

# **Estudo Comparativo para Diferentes Condições de Lubrificação e de Lubrificantes de Corte**

**Nuno Teiga Almeida Morais**

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

**30 de Outubro de 2020**



# **Estudo Comparativo para Diferentes Condições de Lubrificação e de Lubrificantes de Corte**

**Nuno Teiga Almeida Morais**

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

Orientadores:

Professor Doutor João Pinto Castro Ribeiro

**30 de Outubro de 2020**



Dedico este trabalho:

Este trabalho de pesquisa é inteiramente dedicado aos meus pais. Os dois maiores incentivadores das realizações dos meus sonhos.



# Agradecimentos

---

Esta dissertação, reúne o contributo de outras pessoas sem o qual não teria sido possível a concretização da mesma. Desde o início da licenciatura, e agora mestrado, tive a oportunidade de lidar com inúmeros docentes, para a qualidade de orientador neste trabalho elegi o que mais confiança me transmitiu ao longo destes anos.

Sendo assim é então de referir um enorme agradecimento ao meu orientador, Professor João Ribeiro, por todo o tempo dedicado, pela disponibilidade, pelo conhecimento que transmitiu nas suas áreas de especificação.

Ao Engenheiro Jorge Paulo e ao Sr. Abílio Marcelo pela disponibilidade prestada durante todos os ensaios que foram necessários realizar no laboratório.

Um agradecimento à Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Bragança, a qual me acolheu da melhor forma durante estes anos.

Não podia deixar de agradecer aos meus pais, por todo o apoio, compreensão, ajuda e amor transmitido desde sempre.

Para finalizar, agradecer aos meus amigos e colegas pela sua amizade, companheirismo, espírito de entreajuda e solidariedade que se criou, fazendo assim com que a conclusão do curso fosse mais fácil.



# Resumo

---

Nestes tempos, os maiores desafios para a indústria são o aumento da taxa de produção e o aumento da qualidade, com o mínimo custo possível. Para aumentar a taxa de produção é necessário aumentar a velocidade com que se trabalha, mas no caso do torneamento implica uma maior geração de calor na peça e na ferramenta o que tem consequências negativas no acabamento da peça e na vida útil da ferramenta. Para permitir o aumento da taxa de produção sem perda significativa da qualidade superficial, utilizam-se, frequentemente, métodos de lubrificação e refrigeração, mas estes acabam por ser dispendiosos. É aqui que entra a quantidade mínima de lubrificação e os fluídos naturais de base biológica, por exemplo a água ruça, devido às suas propriedades renováveis, biodegradáveis, mais ecológicas, e ao seu baixo custo de produção.

A quantidade mínima de lubrificação consiste na pulverização de um fluído com um fluxo de ar comprimido, isto permite diminuir drasticamente as quantidades de fluídos utilizadas e materiais que seriam utilizados num outro tipo de lubrificação, sendo assim mais barata e mais ecológica.

Na presente dissertação foi realizado um estudo para a viabilidade da utilização de água ruça como lubrificante e refrigerante, através da quantidade mínima de lubrificação, substituindo óleos de corte. Para obter um termo de comparação foi estudada a rugosidade superficial, na maquinagem do aço DIN CK45. Para tal, foram realizados ensaios sem lubrificação, com lubrificação e refrigeração de água ruça e, finalmente, com um óleo de corte. Para obter a menor rugosidade foram analisados os efeitos de três parâmetros de corte durante o processo de torneamento sendo eles a velocidade de corte, velocidade de avanço e penetração.

Com o Método de Taguchi foi possível determinar a matriz dos ensaios experimentais realizados neste trabalho, foi assim construída uma matriz ortogonal L9 e, posteriormente, determinou-se a melhor combinação de parâmetros para a rugosidade superficial e para a taxa de produção. Após os ensaios realizados para as diferentes condições de lubrificação e refrigeração, faz-se a medição da rugosidade superficial.

Segundo o Método de Taguchi conclui-se que a combinação  $V_c = 315$  [m/min],  $f_z = 0,16$  [mm/rot] e  $a_p = 0,9$  [mm] (ensaio 16) obteve o menor valor de rugosidade superficial ( $3,54 \mu\text{m}$ ). Relativamente à taxa de produção a melhor combinação foi a utilizada nos ensaios 9, 18 e 27, onde os parâmetros são:  $V_c = 315$  [m/min],  $f_z = 0,28$  [mm/rot] e  $a_p = 0,6$  [mm]. Corresponde a uma taxa de produção de  $52,92 \text{ cm}^3/\text{min}$  e uma razão S/N de 34,47 dB. Pode-se, também, concluir que as águas ruças têm potencial para ser utilizadas como fluido de refrigeração desde que associados a aditivos que diminuam a sua acidez e baixem o nível de bactérias.

