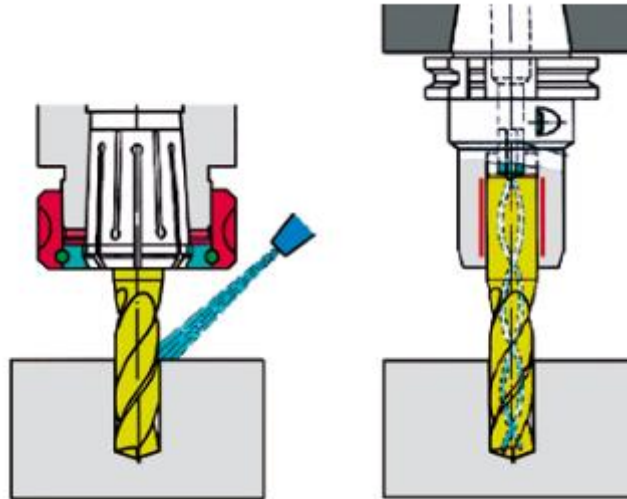


Figura 5 Sistemas de MQL externa e interna [39].

2.5 Acabamento Superficial

Na indústria metalomecânica, uma grande parte das superfícies técnicas funcionais são obtidas por maquinagem e não possuem uma forma geométrica exata. Em qualquer processo de maquinagem existem sempre algumas imperfeições, mesmo estudando e controlando os parâmetros de maquinagem torna-se impossível obter uma superfície absolutamente perfeita [29].

A condição final da superfície maquinada resulta de um processo, no qual, são envolvidas deformações plásticas, ruturas, recuperação elástica, geração de calor, tensões residuais e, por vezes, reações químicas. Todos estes fatores têm interferência na nova superfície maquinada. O acabamento superficial de uma superfície maquinada é a combinação de vários fatores que se pode dividir em rugosidade superficial, ondulações e falhas. O nível de acabamento superficial deve estar previsto no projeto. Por exemplo, a superfície do bloco e da colaça de um motor de combustão interna deve ter baixa rugosidade, enquanto um disco de travão de um automóvel pode conter maior rugosidade. O nível de acabamento superficial deve ter em conta alguns aspetos [28]:

- Grau de acoplamento entre os componentes, por exemplo, vedantes de chumaceiras, elementos de vedação e moldes para injeção


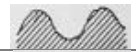
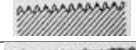


- Coeficientes de atrito, desgaste e lubrificação
- Resistência à corrosão e à fadiga
- Resistividade elétrica e térmica
- Processos seguintes, como a pintura
- Aspeto
- Custos

A textura da superfície maquinada é a combinação de diversos defeitos, com diferentes tipos e magnitudes. A combinação destes defeitos define a superfície real quer seja a nível de amplitude quer seja a nível comprimento.

Existem normas que estabelecem para as superfícies obtidas por maquinagem quatro ordens de grandeza de defeitos (tabela 1), tendo em consideração a caracterização macro e micro geométricas.

Na 1ª ordem encontram-se os defeitos de forma, na 2ª ordem os defeitos de ondulação, na 3ª ordem os defeitos de rugosidade (periódico) e na 4ª ordem os defeitos de rugosidade (aleatório). Podem-se ainda considerar ordens superiores à 4ª, classificando os defeitos a nível atómico e cristalino [29].

Tabela 1 Ordens de grandeza de defeitos para superfícies maquinadas [29].

Tipo de defeito	Número De Ordem	Designação	Esquema do perfil geométrico
Defeitos Macro Geométricos	1	Forma	
	2	Ondulação	
Defeitos Micro Geométricos	3	Rugosidade	
	4		
Somatório dos Defeitos	De 1 a 4	Superfície efetiva	

2.5.1 Rugosidade Superficial

A rugosidade superficial refere-se às pequenas irregularidades finas ou erros micro geométricos que resultam da ação inerente do processo de corte. A rugosidade superficial pode ser influenciada pela máquina-ferramenta, propriedades do material da peça, geometria e material da ferramenta, desgaste da ferramenta, e parâmetros e operações de corte [28].

Uma superfície com a rugosidade nula seria o caso ideal, contudo, isto é impossível, mesmo escolhendo e otimizando os parâmetros de corte, nos processos por arranque de apra existirão sempre imperfeições.

Quanto melhor o acabamento superficial da peça maquinada maior será o custo de fabrico, deste modo, deve-se ter em atenção a função que a peça irá desempenhar para que o seu acabamento superficial esteja em concordância com a sua função. A análise da rugosidade superficial tem sido, cada vez mais, importante pois esta contribui para verificar se a peça maquinada pode apresentar falhas durante a sua utilização, e fornece parâmetros na qualidade do desempenho da ferramenta. Com a evolução tecnológica, torna-se cada vez mais importante controlar os parâmetros de corte, com o objetivo de minimizar os problemas ligados ao atrito e ajuste das tolerâncias que podem prejudicar a vida útil e o desempenho da peça [43].

Segundo a Norma ISO 1302 para representar a rugosidade nos desenhos técnicos são utilizadas duas alternativas na qual como primeira deve ser representado o valor da rugosidade em micrómetros (μm), ou então deve ser definida a classe a indicativa da rugosidade. Neste último caso, são estabelecidas 12 classes (N1 a N12) em que os valores da rugosidade média (R_a) podem variar entre $0,025 \mu\text{m}$ e $50 \mu\text{m}$, como se pode verificar na tabela 2. A unidade de medida da rugosidade média é o micrómetro (μm) [44].

Tabela 2 Classes e valores da rugosidade segundo a Norma ISO 1302.

Classe	R_a (μm)
N12	50
N11	25
N10	12,5
N9	6,3
N8	3,2
N7	1,6
N6	0,8
N5	0,4
N4	0,2
N3	0,1
N2	0,05
N1	0,025

2.5.1.1 Rugosidade Média (R_a)

A rugosidade média (R_a) é o parâmetro mais utilizado pela indústria. Este parâmetro é calculado através da média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento (y_i) dos pontos do perfil da rugosidade, medidos em relação à linha média no percurso de medição (l_m) como ilustra a figura 6.

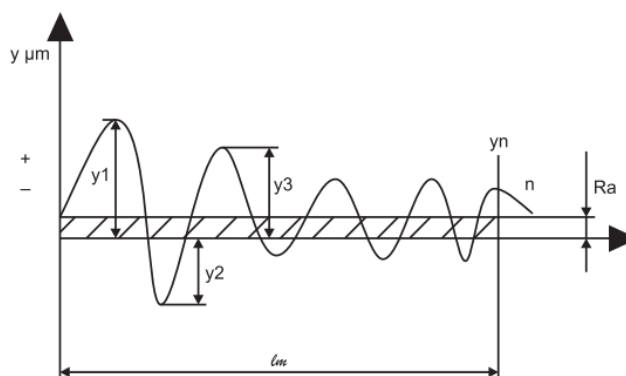


Figura 6 Ilustração medição da rugosidade média [43].

Uma vez que este parâmetro é o mais utilizado na indústria, pode ser aplicado às várias peças fabricadas por fresagem, aplainamento, retificação e torneamento. É, geralmente, utilizada em peças ornamentais, guias de máquinas e componentes gerais quando não necessitam de acabamento superficial especializado. Este parâmetro é escolhido muitas vezes pois pode ser usado quando é necessário um controlo contínuo da rugosidade (por exemplo, nas linhas de produção) e quando o acabamento superficial apresenta sulcos de maquinagem [43].

2.5.1.2 Rugosidade Máxima (R_y)

Este parâmetro é definido como o maior valor das rugosidades parciais, durante o curso de medição (l_m). Este parâmetro é o indicado para analisar as rugosidades em superfícies de vedação, assentos de anéis de vedação, superfícies dinamicamente carregadas, tampões em geral, parafusos altamente carregados e superfícies de deslizamento com perfil efetivo periódico [43].

2.5.1.3 Rugosidade Total (R_t)

A rugosidade total corresponde à distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo durante o comprimento de medição. A utilização da rugosidade total é semelhante ao da rugosidade máxima, contudo, é mais abrangente devido a considerar todos os picos e vales durante o comprimento de medição [43].

2.5.2 Rugosímetro

O instrumento utilizado para medir a rugosidade é o rugosímetro. Este aparelho utiliza um apalpador que contém um sensor, e que percorre a superfície da peça. O modo de acionamento do apalpador é através de um sistema mecânico que o faz movimentar-se para a frente e para trás, percorrendo assim o comprimento de medição. Com este movimento é possível fazer a caracterização da rugosidade da peça, que é obtida através das ondulações “varridas” pelo apalpador. No sensor encontra-se uma agulha, na qual o seu movimento transforma-se em impulsos elétricos num amplificador de sinais. Esses impulsos são ilustrados no visor do rugosímetro, em forma de gráfico do perfil da rugosidade, sendo assim possível obter os valores de rugosidade pretendidos [43].

2.6 Temperatura na Maquinagem e Termografia

Praticamente toda a energia mecânica associada ao corte com arranque da peça, é transformada em energia térmica. As forças aplicadas contra a peça criam atrito, e com a tensão e a deformação a que as peças são sujeitas criam um aumento de temperatura. Estima-se que cerca de 90% da energia mecânica gerada durante a maquinagem transforma-se em energia térmica. Este aumento da temperatura afeta a eficiência da maquinagem, aumenta o desgaste da ferramenta, altera a microestrutura da peça em trabalho, a sua forma e dimensões e também a sua rugosidade. Além destas desvantagens, o aumento da temperatura pode provocar tensões residuais na superfície da peça. Na maior parte dos casos, para se estudar as temperaturas durante os processos de maquinagem são utilizados termopares ou então câmaras IR (infravermelhos) [46,47]. A termografia infravermelha permite a visualização de gradientes térmicos com uma resposta rápida. Apesar da termografia ser bastante utilizada, a emissividade raramente é considerada dependente do espectro. Muitos estudos que utilizam a termografia na maquinagem consideram a emissividade como uma constante [46].

A radiação infravermelha não é detetada pelo olho humano, uma vez que os olhos humanos são sensíveis aos raios eletromagnéticos com comprimentos de onda que variam entre 400 a 760 nm, ou seja, apenas detetam a luz visível, no entanto, uma câmara infravermelha consegue detetar estas radiações convertendo-as numa imagem visual através de um visor, representando as variações térmicas. Os raios infravermelhos cobrem uma parte do espectro eletromagnético, com comprimento de onda de aproximadamente de 900 a 14000 nm (0.9-14 μm). Todos os objetos com temperaturas acima do zero absoluto emitem raios infravermelhos e

a quantidade de radiação aumenta com o aumento da temperatura. A termografia permite obter imagens através de uma câmara infravermelha, calibrada especificamente para mostrar os valores das temperaturas do que se pretende, permitindo, assim, efetuar medições térmicas sem contacto com o corpo em questão [48,49].

A construção de uma câmara infravermelha é semelhante a uma câmara de vídeo digital, na qual os seus principais componentes e sistema de funcionamento (figura 7) são a lente que foca os raios infravermelhos para um detetor destes raios, os seus componentes eletrónicos e os softwares que processam e exibem os sinais e imagens. O detetor da câmara é composto por uma matriz de plano focal constituído por pixéis de tamanho micrométrico, feitos de materiais sensíveis a comprimentos de onda infravermelho. A resolução plano focal pode variar entre 160x120 até 1024x1024 pixéis [47].

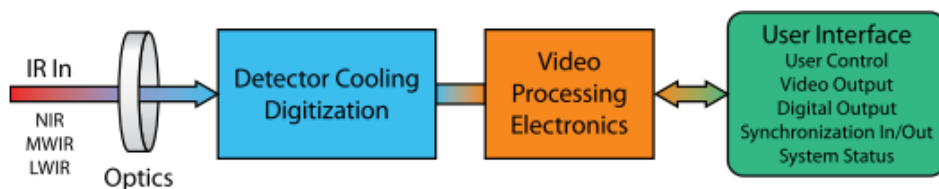


Figura 7 Esquema simplificado de uma câmara infravermelha [47].

Geralmente, as câmaras infravermelhas são projetadas e calibradas para uma faixa específica do espectro infravermelho, ou seja, a ótica e os materiais do detetor de infravermelhos, devem ser seleccionados para a faixa desejada. Na figura 8 pode-se verificar as regiões de resposta para os vários materiais detetores. Os raios infravermelhos contêm as mesmas propriedades da luz visível em relação à reflexão, refração e transmissão, e por isso a lente das câmaras termográficas é projetada de maneira semelhante à de uma câmara de comprimento de onda visual. Contudo, os vidros usados nas lentes das câmaras de luz visível não podem ser usados em camaras de infravermelhos por não transmitirem comprimentos de onda infravermelhos, por outro lado, os materiais transparentes aos raios infravermelhos, geralmente, são opacos à luz visível [47].

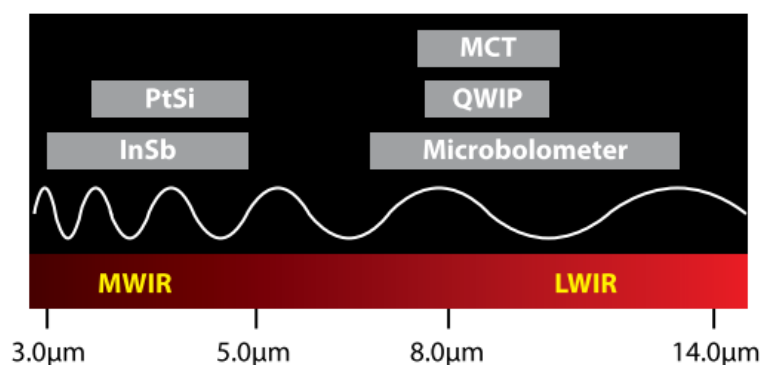


Figura 8 Exemplos de materiais detetores e suas respostas espectrais em relação às bandas de ondas médias (MW) e ondas longas (LW) de infravermelho [47].

2.7 Tribologia

A tribologia foca-se no estudo do desgaste do atrito e da lubrificação. O termo tribologia vem do grego *tribo*, que significa esfregar e *Logos* que significa estudo. Este termo foi utilizado pela primeira vez em 1966 por Peter Jost com o tema “ciência e tecnologia de superfícies interativas em movimento relativo e dos assuntos e práticas relacionadas”. Esta ciência reúne os conhecimentos de física, de química, de mecânica e de ciências dos materiais, para conseguir prever e explicar os comportamentos de sistemas físicos usados em sistemas mecânicos. Descobertas arqueológicas relatam que, durante a história da humanidade, no período do paleolítico já eram utilizadas técnicas para reduzir o atrito. O primeiro registo visual da utilização da tribologia foi verificado numa pintura de baixo-relevo (figura 9) em que os egípcios utilizavam trenós para transportar estátuas pesadas. Além disso, sobre os pés da estátua é possível ver que é derramado líquido no caminho, para reduzir o atrito [49].

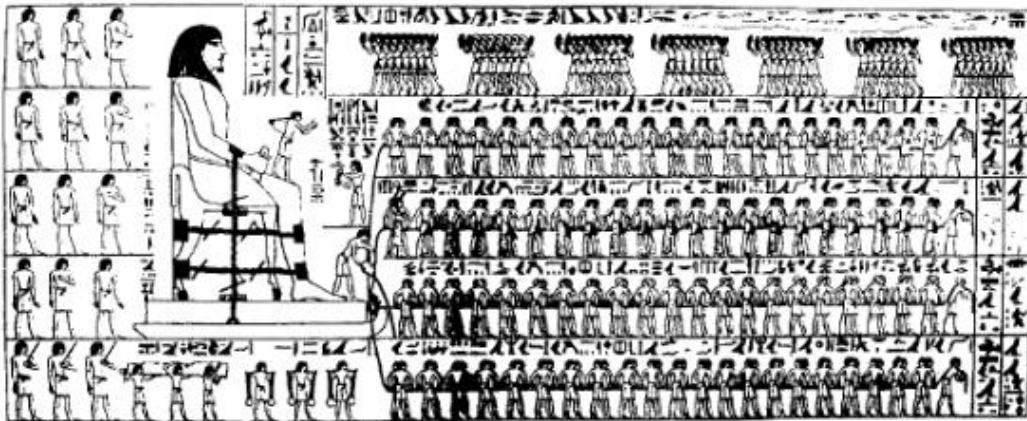


Figura 9 Pintura de baixo-relevo mostrando o derrame de água para reduzir o atrito (Egito 2.400 AC)[49].

O papel de pai da tribologia moderna é atribuído a Leonardo da Vinci, que estudou fenómenos de atrito e desgaste. Conseguiu medir forças de atrito em planos horizontais e inclinados, verificando que estas dependem da força normal ao deslizamento dos corpos. Leonardo da Vinci conseguiu também estabelecer a importância de lubrificantes para diminuir a força de atrito, considerou o efeito da rugosidade no deslizamento de corpos e conseguiu mostrar que a interposição de esferas entre corpos permite a diminuição da resistência ao movimento.

A tribologia é, assim definida, como uma ciência ligada à engenharia de superfícies com movimento relativo, estudando os princípios do atrito, lubrificação e desgaste. Os estudos tribológicos desenvolvem-se com o objetivo de melhorar o desempenho dos produtos e processos de sistemas físicos sujeitos a desgaste [50].

Os quatro principais modos de desgaste estão representados na figura 10.

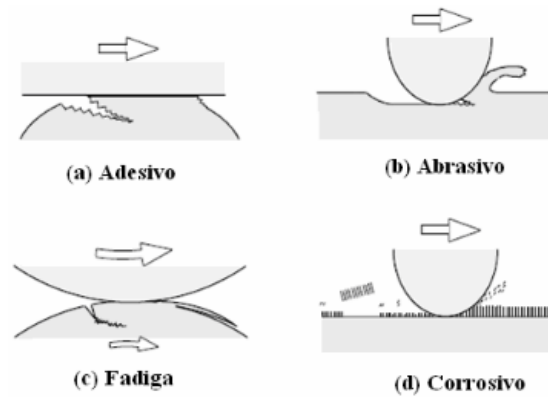


Figura 10 Esquema dos quatro principais modos de desgaste [49].

Quando a ligação adesiva entre as duas superfícies é suficientemente forte para resistir ao deslizamento ocorre o desgaste adesivo. Com este desgaste ocorre uma deformação plástica na região de contacto, dando-se uma transferência de material da superfície mais macia para a superfície mais dura.

No desgaste abrasivo ocorre uma remoção de material na superfície, tendo sempre em conta a superfície e a dureza dos dois materiais em contacto.

O desgaste por fadiga ocorre quando está presente um elevado número de cargas cíclicas.

O desgaste corrosivo dá-se devido a meios corrosivos, que podem ser líquidos ou gasosos, onde ocorre reações químicas e eletroquímicas, que são conhecidas como reações triboquímicas.

Quando duas superfícies em contacto estão em movimento relativo, os processos tribológicos são muito complexos devido ao atrito, desgaste e deformação em diferentes níveis e tipos. O atrito e o desgaste estão relacionados, no entanto, não se trata de uma relação linear [50].

Uma das maiores contribuições desta ciência é promover o aumento da vida útil dos diversos produtos, por exemplo, componentes de motores a combustão interna, ferramentas de corte utilizadas na maquinagem. Nos processos de maquinagem estima-se que cerca de 70% do calor gerado durante o processo seja devido à deformação plástica do material, e os restantes 30% sejam devido ao atrito entre a peça e a ferramenta. A possibilidade de diminuir o atrito entre a peça e a ferramenta permite diminuir o calor gerado durante o processo de maquinagem e aumentar a vida útil das ferramentas de corte, com melhor acabamento superficial dos produtos obtidos [51].

Um tribómetro é um equipamento que permite fazer a medição de propriedades de atrito e desgaste para combinações de materiais e lubrificantes sob condições específicas de carga, velocidade, temperatura e condições atmosféricas. Uma caracterização tribológica envolve estudos sobre condições reais do uso do material, assim como, estudos sobre o coeficiente de atrito, taxa de desgaste e durabilidade da película lubrificante. Os estudos tribológicos podem ser

realizados no âmbito da área automóvel, aeroespacial, eletrônica, biomédica, entre outras. No tribómetro podem ser realizados vários tipos de ensaios, tais como, o de riscamento que é bastante útil na avaliação da adesão e na medição da dureza de películas finas. Permite também fazer ensaios de indentação (para a determinação do módulo de Young), de dureza e ensaios de fadiga, permitindo estudar a durabilidade e resistência do material [49].

2.8 Método Taguchi

Genichi Taguchi (1 de janeiro de 1924 - 2 de junho de 2012) foi um engenheiro e estatístico que nasceu em Tokamachi no Japão e desenvolveu um método que tem como objetivo melhorar a qualidade dos produtos, e que se pode aplicar à engenharia, biotecnologia, marketing e publicidade. O método de Taguchi é uma abordagem adotada para otimizar os parâmetros de projeto, foi originalmente proposta para melhorar a qualidade dos produtos através da aplicação de conceitos estatísticos e de engenharia. O método baseia-se numa matriz ortogonal de experiências que fornece uma variância muito reduzida, em que o resultado final é a configuração ideal dos parâmetros de controlo do processo. Esta matriz ortogonal fornece um conjunto de ensaios bem organizados (com menor número de execuções experimentais) e as razões sinal/ruído de Taguchi (S/N) que são funções logarítmicas de saída são utilizadas como função objetivo nos processos de otimização podendo, assim, prever os resultados ideais. Esta técnica tem ganho popularidade pois é fácil de adotar e é de fácil aplicação mesmo para quem tem poucos conhecimentos na estatística [6,53].

Os passos para a implementação do método de Taguchi são os seguintes:

- 1- Identificação da função principal, efeitos colaterais e modo de falha.
- 2-Identificação do fator de ruído, condição de teste e características de qualidade.
- 3-Identificação da função principal a ser otimizada.
- 4-Identificação do fator de controle e os seus níveis.
- 5-Seleção matriz ortogonal.
- 6- Realização dos ensaios
- 7-Análise dos dados, previsão do nível ótimo e desempenho
- 8-Realização do ensaio de verificação e planificação da ação futura.

2.8.1 Matrizes Ortogonais

As matrizes ortogonais do método de Taguchi permitem o número máximo de efeitos principais serem estimados de maneira não enviesada, com um número mínimo de ensaios. São usadas para variar e testar, sistematicamente, os diferentes níveis de cada um dos fatores de controlo e as matrizes mais usadas são L4, L9, L12, L18 e L27. Normalmente, são escolhidos 2 ou 3 níveis para cada fator [52].

2.8.2 Razão Sinal/Ruído

A Razão Sinal/Ruído desenvolvida por Taguchi é uma medida de desempenho para escolher os níveis de controlo que melhor lidam com o ruído. Neste método o termo “sinal” simboliza o valor desejável para a característica de saída e o termo “ruído” simboliza o valor indesejável. A relação Sinal/Ruído leva em consideração a média e a variância, ou seja, é a relação entre a média (sinal) e o desvio padrão (ruído). A equação S/N depende do critério para a característica de qualidade a ser otimizada. Existem três tipos padrão de relações, dependendo da resposta de desempenho desejada [52].

-Nominal é o melhor

$$\frac{S}{N_T} = 10 \times \log \left(\frac{\bar{y}^2}{S_y^2} \right) \quad (4)$$

-Maior é melhor (Maximizar)

$$\frac{S}{N_L} = -10 \times \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (5)$$

-Menor é o melhor (Minimizar)

$$\frac{S}{N_s} = -10 \times \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (6)$$

Em que:

\bar{y} é a média dos dados observados

S_y^2 é a variância de y

n é o número de observações

y_i são os dados observados

2.9 Análise da Variância (ANOVA)

Na análise ANOVA existe uma variável dependente métrica e uma ou mais variáveis independentes categóricas (os fatores ou parâmetros). Este método estatístico é apropriado para testar a igualdade de médias de mais do que duas populações, e o seu teste baseia-se na comparação de variâncias (comparando a variabilidade entre grupos, relativamente à variabilidade geral). Assim sendo, a análise da variância testa a hipótese de que as médias de uma ou mais das populações são iguais analisando a importância dos fatores, comparando a média das respostas para os diferentes níveis de fatores. Podem-se considerar duas hipóteses:

Hipótese nula, que representa a igualdade das médias- $H_{0,A}$ - As médias da variável em estudo nos k grupos são idênticas. $H_0 = \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_g$

Hipótese alternativa, que representa a existência de diferenças significativas entre as médias da variável em estudo dos k grupos, ou seja, $H_{1,A}$ – Pelo menos dois grupos apresentam resultados médios distintos da variável dependente em estudo. $H_1 \neq \mu_i \neq \mu_j$ para algum par (i,j) .

A construção da ANOVA só é possível quando se está presente de uma variável de resposta contínua, e pelo menos um parâmetro categórico, com dois níveis [54,55] .

Tabela 3 Análise ANOVA.

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados (SQ)	Graus de Liberdade (df)	Quadrados Médios (MQ)	Razão F
Entre grupos	$SQ_A = n \sum_{j=1}^k (\bar{x}_j - \bar{x})^2$	$df_w = k - 1$	$MS_A = \frac{SS_A}{k - 1}$	$F = \frac{MS_A}{MS_E}$
Erro amostral Dentro dos Grupos	$SQ_E = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n (\bar{x}_{ij} - \bar{x}_j)^2$	$df_b = n - k$	$MS_E = \frac{SS_E}{n - k}$	
Total	$SQ_T = n \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n (\bar{x}_{ij} - \bar{x})^2$	$df_t = n - 1$		

A tabela ANOVA (tabela 3) resume os valores de SQ e MQ e apresenta o valor de F. Quando a variabilidade entre grupos é uma parcela elevada da variabilidade global, o valor de F é grande.

Assim sendo:

SQ_A é a soma dos quadrados do fator e mede a variação entre os grupos ou a proporção de variância total relativa aos grupos.

SQ_E é a soma dos quadrados dos erros e mede a variação dentro de cada grupo, que não é explicada pelas possíveis diferenças entre grupos.

SQ_T é a soma dos quadrados total e mede a variação total dos valores de X em torno da sua média geral.

Df representa os graus de liberdade e representa a quantidade de informações totais

MQ representa a razão da soma dos quadrados segundo o grau de liberdade, representado a média amostral.

3. Materiais e Métodos

Ao longo deste capítulo serão apresentados os materiais e equipamentos utilizados durante a execução do trabalho experimental, bem como, a descrição dos métodos e procedimentos que permitiram fazer o planeamento e execução dos ensaios laboratoriais.

Inicialmente, serão abordados todos os equipamentos utilizados justificando a sua utilização e as suas características. De seguida, será apresentado o planeamento segundo o método de Taguchi para os ensaios experimentais. Os ensaios laboratoriais foram divididos em duas fases. Numa primeira fase foram realizados ensaios no Laboratório de Tecnologia Mecânica da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança e, numa segunda fase, foram realizados ensaios no Laboratório de Órgãos de Máquinas e Tribologia do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Minho - Campus de Azurém, Guimarães.

3.1 Materiais e Equipamentos

Na primeira fase prática foram realizados ensaios de fresagem num bloco de liga de alumínio, fazendo variar os parâmetros de lubrificação e os parâmetros de corte. Durante estes ensaios foram utilizados diversos materiais e equipamentos.

- **Liga de Alumínio**

Os ensaios de fresagem foram realizados numa liga de alumínio. Foi utilizada uma liga de Al-Mg-Si, ou seja, uma liga da série 6000, mais especificamente, a liga 6061. Nesta liga, o magnésio e o silício são os elementos principais, em que a sua proporção visa a formação da fase Mg_2Si , permitindo, assim, efetuar tratamentos térmicos, por isso, estas ligas são também designadas como ligas de tratamento térmico. Estas ligas apresentam boa ductilidade, boas características de soldadura, de maquinagem e boa resistência à corrosão. A combinação de Mg varia entre 0,6% e 1,2% e a de Si varia entre 0,4% e 1,3%.

- **Serra de Fita**

Para cortar os blocos de alumínio com as dimensões pretendidas foi utilizada a serra de fita Optimum Quantum, S 181 do Laboratório de Tecnologia Mecânica da ESTIG

- **Fresadora**

A maquinagem da liga de alumínio foi realizada na fresadora MRF FU145 do Laboratório de Tecnologia Mecânica da ESTIG. Esta máquina é uma fresadora vertical na qual se realizaram as operações de facejamento dos blocos de alumínio. Após as operações de facejamento procedeu-se à medição da rugosidade superficial. Durante o processo de fresagem, também, se efetuou a medição da temperatura nas aparas e na interface aparta-ferramenta.

A fresa utilizada foi uma fresa de facejamento, com diâmetro de 100 mm e composta por 6 arestas de corte. As pastilhas utilizadas têm a designação de TPMN 220412. De acordo com o fabricante, os parâmetros máximos de maquinagem são: para o avanço máximo por dente (f_z) de 0,17 mm/dente e para a velocidade de corte máxima (v_c) é de 175 m/min.

- **Atomizador (Dispositivo MQL)**

Para obter a pulverização dos fluidos de corte, foi utilizado um atomizador (figura 11) previamente adquirido para o efeito. Este dispositivo contém duas entradas, a primeira está ligada ao ar comprimido e a segunda ao reservatório do fluido utilizado. Contém uma mangueira rígida com um bocal no qual o fluido de corte é pulverizado sob a forma de aerossol. O dispositivo possui ainda dois fusos que permitem fazer a regulação do caudal de ar e de fluido de corte.

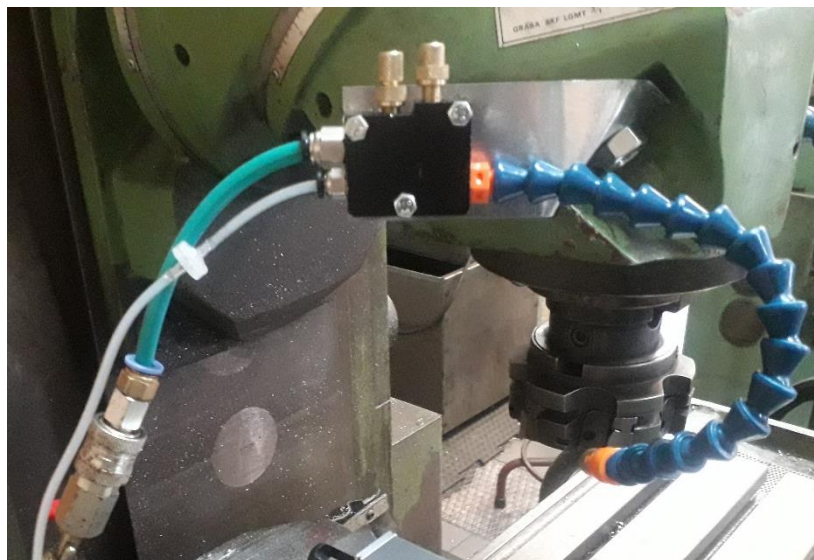


Figura 11 Atomizador (Dispositivo MQL).

- **Rugosímetro Mitutoyo SJ-301**

Este equipamento (figura 12) foi utilizado para medir a rugosidade superficial dos provetes obtidos nos ensaios experimentais de maquinagem. Este aparelho é portátil e permite medir a rugosidade superficial em qualquer direção. Os parâmetros estão em conformidade com várias normas europeias e, após a obtenção dos resultados, estes são apresentados no ecrã. É preciso ter alguns cuidados na utilização deste dispositivo, visto que na extremidade se encontra o detetor, que deve ser pousado sobre a peça em que se está a medir, de uma forma muito delicada para não danificar a agulha.



Figura 12 Rugosímetro Mitutoyo SJ-301 e detetor.

- **Câmara Termográfica FLIR SC7000**

A câmara FLIR SC7000 (ver figura 13) é uma câmara muito flexível, com elevada sensibilidade, precisão, resolução espacial e velocidade. Estas câmaras são projetadas para uso em investigação e aplicações industriais, em que está disponível uma ampla gama de detetores para poderem ser aplicados nas diversas análises simples e multiespectrais, em que o tempo de integração é ajustável em incrementos de nanossegundos.

Esta série vem com uma roda de filtro removível e motorizada de 4 posições permitindo, assim, obter imagens numa parte selecionada do espectro eletromagnético em formatos de 640 x 512 ou 325 x 256 pixels com alta sensibilidade e níveis de ruído na ordem dos 20 mK, permitindo que um subconjunto da imagem total seja lido seletivamente com o tamanho da janela ajustável pelo utilizador. Dependendo do detetor utilizado, esta câmara consegue processar as imagens térmicas a uma velocidade de 62000 Hz. Os tamanhos de janela de visualização podem ser escolhidos arbitrariamente e são facilmente definidos usando o controlo da câmara no próprio *software*.

A série FLIR SC7000 funciona em conjugação com o *software* FLIR ResearchIR Max que permite fazer a visualização intuitiva, aceder aos controlos da câmara (câmara virtual), gravação e processamento avançado dos dados térmicos fornecidos pela câmara.

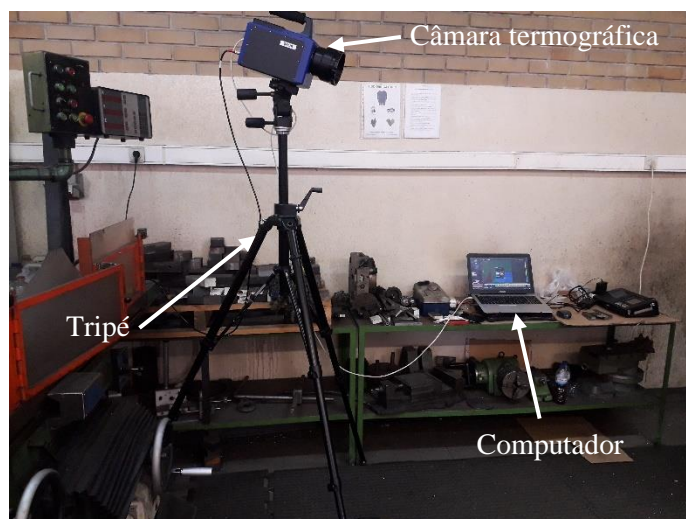


Figura 13 Câmara termográfica FLIR SC7000.

- **Fluidos em Estudo**

Como dito anteriormente, neste trabalho pretende-se analisar a viabilidade para a utilização de águas ruças como lubrificante de corte. Deste modo, utilizaram-se como fluidos de corte as **águas ruças** e o óleo de corte convencional da marca **Balis MAFCOOL 51**, para efetuar uma comparação entre eles. O fluido de corte **Balis MAFCOOL 51** é um fluido de corte solúvel semi-sintético e possui elevada capacidade lubrificante, elevada estabilidade e permite boa qualidade de acabamento das peças maquinadas. O fabricante recomenda uma concentração de 4% a 8% em água.

Numa segunda fase foram realizados ensaios tribológicos utilizando um equipamento chamado tribómetro.

- **Tribómetro PLINT TE67**

O tribómetro PLINT TE67 (figura 14) é um equipamento universal que se destina à realização de ensaios de atrito e desgaste por deslizamento e podem ser realizadas várias geometrias de ensaio, tal como, esfera sobre disco rotativo. Para a elaboração dos ensaios foi utilizada a configuração esfera sobre um disco rotativo. Este equipamento é, fundamentalmente, constituído por uma mesa que descreve o movimento pretendido (rotação do disco ou movimento linear alternativo) e por uma cabeça porta pinos onde se coloca a esfera, um braço de posicionamento da cabeça de porta-pinos, uma célula de carga para medição da força de atrito e um sistema de aquisição de dados. Os ensaios realizados utilizaram uma esfera de material cerâmico (Alumina) (figura 15) sobre um disco rotativo em aço inoxidável 316L (figura 16), com o intuito de obter coeficientes de atrito e medição de desgaste na esfera através da perda/ganho de massa e no disco através do sulco provocado pela esfera cerâmica.



Figura 14 Tribômetro PLINT TE 67 e sistema de aquisição de dados.



Figura 15 Esfera de alumina.

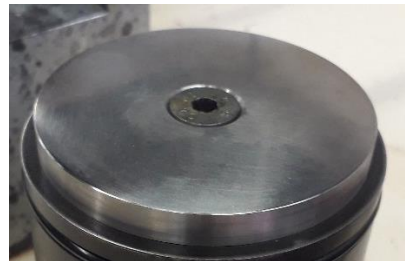


Figura 16 Disco em aço inoxidável.

3.2 Métodos e Procedimentos

3.2.1 Arranjo Ortogonal de Taguchi

Para dar início à primeira fase de ensaios no Laboratório de Tecnologia Mecânica da ESTIG-IPB foi necessário selecionar os parâmetros de maquinagem utilizados durante os testes de fresagem, bem como, definir os níveis desses parâmetros, com o objetivo de minimizar a rugosidade superficial e a temperatura de corte.

Sabe-se os parâmetros controláveis no processo de fresagem são a velocidade de rotação (n), a velocidade de avanço (V_f) e a penetração (a_p), bem como, os seus diferentes níveis. Com base nestes elementos, é possível determinar a matriz ortogonal adequada, observando a tabela 4.

Tabela 4 Matrizes ortogonais de Taguchi em função dos parâmetros e dos níveis.

Número de níveis	Número de parâmetros		
	2	3	4
2	L4	L4	L8
3	L9	L9	L9
4	L16	L32	L16

Como se pretende estudar a influência dos três parâmetros já enunciados e atribuindo, a cada parâmetro, três níveis definiu-se a matriz de Taguchi L9.

Os valores dos níveis escolhidos foram definidos tendo em conta os valores admitidos pelo fabricante da ferramenta de corte, sendo que, é recomendada uma velocidade de corte máxima de 175 m/min e um avanço máximo, por dente, de 0,17 mm. Com ajuda das equações (1) e (2) foi possível calcular a velocidade de rotação máxima e a velocidade máxima de avanço. Assim, foi definida a tabela 5 com 3 níveis para cada parâmetro.

Tabela 5 Valores dos níveis para cada parâmetro.

Parâmetro	Símbolo	Nível 1	Nível 2	Nível 3
Velocidade de rotação (rpm)	A	195	285	500
Velocidade de avanço (mm/min)	B	20	63	185
Penetração (mm)	C	0.3	0.6	1

De acordo com a matriz de Taguchi L9, será necessário a realização de 9 ensaios, tendo em conta as combinações presentes na tabela 6.

Tabela 6 Matriz de Taguchi utilizada.

Ensaio	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

Após escolhida a Matriz L9 e definidos os valores para cada nível é possível substituir os níveis na tabela 6 pelos respectivos valores, obtendo, deste modo, a tabela 7.

Tabela 7 Matriz L9 de Taguchi com os parâmetros de maquinagem selecionados.

Ensaio	Velocidade de rotação (rpm)	Velocidade de avanço (mm/min)	Penetração (mm)
1	195	20	0,3
2	195	63	0,6
3	195	185	1
4	285	20	0,6
5	285	63	1
6	285	185	0,3
7	500	20	1
8	500	63	0,3
9	500	185	0,6

Esta matriz foi utilizada para 5 condições de lubrificação diferentes (tabela 8) para, desta forma, ser possível estudar a viabilidade das águas ruças como lubrificante de corte.

Tabela 8 Condições de lubrificação para cada matriz de Taguchi L9.

Grupo de Ensaio	Condições lubrificação
I	Seco
II	<i>Balis MAFCOOL 51</i> com caudal de 50 ± 5 ml/h
III	<i>Balis MAFCOOL 51</i> com caudal de 100 ± 5 ml/h
IV	Águas ruças com caudal de 50 ± 5 ml/h
V	Águas ruças com caudal de 100 ± 5 ml/h

3.2.2 Procedimento Prático

Os testes práticos iniciaram-se com a análise do atomizador MQL utilizado e, em conjunto, com outro estudo que estava a ser desenvolvido no mesmo laboratório para diferentes condições de pressão de ar comprimido e de abertura dos fusos que regulam o ar e o fluido obtiveram-se alguns os caudais de fluido (tabela 9). Este atomizador mostrou-se bastante sensível e, por isso, antes de cada ensaio foi controlado o valor do caudal, considerando um erro de ± 5 ml/h.

Tabela 9 Estudo dos caudais no atomizador MQL.

Pressão ar [bar]	Abertura fluido [Graus]	Abertura ar [Graus]	Balis MAFCOOL 51 Caudal [ml/h]	Águas ruças Caudal [ml/h]
4	3x360	250		
	3x360	270		
	3x360	360	26	25
5	3x360	250		
	3x360	270	44	47
	3x360	360	73	81
6	3x360	250	98	103
	3x360	270	160	151
	3x360	360	199	185

Uma vez que as águas ruças continham bastantes impurezas, pois foram obtidas da fossa de um processo de prensas, foi necessário efetuar a sua filtragem. Inicialmente, utilizou-se um coador (figura 17) para se conseguir remover os resíduos sólidos maiores. Depois foram utilizados panos de cozinha (figura 18) e, de seguida, tecidos de nylon (figura 19) obtidos das vulgarmente designadas “meias de vidro”. Na fase final da filtragem, utilizaram-se os filtros interiores de máscaras descartáveis (figura 20).



Figura 17 Filtragem águas ruças com coador.



Figura 18 Filtragem águas ruças com pano de cozinha.



Figura 19 Filtragem de águas ruças com tecido de nylon.



Figura 20 Filtragem de águas ruças com filtro interior de máscara descartável.

Antes de dar início aos testes práticos foi, ainda, necessário conhecer e explorar o funcionamento da câmara termográfica FLIR SC7000 e do *software ResearchIR Max*. Durante a aprendizagem de manuseamento da câmara foi escrito um manual de utilização rápida que se encontra em anexo.

Antes dos testes de fresagem começou-se por cortar 2 blocos de liga de alumínio (Al6061) na serra fita Quantum Maschinen, S 181, com as dimensões de 65 × 65 × 25 mm. Cortaram-se dois blocos do mesmo material pois iria ser necessário efetuar 45 passagens mais os testes de confirmação. De seguida, fizeram-se alguns ensaios preliminares com restos de blocos disponíveis no laboratório, para verificar se as pastilhas da fresadora estavam em bom estado, pois se estivessem demasiado gastas poderiam interferir nos resultados. Testou-se, também, o atomizador MQL, localização e focagem da câmara termográfica. Como o laboratório tinha mais pessoas a circular decidiu-se isolar com cartão a zona de corte da fresadora, para que as temperaturas corporais das pessoas a passarem nas imediações não interferisse no valor da temperatura medida. Durante os ensaios com as águas ruças utilizou-se ainda mais cartão na base da fresadora para absorverem este fluido (figura 21) e evitar que ele se misturasse com fluido de corte tradicionalmente usado na fresadora.



Figura 21 Zona de corte isolada.

Deu-se início ao trabalho prático, sendo que a maquinagem de cada bloco foi feita em duas passagens (da esquerda para a direita e vice-versa). Iniciou-se com os 9 ensaios sem lubrificação, depois realizaram-se 9 testes com óleo de corte Balis MAFCOOL 51 com caudal de 50 ml/h e 100 ml/h. Por fim, realizaram-se os ensaios com águas ruças com caudal de 50 ml/h e mais 9 ensaios com águas ruças com caudal de 100 ml/h, totalizando, assim, 45 ensaios.

Em cada ensaio foi gravado um vídeo com a câmara termográfica e, após a sua finalização, foram efetuadas 5 medições de rugosidade no bloco (figura 22). Foi medida a rugosidade nos 4 cantos e no centro do bloco (ver figura 23).



Figura 22 Medição da rugosidade em cada passagem.

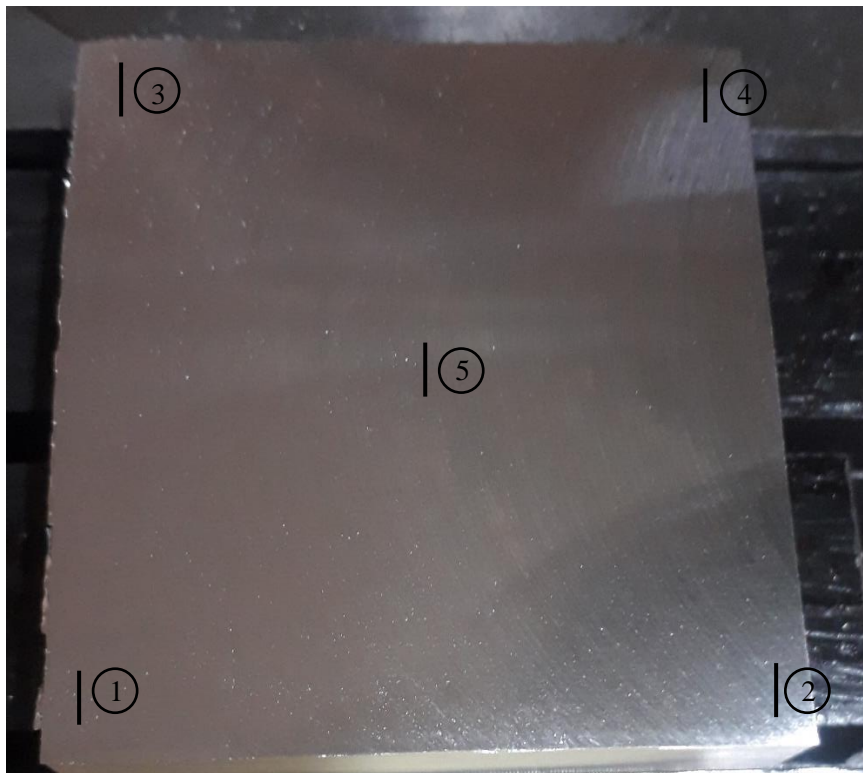


Figura 23 Representação das regiões de medição da rugosidade.

No final de cada dia de trabalho, foram analisados os vídeos no *software ResearchIR Max*, tendo sido mantido o mesmo critério e, tentando ser o mais rigoroso possível, analisou-se a temperatura de formação das aparas. Analisando, *frame a frame*, os vídeos, num instante em que a aresta de corte penetrava na peça e, no *frame* seguinte, foi observada a formação, tendo sido nesse instante que o valor de temperatura foi considerado para este estudo. De seguida, foi desenhada uma caixa na zona de análise pretendida, para se obter apenas a temperatura máxima da apara) nesta zona (figura 24). Foram retirados 20 valores de temperatura e foi efetuada a média de todos esses valores.

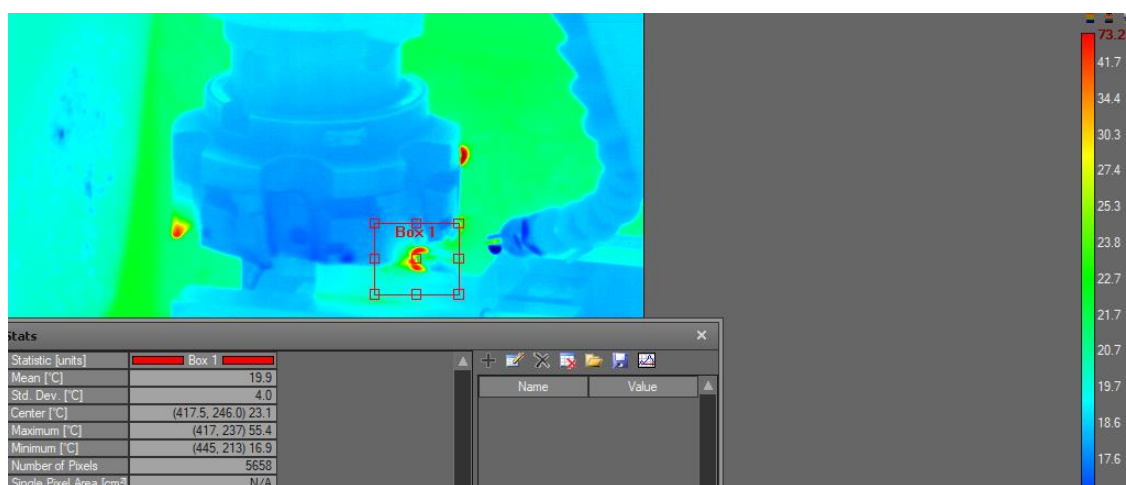


Figura 24 Análise de temperaturas software ResearchIR Max.

Numa segunda fase dos ensaios laboratoriais, procedeu-se à utilização do tribómetro no Laboratório de Órgãos de Máquinas e Tribologia, do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Minho - Campus de Azúrem.

Durante estes ensaios, foram seguidos vários procedimentos e foi necessário calcular o número de rotações por minuto que o disco iria fazer, tendo em conta o raio de contacto com a esfera e a velocidade linear. Inicialmente, foi realizado um ensaio com uma velocidade linear de 0.5 m/s, no entanto, verificou-se que o fluido não ficava na zona central do disco devido à força centrífuga que o “empurrava” para fora do disco. Refez-se os ensaios com uma velocidade linear de 0,1 m/s.

Pela equação (4) e (5) foi possível obter o número de rotações por minuto, para cada raio do disco.

$$v = \frac{\omega}{R} \quad (4)$$

$$\omega = \frac{2 \times \pi \times n}{60} \quad (5)$$

Sendo:

- V a velocidade linear em m/s

- ω velocidade angular em rad/s

- R o raio médio da pista de desgaste no disco

- n o número de rotações por minuto

Foi, assim, possível construir a tabela 10 com os valores de rotações por minuto.

Tabela 10 Valores em rotações por minuto utilizados nos ensaios de tribologia.

Raio [mm]	Rotações por minuto	Tipo de lubrificante
15	63	Seco
17	56	Seco
24	39	Óleo de corte
26	36	Águas ruças
27	35	Águas ruças
28	34	Óleo de corte
30	31	Água destilada

Após o cálculo dos valores das rotações por minuto que iram ser atribuídas ao disco rotativo em cada ensaio, deu-se início ao procedimento experimental seguindo as etapas:

1. Montagem do disco na mesa porta discos (figura 25)
2. Limpeza do disco com álcool isopropílico
3. Lavagem da esfera de alumina com álcool e em ultrassons durante 5 minutos (figura 26)
4. Pesagem da esfera
5. Definição do raio da pista de desgaste no disco
6. Montagem da esfera no porta esferas (figura 27)
7. Colocação da carga



Figura 25 Montagem do disco.



Figura 26 Lavagem da esfera.



Figura 27 Montagem dos componentes.

Após este procedimento deu-se início aos testes (figura 28), tendo estes uma duração de 2 horas.

Foi efetuada uma pesagem da esfera, no início e fim de cada ensaio. A pesagem final da esfera corresponde à pesagem inicial da esfera para o ensaio seguinte.

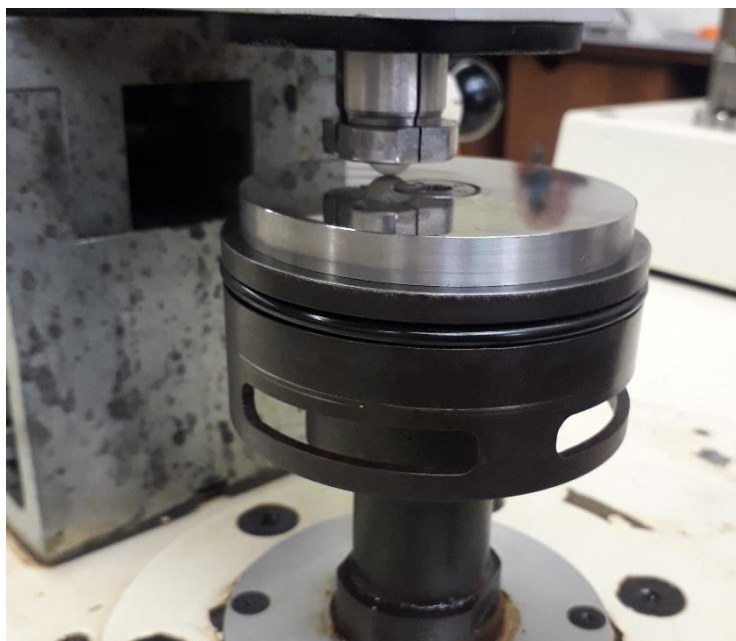


Figura 28 Ensaio tribológico a seco.

Quando se procedeu aos ensaios com lubrificantes foi necessário utilizar um reservatório para esse lubrificante (figura 29).



Figura 29 Reservatório para lubrificante.

Todos os procedimentos nos testes com lubrificante foram os mesmos, no entanto, acrescentou-se o reservatório e o lubrificante à mesa porta discos (figura 30).



Figura 30 Exemplo de ensaio tribológico com lubrificante.

4. Resultados Obtidos

No decorrer deste capítulo serão apresentados os resultados obtidos durante as duas fases de ensaios. Inicialmente, serão abordados os resultados obtidos nos testes de maquinagem, ou seja, serão apresentados os valores da taxa de produção obtidos, de rugosidades e temperaturas. Numa última fase, serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios tribológicos, isto é, os valores de atrito e desgaste.

4.1 Resultados Obtidos na Maquinagem

Nos processos de maquinagem o tempo utilizado durante a maquinagem é bastante importante uma vez que, devido à grande competitividade da indústria, deve-se reduzir ao mínimo o tempo de fabrico e, por isso, primeiro calculou-se a taxa de produção utilizando a equação (3) do segundo capítulo em função dos parâmetros de corte utilizados (tabela 11).

Tabela 11 Valores de taxa de produção obtida com a matriz ortogonal de Taguchi.

Número de ensaio	Velocidade de rotação (rpm)	Velocidade de avanço (mm/min)	Penetração (mm)	Taxa de produção cm ³ /min
1	195	20	0,3	0,39
2	195	63	0,6	2,457
3	195	185	1	12,025
4	285	20	0,6	0,78
5	285	63	1	4,095
6	285	185	0,3	3,6075
7	500	20	1	1,3
8	500	63	0,3	1,2285
9	500	185	0,6	7,215

Da tabela 11, é possível afirmar que o terceiro ensaio foi o que obteve uma taxa de produção mais elevada (12,025 cm³/min) e, pelo contrário, o ensaio número um obteve uma taxa de produção mais baixa (0,39 cm³/min). Estas taxas de produção não variam consoante o lubrificante, apenas variam consoante os parâmetros de corte e resumem-se à quantidade de material removido durante um período de tempo.

De seguida, serão apresentados os valores de rugosidade média, rugosidade máxima e temperatura média obtidas em cada grupo de ensaios com diferentes condições de lubrificação. É necessário ter em conta que foi usada a mesma matriz de Taguchi com a mesma variação de parâmetros para cada grupo de teste fazendo variar apenas o fluido lubrificante e o caudal do mesmo.

Os primeiros ensaios experimentais foram efetuados na condição da maquinagem a seco. Com base nesses ensaios, mediu-se a rugosidades e a temperatura na formação da apara, os resultados encontram-se apresentados na tabela 12.

Tabela 12 Valores de rugosidades e temperaturas obtidos nos ensaios a seco.

Ensaio	Medição 1		Medição 2		Medição 3		Medição 4		Medição 5		Média		Temp. Média °C
	Ry μm	Ra μm	Ry μm	Ra μm	Ry μm	Ra μm	Ry μm	Ra μm	Ry μm	Ra μm	Ry μm	Ra μm	
L1	1,49	0,26	5,66	1,03	4,41	0,77	4,33	0,89	6,42	1,17	4,46	0,82	67,81
L2	2,17	0,48	16,28	3,89	15,89	4,33	12,28	2,48	13,54	3,07	12,03	2,85	94,48
L3	8,30	1,71	22,96	6,05	23,91	5,14	15,4	3,62	14,66	3,16	17,04	3,93	105,70
L4	1,74	0,34	4,79	0,84	4,18	0,85	3,97	0,79	3,84	0,69	3,70	0,70	101,62
L5	4,59	0,84	9,68	2,01	9,46	2,12	9,31	2,02	9,53	1,98	8,51	1,79	119,69
L6	2,91	0,61	22,19	4,99	24,88	5,18	13,84	3,84	10,49	2,28	14,86	3,38	80,71
L7	2,59	0,52	3,91	0,69	4,06	0,73	2,47	0,55	3,24	0,64	3,25	0,62	121,50
L8	1,84	0,33	5,91	1,12	6,22	1,13	6,20	1,03	5,94	1,05	5,22	0,93	104,68
L9	3,10	0,56	18,69	4,92	20,35	4,90	15,77	3,98	13,34	3,01	14,20	3,47	115,41

Observando a tabela 12, para o conjunto de ensaios sem lubrificação, verifica-se que foi no sétimo ensaio que se obtiveram menores valores de rugosidade média (0,62 μm). Por outro lado, no terceiro ensaio foi onde se obteve um maior valor de rugosidade média (3,93 μm). A nível de rugosidade máxima, o seu maior valor ocorreu, também, no terceiro ensaio (17,04 μm) e o menor valor foi obtido, também, no sétimo ensaio da matriz (3,25 μm).