**Palavras Chaves:** lubrificação, refrigeração, rugosidade superficial, torneamento, taxa de produção

# Abstract

---

In these times, the biggest challenges for the industry are the increase in the production rate and the increase in quality. In order to increase the production rate, it is necessary to increase the speed with which it works, but in the case of turning it implies a greater generation of heat in the workpiece and tool, which has negative consequences on the workpiece finish and tool life. To do this, lubrication and cooling methods are used, but they turn out to be expensive. This is where the minimum quantity lubrication and natural bio-based fluids come in, for example olive mill wastewaters, due to their renewable, biodegradable, more ecological properties, and their low production cost.

The minimum quantity lubrication consists of spraying a fluid with a flow of compressed air, this allows to drastically reduce the amounts of fluids used and materials that would be used in another type of lubrication, thus being cheaper and more environmentally friendly.

In this dissertation a study was carried out for the feasibility of using olive mill wastewaters as a lubricant and coolant, through the minimum quantity lubrication, replacing cutting oils. To obtain a comparison term, surface roughness was studied when machining DIN CK45. For this purpose, tests were carried out without lubrication, with olive mill wastewaters lubrication and cooling and finally with cutting oil. To obtain the lowest roughness, the effects of three cutting parameters during the turning process were analyzed, namely the cutting speed, feed speed and penetration

With the Taguchi Method it was possible to determine the matrix of the experimental tests carried out in this work, an orthogonal L9 matrix was thus constructed and, subsequently, the best combination of parameters for surface roughness and production rate was determined. After the tests carried out for the different lubrication and cooling conditions, the surface roughness is measured.

According to the Taguchi Method, it is concluded that the combination  $V_c = 315$  [m / min],  $f_z = 0.16$  [mm / rev] and  $a_p = 0.9$  [mm] (test 16) obtained the lowest value surface roughness (3.54  $\mu\text{m}$ ). Regarding the production rate, the best combination was used in tests 9, 18 and 27, where the parameters are:  $V_c = 315$  [m / min],  $f_z = 0.28$  [mm /

rot] and  $a_p = 0,6$  [mm]. It corresponds to a production rate of 52.92 cubic centimeters per minute and an S/N ratio of 34.47 dB. It can also be concluded that olive mill wastewaters have the potential to be used as a cooling fluid as long as associated with additives that reduce its acidity and lower the level of bacteria.

**Keywords:** lubrication, cooling, surface roughness, turning, production rate

# Índice

---

<b>1. Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1. Enquadramento .....	1
1.2. Objetivos .....	2
1.3. Organização dos capítulos .....	3
<b>2. Fundamentos Teóricos.....</b>	<b>5</b>
2.1. Processos de lubrificação e refrigeração.....	5
2.2. Flúidos de corte.....	8
2.2.1 Água ruça .....	11
2.3. Torneamento .....	12
2.4. Rugosidade Superficial .....	14
2.4.1 Rugosidade média ( $R_a$ ).....	15
2.4.2 Rugosidade máxima ( $R_y$ ) .....	16
2.4.3 Rugosidade total ( $R_t$ ).....	17
2.4.4 Rugosímetro .....	17
2.5. Taxa de Produção.....	19
2.6. Método de Taguchi .....	19
2.6.1. Conceito da função perda na qualidade de Taguchi.....	20
2.6.2. Estratégia de design das experiências .....	21
2.6.3. Taguchi e razão sinal-ruído .....	21
2.6.4. Análise de resultados.....	23
<b>3. Materiais e Métodos .....</b>	<b>25</b>
3.1. Equipamento e material utilizado .....	25

3.2.	Matriz ortogonal segundo o método de Taguchi .....	27
3.3.	Ensaio experimentais.....	29
<b>4.</b>	<b>Resultados Obtidos.....</b>	<b>34</b>
4.1.	Resultados obtidos segundo o método de Taguchi .....	34
4.1.1	Rugosidade Média ( $R_a$ ) .....	34
4.1.2	Rugosidade Máxima ( $R_y$ ).....	38
4.1.3	Taxa de Produção .....	42
<b>5.</b>	<b>Análise e Discussão dos Resultados .....</b>	<b>44</b>
5.1.	Método de Taguchi .....	44
5.1.1	Razão Sinal-Ruído .....	44
5.2.	Comparação das peças e aparas após os diferentes tipos de lubrificação e refrigeração	51
<b>6.</b>	<b>Conclusões e sugestões para trabalhos futuros .....</b>	<b>54</b>
6.1.	Conclusões .....	54
6.2.	Sugestões para trabalhos futuros.....	56
	<b>Referências bibliográficas .....</b>	<b>57</b>