Observando as temperaturas, verifica-se que a temperatura mínima, sem lubrificação, foi obtida no primeiro ensaio (67,81° C), em contrapartida, a temperatura máxima foi obtida no sétimo ensaio (121,5°C), ensaio este que obteve menores valores de rugosidades.

Os ensaios que se seguiram foram com a lubrificação por óleo de corte convencional balis MAFCOOL 51, com um caudal de 50 ml/h em que os valores das medições das rugosidades e temperaturas estão apresentadas na tabela 13.

Tabela 13 Valores de rugosidade e temperatura obtidos nos ensaios com óleo de corte convencional com caudal de 50 ml/h.

Ensaio	Medição 1		Medição 2		Medição 3		Medição 4		Medição 5		Média		Temp. Média °C
	Ry μm	Ra μm	Ry μm	Ra μm	Ry μm	Ra μm	Ry μm	Ra μm	Ry μm	Ra μm	Ry μm	Ra μm	
II.1	1,16	0,24	5,23	0,92	5,42	0,99	3,68	0,82	4,38	0,87	3,97	0,76	59,84
II.2	4,75	0,74	12,85	3,09	14,88	3,98	14,27	3,29	13,49	2,81	12,04	2,78	82,34
II.3	2,51	0,48	22,95	5,14	29,32	6,60	12,81	3,00	9,90	2,14	15,49	3,47	101,38
II.4	0,93	0,19	4,55	0,82	5,22	0,83	4,18	0,75	3,65	0,64	3,70	0,64	88,09
II.5	1,76	0,29	9,60	1,98	10,10	2,16	10,68	2,4	8,27	1,67	8,08	1,70	112,52
II.6	3,00	0,58	20,05	4,46	19,82	4,72	12,37	3,2	11,4	2,36	13,3	3,06	68,94
II.7	1,22	0,23	5,71	0,89	3,59	0,69	4,15	0,6	3,39	0,60	3,61	0,60	115,54
II.8	1,64	0,32	5,43	1,01	5,61	1,12	4,54	0,91	4,20	0,86	4,28	0,84	90,91
II.9	1,90	0,43	19,20	4,94	12,23	3,08	16,42	3,63	14,25	3,09	12,80	3,03	103,43

Com base na tabela 13, analisando os valores da rugosidade média, verifica-se, mais uma vez, que o menor valor foi obtido no ensaio 7 com (0,60 μm). À semelhança da maquinagem a seco, o maior valor da rugosidade média encontra-se, também, no terceiro ensaio (3,47 μm). O maior valor da rugosidade máxima encontra-se no terceiro ensaio (15,49 μm) enquanto o menor valor mantém-se no sétimo teste (3,61 μm).

Analisando as temperaturas na mesma tabela (13), é possível afirmar que a menor temperatura foi obtida no primeiro ensaio (59,84°C), enquanto a maior temperatura foi obtida quando a rugosidade foi menor, ou seja, no sétimo ensaio, 115,54°C.

No grupo seguinte de ensaios foi aumentado o caudal do fluido para 100 ml/h, mantendo o mesmo fluido de corte (Balis MAFCOOL 51). Os valores das medições das rugosidades e temperaturas, apresentam-se na tabela 14.

Tabela 14 Valores de rugosidade e temperatura obtidos nos ensaios com óleo de corte convencional com caudal de 100 ml/h.

Ensaio	Medição 1		Medição 2		Medição 3		Medição 4		Medição 5		Média		Temp. Média °C
	Ry μm	Ra μm	Ry μm	Ra μm	Ry μm	Ra μm	Ry μm	Ra μm	Ry μm	Ra μm	Ry μm	Ra μm	
III.1	1,1	0,23	5,07	0,87	4,33	0,81	4,63	0,86	4,68	0,86	3,96	0,72	45,19
III.2	2,27	0,42	12,53	3,40	15,13	3,47	15,77	3,52	13,65	2,96	11,87	2,75	77,86
III.3	1,73	0,35	22,74	4,80	26,14	6,86	12,86	2,90	11,36	2,34	14,96	3,45	98,61
III.4	1,04	0,20	3,87	0,71	4,50	0,77	3,72	0,69	3,53	0,68	3,332	0,61	78,20
III.5	0,56	0,11	8,58	1,85	11,09	2,24	10,50	2,20	9,52	2,11	8,05	1,70	100,16
III.6	1,37	0,30	22,16	4,43	21,79	4,43	12,86	3,13	10,73	2,54	13,78	2,96	65,03
III.7	0,91	0,15	5,20	0,80	2,47	0,42	3,62	0,59	3,66	0,63	3,17	0,51	101,7
III.8	1,82	0,35	5,25	1,02	5,34	0,99	5,26	0,92	4,39	0,88	4,41	0,83	86,44
III.9	2,85	0,71	16,21	4,12	17,96	4,23	18,04	3,73	14,50	3,20	13,91	3,19	93,85

Analisando a tabela 14, à semelhança dos resultados anteriores, verificam-se os mesmos comportamentos. A menor rugosidade média encontra-se no sétimo ensaio (0,51 μm) e a maior rugosidade média encontra-se no terceiro teste (3,45 μm). É possível afirmar, também, que a maior rugosidade máxima se encontra no terceiro ensaio (14,96 μm) e, por outro lado, a menor no sétimo ensaio (3,17 μm). Observando as temperaturas, verifica-se o mesmo comportamento, para uma menor rugosidade, no sétimo ensaio, encontra-se a temperatura mais elevada (101,7°C) e no primeiro ensaio encontra-se a menor temperatura (45,19°C).

Nos ensaios posteriores foi alterado o fluido para as águas ruças. No primeiro grupo de testes, foi maquinado o bloco da liga de alumínio, utilizando um caudal de 50 ml/h de águas ruças como lubrificante. Os valores da medição da rugosidade e temperatura obtidos neste grupo, encontram-se apresentados na tabela 15.

Tabela 15 Valores de rugosidade e temperatura obtidos nos ensaios com águas ruças com caudal de 50 ml/h.

Ensaio	Medição 1		Medição 2		Medição 3		Medição 4		Medição 5		Média		Temp. Média °C
	Ry μm	Ra μm	Ry μm	Ra μm	Ry μm	Ra μm	Ry μm	Ra μm	Ry μm	Ra μm	Ry μm	Ra μm	
IV.1	1,56	0,29	5,76	1,03	5,36	0,85	5,34	0,92	4,48	0,88	4,5	0,79	58,00
IV.2	2,42	0,48	16,43	3,84	20,10	4,48	15,32	3,19	15,54	3,25	13,96	3,04	82,46
IV.3	2,98	0,57	28,10	6,56	29,78	6,41	11,63	2,47	12,54	2,57	17,00	3,71	97,54
IV.4	1,39	0,26	5,58	1,04	4,82	0,73	3,63	0,63	3,67	0,68	3,818	0,66	91,47
IV.5	2,31	0,49	10,54	2,10	9,75	2,08	11,45	2,40	10,56	2,30	8,922	1,87	112,15
IV.6	4,23	0,94	21,09	4,44	20,38	4,75	14,65	3,59	12,64	2,34	14,59	3,21	66,70
IV.7	1,05	0,24	5,41	0,92	3,80	0,67	3,90	0,76	3,86	0,64	3,60	0,64	106,30
IV.8	1,93	0,31	5,34	1,03	5,99	1,08	4,91	0,93	4,55	0,94	4,54	0,85	101,03
IV.9	2,17	0,48	17,80	4,52	19,77	5,19	17,19	3,97	16,03	3,80	14,59	3,59	104,39

Com a aplicação das águas ruças e observando a tabela 15, verificou-se, mais uma vez, para este grupo o mesmo comportamento a nível de rugosidade. A menor rugosidade média encontra-se no sétimo ensaio, desta vez, com 0,64 μm e a maior rugosidade média encontra-se no terceiro teste (3,71 μm). A maior rugosidade máxima encontra-se, também, no terceiro teste (17,00 μm) e a menor rugosidade máxima foi obtida também no sétimo ensaio (3,60 μm).

Neste grupo de testes surge uma diferença a nível de temperaturas, quando se observa a tabela 15, a menor temperatura manteve-se no primeiro ensaio (58,00°C), e, por outro lado, a maior temperatura foi obtida no quinto ensaio (112,15°C).

Para finalizar, os ensaios de maquinagem no último grupo de testes manteve-se o fluido (águas ruças), mas aumentou-se o caudal para 100 ml/h. Os valores das medições das rugosidades e temperaturas estão apresentadas na tabela 16.

Tabela 16 Valores de rugosidade e temperatura obtidos nos ensaios com águas ruças com caudal de 100 ml/h.

Ensaio	Medição 1		Medição 2		Medição 3		Medição 4		Medição 5		Média		Temp. média °C
	Ry μm	Ra μm	Ry μm	Ra μm	Ry μm	Ra μm	Ry μm	Ra μm	Ry μm	Ra μm	Ry μm	Ra μm	
V.1	1,82	0,36	4,24	0,81	4,01	0,78	4,77	0,95	5,14	1,03	3,99	0,78	52,71
V.2	2,02	0,36	8,36	2,95	6,63	1,82	17,40	3,75	19,25	4,46	10,73	2,66	77,68
V.3	3,12	0,54	21,88	4,74	28,68	6,89	18,92	3,76	12,31	2,83	16,98	3,75	93,15
V.4	3,14	0,69	3,39	0,67	3,81	0,65	3,59	0,66	3,55	0,65	3,49	0,66	78,32
V.5	1,06	0,20	9,90	2,02	9,65	2,04	10,89	2,37	12,34	2,47	8,76	1,82	100,94
V.6	1,54	0,32	20,95	4,50	20,65	5,03	13,21	3,27	12,24	3,11	13,71	3,24	60,86
V.7	1,15	0,20	4,70	0,87	4,67	0,81	3,18	0,62	3,33	0,67	3,40	0,63	101,05
V.8	1,87	0,33	4,62	0,91	5,48	1,06	4,70	0,95	4,72	0,92	4,27	0,83	92,31
V.9	1,51	0,34	19,21	4,78	18,57	4,63	18,77	4,27	17,28	3,80	15,06	3,56	101,15

Observando a tabela 16, verifica-se que, com o aumento do caudal de águas ruças para 100 ml/h, o comportamento da rugosidade manteve-se igual aos outros grupos de ensaios, com o

terceiro ensaio a obter o maior valor de rugosidade máxima e rugosidade média (16,98 μm e 3,75 μm , respetivamente). Por outro lado, o sétimo ensaio manteve-se com o menor valor de rugosidade máxima e rugosidade média (3,40 μm e 0,63 μm).

Ainda, observando a tabela 16, é possível verificar que a temperatura mínima continua no primeiro teste, no entanto, a temperatura máxima encontra-se no ensaio número nove, com um valor de 101,15°C. É de fazer reparo que os ensaios cinco, sete, e nove obtiveram valores muito próximos de temperaturas 100,94°C, 101,05°C, e 101,15°C, respetivamente.

4.2 Resultados Obtidos no Estudo Tribológico

A execução dos ensaios tribológicos foi efetuada durante 7200 segundos, onde, foram gerados cerca de 2610 valores de coeficiente de atrito e, por isso, os valores são apresentados graficamente e são todos relativos ao par tribológico alumina/aço inoxidável 316L para as distintas condições de lubrificação consideradas. Foram validados seis ensaios, o primeiro, sem lubrificação, o segundo e terceiro com óleo de corte Balis Mafcool 51, o quarto e o quinto com águas ruças, e o sexto com água destilada.

Os valores de atrito obtidos para o primeiro ensaio apresentam-se na figura 31.

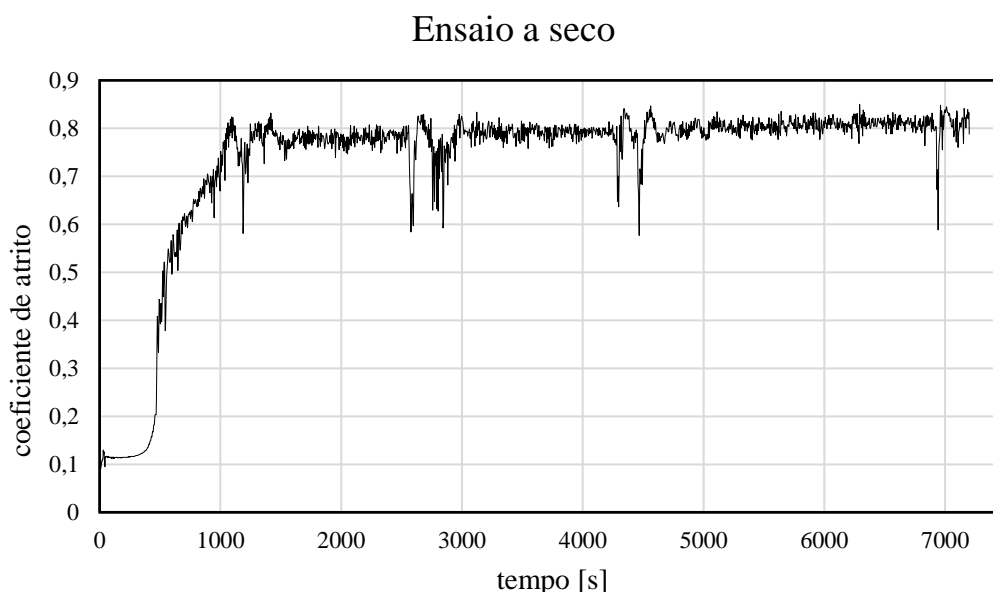


Figura 31 Evolução do coeficiente de atrito durante o deslizamento a seco.

Observando a figura 31, verificam-se, inicialmente, fenómenos de rodagem nos primeiros 1000 segundos. Após a rodagem, considera-se um regime estacionário, no qual, se verificam valores de coeficiente de atrito próximos de 0,80. Estes resultados serão, posteriormente, analisados com maior profundidade.

Na figura 32 encontram-se apresentados os valores obtidos para o coeficiente de atrito no segundo ensaio.

1º Ensaio com Balis Mafcool 51

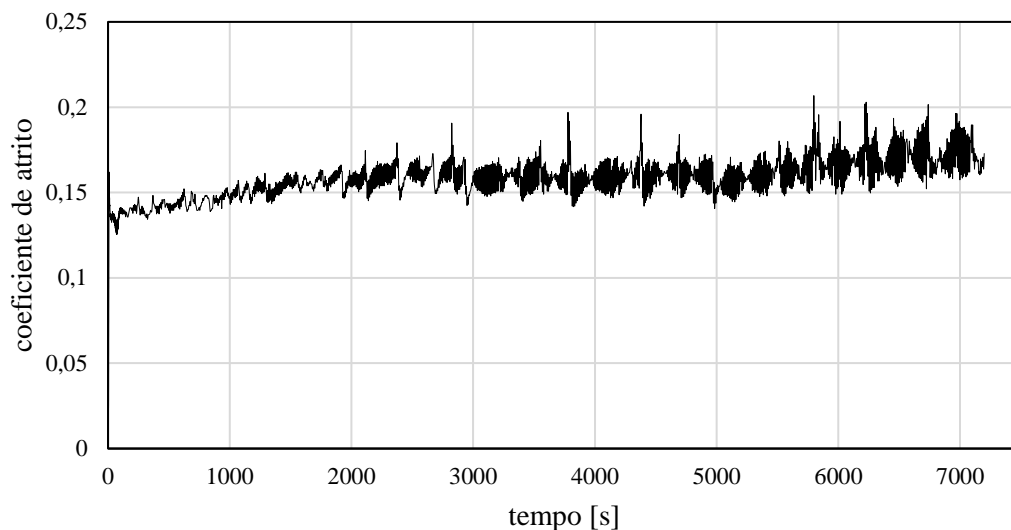


Figura 32 Evolução do coeficiente de atrito durante o deslizamento com Balis Mafcool 51 – 1º ensaio.

Analisando a figura 32, observa-se que os fenômenos de rodagem neste caso não são tão perceptíveis. Verificou-se ainda que os valores de coeficientes de atrito encontram-se sobretudo entre os 0,15 e 0,20.

Os valores do terceiro ensaio apresentam-se na figura 33. Este ensaio consistiu na repetição do ensaio número dois, com o mesmo fluido e nas mesmas condições.

2º Ensaio com Balis Mafcool 51

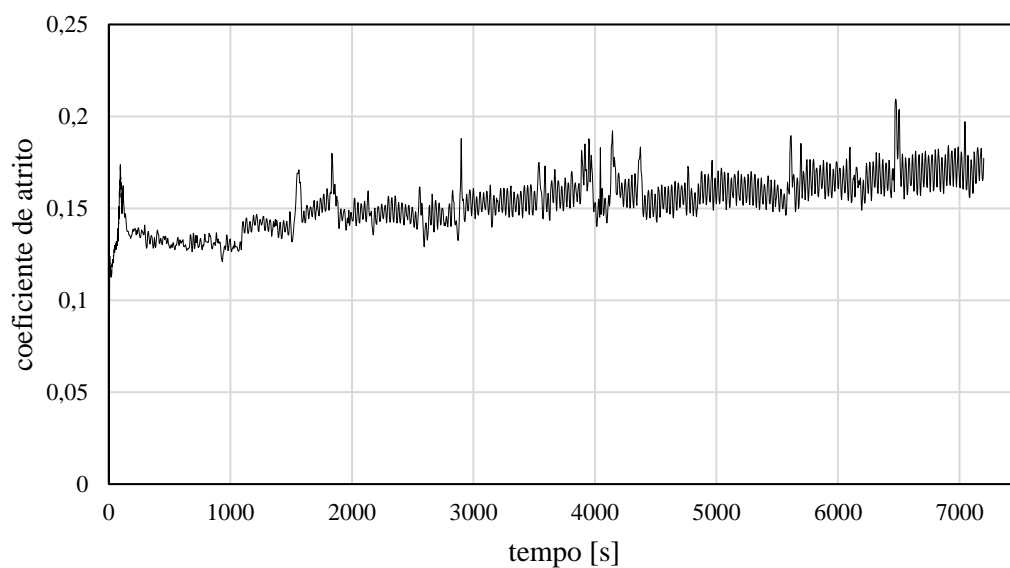


Figura 33 Evolução do coeficiente de atrito durante o deslizamento com Balis Mafcool 51 – 2º ensaio.

Observando a figura 33 verifica-se uma pequena oscilação no início do ensaio. Contudo, após estabilizar no regime estacionário, verifica-se comportamento parecido com o primeiro ensaio utilizando este fluido.

Na figura 34 estão apresentados os valores relativamente ao quarto ensaio, que foi efetuado com águas ruças.

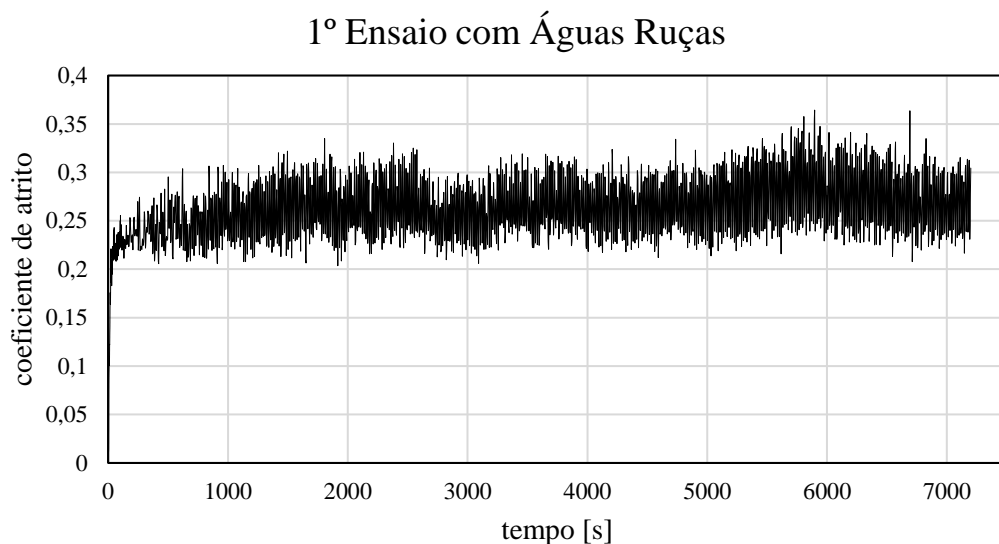


Figura 34 Evolução do coeficiente de atrito durante o deslizamento com águas ruças – 1º ensaio.

Analisando a figura 34, verifica-se um regime estacionário em quase todo o período do ensaio. Verifica-se, também, uma grande amplitude do coeficiente de atrito, entre 0,20 e 0,35.

No quinto ensaio, procedeu-se à repetição do quarto ensaio, com o mesmo fluido e as mesmas condições. Esses valores estão apresentados na figura 35.

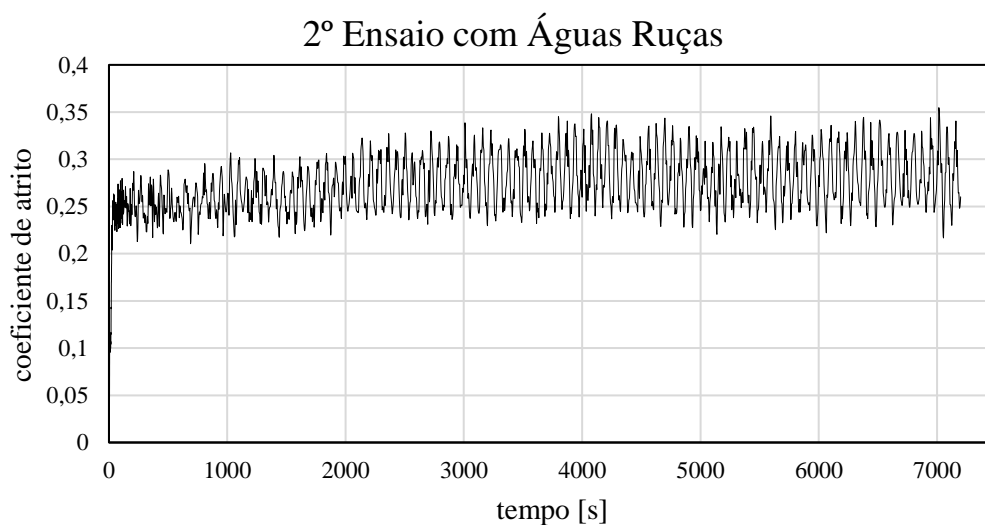


Figura 35 Evolução do coeficiente de atrito durante o deslizamento com águas ruças – 2º ensaio.

Observando a figura 35 verifica-se o mesmo comportamento do gráfico anterior. A rodagem não é perceptível, obtendo-se um regime estacionário em quase todo o seu período. É possível observar, também, que o coeficiente de atrito tem uma amplitude elevada, aproximadamente, entre 0,20 e 0,35.

Por fim, foi realizado um último ensaio com água destilada. Os valores obtidos encontram-se representados graficamente na figura 36.

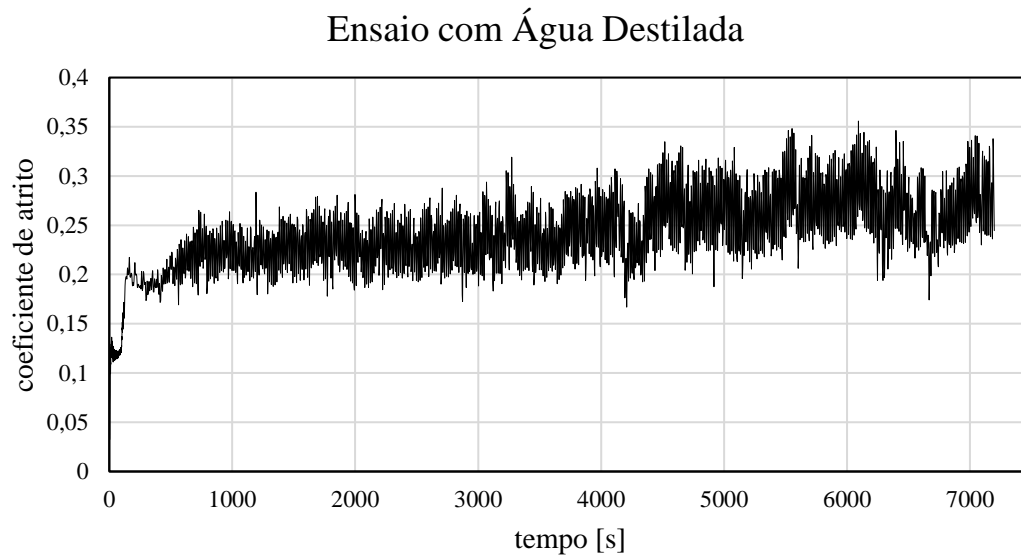


Figura 36 Evolução do coeficiente de atrito durante o deslizamento com água destilada.

Na figura 36, é possível observar fenómenos de rodagem até, sensivelmente, aos 800 segundos. No regime estacionário, verifica-se, também, uma grande amplitude de coeficiente de atrito ente, aproximadamente, 0,17 e 0,35, sendo que, com o decorrer do tempo, o coeficiente de atrito médio tende a aumentar.

5. Análise e Discussão de Resultados

No decorrer deste capítulo serão analisados e discutidos os resultados já apresentados no capítulo 4. Serão analisados os resultados obtidos durante a maquinagem, mais concretamente, a análise das razões sinal/ruído dos fatores em estudo, taxa de produção, rugosidade superficial e temperatura. Serão analisados e otimizados os parâmetros de corte de cada grupo de ensaios. Posteriormente, serão analisados os resultados relativos aos ensaios de tribologia. Finalmente, será efetuada a comparação final que visa verificar se as águas ruças têm potencial para serem utilizadas como lubrificante de corte.

5.1 Análise e Discussão dos Resultados da Maquinagem – Método de Taguchi

A análise dos resultados da maquinagem inicia-se pela análise das razões Sinal/Ruído. Como referido anteriormente, existem três tipos padrão de relações, dependendo da resposta de desempenho desejada, “nominal é o melhor”, “maior é o melhor” e “menor é o melhor”. No caso da maquinagem, pretende-se sempre maximizar a taxa de produção e minimizar a rugosidade superficial e as temperaturas de corte, por isso, serão utilizadas “maior é o melhor” e “menor é o melhor”, respetivamente.

5.1.1 Razão Sinal/Ruído Taxa de Produção

Durante os processos de maquinagem, pretende-se sempre, remover a máxima quantidade de material no menor tempo possível, por isso, a taxa de produção deve ser maximizada. A categoria S/N será, então, “maior é o melhor”, deste modo, utilizando os valores da tabela 11 (capítulo 4) e aplicando a equação (5) (capítulo 2) é possível construir a tabela 17 que apresenta os valores de razão sinal/ruído para a taxa de produção.

A matriz ortogonal de Taguchi utilizada para os ensaios foi sempre a mesma. Uma vez que a taxa de produção e a respetiva razão sinal/ruído variam apenas com os parâmetros de corte, estas foram calculadas apenas uma vez. Assim, tem-se uma razão sinal/ruído geral, que corresponde aos 5 grupos de ensaios.

Segue-se o exemplo de cálculo de S/N para o primeiro ensaio:

$$\frac{S}{N_L} = -10 \times \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right)$$

$$\frac{S}{N_L} = -10 \times \log \left(\frac{1}{1} \times \frac{1}{0,39^2} \right) = -8,17$$

Tabela 17 Valor da razão S/N para a taxa de produção.

Número de ensaio	Velocidade de rotação (rpm)	Velocidade de avanço (mm/min)	Penetração (mm)	Taxa de produção (cm ³ /min)	S/N (dB)
1	195	20	0,3	0,39	-8,17
2	195	63	0,6	2,45	7,80
3	195	185	1	12,02	21,60
4	285	20	0,6	0,78	-2,15
5	285	63	1	4,09	12,24
6	285	185	0,3	3,60	11,14
7	500	20	1	1,30	2,27
8	500	63	0,3	1,22	1,78
9	500	185	0,6	7,21	17,16

Analisando a tabela 17, é possível afirmar que o ensaio número 3 foi o que obteve maior valor para o sinal/ruído da taxa de produção (21,60 dB), o que é confirmado por, neste mesmo ensaio, se ter obtido o maior valor de taxa de produção 12,02 cm³/min. Em contrapartida, o primeiro ensaio obteve menor valor de S/N, o que, também, é confirmado por se ter encontrado neste teste o menor valor de taxa de produção, -8,17 dB e 0,39 cm³/min, respectivamente.

É possível, neste momento, calcular a razão S/N para cada parâmetro relativamente à taxa de produção. Por exemplo, para a velocidade de rotação (n) de 195 rpm

$$\frac{S}{N} = \frac{-8,17 + 7,80 + 21,60}{3} = 7,07$$

Tabela 18 Resultados S/N para cada parâmetro para a taxa de produção.

PARÂMETRO		S/N (DB)
A1	$n = 195$ rpm	7,07
A2	$n = 285$ rpm	7,07
A3	$n = 500$ rpm	7,07
B1	$V_f = 20$ mm/min	-2,68
B2	$V_f = 63$ mm/min	7,28
B3	$V_f = 185$ mm/min	16,6
C1	$a_p = 0,3$ mm	1,58
C2	$a_p = 0,6$ mm	7,60
C3	$a_p = 1$ mm	12,04

Na tabela 18 estão apresentados os valores de sinal/ruído para cada parâmetro de corte, em função da taxa de produção. Para melhor percepção da influência destes parâmetros encontram-se apresentados sob a forma gráfica na figura 37.

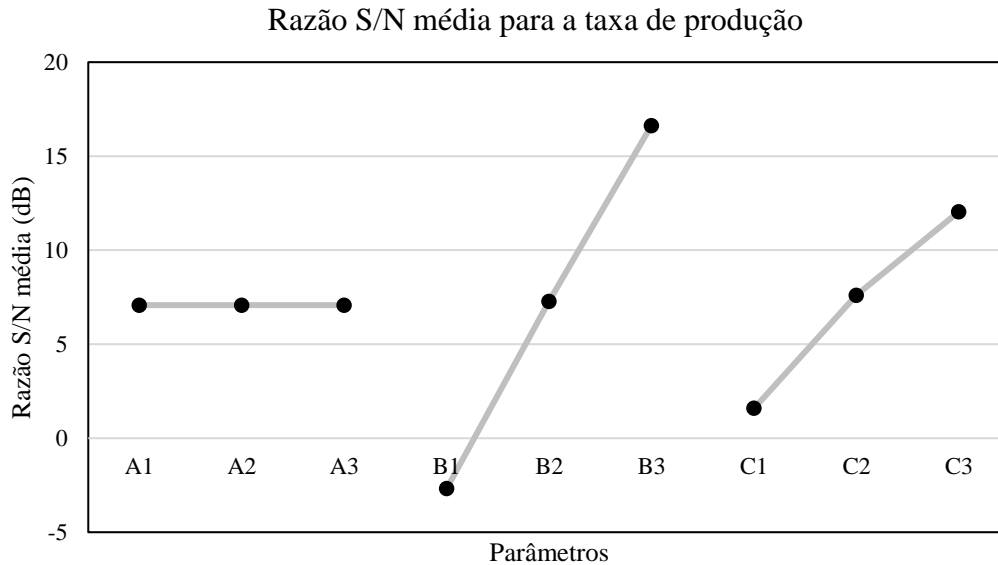


Figura 37 Razão S/N média em relação à taxa de produção para cada parâmetro de corte.

Tendo por base a tabela 18 e a figura 37 verifica-se que a velocidade de rotação tem sempre a mesma influência na taxa de produção. Com o aumento da velocidade de avanço (V_f) e da penetração (a_p), verifica-se um aumento da taxa de produção, pois remove-se mais material por unidade de tempo. Em suma, é possível afirmar que, entre os parâmetros escolhidos, para se obter uma maior taxa de produção devem ser escolhidos como parâmetros de corte a combinação B3C3 (com qualquer rotação), o que corresponde à velocidade de avanço (V_f) de 185 mm/min e uma penetração (a_p) de 1 mm, combinação esta que se encontra já testada.

5.1.2 Razão Sinal/Ruído Rugosidade Superficial e Temperatura

A rugosidade superficial e a temperatura de maquinagem interferem diretamente na qualidade final da peça maquinada. Foi estudada a influência dos parâmetros, sempre com o objetivo de diminuir a rugosidade superficial e a temperatura de corte. Apesar de ter sido efetuada a medição da rugosidade máxima e média, como esta última é a mais utilizada a nível industrial, optou-se por analisar apenas esta última durante a presente secção e as que se seguem. A categoria S/N será assim “menor é o melhor”, utilizando os valores das tabelas 12, 13, 14, 15 e 16 (capítulo 4) e aplicando a equação (6) (capítulo 2) foi possível calcular os valores de sinal/ruído para os valores de rugosidade superficiais e temperatura em cada grupo de ensaios.

Uma vez que se pressupõe que rugosidade superficial e as temperaturas de corte variam consoante o tipo de lubrificação aplicada, estas análises serão efetuadas para cada grupo de ensaios, com o intuito de verificar se os parâmetros de corte para cada grupo de lubrificação se manterão os mesmos, para minimizar a rugosidade superficial e a temperatura de corte.

5.1.2.1 Testes a Seco

No capítulo 4, na tabela 12 foram apresentados os valores de rugosidade média e de temperatura média para o grupo de ensaios a seco utilizando a categoria S/N “menor é o melhor” e com ajuda da equação 6 calcularam-se os valores de sinal/ruído para cada uma destas propriedades.

Com a expressão seguinte, exemplifica-se como foi calculada a razão S/N para a rugosidade média no ensaio I.1. Para temperatura média utilizou-se o mesmo método, mas com 20 valores de temperaturas obtidas.

$$\frac{S}{N_s} = -10 \times \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right)$$

$$\frac{S}{N_s} = -10 \times \log \left(\frac{1}{5} \times (0,26^2 + 1,03^2 + 0,77^2 + 0,89^2 + 1,17^2) \right) = 1,09 \text{ dB}$$

Tabela 19 Valor da razão S/N para a rugosidade superficial e temperatura das aparas no ensaio a seco.

Número de ensaio	n	V_f	a_p	Rugosidade média μm	S/N Rugosidade média (dB)	Temperatura média °C	S/N Temperatura média (dB)
I.1	195	20	0,3	0,82	1,09	67,81	-36,79
I.2	195	63	0,6	2,85	-9,97	94,48	-39,77
I.3	195	185	1	3,93	-12,50	105,70	-40,83
I.4	285	20	0,6	0,70	2,76	101,62	-40,32
I.5	285	63	1	1,79	-5,37	119,69	-41,82
I.6	285	185	0,3	3,38	-11,58	80,71	-38,31
I.7	500	20	1	0,62	3,99	121,57	-42,04
I.8	500	63	0,3	0,93	0,17	104,68	-40,72
I.9	500	185	0,6	3,47	-11,66	115,41	-41,48

Observando a tabela 19 podem-se tirar várias conclusões: o maior valor de S/N para a rugosidade média é de 3,99 dB, que corresponde ao menor valor de rugosidade média no sétimo ensaio (I.7). Por outro lado, o menor valor de S/N para a mesma propriedade encontra-se no terceiro ensaio, quando a rugosidade média foi a maior (3,93 μm) obteve-se um valor de S/N de -12,50 dB.

Analisando as temperaturas e os valores de S/N, verifica-se que seguem o mesmo comportamento. Um maior valor de S/N de temperatura corresponde a uma temperatura menor, encontrada no primeiro ensaio (-36,79 dB e 67,81°C, respetivamente). Em contrapartida, o sétimo ensaio obteve maior temperatura, o que corresponde a um menor valor de S/N para esta propriedade (121,57°C e -42,04dB, respetivamente). É de notar, que à temperatura mais elevada

corresponde uma menor rugosidade, no entanto, à menor temperatura não corresponde a maior rugosidade.

É possível calcular a razão S/N, para cada parâmetro, relativamente à rugosidade superficial média e à temperatura. Por exemplo, para a velocidade de rotação (n) de 195 rpm, em relação à rugosidade aplica-se a seguinte equação:

$$\frac{S}{N} = \frac{(1,09) + (-9,97) + (-12,50)}{3} = -7,12$$

Para o mesmo parâmetro, em relação à temperatura média da formação das aparas

$$\frac{S}{N} = \frac{(-36,79) + (-39,77) + (-40,83)}{3} = -39,13$$

Tabela 20 Resultados S/N para cada parâmetro para a rugosidade média e temperatura média nos ensaios a seco.

PARÂMETRO		S/N (DB) RUGOSIDADE	S/N (DB) TEMPERATURA
A1	$n = 195$ rpm	-7,12	-39,13
A2	$n = 285$ rpm	-4,73	-40,15
A3	$n = 500$ rpm	-2,49	-41,41
B1	$V_f = 20$ mm/min	2,62	-39,72
B2	$V_f = 63$ mm/min	-5,05	-40,77
B3	$V_f = 185$ mm/min	-11,92	-40,21
C1	$a_p = 0,3$ mm	-3,43	-38,61
C2	$a_p = 0,6$ mm	-6,29	-40,52
C3	$a_p = 1$ mm	-4,62	-41,57

Na tabela 20 é possível observar os valores de razão sinal/ruído para cada parâmetro para a rugosidade média e para a temperatura média. Para melhor percepção destes valores foi elaborado um gráfico apresentado na figura 38.

Analisando a figura 38 e a tabela 20 verifica-se que, principalmente, com o aumento da rotação n ocorre o aumento da razão S/N para a rugosidade, e uma diminuição da razão S/N para a temperatura. Isto significa que, para se obter baixos valores de rugosidade devem ser usadas velocidades de rotação elevadas, no entanto, para baixas temperaturas de corte devem-se usar baixas rotações. Com aumento da velocidade de avanço V_f , verifica-se uma diminuição da razão S/N no caso da rugosidade, o que implica, que para baixas rugosidades deve-se usar a menor velocidade de avanço. No caso das temperaturas, com o aumento da penetração verifica-se

também uma diminuição da razão S/N da temperatura, o que sugere que para baixas temperaturas devem ser usadas baixas penetrações.

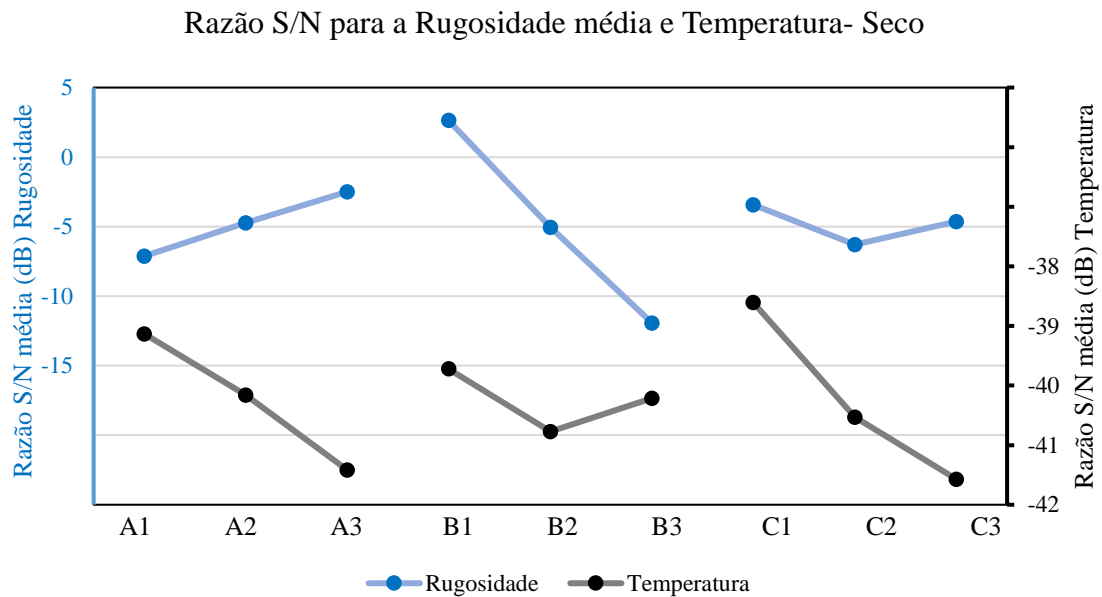


Figura 38 Valores de S/N para rugosidade e temperatura no ensaio a seco para cada parâmetro.

Como conclusão, verifica-se que para se obter uma baixa rugosidade superficial, a seco, os parâmetros ótimos são A3B1C1, ou seja, rotação de 500 rpm, velocidade de avanço de 20 mm/min e penetração de 0,3 mm. No caso dos parâmetros ótimos para uma baixa temperatura, estes devem ser A1B1C1, ou seja, rotação de 195 rpm, velocidade de avanço de 20 mm/min e penetração de 0,3 mm. No caso da combinação ótima para a rugosidade, como não estava presente na matriz de ensaios L9 de Taguchi, obriga a efetuar um ensaio de confirmação. Já a combinação ótima para a temperatura de corte, corresponde a uma das combinações, previamente definidas, na matriz L9 utilizada nos ensaios, pelo que, não há a necessidade de efetuar o ensaio experimental de confirmação.

5.1.2.2 Testes com Balis Mafcool 51 com Caudal 50 ml/h

O segundo grupo de testes foi realizado com o fluido convencional de corte Balis Mafcool 51, com um caudal de 50 ml/h. No capítulo 4, na tabela 13 foram apresentados os valores de rugosidade média e de temperatura média para este grupo de ensaios, utilizando a categoria S/N “menor é o melhor” e, com ajuda da equação 6, calcularam-se os valores da razão sinal/ruído para cada uma destas propriedades.

É possível verificar na tabela 21 o mesmo comportamento que se obteve no ensaio a seco. O maior valor para S/N para a rugosidade média é de 3,89 dB que corresponde ao menor valor de rugosidade média no sétimo ensaio. Por outro lado, o menor valor de S/N para a mesma

propriedade encontra-se no terceiro ensaio, quando a rugosidade média foi a maior (3,47 μm) obteve-se um valor de S/N de -12,24 dB.

Tabela 21 Valor da razão S/N para a rugosidade superficial e temperatura das aparas no ensaio com Balis Mafcool 51 (50 ml/h).

Número de ensaio	n	V_f	a_p	Rugosidade média μm	S/N Rugosidade média (dB)	Temperatura média $^{\circ}\text{C}$	S/N Temperatura média (dB)
II.1	195	20	0,3	0,76	1,78	59,84	-35,73
II.2	195	63	0,6	2,78	-9,50	82,34	-38,49
II.3	195	185	1	3,47	-12,24	101,38	-40,37
II.4	285	20	0,6	0,64	3,24	88,09	-39,05
II.5	285	63	1	1,7	-5,37	112,52	-41,21
II.6	285	185	0,3	3,06	-10,66	68,94	-36,95
II.7	500	20	1	0,60	3,89	115,54	-41,48
II.8	500	63	0,3	0,84	1,02	90,91	-39,46
II.9	500	185	0,6	3,03	-10,5	103,43	-40,51

Analisando as temperaturas e a razão S/N das temperaturas médias, verifica-se que seguem a mesma tendência. Um maior valor de S/N de temperatura corresponde a uma temperatura menor, encontrada no primeiro ensaio (-35,73 dB e 59,84 $^{\circ}\text{C}$, respetivamente).

Tabela 22 Resultados S/N para cada parâmetro para a rugosidade média e temperatura média nos ensaios com Balis Mafcool 51 (50 ml/h).

PARÂMETRO		S/N (DB) RUGOSIDADE	S/N (DB) TEMPERATURA
A1	$n = 195$ rpm	-6,65	-38,20
A2	$n = 285$ rpm	-4,26	-39,07
A3	$n = 500$ rpm	-1,87	-40,48
B1	$V_f = 20$ mm/min	2,97	-38,75
B2	$V_f = 63$ mm/min	-4,61	-39,72
B3	$V_f = 185$ mm/min	-11,15	-39,28
C1	$a_p = 0,3$ mm	-2,61	-37,38
C2	$a_p = 0,6$ mm	-5,60	-39,35
C3	$a_p = 1$ mm	-4,57	-41,02

Na tabela 22 estão apresentados os valores de razão sinal/ruído para cada parâmetro para a rugosidade média e para a temperatura média. Para melhor perceção destes valores foi elaborada uma representação gráfica apresentada na figura 39.

Razão S/N para a rugosidade média e temperatura - Balis Mafcool 51 (50 ml/h)

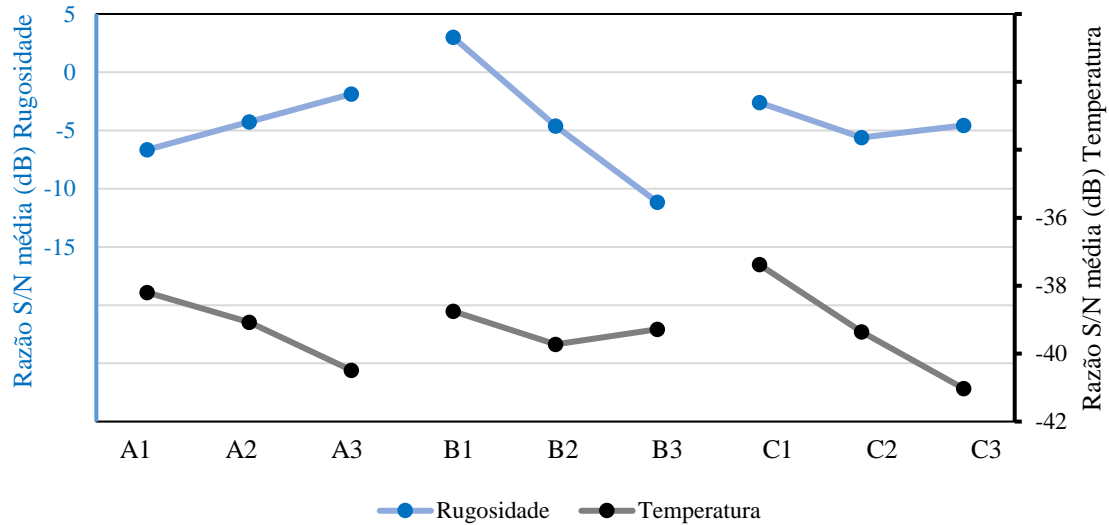


Figura 39 Valores de S/N para rugosidade e temperatura no ensaio com Balis Mafcool 51 (50 ml/h) para cada parâmetro.

Observando a figura 39 e a tabela 22, é possível afirmar que a razão sinal/ruído para a temperatura e para a rugosidade, com a aplicação de um fluido de corte convencional e com caudal de 50 ml/h, segue a mesma tendência dos ensaios realizados sem qualquer lubrificação. Verifica-se que o aumento da velocidade de rotação favorece um bom acabamento superficial (diminuição da rugosidade superficial) mas origina o aumento das temperaturas. O aumento da velocidade de avanço prejudica o acabamento superficial e o aumento da penetração prejudica a temperatura.

Para fazer uma escolha de uma combinação ótima para baixa rugosidade deve ser usada a combinação A3B1C1, ou seja, rotação de 500 rpm, velocidade de avanço de 20 mm/min e penetração de 0,3 mm. Para se obterem valores de temperatura de corte mais baixos, deve ser usada a combinação A1B1C1, ou seja, rotação de 195 rpm, velocidade de avanço de 20 mm/min e penetração de 0,3 mm. Estas combinações são iguais para o grupo de ensaios sem lubrificação representados na tabela 19.

5.1.2.3 Testes com Balis Mafcool 51 com Caudal 100 ml/h

Para o terceiro grupo de ensaios foi utilizado o mesmo fluido do grupo anterior, contudo, o caudal de lubrificação foi aumentado para 100 ml/h.

No capítulo 4, tabela 14 foram apresentados os valores da rugosidade média e da temperatura média obtida nestes ensaios. À semelhança dos grupos anteriores, com a equação (6) foi calculada a razão sinal/ruído para cada uma destes objetivos (tabela 23).

Tabela 23 Valor da razão S/N para a rugosidade superficial e temperatura das aparas no ensaio com Balis Mafcool 51 (100 ml/h).

Número de Ensaio	n	V_f	a_p	Rugosidade média μm	S/N Rugosidade média (dB)	Temperatura média $^{\circ}\text{C}$	S/N Temperatura média (dB)
III.1	195	20	0,3	0,72	2,29	45,19	-33,16
III.2	195	63	0,6	2,75	-9,53	77,86	-37,98
III.3	195	185	1	3,45	-12,25	98,61	-40,17
III.4	285	20	0,6	0,61	3,81	78,20	-38,25
III.5	285	63	1	1,70	-5,50	100,16	-40,44
III.6	285	185	0,3	2,96	-10,46	65,03	-36,57
III.7	500	20	1	0,51	4,99	101,7	-40,60
III.8	500	63	0,3	0,83	1,23	86,44	-39,12
III.9	500	185	0,6	3,19	-10,75	93,85	-39,82

Analisando a tabela 23, como já afirmado anteriormente (capítulo 4), foi no ensaio número 7 que se obteve o menor valor de rugosidade e, por isso, obteve-se o maior valor de sinal/ruído para este objetivo (0,51 μm e 4,99 dB, respetivamente). Ainda neste ensaio, foi verificado o valor de temperatura mais elevado, o que leva ao valor mais baixo do sinal/ruído para esta propriedade (101,7 $^{\circ}\text{C}$ e -40,60 dB, respetivamente).

O maior valor de rugosidade encontra-se no terceiro ensaio com 3,45 μm o que origina um menor valor de razão sinal/ruído (-12,25 dB). Em relação à menor temperatura, esta verificou-se no primeiro ensaio (45,19 $^{\circ}\text{C}$) o que leva ao maior valor de razão sinal/ruído (-33,16 dB).

Tabela 24 Resultados S/N para cada parâmetro para a rugosidade média e temperatura média nos ensaios com Balis Mafcool 51 (100 ml/h).

PARÂMETRO		S/N (DB) RUGOSIDADE	S/N (DB) TEMPERATURA
A1	$n = 195$ rpm	-6,49	-37,10
A2	$n = 285$ rpm	-4,04	-38,42
A3	$n = 500$ rpm	-1,51	-39,85
B1	$V_f = 20$ mm/min	3,70	-37,34
B2	$V_f = 63$ mm/min	-4,60	-39,18
B3	$V_f = 185$ mm/min	-11,15	-38,85
C1	$a_p = 0,3$ mm	-2,30	-36,28
C2	$a_p = 0,6$ mm	-5,49	-38,68
C3	$a_p = 1$ mm	-4,25	-40,40

Na tabela 24 estão apresentados os valores de razão sinal/ruído para cada parâmetro. Com a ajuda do gráfico representado na figura 40, é possível determinar as combinações ótimas de maquinaagem.

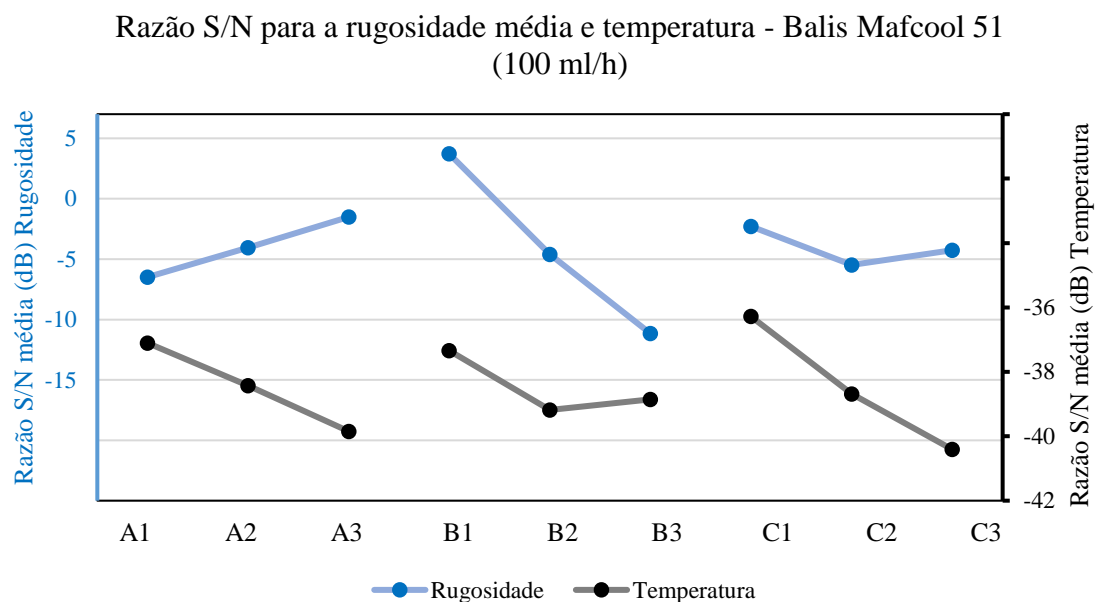


Figura 40 Valores de S/N para rugosidade e temperatura no ensaio com Balis Mafcool 51 (100 ml/h) para cada parâmetro.

Analisando a figura 40 e a tabela 24 é possível verificar, mais uma vez, que as razões sinal/ruído para cada parâmetro seguem o mesmo comportamento dos grupos de ensaios anteriores. Voltou-se a verificar que o aumento da velocidade de rotação diminui a rugosidade, mas aumenta a temperatura. Um aumento da velocidade de avanço faz aumentar a rugosidade e, com o aumento da penetração, verifica-se um aumento da temperatura.

Para este grupo de ensaios, verificam-se as mesmas combinações ótimas para estes dois objetivos, para a rugosidade A3B1C1, rotação de 500 rpm, velocidade de avanço de 20 mm/min e penetração de 0,3 mm e, para favorecer baixas temperaturas de corte, a combinação ótima obtida foi a A1B1C1, isto é, rotação de 195 rpm, velocidade de avanço de 20 mm/min e penetração de 0,3 mm.

5.1.2.4 Testes com Águas Ruças com Caudal 50 ml/h

No quarto grupo de ensaios foram utilizadas águas ruças como lubrificante de corte. Numa primeira fase, o caudal utilizado foi de 50 ml/h. Utilizando a tabela 15 (capítulo 4) que fornece os resultados obtidos de rugosidade e de temperatura, com a aplicação da equação (6) (capítulo 2) é possível calcular os valores de razão sinal/ruído que são apresentados na tabela 25.

Tabela 25 Valor da razão S/N para a rugosidade superficial e temperatura das aparas no ensaio com águas ruças (50 ml/h).

Número de Ensaio	n	V_f	a_p	Rugosidade média μm	S/N Rugosidade média (dB)	Temperatura média °C	S/N Temperatura média (dB)
IV.1	195	20	0,3	0,79	1,56	58,00	-35,44
IV.2	195	63	0,6	3,04	-10,47	82,46	-38,58
IV.3	195	185	1	3,71	-12,88	97,54	-40,18
IV.4	285	20	0,6	0,66	2,93	91,47	-39,41
IV.5	285	63	1	1,87	-6,02	112,15	-41,13
IV.6	285	185	0,3	3,21	-10,90	66,7	-36,70
IV.7	500	20	1	0,64	3,29	106,3	-40,91
IV.8	500	63	0,3	0,85	0,89	101,03	-40,39
IV.9	500	185	0,6	3,59	-11,91	104,39	-40,57

Com a utilização das águas ruças, como dito na apresentação dos resultados de rugosidade e temperatura, analisando a tabela 25, a menor rugosidade mantém-se no sétimo ensaio com 0,64 μm , o que corresponde a um maior valor de razão sinal/ruído com 3,29 dB. A maior rugosidade mantém-se no terceiro ensaio, com 3,71 μm , com -12,88 dB de razão sinal/ruído correspondente.

Ao nível de temperaturas de corte, verifica-se uma alteração na temperatura máxima, que agora encontra-se no quinto ensaio, com um valor de 112,15 °C, correspondendo a um menor valor de razão sinal/ruído -41,13dB. A temperatura mínima mantém-se no primeiro teste, com 58°C correspondendo a -35,44 dB.

Tabela 26 Resultados S/N para cada parâmetro para a rugosidade média e temperatura média nos ensaios com águas ruças (50 ml/h).

PARÂMETRO		S/N (DB) RUGOSIDADE	S/N (DB) TEMPERATURA
A1	$n = 195$ rpm	-7,26	-38,07
A2	$n = 285$ rpm	-4,66	-39,08
A3	$n = 500$ rpm	-2,57	-40,62
B1	$V_f = 20$ mm/min	2,59	-38,59
B2	$V_f = 63$ mm/min	-5,20	-40,04
B3	$V_f = 185$ mm/min	-11,90	-39,15
C1	$a_p = 0,3$ mm	-2,81	-37,51
C2	$a_p = 0,6$ mm	-6,48	-39,52
C3	$a_p = 1$ mm	-5,20	-40,74

Na tabela 26 estão apresentados os valores de S/N para cada parâmetro, utilizando águas ruças com um caudal de 50 ml/h. Com esta tabela é possível construir o gráfico apresentado na figura 41.

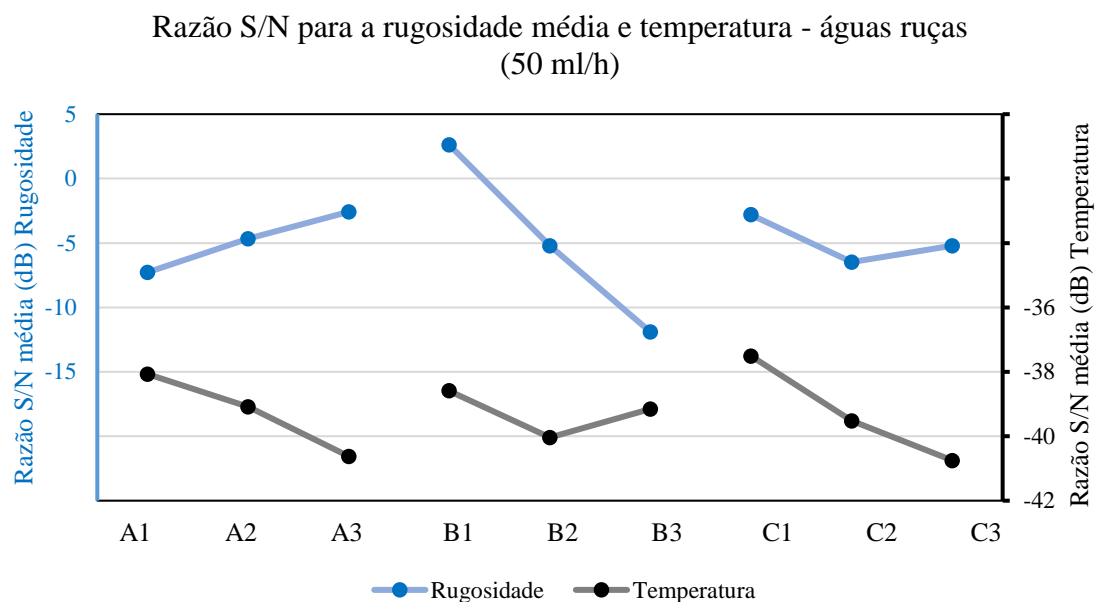


Figura 41 Valores de S/N para rugosidade e temperatura no ensaio com águas ruças (50 ml/h) para cada parâmetro.

Com a análise da tabela 25 e da figura 41, verifica-se que, com a aplicação das águas ruças, os valores de S/N para a rugosidade e temperatura seguem a mesma tendência que nos grupos de ensaios anteriores. O aumento da velocidade de rotação favorece um bom acabamento superficial (menor rugosidade), mas aumenta a temperatura de corte. Com o aumento da velocidade de avanço aumenta a rugosidade, e com o aumento da penetração cria um aumento da temperatura.

Da análise da figura 41, é possível afirmar que, as combinações ótimas para baixa rugosidade e baixa temperatura mantêm as dos ensaios anteriores. Para uma baixa rugosidade deve ser usada a combinação A3B1C1, rotação de 500 rpm, velocidade de avanço de 20 mm/min e penetração de 0,3 mm e, para favorecer baixas temperaturas A1B1C1, rotação de 195 rpm, velocidade de avanço de 20 mm/min e penetração de 0,3 mm.

5.1.2.5 Testes com Águas Ruças com Caudal 100 ml/h

No último grupo de ensaios foi utilizada o mesmo lubrificante do ensaio anterior, contudo, aumentou-se o caudal para 100 ml/h. Utilizando a tabela 16 do capítulo 4, e com a ajuda da equação (6) (capítulo 2) é possível calcular os valores da razão sinal/ruído para este último grupo de ensaios, e que estão apresentados na tabela 27.

Tabela 27 Valor da razão S/N para a rugosidade superficial e temperatura das aparas no ensaio com águas ruças (100 ml/h).

Número de Ensaio	n	V_f	a_p	Rugosidade média μm	S/N Rugosidade média (dB)	Temperatura média $^{\circ}C$	S/N Temperatura média (dB)
V.1	195	20	0,3	0,78	1,72	52,71	-34,60
V.2	195	63	0,6	2,66	-9,64	77,68	-38,03
V.3	195	185	1	3,75	-12,66	93,15	-39,83
V.4	285	20	0,6	0,66	3,55	78,32	-38,13
V.5	285	63	1	1,82	-6,02	100,94	-40,30
V.6	285	185	0,3	3,24	-11,20	60,86	-35,86
V.7	500	20	1	0,63	3,39	101,05	-40,69
V.8	500	63	0,3	0,83	1,18	92,31	-39,61
V.9	500	185	0,6	3,56	-11,87	101,15	-40,37

Com a observação da tabela 27 é possível verificar, mais uma vez, que a menor rugosidade se encontra no ensaio número 7 ($0,63 \mu m$ correspondendo a um valor de 3,39 dB), no entanto, o maior valor de S/N para a rugosidade encontra-se no ensaio número 4 ($0,66 \mu m$ correspondendo a 3,55 dB). O maior valor de rugosidade média mantém-se no terceiro ensaio o que resulta no mínimo valor de S/N ($3,75 \mu m$ e -12,66 dB, respetivamente).

Em relação às três temperaturas de corte mais elevadas e muito próximas, encontradas no ensaio número 5, 7 e 9, verifica-se nestes os menores valores de SN, no entanto, no ensaio número 9 encontra-se o maior valor de temperatura ($101,15^{\circ}C$ com -40,37 dB), mas a menor razão S/N encontra-se no ensaio número 7 (com uma temperatura de $101,05^{\circ}C$ e uma razão S/N de -40,69 dB). A menor temperatura mantém-se no primeiro teste, com a maior razão S/N ($52,71^{\circ}C$ e -34,60 dB, respetivamente).

Tabela 28 Resultados S/N para cada parâmetro para a rugosidade média e temperatura média nos ensaios com águas ruças (100 ml/h).

PARÂMETRO		S/N (DB) RUGOSIDADE	S/N (DB) TEMPERATURA
A1	$n = 195 \text{ rpm}$	-6,86	-37,48
A2	$n = 285 \text{ rpm}$	-4,55	-38,10
A3	$n = 500 \text{ rpm}$	-2,43	-40,22
B1	$V_f = 20 \text{ mm/min}$	2,89	-37,81
B2	$V_f = 63 \text{ mm/min}$	-4,82	-39,31
B3	$V_f = 185 \text{ mm/min}$	-11,91	-38,69
C1	$a_p = 0,3 \text{ mm}$	-2,76	-36,69
C2	$a_p = 0,6 \text{ mm}$	-5,99	-38,84
C3	$a_p = 1 \text{ mm}$	-5,09	-40,27

Na tabela 28 estão representados os valores de razão sinal/ruído para cada parâmetro com a utilização de águas ruças com um caudal de 100 ml/h. Com a ajuda da tabela 28 é possível construir o gráfico da figura 42.

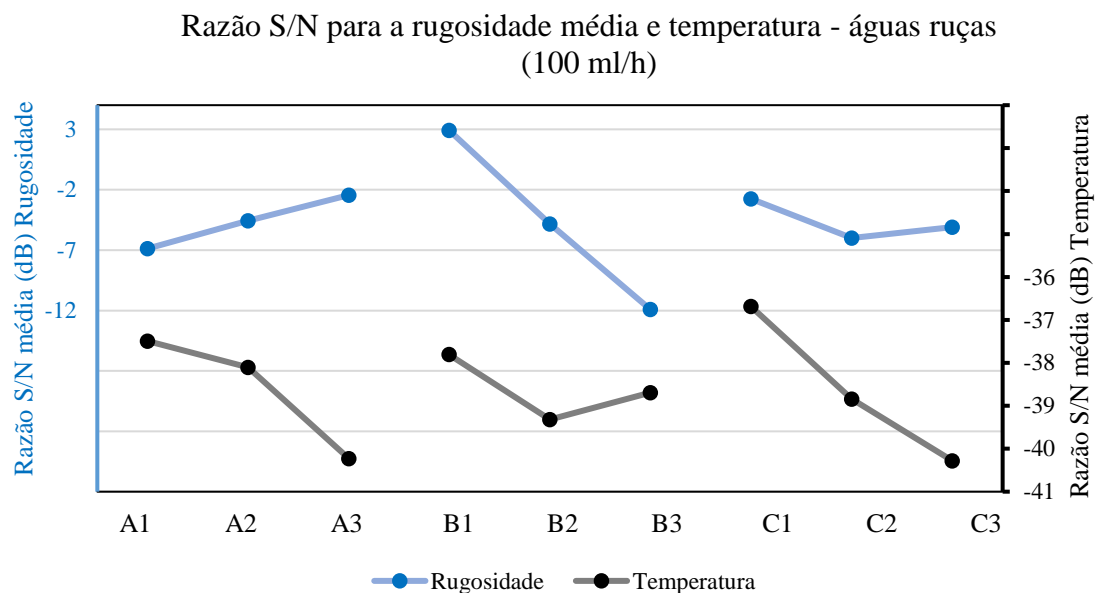


Figura 42 Valores de S/N para rugosidade e temperatura no ensaio com águas ruças (100 ml/h) para cada parâmetro.

Com a observação da figura 42 pode-se afirmar que, à semelhança dos grupos de ensaios anteriores, o aumento da rotação de corte favorece um aumento da razão sinal/ruído para a rugosidade, o que resulta num melhor acabamento superficial (menor rugosidade). Este aumento da velocidade de rotação tem um impacto inverso nas temperaturas, sendo que, com o aumento da velocidade de rotação as temperaturas irão aumentar. O aumento da velocidade de avanço desfavorece o acabamento superficial, ou seja, com a diminuição da razão sinal/ruído prevê-se um aumento da rugosidade. Em relação à penetração, quanto maior a penetração maior será o valor da temperatura de corte.

À semelhança dos ensaios anteriores, as combinações ótimas para a menor rugosidade e menor temperatura são A3B1C1, rotação de 500 rpm, velocidade de avanço de 20 mm/min e penetração de 0,3 mm, A1B1C1, rotação de 195 rpm, velocidade de avanço de 20 mm/min e penetração de 0,3 mm, respetivamente.

5.1.3 Análise ANOVA

Com a análise das figuras anteriores (37, 38, 39, 40, 41 e 42), foi possível determinar as combinações ótimas para cada objetivo. Verificou-se que, com a alteração do tipo de lubrificante e caudal, estas combinações mantêm-se iguais para todos os grupos de ensaios, como é possível verificar na tabela 29.

Tabela 29 Combinações ótimas.

	Seco	Balis Mafcool 51 (50 ml/h)	Balis Mafcool 51 (100 ml/h)	Águas Ruças (50 ml/h)	Águas Ruças (100 ml/h)
Taxa de Produção	B3C3				
Rugosidade	A3B1C1				
Temperatura	A1B1C1				

Com a análise da tabela 29 verifica-se que os parâmetros de corte são os que têm um maior impacto na escolha das combinações ideais para aumentar a taxa de produção, diminuir o valor da rugosidade e da temperatura de corte. O tipo de lubrificação, apesar de se notar diferenças entre as rugosidades e temperaturas médias quando comparando entre os grupos de ensaios (será feita essa comparação no capítulo 5.2), estes não fazem variar as combinações ótimas de corte.

Para se efetuar uma avaliação da influência dos parâmetros de corte nos objetivos em estudo, foi realizada uma análise da variância que permite verificar o nível de influência de cada fator de controlo numa resposta específica, neste caso, foi feita uma análise ANOVA para a taxa de produção, para a rugosidade superficial e para a temperatura de corte.

Tabela 30 ANOVA para taxa de produção.

Taxa de Produção						
	GL	SQ	MQ	Valor F	Valor P	Contribuição
Vel. Rot - n	2	7,635	3,818	1	0,5	6,66%
Avanço - V_f	2	74,495	37,248	9,76	0,093	64,94%
Penetração - a_p	2	24,951	12,475	3,27	0,234	21,75%
Erro	2	7,635	3,818			6,66%
Total	8	114,717				100,00%

Analisando a tabela 30 é possível verificar que o parâmetro com maior contribuição para um aumento da taxa de produção é a velocidade de avanço V_f , com uma contribuição de 64,94%, seguido da penetração, a_p , com 21,75%. Verificou-se ainda que o erro tem um valor relativamente baixo, o que significa que os parâmetros escolhidos são os adequados e que ruído externo tem pouco influência nas medições efetuadas.

Na tabela 31 apresentam-se os resultados da análise da variância tendo como resposta a temperatura e a rugosidade quando realizados os ensaios sem lubrificação.

Analisando a tabela 31, verifica-se que o parâmetro com maior influência no aumento das temperaturas na maquinagem a seco é a penetração seguida da velocidade de rotação com uma contribuição de 56,99 % e 33,10 %, respetivamente. O parâmetro com menor influência no

aumento das temperaturas é a velocidade de avanço, com uma contribuição de apenas 7%. Deste modo, para se reduzirem as temperaturas devem ser utilizadas menores penetrações e velocidades de rotação.

Tabela 31 ANOVA para temperatura e rugosidade - ensaios a seco.

Seco						
Temperatura						
	GL	SQ	MQ	Valor F	Valor P	Contribuição
Vel.Rot - n	2	7,8523	3,9262	11,41	0,081	33,10%
Avanço - V_f	2	1,6615	0,8307	2,41	0,293	7,00%
Penetração - a_p	2	13,5176	6,7588	19,64	0,048	56,99%
Erro	2	0,6883	0,3442			2,90%
Total	8	23,7197				100,00%
Rugosidade Média						
	GL	SQ	MQ	Valor F	Valor P	Contribuição
Vel.Rot - n	2	32,14	16,068	2,7	0,271	8,60%
Avanço - V_f	2	317,53	158,765	26,64	0,036	84,92%
Penetração - a_p	2	12,33	6,163	1,03	0,492	3,30%
Erro	2	11,92	5,96			3,19%
Total	8	373,91				100,00%

Em relação ao aumento da rugosidade pode-se verificar que o parâmetro com maior contribuição é a velocidade de avanço, seguida da velocidade de rotação, com uma contribuição de 84,92% e 8,60%. A penetração apresenta uma contribuição de apenas 3,30%.

Tabela 32 ANOVA para temperatura e rugosidade - Balis Mafcool 51 (50 ml/h).

Balis Mafcool 51 - 50 ml/h						
Temperatura						
	GL	SQ	MQ	Valor F	Valor P	Contribuição
Vel. Rot - n	2	8,0047	4,0023	11,76	0,078	26,65%
Avanço - V_f	2	1,4011	0,7005	2,06	0,327	4,67%
Penetração - a_p	2	19,9465	9,9733	29,31	0,033	66,42%
Erro	2	0,6805	0,3402			2,27%
Total	8	30,0327				100,00%
Rugosidade Média						
	GL	SQ	MQ	Valor F	Valor P	Contribuição
Vel. Rot - n	2	34,23	17,116	2,75	0,266	9,50%
Avanço - V_f	2	299,97	149,986	24,14	0,04	83,22%
Penetração - a_p	2	13,83	6,916	1,11	0,473	3,84%
Erro	2	12,43	6,213			3,45%
Total	8	360,46				100,00%

Na tabela 32 são apresentados os valores referentes às mesmas respostas, no entanto, com condições de lubrificação por Balis Mafcool 51, com um caudal de 50 ml/h.

Observando a tabela 32, é possível afirmar que com a aplicação do fluido de corte convencional com um caudal de 50 ml/h, o parâmetro com maior contribuição para aumento da temperatura é a penetração, com uma contribuição de 66,42%. A velocidade de rotação é o segundo parâmetro com maior contribuição, com 26,65% e, por último, encontra-se a velocidade de avanço com apenas 4,67%. Em relação à rugosidade verifica-se que a velocidade de avanço é o parâmetro com maior contribuição, 83,22%, seguida da velocidade de rotação (9,50%) e da penetração com 3,84%.

Na tabela 33 estão apresentados os valores referentes às mesmas respostas, com o mesmo lubrificante, mas com um caudal de 100 ml/h.

Tabela 33 ANOVA para temperatura e rugosidade - Balis Mafcool 51 (100 ml/h).

Balis Mafcool 51 - 100 ml/h						
Temperatura						
	GL	SQ	MQ	Valor F	Valor P	Contribuição
Vel. Rot - n	2	11,3	5,65	3,97	0,201	24,78%
Avanço - V_f	2	5,769	2,884	2,03	0,33	12,65%
Penetração - a_p	2	25,693	12,846	9,02	0,1	56,33%
Erro	2	2,847	1,423			6,24%
Total	8	45,608				100,00%
Rugosidade Média						
	GL	SQ	MQ	Valor F	Valor P	Contribuição
Vel. Rot - n	2	37,32	18,662	3,13	0,242	9,39%
Avanço - V_f	2	332,84	166,419	27,87	0,035	83,72%
Penetração - a_p	2	15,44	7,721	1,29	0,436	3,88%
Erro	2	11,94	5,971			3,00%
Total	8	397,55				100,00%

Analisando a tabela 33, verificam-se os mesmos comportamentos que nas tabelas anteriores. A penetração é o parâmetro com maior contribuição para aumento da temperatura, seguida da velocidade de rotação e, por fim, a velocidade de avanço (56,33 %, 24,78% e 12,65%, respetivamente). Em relação à rugosidade, também se verifica que o avanço é o parâmetro com maior contribuição (83,72 %), seguido da velocidade de rotação (9,39%) e da penetração 3,88 %.

Na tabela 34 estão apresentados os valores referentes às mesmas respostas, no entanto, agora serão apresentados os resultados da aplicação de águas ruças com um caudal de 50 ml/h.

Com a análise da tabela 34 é possível verificar que mais uma vez a contribuição dos parâmetros de corte nas duas respostas estudadas segue o mesmo comportamento. Para as

temperaturas, a penetração é o parâmetro com maior contribuição (50,46%), seguindo da velocidade de rotação (31,30%) e, por fim, encontra-se a velocidade de avanço com 10,07%. Em relação à rugosidade, o avanço mantém-se como sendo o parâmetro com maior contribuição 82,02%, seguido da velocidade de rotação e da penetração com (8,59% e 5,40%, respetivamente).

Tabela 34 ANOVA para temperatura e rugosidade - águas ruças (50 ml/h).

Águas Ruças 50 ml/h						
Temperatura						
	GL	SQ	MQ	Valor F	Valor P	Contribuição
Vel. Rot - n	2	9,933	4,967	3,84	0,207	31,30%
Avanço - V_f	2	3,197	1,598	1,23	0,448	10,07%
Penetração - a_p	2	16,015	8,008	6,18	0,139	50,46%
Erro	2	2,59	1,295			8,16%
Total	8	31,735				100,00%
Rugosidade Média						
	GL	SQ	MQ	Valor F	Valor P	Contribuição
Vel. Rot - n	2	33,11	16,554	2,16	0,317	8,59%
Avanço - V_f	2	316,06	158,032	20,61	0,046	82,02%
Penetração - a_p	2	20,82	10,411	1,36	0,424	5,40%
Erro	2	15,34	7,668			3,98%
Total	8	385,33				100,00%

Na tabela 35 serão apresentados os valores referentes às mesmas respostas, com o mesmo lubrificante, no entanto com um caudal de 100 ml/h.

Tabela 35 ANOVA para temperatura e rugosidade - águas ruças (100 ml/h).

Águas Ruças 100 ml/h						
Temperatura						
	GL	SQ	MQ	Valor F	Valor P	Contribuição
Vel. Rot - n	2	12,369	6,1847	7,95	0,116	33,46%
Avanço - V_f	2	3,434	1,7169	2,11	0,322	9,29%
Penetração - a_p	2	19,538	9,7191	11,99	0,077	52,85%
Erro	2	1,63	0,8149			4,41%
Total	8	36,971				100,00%
Rugosidade Média						
	GL	SQ	MQ	Valor F	Valor P	Contribuição
Vel. Rot - n	2	29,43	14,713	1,65	0,377	7,49%
Avanço - V_f	2	329,27	164,637	18,49	0,051	83,75%
Penetração - a_p	2	16,63	8,317	0,93	0,517	4,23%
Erro	2	17,81	8,904			4,53%
Total	8	393,14				100,00%

Com a análise da tabela 35, é possível, mais uma vez, concluir que a penetração é o parâmetro com maior contribuição para o aumento da temperatura (52,85%), e a velocidade de avanço é o parâmetro com maior contribuição para aumento da rugosidade (83,75%). De seguida, para a temperatura de corte, destaca-se a velocidade de rotação, com uma contribuição de 33,46% seguida da velocidade de avanço com 9,29%. Em relação à rugosidade, em segundo lugar encontra-se a velocidade de rotação, com 7,49%, seguindo-se da penetração com 4,23%.

5.2 Comparação dos Fluidos Lubrificantes

Um dos objetivos da presente dissertação foca-se em verificar se as águas ruças terão potencial para serem utilizadas como fluido de corte. Para se fazer a comparação entre os dois fluidos utilizados e, para avaliar se as águas ruças são viáveis como lubrificante de corte, serão comparados os valores da rugosidade média e os valores de temperatura de cada grupo de lubrificação. Serão, também, comparados os resultados utilizando a combinação ótima de parâmetros de maquinagem para a menor rugosidade (que foi igual para todos os grupos de ensaio) e para a menor temperatura de corte.

Na tabela 36 estão apresentados os valores de rugosidade média e temperatura média obtidos nos ensaios de confirmação para cada um dos tipos de lubrificação.

Tabela 36 Resultados obtidos nos ensaios de confirmação.

Ensaio de Confirmação	n	V_f	a_p	Rugosidade Média μm	Temperatura Média $^{\circ}C$
Seco	500	20	0,3	0,658	87,905
Balis Mafcool 51 (50 ml/h)	500	20	0,3	0,642	84,67
Balis Mafcool 51 (100 ml/h)	500	20	0,3	0,538	66,285
Águas Ruças 50 ml/h	500	20	0,3	0,648	82,24
Águas Ruças 100 ml/h	500	20	0,3	0,616	71,055

Recorrendo à tabela 36, é possível representar esses valores graficamente nas figuras 43 e 44, para melhor compreensão dos valores obtidos nos ensaios de confirmação. No entanto, numa primeira análise à tabela é possível verificar que, tal como seria previsível, o ensaio a seco obteve valores mais elevados de rugosidade e temperatura. O ensaio com melhores resultados, foi

alcançado com a utilização do óleo convencional de corte (Balis Mafcool 51), com um caudal de 100 ml/h. As análises entre os fluidos serão feitas analisando as figuras 43 e 44.

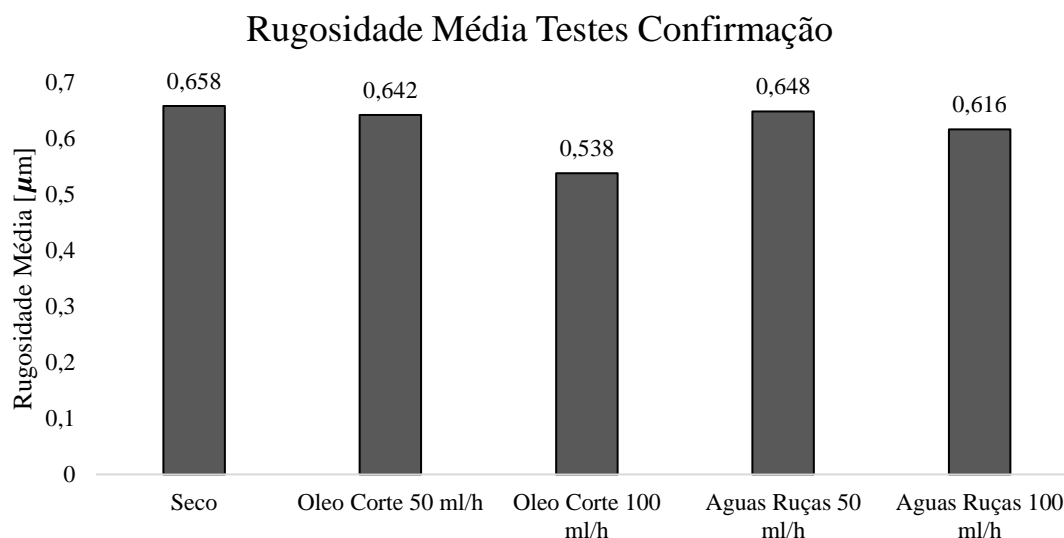


Figura 43 Rugosidade média nos testes de confirmação.

Fazendo uma análise à figura 43, tal como já afirmado, o ensaio a seco obteve um maior valor de rugosidade média (0,658 μm). Fazendo uma comparação entre os ensaios com lubrificante, repara-se que, com um caudal de 50 ml/h, os dois lubrificantes conseguiram obter uma redução da rugosidade (em relação ao ensaio a seco), no entanto, o óleo de corte convencional reduziu a rugosidade em 2,432% (reduziu para 0,642 μm), enquanto as águas ruças reduziram a rugosidade em, apenas, 1,52% (reduzindo para 0,648 μm). Com este caudal pode-se afirmar que é mais eficiente o fluido de corte, pois conseguiu-se uma maior redução da rugosidade, contudo, as águas ruças mostraram-se também eficazes na redução da rugosidade. Com o aumento do caudal, dos dois lubrificantes em estudo, para 100 ml/h, verificou-se uma maior percentagem de redução da rugosidade, principalmente, com a aplicação do óleo de corte convencional. Fazendo a mesma comparação, em relação ao ensaio sem lubrificação, com o óleo de corte convencional, conseguiu-se uma redução de 18,24% da rugosidade (0,538 μm). Por outro lado, com a aplicação das águas ruças, foi possível diminuir a rugosidade em 6,38 % (0,616 μm), verificando-se, mais uma vez, que o óleo de corte obteve melhores resultados, no entanto, as águas ruças mostraram-se, também, eficazes na redução da rugosidade. É possível verificar, tal como esperado, que com o aumento do caudal de lubrificação nos dois fluidos conseguiu-se diminuir a rugosidade, sendo que, no fluido de corte, essa diminuição foi superior.

Temperatura Média Testes Confirmação

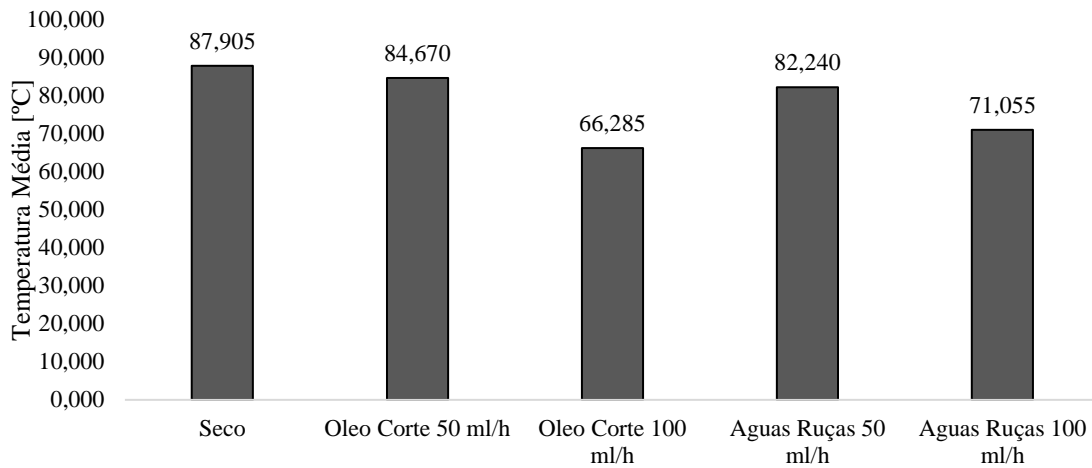


Figura 44 Temperatura média nos testes de confirmação.

Na figura 44, estão apresentados os resultados referentes à temperatura média em cada ensaio de confirmação. Tal como já afirmado o ensaio a seco obteve maiores valores de temperatura, 87,905°C. Com a aplicação dos fluidos de corte, conseguiu-se uma diminuição das temperaturas. Comparando os dois fluidos de corte, com um caudal de 50 ml/h, verifica-se que as águas ruças alcançaram uma maior redução da temperatura, cerca de 6,45% (82,240°C), enquanto o óleo de corte convencional apenas conseguiu uma redução de temperatura de 3,69% (84,670°C). Neste caso, as águas ruças mostraram-se mais eficientes na redução da temperatura, contudo, quando se aumentou o caudal dos dois fluidos para 100 ml/h ocorreu o inverso. Com o óleo de corte convencional obteve-se uma redução de cerca de 24,6% (66,285°C), enquanto com a utilização das águas ruças apenas se conseguiu uma redução de 19,17% (71,055°C).

Para se ter mais um método de comparação entre os dois fluidos, foi feita a média das temperaturas e das rugosidades para cada grupo de testes realizados, que estão apresentados na tabela 37.

Tabela 37 Rugosidade e temperatura média em cada grupo de ensaios.

Grupo Ensaio	Rugosidade Média μm	Temperatura Média °C
I - Seco	2,058	101,299
II - Balis Mafcool 51 (50 ml/h)	1,879	91,444
III - Balis Mafcool 51 (100 ml/h)	1,862	83,007
IV - Águas Ruças 50 ml/h	2,045	91,118
V - Águas Ruças 100 ml/h	1,996	84,245

Analisando a tabela 37, é possível verificar que, o grupo de ensaios sem qualquer lubrificação foi o que mostrou piores resultados, à semelhança do ensaio de confirmação. Para se melhor compreender os valores da tabela, estes serão apresentados graficamente nas figuras 45 e 46.

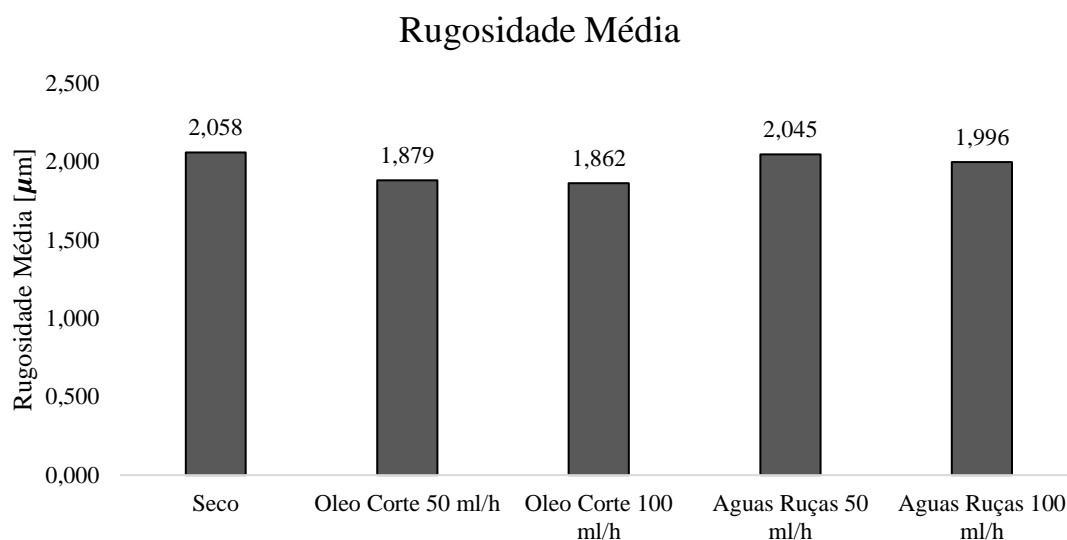


Figura 45 Rugosidade média para os 5 grupos de ensaios.

Com a observação da figura 45, pode-se verificar que a rugosidade média, para o grupo de testes a seco, obteve o maior valor, com 2,058 μm . Comparando os dois fluidos, verifica-se que para os mesmos caudais (50 e 100 ml/h) o lubrificante de corte conseguiu sempre uma melhor contribuição que as águas ruças, verificou-se mesmo que, um caudal de 50 ml/h de fluido de corte obteve melhores resultados do que as águas ruças com um caudal de 100 ml/h. Transformando estes valores em percentagens, óleo de corte, com um caudal de 50 ml/h reduziu a rugosidade em 8,7% (1,879 μm), e quando se duplicou o caudal (para 100 ml/h), aumentou-se a percentagem de redução da rugosidade para 9,53% (1,862 μm). Em relação às águas ruças, com a aplicação de 50 ml/h deste fluido diminuiu a rugosidade em 0,63% (2,045 μm), e com a duplicação do caudal (para 100 ml) verificou-se que reduziu a rugosidade em 3,02% (1,996 μm). Ordenando estes resultados, verifica-se que o lubrificante mais eficiente foi o lubrificante de corte convencional com um caudal de 100 ml/h, em segundo lugar, o mesmo lubrificante com um caudal de 50 ml/h, seguindo-se das águas ruças com 100 ml/h e 50 ml/h, respetivamente. Esta última afirmação contradiz os resultados apresentados do gráfico 13, que se verificou que as águas ruças com caudal de 100 ml/h obtiveram menor rugosidade do que o fluido de corte com caudal de 50 ml/h, no entanto, na média das rugosidades de cada grupo, com 50 ml/h de fluido de corte convencional obteve-se menor rugosidade média do que com 100 ml/h de águas ruças.

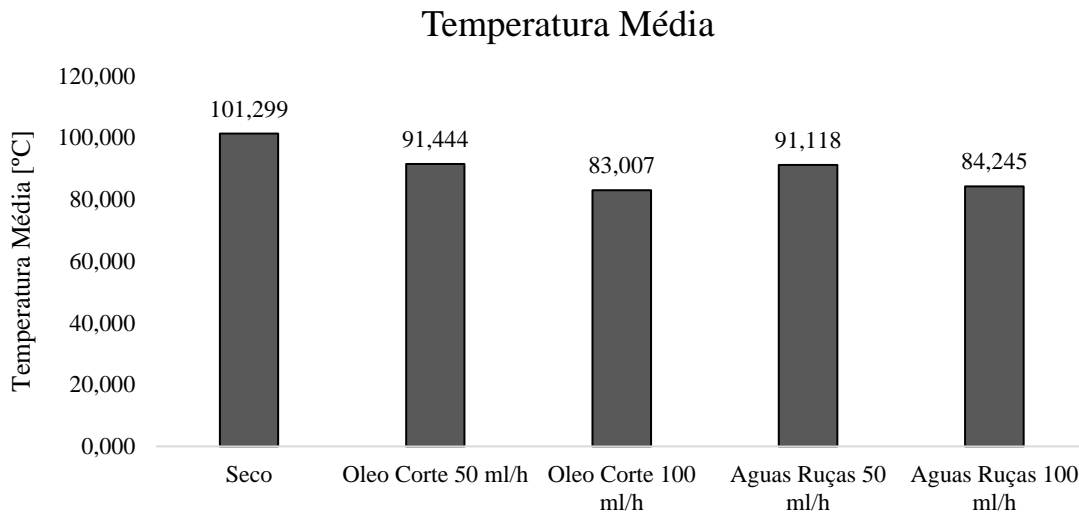


Figura 46 Temperatura média para os 5 grupos de ensaios.

Na figura 46 estão apresentados os resultados das temperaturas médias para cada grupo de ensaios. Mais uma vez, verifica-se que o ensaio a seco obteve piores resultados, neste caso, com uma temperatura média de 101,299°C. Comparando os lubrificantes utilizados verifica-se, à semelhança do que se verificou nos ensaios de confirmação, que para um caudal de 50 ml/h as águas ruças conseguem uma maior redução da temperatura, para 10,05% (91,118°C) contra 9,73% reduzido pelo fluido de corte convencional (91,444 °C), no entanto, é de salientar que esta diferença é muito reduzida e os valores de temperatura média obtida nestes dois grupos de ensaios é bastante próxima, diferindo apenas em 0,326 °C.

Com o aumento do caudal para 100 ml/h dos dois fluidos em estudo, verificou-se que o fluido de corte convencional torna-se mais eficaz na redução das temperaturas. O óleo de corte consegue, assim, uma redução de 18,06% (83,007°C), contra uma redução de 16,84% da temperatura com a aplicação de águas ruças (84,245°C).

Para terminar este capítulo, pode-se afirmar que as águas ruças têm um maior impacto na redução da temperatura do que da rugosidade. No entanto, o fluido de corte mostrou-se bastante eficiente nos dois objetivos em estudo, sendo que, com o aumento do caudal verificou-se melhorias na sua eficácia.

Ainda neste capítulo, é importante salientar que, durante os ensaios com a aplicação das águas ruças verificou-se que a peça após ser maquinada encontrava-se com uma coloração acastanhada, verificando-se mesmo algumas manchas na face maquinada, como é possível verificar na figura 47. Além destas manchas na peça, e, apesar de se ter isolado a fresadora, verificou-se também várias manchas na mesa da fresadora (figura 48 e 49), que foram limpas para evitar a ocorrência de corrosão superficial.

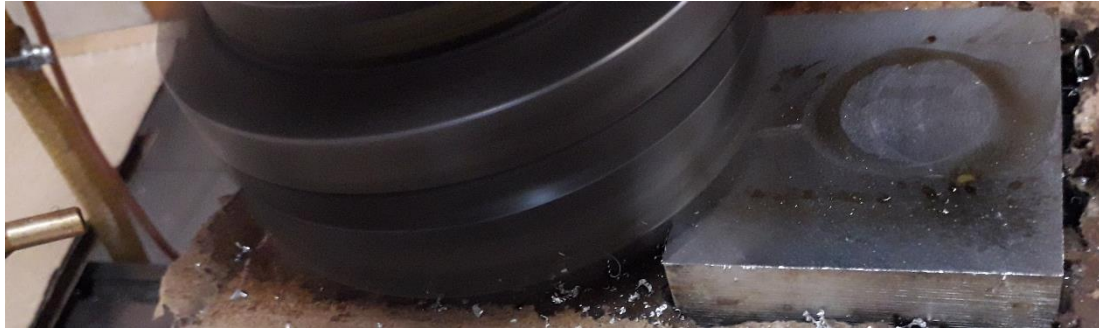


Figura 47 Manchas na face maquinada provocadas pelas águas ruças.



Figura 48 Manchas provocadas pelas águas ruças na mesa de fresar.



Figura 49 Manchas provocadas pelas águas ruças no carrinho porta peças.

Pelo contrário, com a utilização do fluido de corte convencional (Balis Mafcool 51) não se verificou qualquer tipo de manchas na peça (figura 50).

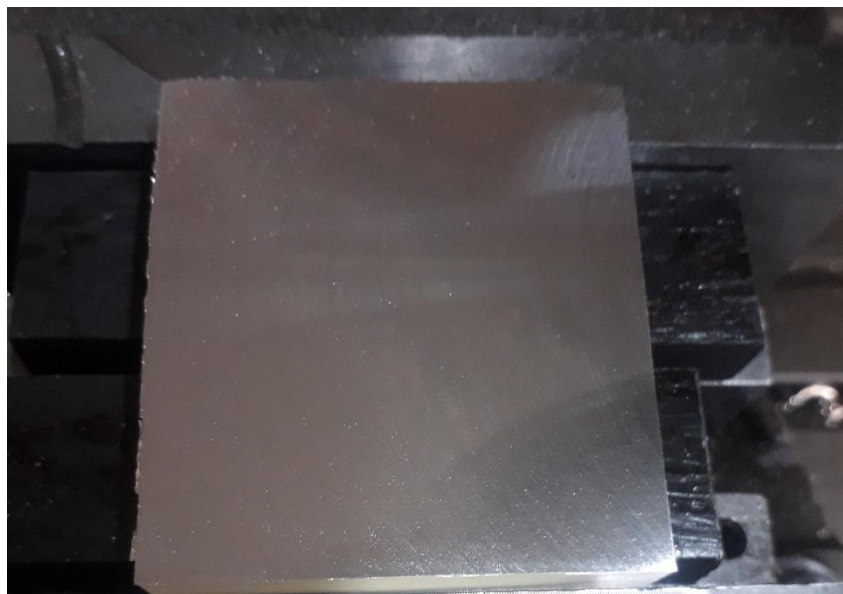


Figura 50 Peça maquinada com Balis Mafcool 51.

5.3 Análise dos Resultados Obtidos nos Ensaios Tribológicos

Recorrendo aos resultados obtidos nos ensaios de tribologia, já apresentados individualmente e graficamente no capítulo 4.2, é possível consolidar todos estes valores num único gráfico, para que seja possível comparar a contribuição de cada fluido para a diminuição do coeficiente de atrito (figura 51).

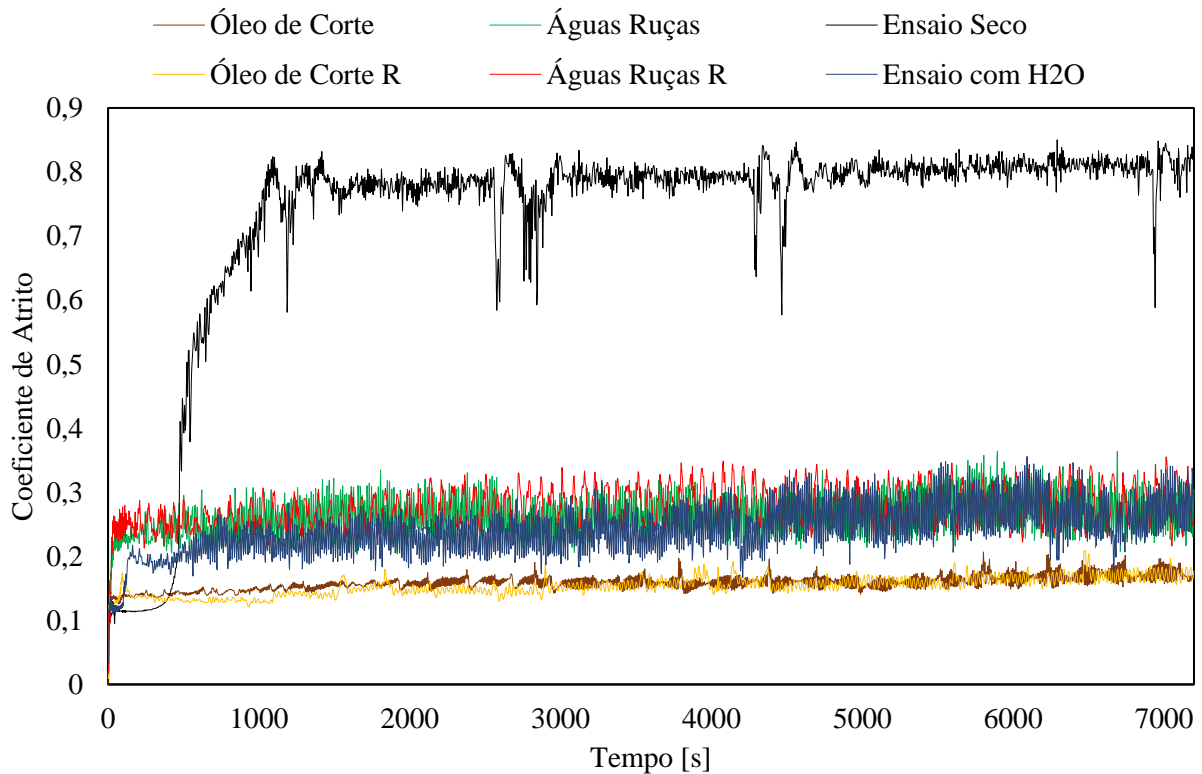


Figura 51 Comparação dos ensaios tribológicos.

Na figura 51, estão apresentados todos os valores obtidos durante os ensaios tribológicos. Com uma primeira análise, verifica-se que o ensaio a seco (identificado a preto) obteve maior coeficiente de atrito do que todos os outros ensaios. É, ainda, possível verificar que os ensaios com óleo de corte convencional (identificados a amarelo e castanho), obtiveram os menores valores de atrito, mostrando-se estes dois ensaios bastante estáveis, com uma amplitude entre o valor máximo e valor mínimo bastante reduzida comparando com os restantes ensaios. Os ensaios com águas ruças, (identificados a verde e a vermelho) obtiveram maiores valores de atrito comparando com os ensaios com óleo de corte convencional, contudo, verifica-se uma grande diminuição do atrito comparando com o ensaio a seco. Em relação ao ensaio com água destilada (identificado a azul), verifica-se um melhor comportamento inicial do que as águas ruças.

Tendo em conta os fenómenos iniciais de rodagem, para se calcular o atrito médio de cada ensaio foi considerado apenas o regime estacionário. Esses valores de atrito médio encontram-se na figura 52.

Coeficientes de Atrito Médio em Regime Estacionário

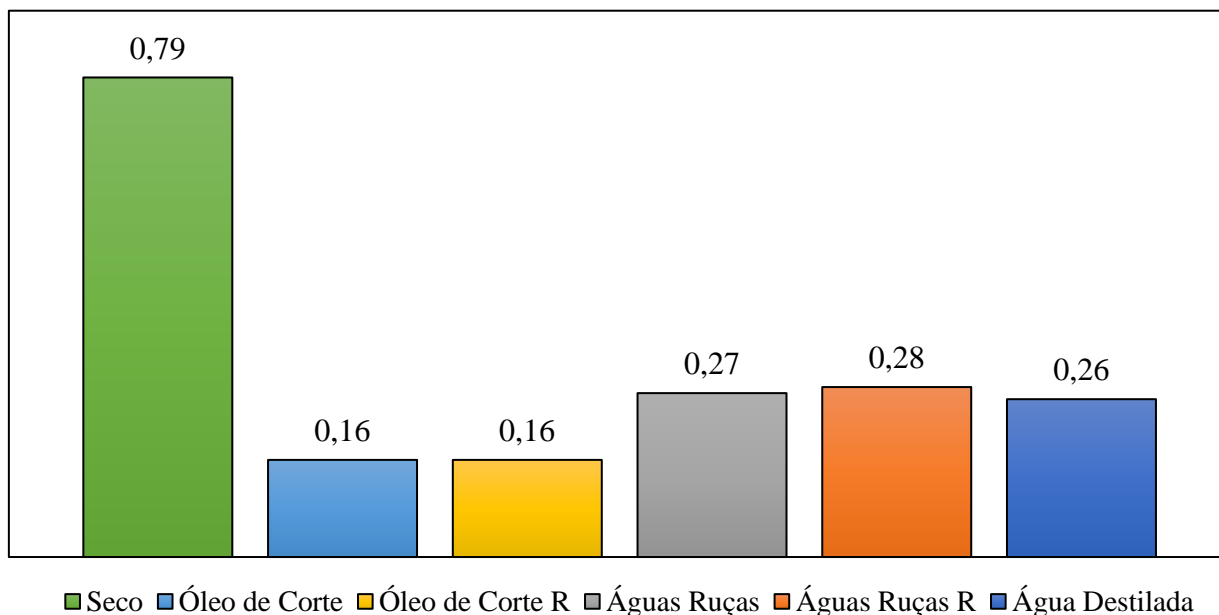


Figura 52 Coeficientes de atrito médio em regime estacionário.

Analisando a figura 52, tal como esperado, no deslizamento a seco o coeficiente de atrito é o mais elevado obtendo um valor de 0,79. No deslizamento com a aplicação de óleo de corte, reduz-se bastante o coeficiente de atrito para 0,16.

O coeficiente de atrito nos dois ensaios com a aplicação de águas ruças dá um valor comparável ao obtido na presença de água destilada, 0,27, 0,28 e 0,26, respetivamente. Não demonstrando, por isso, lubricidade acrescida em comparação com a água destilada. Contudo, é importante salientar que, no deslizamento em água destilada e águas ruças, a redução do coeficiente de atrito é muito significativa comparativamente com o deslizamento seco.

Em relação ao desgaste obtido nos ensaios tribológicos, não foi observado desgaste mensurável na esfera cerâmica, figura 53, apesar de se ter feito medição da massa da mesma no início e no fim de cada ensaio. Estas medições não foram contabilizadas devido aos valores obtidos nestas medições não serem significativos e as diferenças verificam-se, essencialmente, devido ao erro da balança.



Figura 53 Esfera cerâmica após ensaios tribológicos.

Ao contrário da esfera, no disco é possível observar as pistas de desgaste a olho nu. Estas pistas podem ser vistas na figura 54.



- 1-Ensaio a Seco
- 2-Seco R
- 3-Óleo de Corte R
- 4-Águas Ruças R
- 5-Águas Ruças
- 6-Óleo de Corte
- 7-Água Destilada.

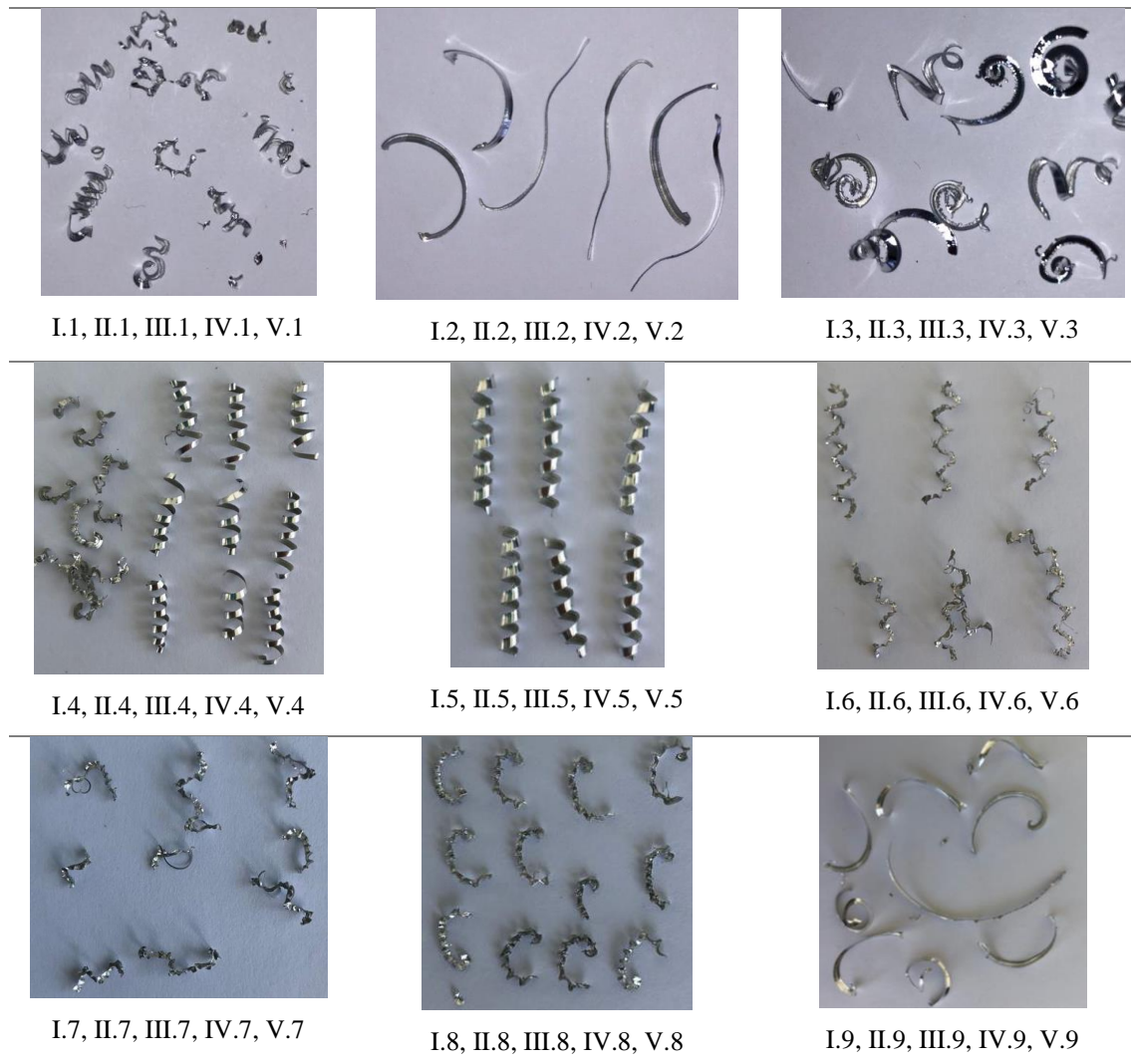
Figura 54 Pistas de desgaste no disco.

Com a análise da figura 54, é possível verificar que o ensaio a seco obteve uma pista mais larga, quando comparado com todas as outras pistas. A pista menos profunda (mais fina) verifica-se com óleo de corte, na terceira e sexta pista. As pistas com águas ruças (quarta e quinta pista) e com água destilada (sétima pista), estão bastante parecidas.

5.4 Análise das Aparas

Na tabela 38 estão apresentadas as aparas resultantes de todos os ensaios. Quando comparadas as aparas entre os grupos de ensaio, verifica-se que os ensaios com as mesmos parâmetros de corte (por exemplo, comparando as aparas de todos os ensaios número 1 dos vários grupos) as aparas mantêm-se iguais, apesar de fazer uma variação dos lubrificantes.

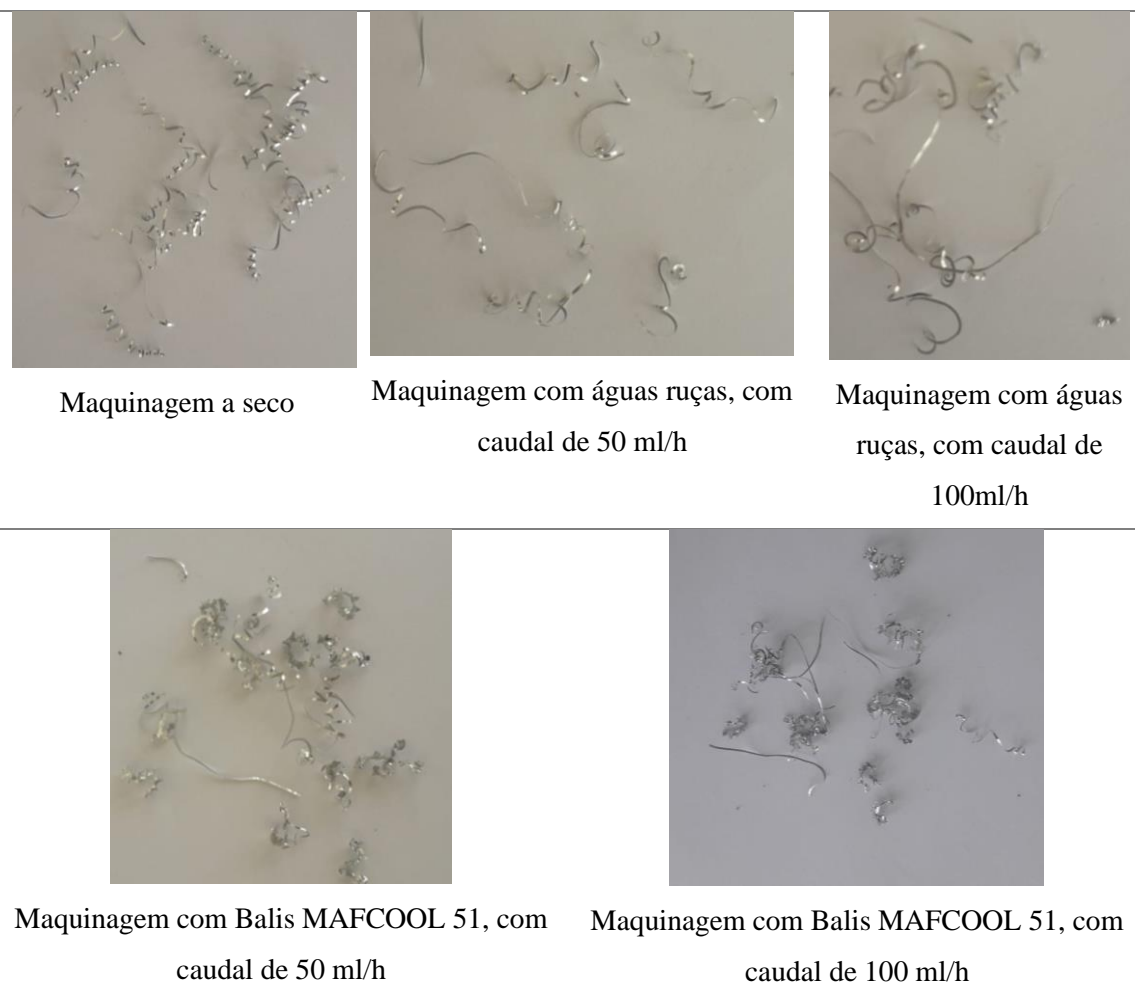
Tabela 38 Representação das aparas obtidas nos 45 ensaios realizados.



Com a análise das figuras da tabela 38, é possível afirmar que, para os ensaios realizados, a forma e tamanho das aparas variam apenas com os parâmetros de maquinagem. De ensaio para ensaio, variaram os parâmetros de maquinagem o que proporcionou várias formas e tamanhos de aparas. É possível ainda concluir que a alteração do fluido de corte e respetivo caudal não tiveram influência na forma e tamanho das aparas.

Para se comprovar que as aparas não variam a sua forma e tamanho consoante o tipo de lubrificante, na tabela 39 são apresentadas as aparas dos ensaios de confirmação.

Tabela 39 Ilustração das aparas nos ensaios de confirmação.



Na tabela 39 estão ilustradas as aparadas obtidas nos ensaios de confirmação, na qual, na primeira ilustração está representado o ensaio a seco, na segunda ilustração o ensaio com águas ruças, com um caudal de 50 ml/h, na terceira ilustração o ensaio com águas ruças, com um caudal de 100 ml/h, na quarta ilustração o ensaio com óleo de corte convencional, com um caudal de 50 ml/h, e na quinta ilustração o ensaio com óleo de corte convencional com caudal de 100 ml/h.

Todas as aparas apresentam-se arredondadas e bastante finas, com algumas mais compridas. Mais uma vez é possível verificar que a alteração do fluido de corte e o caudal não teve qualquer influência na forma e tamanho das aparas. Os ensaios de confirmação foram realizados com uma velocidade de rotação de 500 rpm, velocidade de avanço de 20 mm/min e penetração de 0,3 mm, permitindo assim obter as aparas apresentadas.

6. Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

Neste último capítulo são apresentadas as conclusões finais possíveis de retirar após a análise dos resultados sobre o presente estudo. Serão também apresentadas as sugestões para trabalhos futuros com o intuito de dar seguimento a este estudo.

6.1 Conclusões

Durante o presente estudo foi analisada a influência dos parâmetros de corte e o impacto dos lubrificantes no processo de fresagem.

Foram realizados cinco grupos de ensaios, fazendo variar os fluidos de corte e os caudais. Com a utilização destes grupos, havia três principais objetivos. O primeiro objetivo era analisar a possibilidade de haver uma alteração das combinações de parâmetros de corte ótimos, com as alterações dos fluidos e dos caudais. O segundo objetivo era avaliar a influência destes fluidos na diminuição da rugosidade superficial e da temperatura de corte (na região da formação da apara). O terceiro e último objetivo era analisar o impacto das águas ruças na maquinagem.

Com o estudo da combinação ótima para a taxa de produção, comum aos cinco grupos de ensaios, obteve-se que a combinação ideal seria B3C3 (com qualquer rotação), o que corresponde a velocidade de avanço (V_f) de 185 mm/min e uma penetração (a_p) de 1 mm. Com a análise da variância para esta verificou-se que a velocidade de avanço V_f é o parâmetro com maior contribuição para aumentar a taxa de produção (64,94%).

Em relação ao primeiro objetivo, as combinações ótimas para minimizar a rugosidade superficial e temperatura de corte mantiveram-se as mesmas para cada grupo de ensaios, o que leva a concluir que, os parâmetros ótimos de maquinagem não se alteram com a lubrificação utilizada. Essas combinações foram, para o menor valor de rugosidade superficial, A3B1C1, isto é, velocidade de rotação de 500 rpm, velocidade de avanço de 20 mm/min e penetração de 0,3 mm. Para minimizar a temperatura de corte, a combinação ideal é A1B1C1, ou seja, velocidade de rotação de 195 rpm, velocidade de avanço de 20 mm/min e penetração de 0,3 mm. Com a análise ANOVA verificou-se que o parâmetro com maior influência no aumento da temperatura foi a penetração, seguida da velocidade de rotação. Em relação à rugosidade superficial, verificou-se que o parâmetro com maior influência foi a velocidade de avanço, seguida da velocidade de rotação com uma contribuição muito reduzida. Conclui-se, assim, que, independentemente do tipo de lubrificação, o aumento da penetração é o fator com maior contribuição para o aumento da temperatura de corte e o aumento da velocidade de avanço é o parâmetro com maior contribuição no aumento da rugosidade superficial.

Em relação ao segundo objetivo, nos ensaios de confirmação, com a combinação ótima para a menor rugosidade (A3B1C1), aplicando águas ruças com um caudal de 50 ml/h conseguiu-

se uma diminuição de 1,52% face a uma redução de 2,43% com a utilização de óleo de corte convencional. Com o aumento do caudal nos dois fluidos para 100 ml/h, com as águas ruças reduziu-se a rugosidade em 6,38 %, e com a utilização do óleo de corte convencional reduziu-se esta resposta em 18,24%. Em relação às temperaturas verificou-se que a aplicação de um caudal de 50 ml/h de águas ruças obteve uma redução de 6,45% contra uma redução de apenas 3,69% obtido com a aplicação de óleo de corte convencional. Contudo, duplicando o caudal para 100 ml/h, verificou-se uma maior redução nas temperaturas com a utilização de óleo de corte, 24,6%, face a uma diminuição de 19,17%, aplicando águas ruças.

As médias dos valores da rugosidade e da temperatura, em cada grupo de ensaios, mostraram que a aplicação de 50 ml/h de óleo de corte reduz a rugosidade média em 8,70% e com a utilização de águas ruças apenas se reduziu 0,63%. Com um caudal de 100 ml/h, a aplicação de óleo de corte convencional reduziu a rugosidade em 9,53%, no entanto, as águas ruças apenas reduziram a rugosidade em 3,02%. Estudando as temperaturas de corte médias, verificou-se que a aplicação de óleo de corte convencional com caudal de 50ml/h reduziu em 9,73% e as águas ruças conseguiram melhor resultado, reduzindo as temperaturas em 10,05%. Contudo, duplicando o caudal dos lubrificantes para 100 ml/h, o óleo de corte convencional conseguiu uma redução de 18,06%, contra uma redução de 16,84% com a aplicação das águas ruças.

Para reforçar o terceiro objetivo, sob o ponto de vista da diminuição da temperatura de corte e da rugosidade superficial das peças maquinadas, é possível concluir que as águas ruças têm potencial para serem utilizadas como fluido de corte, sendo particularmente eficazes, na diminuição de temperaturas de maquinagem. No que toca à diminuição da rugosidade superficial, verificou-se que as águas ruças também têm potencial, embora mais reduzido.

Nos ensaios tribológicos, verificou-se que as águas ruças têm um fraco desempenho na redução do atrito, quando comparado com o óleo de corte convencional. No entanto, comparando com o coeficiente de atrito a seco, conseguiu-se reduzir este coeficiente de 0,79 para 0,27-0,28. O ensaio com óleo de corte convencional manteve-se nos 0,16. É ainda de salientar, que a água destilada conseguiu menor coeficiente de atrito do que as águas ruças (0,26). Ainda destes ensaios, é possível concluir que o óleo de corte convencional se manteve bastante estável durante os dois ensaios e, pelo contrário, as águas ruças mantiveram-se mais instáveis. A água destilada teve um comportamento semelhante às águas ruças, o que se pode concluir que, para as águas ruças conseguirem um comportamento mais próximo do óleo de corte convencional, será necessário a aplicação de outros elementos, por exemplo aumentar a quantidade de gordura e outros aditivos.

A aposta das águas ruças como lubrificante de corte pode ser viável, pois, trata-se de um fluido biológico e, por isso, tem características mais amigas do ambiente, comparando com o óleo de corte convencional. Pelos ensaios realizados mostrou-se capaz de diminuir a rugosidade e

temperatura em relação à maquinação a seco. Em contrapartida, as suas características são menores do que os óleos de corte convencionais e é de lembrar que, com a utilização deste fluido, as peças e a máquina apresentaram manchas e, por isso, é necessário fazer uma lavagem das mesmas continuamente ou adicionar aditivos (antioxidantes) ao fluido de corte (águas ruças) de modo a minimizar este efeito.

6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Durante o presente estudo foram analisados algumas variáveis importantes durante os processos de maquinação, a rugosidade superficial e as temperaturas das aparas, no entanto, num futuro trabalho poderia ser estudado o desgaste da ferramenta de corte nas mesmas condições.

Verificou-se que as águas ruças poderão ter potencial para serem utilizadas como fluido de corte, contudo, seria interessante adicionar a este fluido aditivos, tais como nanopartículas e analisar como se irá comportar o fluido.

Com os ensaios de tribologia verificou-se a ineficácia das águas ruças na redução do coeficiente de atrito, estes ensaios poderão ser repetidos com a adição de aditivos ao fluido.

O atomizador MQL mostrou-se muito sensível, seria interessante desenvolver um atomizador MQL, no qual o fluido estaria num vaso pressurizado e, assim, testar se o caudal de saída se iria tornar mais estável.

Referências

- [1] R. M. E Sousa, D. M. Iceri, R. S. Destro, M.H. Oikawa, E.C. Bianchi, P.R. De Aguiar, C.A. Fortug, “Retificação de Cerâmica de Alumina Relacionada com Diferentes Técnicas de Lubri-Refrigeração: Convencional e Mínima Quantidade de Lubrificacao,” *Ceramica*, vol. 57, no. 341, pp. 76–84, 2011.
- [2] P. Mhatre, R. Panchal, A. Singh, and S. Bibyan, “A Systematic Literature Review on the Circular Economy Initiatives in the European Union,” *Sustain. Prod. Consum.*, vol. 26, pp. 187–202, 2021.
- [3] N. Nguyen and L. Johnson, “Consumer Behaviour and Environmental Sustainability,” *J. Consum. Behav.*, vol. 19, pp. 539–541, 2020.
- [4] U. Karaguzel, M. Bakkal, and E. Budak, “Modeling and Measurement of Cutting Temperatures in milling,” *Procedia CIRP*, vol. 46, pp. 173–176, 2016.
- [5] G. Boothroyd and W. Knight, *Fundamentals of Machining and Machine tools*, Second Edi. New York, 1989.
- [6] J. Z. Zhang, J. C. Chen, and E. D. Kirby, “Surface Roughness Optimization in an End-Milling Operation Using the Taguchi Design Method,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 184, no. 1–3, pp. 233–239, 2007.
- [7] M. Tolouei-Rad and I. M. Bidhendi, “On the Optimization of Machining Parameters for Milling Operations,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 37, no. 1, pp. 1–16, 1997.
- [8] M. Bayoumi and A. Abdellatif, “Effect of Surface Finish on Fatigue Strength,” *Eng. Fract. Mech.*, vol. 51, no. 5, pp. 861–870, 1995.
- [9] W. Sai, N. Salah, and J. Lebrun, “Influence of Machining by Finishing Milling on Surface Characteristics,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 41, no. 3, pp. 443–450, 2001.
- [10] M. S. Shahrom, N. M. Yahya, and A. R. Yusoff, “Taguchi Method Approach on Effect of Lubrication Condition on Surface Roughness in Milling Operation,” *Procedia Eng.*, vol. 53, pp. 594–599, 2013.
- [11] V. Dubey, A. Kumar Sharma, and R. Kumar Singh, “Study of Various Cooling Methodology Used in Machining Processes,” *Mater. Today Proc.*, vol. 21, pp. 1572–1576, 2020.
- [12] M. Rifat, M. H. Rahman, and D. Das, “A Review on Application of Nanofluid MQL in machining,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 1919, no. 2017, 2017.
- [13] S. Hara, “Cutting Fluids,” *Japanese J. Tribol.*, vol. 39, no. 10, pp. 1261–1271, 1994.

- [14] N. A. Negm, N. G. Kandile, A. M. Abd El Salam, and S. A. Mansour, "Performance Evaluation of Cutting Fluids Additives Developed from Recycling of Polyethylene Terephthalate," *IOSR J. Appl. Chem.*, vol. 7, no. 5, pp. 69–79, 2014.
- [15] P. Kumar, S. A. H. Jafri, P. K. Bharti, and M. A. Siddiqui, "Study of Hazards Related To Cutting Fluids and Their Remedies," vol. 3, no. 7, pp. 1225–1229, 2014.
- [16] B. Boswell, M. N. Islam, I. J. Davies, Y. R. Ginting, and A. K. Ong, "A Review Identifying the Effectiveness of Minimum Quantity Lubrication (MQL) During Conventional Machining," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 92, no. 1–4, pp. 321–340, 2017.
- [17] S. Zhang, J. F. Li, and Y. W. Wang, "Tool Life and Cutting Forces in End Milling Inconel 718 Under Dry and Minimum Quantity Cooling Lubrication Cutting Conditions," *J. Clean. Prod.*, vol. 32, pp. 81–87, 2012.
- [18] M. Sarikaya and A. Güllü, "Multi-Response Optimization of Minimum Quantity Lubrication Parameters Using Taguchi-Based Grey Relational Analysis in Turning of Difficult-to-Cut Alloy Haynes 25," *J. Clean. Prod.*, vol. 91, pp. 347–357, 2015.
- [19] S. J. Skerlos, K. F. Hayes, A. F. Clarens, and F. Zhao, "Current Advances in Sustainable Metalworking Fluids Research," *Int. J. Sustain. Manuf.*, vol. 1, no. 1–2, pp. 180–202, 2008.
- [20] D. Pereira, J. Ribeiro, and L. Queijo, "Otimização de Parâmetros de Fresagem Usando o Método de Taguchi com a Análise Relacional de Grey," *Iberoam. J. Industrial Eng.*, vol. 10, no. 19, pp. 56–70, 2018.
- [21] J. Ribeiro, *Tecnologia Mecânica II- IPB*. .
- [22] D. Ferraresi, *Fundamentos da Usinagem dos Metais*. Estado de São Paulo, Brasil: Editora Edgard Blocher LTDA., 1969.
- [23] V. Chiaverini, "Tecnologia Mecânica - Processos de Fabricação e Tratamento - Volume II." McGraw-Hill p. 315, 1986.
- [24] Á. R. Machado and J. Wallbank, "The Effect of Extremely Low Lubricant Volumes in Machining," *Wear*, vol. 210, no. 1–2, pp. 76–82, 1997.
- [25] C. Sandvik, *Modern Metal Cutting: a Practical Handbook*. Sweden, 1994.
- [26] A. Teixeira da Rocha, *Tecnologia Mecânica Volume III*, 6ª Edição. Coimbra: Coimbra Editora, 1994.
- [27] M. P. Groover, *Fundamentals of Modern Manufacturing Materials, Processes, and Systems*, Fourth Edi. John Wiley & Sons, INC., 2010.

- [28] A. R. Machado, A. M. Abrao, T. Coelho, Reginaldo, and M. Silva, *Teoria da Usinagem dos Materiais*, Vol. 2. São Paulo: Blucher, 2009.
- [29] J. P. Davim, *Princípios da Maquinagem*. Coimbra: Livraria Almedina, 1995.
- [30] O. Erik, F. D. Jones, and H. H. Horton Holbrook L. Ryffel, *Machinery's Handbook*, 27th Editi. New York: Industrial Press Inc., 2004.
- [31] A. Anand, K. Vohra, M. I. Ul Haq, A. Raina, and M. F. Wani, "Tribological Considerations of Cutting Fluids in Machining Environment: A review," *Tribol. Ind.*, vol. 38, no. 4, pp. 463–474, 2016.
- [32] E. Sujová, "Contamination of the Working Air Via Metalworking Fluids Aerosols," *Eng. Rev.*, vol. 32, no. 1, pp. 9–15, 2012.
- [33] Y. M. Shashidhara and S. R. Jayaram, "Vegetable Oils as a Potential Cutting Fluid-An Evolution," *Tribol. Int.*, vol. 43, no. 5–6, pp. 1073–1081, 2010.
- [34] R. Kreivaitis and M. Gumbytė, "Investigation of Mixture of Vegetable Oil and Synthetic Esters as Environmentally Friendly Base Stock for Low-Temperature Lubrication Applications," *Tribol. Ind.*, vol. 40, no. 3, pp. 401–409, 2018.
- [35] G. Burton, C. S. Goo, Y. Zhang, and M. B. G. Jun, "Use of Vegetable Oil in Water Emulsion Achieved Through Ultrasonic Atomization as Cutting Fluids in Micro-Milling," *J. Manuf. Process.*, vol. 16, no. 3, pp. 405–413, 2014.
- [36] D. Martins, "Valorização de Resíduos da Indústria do Azeite: Análise do Potencial da Recuperação de Antioxidantes e de Água," *Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra*, p. 92, 2016.
- [37] L. Oliveira, "Tratamento de Águas Ruças por Fitorremediação com Lemna Minor ou por Biossorção com Cortiça," *Faculdade de Ciências da Universidade do Porto*, 2013.
- [38] J. Singh, S. S. Gill, M. Dogra, and R. Singh, "A Review on Cutting Fluids Used in Machining Processes," *Eng. Res. Express*, vol. 3, no. 1, p. 012002, 2021.
- [39] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, "Minimum Quantity Lubrication for Machining - Operations," *Publisher Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV)* November, 2010.
- [40] V. S. Sharma, G. Singh, and K. Sorby, "A Review on Minimum Quantity Lubrication for Machining Processes," *Mater. Manuf. Process.*, vol. 30, no. 8, pp. 935–953, 2015.
- [41] A. Ribeiro, "Aplicação de Mínima Quantidade de Lubrificante no Fresamento do Aço SAE 8640." *Faculdade de Brasília -UnB-Engenharia Automotiva*

- [42] A. Correia and J. Davim, “Efeito da Lubrificação Mínima (MQL-Minimal Quantity of Lubricant) na Maquinagem de uma Liga de Alumínio,” *Análise Exp. Tensões* ISSN, pp. 27–34, 2006.
- [43] J. C. da S. Neto, *Metrologia e Controle Dimensional*. LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora 2012.
- [44] P. Guedes, *Metrologia Industrial*. Lisboa: Lidel, Elsevier Editora 2011.
- [45] M. C. Shaw, *Metal Cutting Principles*, Second Edi. New York Oxford, 2005.
- [46] M. de O. Moreira, A. M. Abrão, R. A. M. Ferreira, and M. P. Porto, “Temperature Monitoring of Milling Processes Using a Directional-Spectral Thermal Radiation Heat Transfer Formulation and Thermography,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 171, p. 121051, 2021.
- [47] Flir, *The Ultimate Infrared Handbook for R&D Professionals*. FLIR Systems Incorporated, 2015.
- [48] Y. He et al., “Infrared Machine Vision and Infrared Thermography with Deep Learning: A review,” *Infrared Phys. Technol.*, vol. 116, no. October 2020, p. 103754, 2021.
- [49] P. A. Radi, “Tribologia , Conceitos E Aplicações,” *An. do 13O Encontro Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA*, vol. 1991, pp. 1–13, 2007.
- [50] P.A. Gonçalves, L. Vieira, V. T. Airoidi, “Tribological Tools for Lubricants Development for Space 1- Introduction,” no. January 2015, pp. 1–12.
- [51] R. M. Drumond, E. R. da Silva, P. S. Martins, and E. Cheikh, “Avaliação do Desgaste por Microabrasão do Aço AISI M-35 Revestido Por DLC – Diamond-Like Carbon.,” *Rev. Eletrônica Perspect. da Ciência e Tecnol. - ISSN 1984-5693*, vol. 12, no. December, 2020.
- [52] Simone Senesathit, “Study and Investigate Effects of Cutting Surface in CNC Milling Process for Aluminum Based on Taguchi Design Method,” *Int. J. Eng. Res.*, vol. V8, no. 12, pp. 288–295, 2019.
- [53] “Suporte ao Minitab,” 2019. [Online]. Available: <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/anova/supporting-topics/basics/what-is-anova/>. [Accessed: 08-Jul-2021].
- [54] I. Oliveira, “Complementos de Estatística-Testes de Hipóteses a k Médias a Análise da Variância,” Vila Real, 2020- UTAD

Anexos

Manual de Utilização Rápida

FLIR SC7000



Câmara Flir SC7000

A câmara FLIR SC700 é uma câmara muito versátil, com alta sensibilidade de precisão, resolução espacial e velocidade. Estas câmaras são projetadas para uso académico e aplicações industriais, em que estão disponíveis uma ampla gama de detetores para conseguir ser aplicada nas diversas análises simples e multiespectrais.

Esta série vem com uma roda de filtro removível e motorizada de 4 posições permitindo assim obter imagens numa parte selecionada do espectro eletromagnético em formatos de 640 x 512 ou 325 x 256 pixels com alta sensibilidade e níveis de ruído na ordem dos 20 mK e permite que um subconjunto da imagem total seja lido seletivamente com o tamanho da janela ajustável pelo utilizador. Os tamanhos de janela de visualização podem ser escolhidos arbitrariamente e são facilmente definidos usando o controlo da câmara no próprio *software*.

O tempo de integração é ajustável em incrementos de nanossegundos. A série FLIR SC7000 funciona perfeitamente em conjunto com o *software FLIR ResearchIR Max* permitindo a visualização intuitiva, gravação e processamento avançado dos dados térmicos fornecidos pela câmara.

Software FLIR ResearchIR Max

O Software FLIR ResearchIR Max é uma ferramenta bastante útil para trabalhar com a câmara FLIR SC7000. Este software permite aceder aos controlos da câmara (câmara virtual), obter imagens, e fazer a análise dessas imagens.

O software pode ser obtido em:

<https://support.flir.com/SwDownload/app/RssSWDownload.aspx?ID=12401>

Instalação:

- Correr o Setup
- Na parte de opções adicionais **instalar Pleora iPort Software GigE camera support** (ilustração 1).

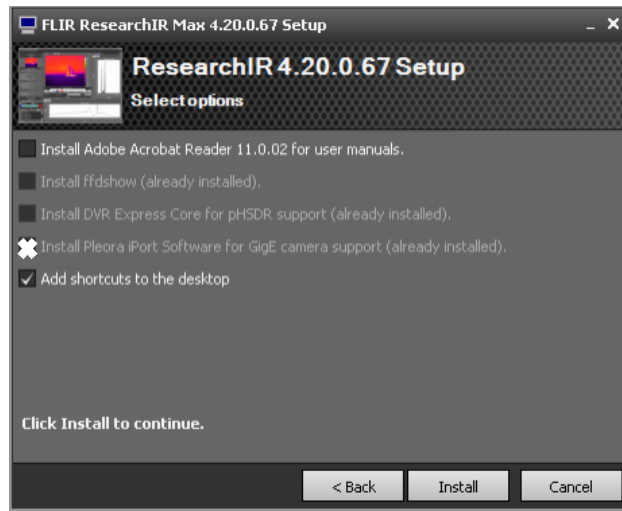


Ilustração 1 Instalação Research IR

Após a instalação é necessário ir à pasta **Pleora Technologies Inc** e correr o **Driver installation Tool** (ilustração 2).

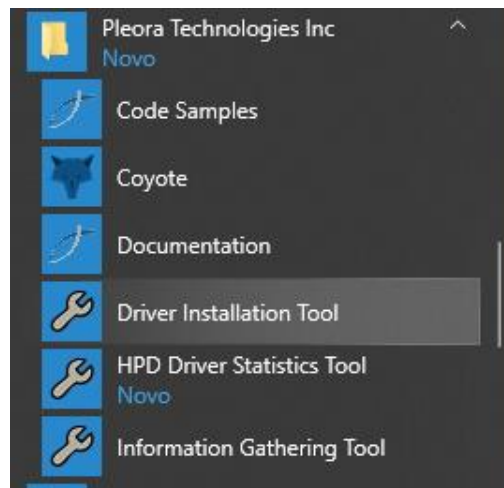


Ilustração 2 Instalação Pleora Technologies

Deve agora ser instalado a driver (ilustração 3):

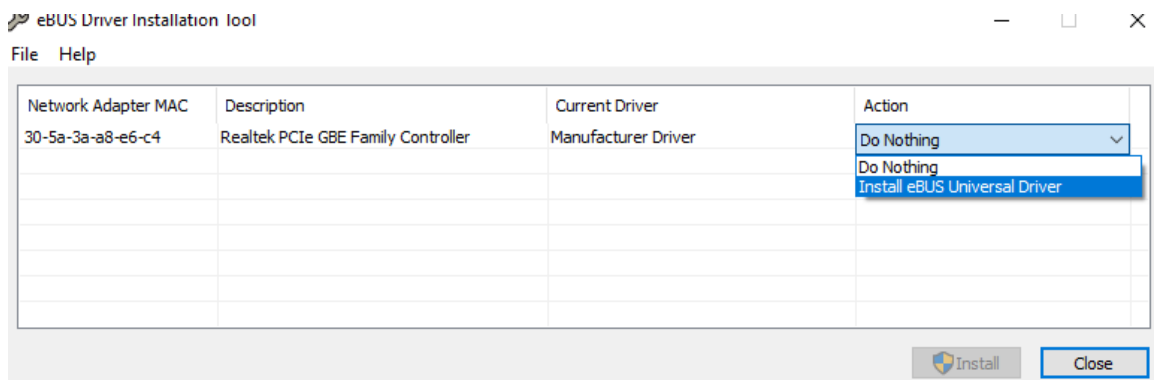


Ilustração 3 Instalação da eBUS Universal Driver

Processo de instalação completo!

Pode se também fazer o download do software Pleora eBUS driver (v. 3.3) em:

<https://support.flir.com/SwDownload/app/RssSWDownload.aspx?ID=171>

Licenças

-É possível ativar uma licença gratuita de 30 dias, disponível no site da FLIR.

-Existe também uma Hardware Dongle (Pen), com a licença de uso do software, **mas não foi utilizada nem testada**, para não haver conflito de licenças, caso este USB Dongle já estivesse em uso em outro computador. Por isso a Pen não foi utilizada, foi apenas testada a licença gratuita de 30 dias.

Primeiros Passos

- É importante desligar o antivírus para gravações de alta velocidade.

- Limpar a lente com cuidado utilizando soprador de ar manual, não comprimido.

Ligações da câmara (ilustração 4):



Ilustração 4 Ligações da câmara

-Ligar o cabo da corrente elétrica

-Ligar o cabo de rede na câmara e na entrada de rede do computador

-Ligar a câmara no botão ON/OFF

Inicialmente a câmara faz um ruído durante cerca de 7 minutos, no qual durante este tempo enquanto emite o ruído a câmara não está disponível para ser utilizada.

Utilização do software

Após o ruído diminuir, é possível iniciar o software ResearchIR Max e selecionar a câmara (ilustração 5). Se não aparecer disponível deve-se fazer uma nova pesquisa e confirmar que está ligado o cabo de rede corretamente e o computador está a obter esses dados de rede.

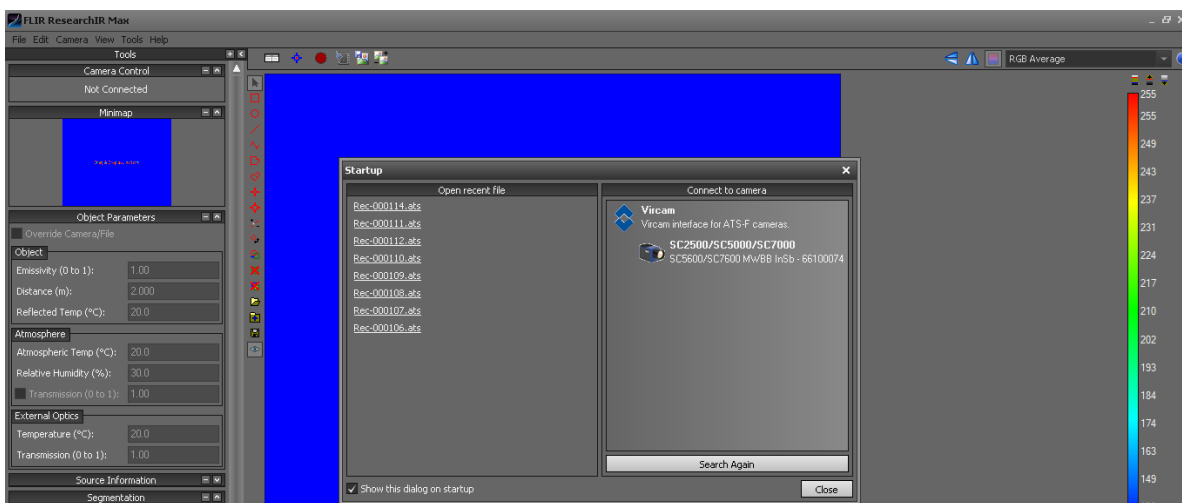


Ilustração 5 Primeiros passos no software ResearchIR

A câmara SC7000 tem 4 tempos de integração e 2 intervalos de obtenção de temperatura (-20°C aos 300°C e dos 300°C até aos 1500). Estes tempos de integração e os intervalos de obtenção da temperatura podem ser alterados no menu **Camera-Control** (ilustração 6).

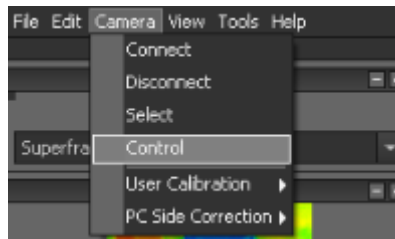


Ilustração 6 Controlos da câmara

Deste modo acede-se à câmara virtual, no qual é possível alterar todos os parâmetros da câmara (ilustração 7).



Ilustração 7 câmara virtual

-No **Setup- Presets** é possível selecionar a lente que está a ser utilizada e a faixa de temperaturas que se pretende estudar (ilustração 8):

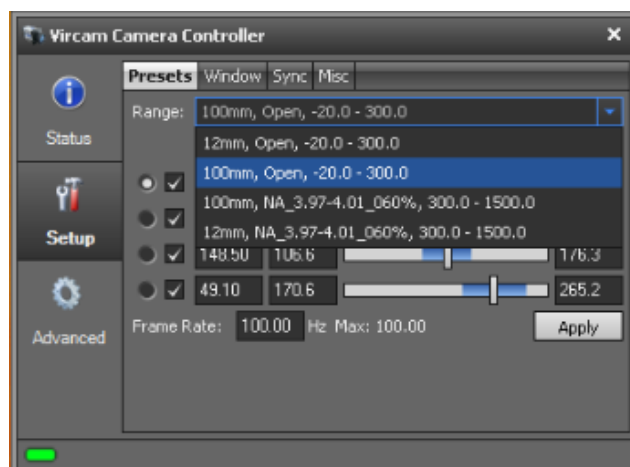


Ilustração 8 Escolha da lente e faixa te temperatura

Ainda neste *setup* (ilustração 9), é possível verificar os intervalos de integração e obtenção de temperaturas. Cada tempo de integração pode dar origem a 4 ficheiros “SEQ” ou apenas a 1 ficheiro “SEQ”.

Os tempos de integração pequenos são aplicados a temperaturas mais altas e os tempos de integração grandes são aplicados a temperaturas mais baixas.

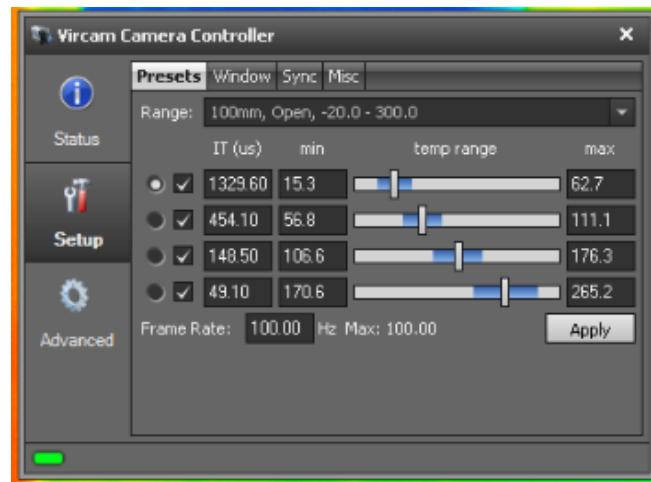


Ilustração 9 Tempos de integração

-No menu seguinte (**Window**) é possível alterar a janela de visualização (ilustração 10):

640x512; 320x256; 240x?



Ilustração 10 Escolha da janela de visualização

-No menú **Sync** é possível sincronizar com gerador de sons (Micro) e sincronizar com disparador (interruptor)

Os modos de integração: IWR – Mais rápido 1000Hz; e ITR- Mais lento 300Hz

No menu **Advanced**:

-AGC/Vídeo- Controlo de vídeo Analógico

-Correction- NUC (Non-Uniform Correction)

-Perform correction:

1º Next

2º Aproximar algo uniforme para tapar a lente da câmara e prosseguir como indica o software.

(Informações mais técnicas sobre este passo podem ser encontradas no PDF gerado durante a instalação do software RechearchIR Manual)

É também possível definir emissividades, distância de gravação, temperatura refletida, entre outras (ilustração 11).

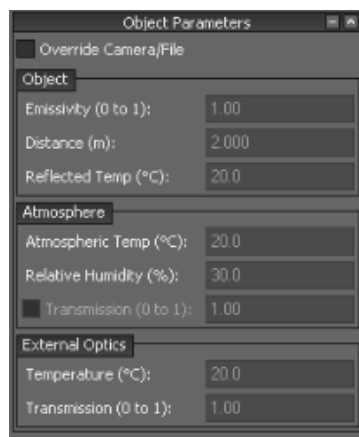


Ilustração 11 Outras opções

Visualização de Imagens

Esta câmara não possui focagem automática, é necessário fazer uma focagem manual.

Caso a imagem esteja com interferências, como que se estivesse a tentar sobrepor várias imagens é porque está selecionado o modo *Display all*, para se conseguir uma única imagem deve ser selecionada a última opção: *Dynamic Range Extension (SF)* (ilustração 12).

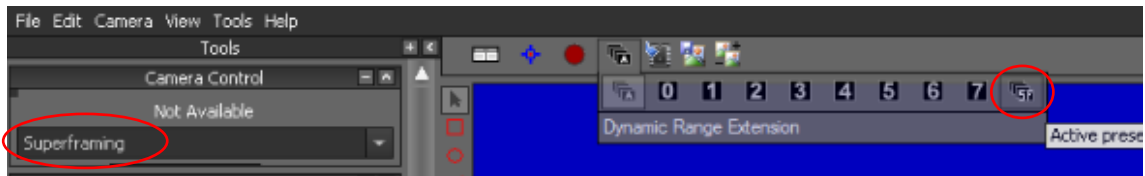


Ilustração 12 Visualização de imagens

Este menu permite ao utilizador seleccionar o display que pretende visualizar.

O Superframing deve estar ativo. (lado esquerdo por baixo dos menus)

Deve se fazer a focagem manualmente na objetiva.

No menu View- Palette é possível alterar o esquema de cores de visualização (ilustração 13).

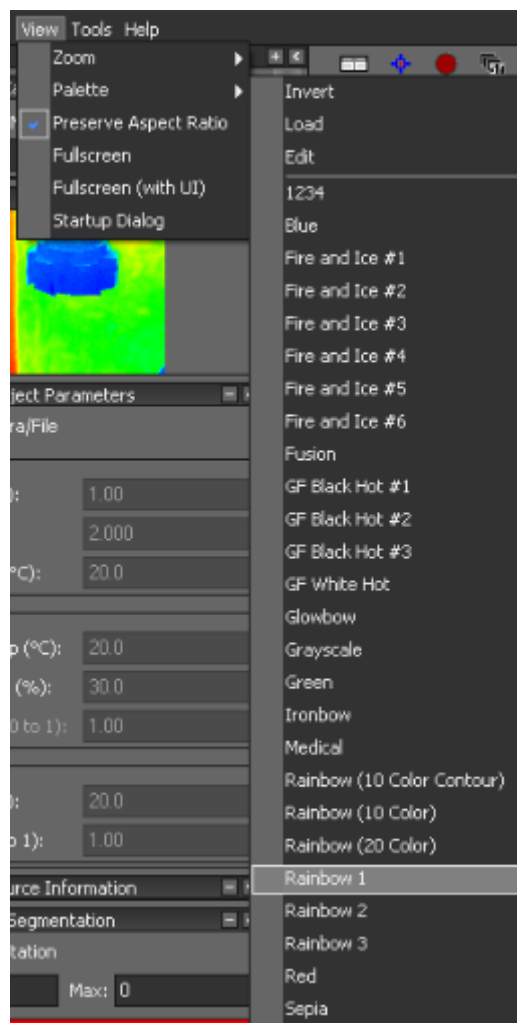


Ilustração 13 Escolha das cores de visualização

Este esquema de cores pode ser alterado a qualquer momento, até depois do vídeo gravado quando se faz o tratamento da imagens.

Opções de gravação (ilustração 14):

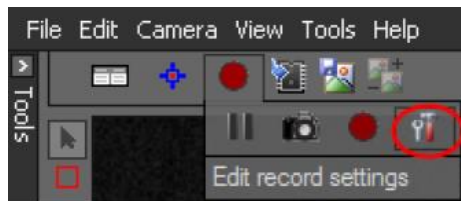


Ilustração 14 Opções de gravação

Nas **opções de gravação** (ilustração 15) é possível alterar o diretório dos vídeos, o modo de gravação entre outras.

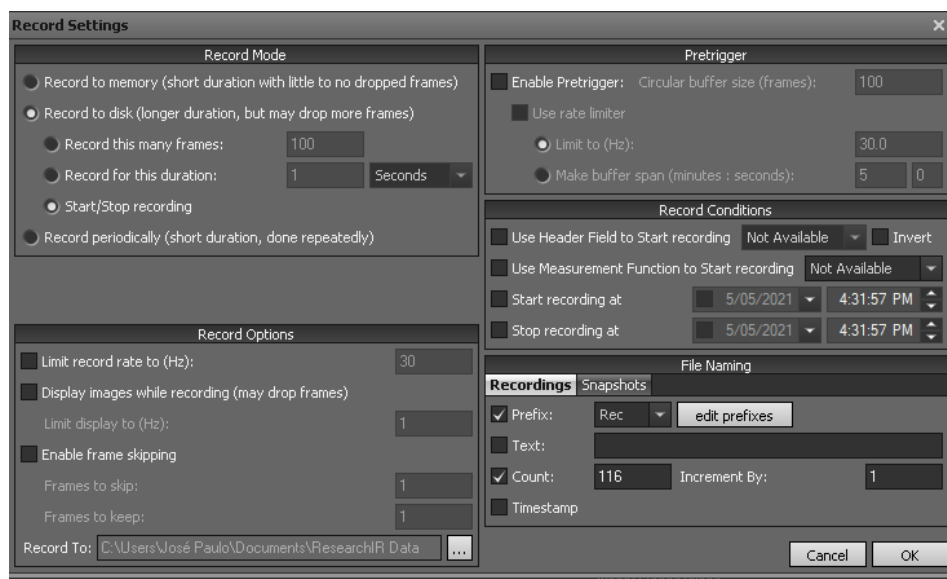


Ilustração 15 Alteração das opções de gravação

Para dar início à gravação deve-se carregar no botão vermelho.

Para dar como concluída a gravação deve-se ter em conta a opção selecionada no menu de gravação, se for pretendido dar início e fim a gravação manualmente deve ser selecionado a opção **Start/Stop recording**, por outro lado podem ser definidos número de frames ou segundos a serem gravados.

Tratamento dos dados

Em File-Open é possível abrir os vídeos já obtidos (ilustração 16).

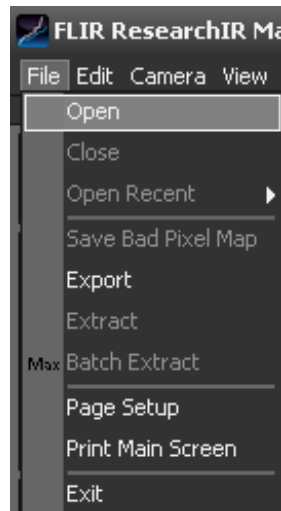


Ilustração 16 Abertura dos vídeos já gravados

É possível ver os vídeos frame a frame ou de um modo seguido.

Para se visualizar todos os frames e em todas as faixas de temperatura deve-se usar a opção Display all Presents (ilustração 17), caso contrário dependendo da opção selecionada pode passar frames e com faixas de temperaturas diferentes.



Ilustração 17 Visualização dos frames

No menu inferior pode ser alterado o tipo de escala das temperaturas, inclusive pode-se ajustar a escala à imagem ou de forma manual (ilustração 18):

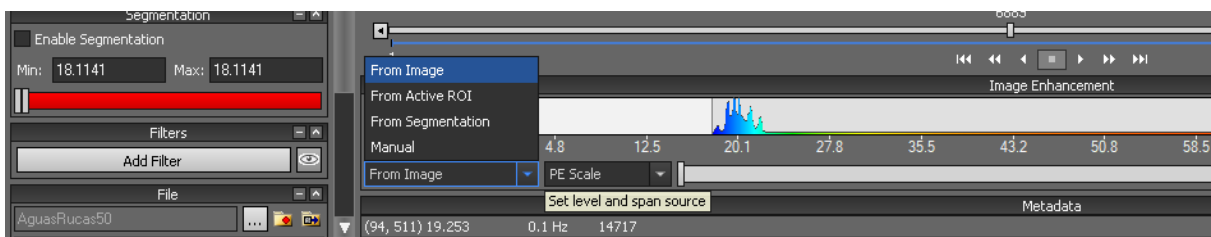


Ilustração 18 Alteração de escala de temperaturas

É possível também alterar a escala de temperaturas que se pode visualizar:

Por exemplo na ilustração 19 usou se a opção de atribuir a escala de cores conforme a imagem:

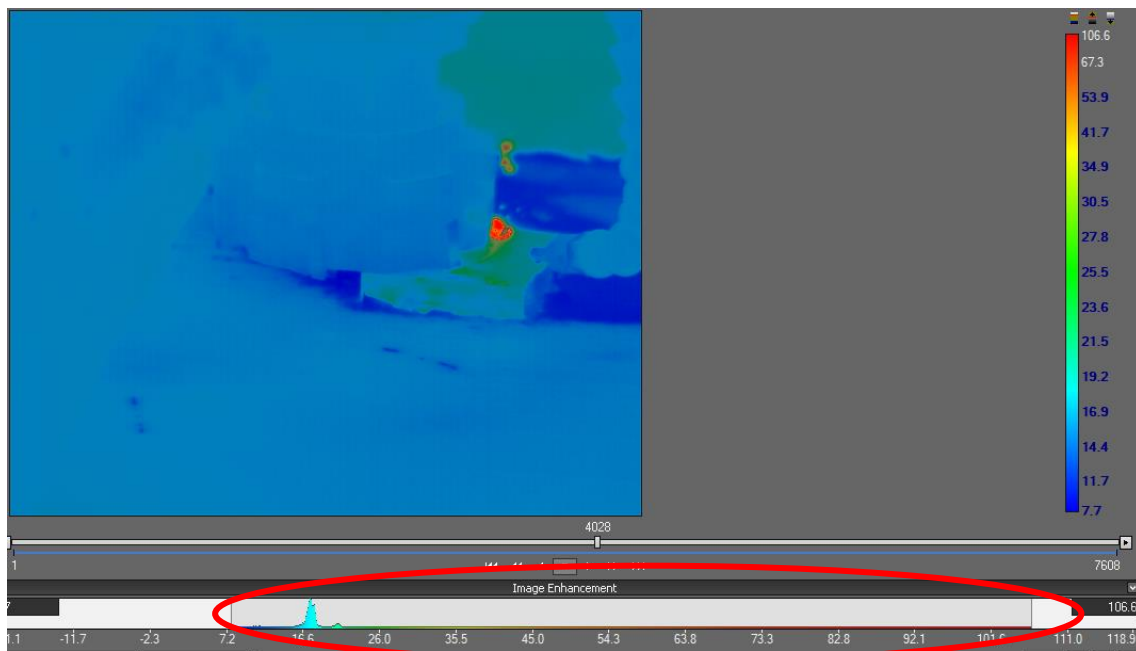


Ilustração 19 Escala de temperaturas total

No mesmo frame alterou-se a visualização pretendida de temperaturas entre 16°C e 23°C no gráfico inferior *Image Enhancement* (ilustração 20).

Deste modo tem-se mais atenção à faixa de temperaturas que se pretende ver

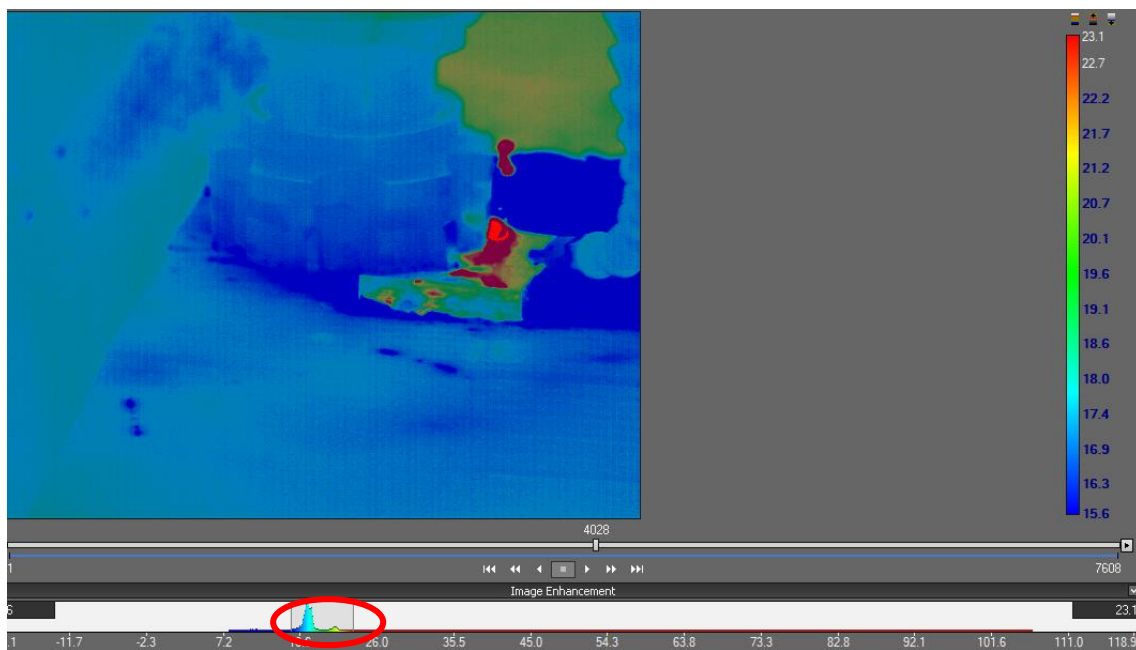


Ilustração 20 faixa de temperaturas alterada

As zonas que se encontram acima ou abaixo desta faixa de temperatura que foi alterado manualmente, passando o cursor do rato ele informa a temperatura real (ilustração 21):

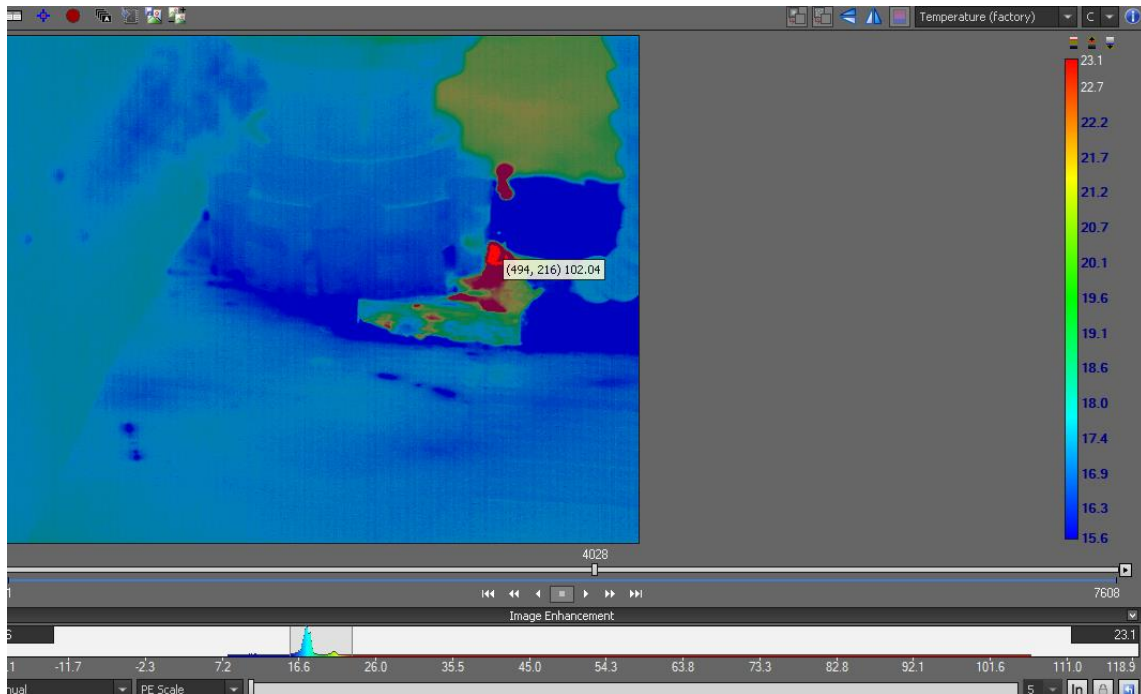


Ilustração 21 Visualização das temperaturas manualmente

Para analisar a temperatura apenas em determinadas áreas é possível desenhar por exemplo caixas (ilustração 22):

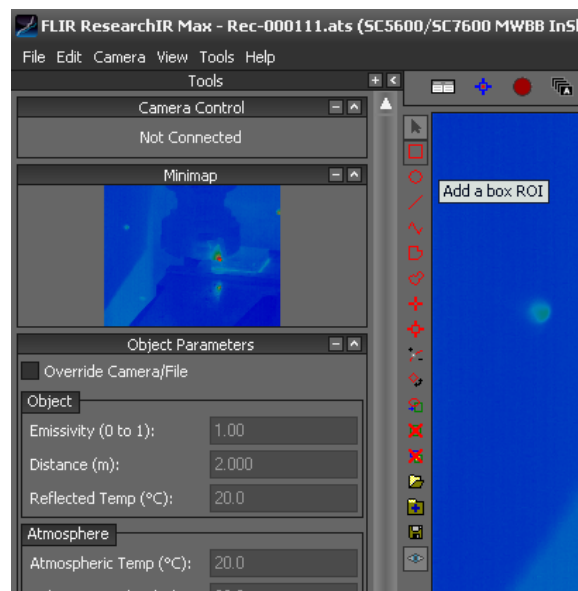


Ilustração 22 Análise de temperaturas em áreas específicas

De seguida podem-se seguir as várias ferramentas (ilustração 23):

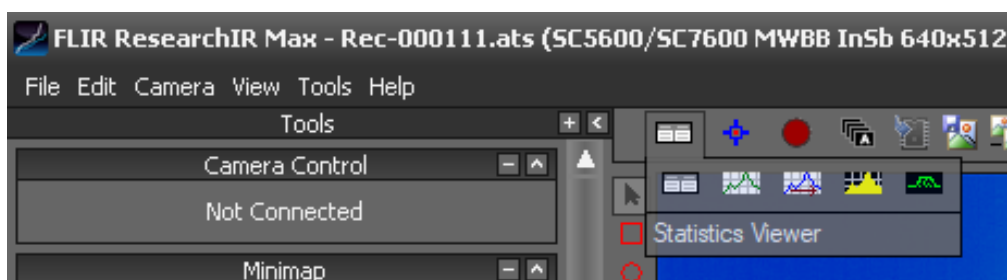


Ilustração 23 Ferramentas de análise de imagens

Recorrendo por exemplo ao *Statistics Viewer* encontra-se a seguinte janela (ilustração 24).

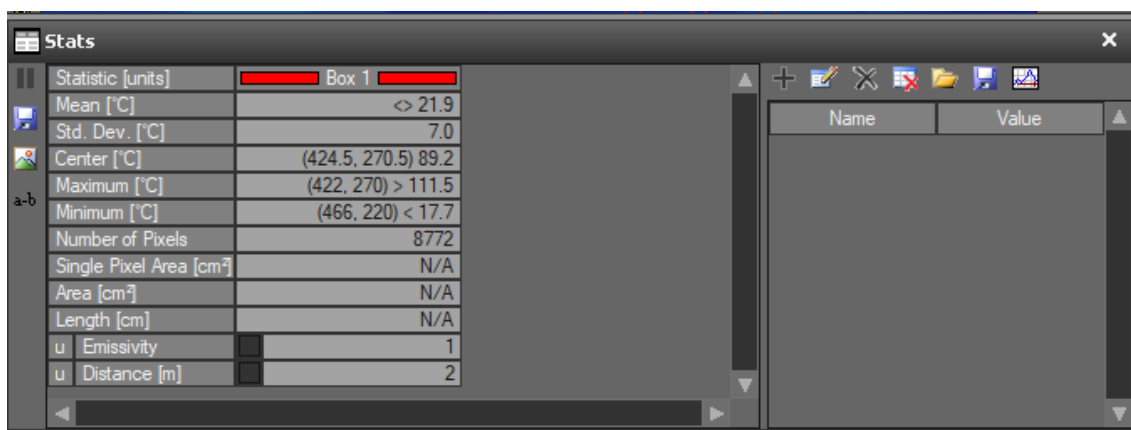


Ilustração 24 Caixa de análise de temperaturas em zonas específicas

Nesta janela apenas aparecem as temperaturas que se encontram dentro da caixa desenhada (ilustração 25)

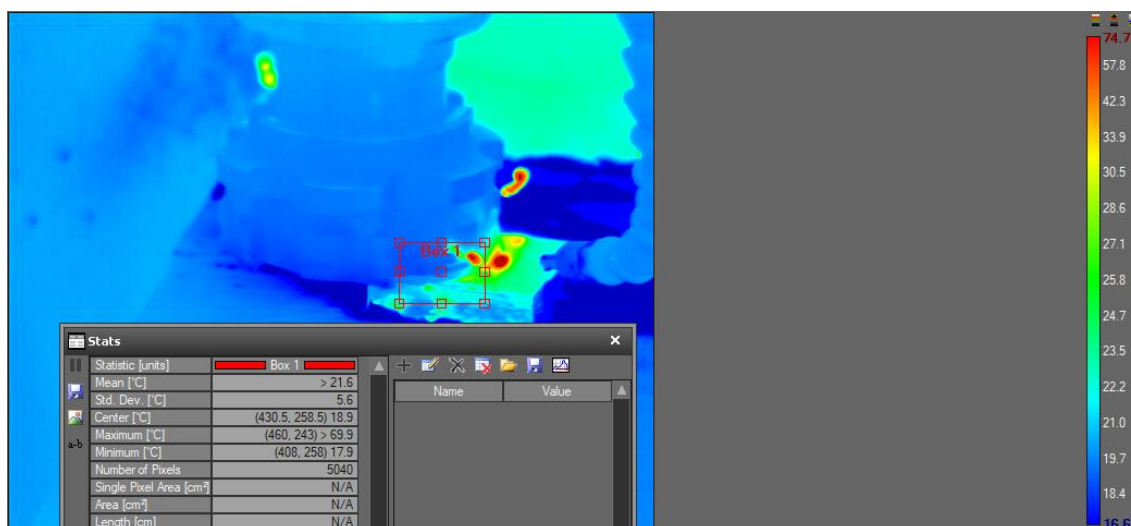


Ilustração 25 Diferença na temperatura máxima na caixa, com a temperatura máxima em toda a imagem

No caso representado verifica-se que na zona seleccionada a temperatura máxima é de 69.9°C. No entanto em outras zonas obtiveram-se temperaturas máximas na ordem dos 74.7 °C.