# Lista de figuras

---

<i>Figura 1 – Algumas operações realizáveis no torno [9] .....</i>	12
<i>Figura 2 – Operação de torneamento cilíndrico exterior [9].....</i>	13
<i>Figura 3 – Rugosidade média [12] .....</i>	15
<i>Figura 4 – Rugosidade Máxima [12] .....</i>	17
<i>Figura 5 – Rugosidade Total [12].....</i>	17
<i>Figura 6 – Esquema de funcionamento de um rugosímetro [12] .....</i>	18
<i>Figura 7 - Gráfico da função perda de Taguchi [14] .....</i>	20
<i>Figura 8 – Serra elétrica.....</i>	26
<i>Figura 9 – Torno .....</i>	26
<i>Figura 10– Demonstração da utilização da pistola de pintura.....</i>	27
<i>Figura 11 – Rugosímetro utilizado .....</i>	27
<i>Figura 12 – Serrote de fita.....</i>	30
<i>Figura 13 – Blocos cortados nas dimensões referidas de 60 milímetros .....</i>	30
<i>Figura 14 – Bloco do ensaio 26 após torneamento .....</i>	31
<i>Figura 15 – Torneamento sem lubrificação.....</i>	31
<i>Figura 16 – Torneamento com lubrificação por MQL .....</i>	32
<i>Figura 17 – Medição de rugosidade de uma peça.....</i>	32
<i>Figura 18 – Posição das medições no bloco cilíndrico .....</i>	33
<i>Figura 19 – Rugosímetro em funcionamento .....</i>	33
<i>Figura 20 – Média de Ra (sem lubrificação).....</i>	35
<i>Figura 21 - Média de Ra (Água Ruça).....</i>	36
<i>Figura 22 - Média de Ra (Óleo de Corte).....</i>	37
<i>Figura 23 – Comparação da Média de Ra [<math>\mu\text{m}</math>] .....</i>	38

<i>Figura 24 – Média de Ry (sem lubrificação)</i> .....	39
<i>Figura 25 - Média de Ry (Água Ruça)</i> .....	40
<i>Figura 26 - Média de Ry (Óleo de Corte)</i> .....	41
<i>Figura 27 – Gráfico da taxa de produção</i> .....	43
<i>Figura 28 – Valor médio S/N para os diferentes parâmetros relativamente à rugosidade superficial (sem lubrificação)</i> .....	47
<i>Figura 29 - Valor médio S/N para os diferentes parâmetros relativamente à rugosidade superficial (Água Ruça)</i> .....	48
<i>Figura 30 - Valor médio S/N para os diferentes parâmetros relativamente à rugosidade superficial (Óleo de Corte)</i> .....	48
<i>Figura 31 – Valor médio S/N para os diferentes parâmetros relativamente à taxa de produção</i> .....	51
<i>Figura 32 – Da esquerda para a direita (ensaio 7, 16 e 25)</i> .....	52
<i>Figura 33 – Da esquerda para a direita aparas dos ensaios 7, 16 e 25</i> .....	52
<i>Figura 34 – Da esquerda para a direita (ensaio 9, 18 e 27)</i> .....	53
<i>Figura 35 – Da esquerda para a direita aparas dos ensaios 9, 18 e 27</i> .....	53

# Lista de tabelas

---

<i>Tabela 1 - Classe de Rugosidade [12]</i> .....	16
<i>Tabela 2 – Matriz ortogonal L9 segundo Taguchi</i> .....	21
<i>Tabela 3 – Composição química do DIN CK45</i> .....	25
<i>Tabela 4 – Valores de referência do fabricante</i> .....	26
<i>Tabela 5 – Alguns tipos de arranjos ortogonais de Taguchi</i> .....	28
<i>Tabela 6 – Valores dos diferentes níveis para cada parâmetro</i> .....	28
<i>Tabela 7 – Matriz ortogonal segundo Taguchi</i> .....	29
<i>Tabela 8 – Matriz L9 com o valor dos parâmetros escolhidos (sem lubrificação)</i> .29	
<i>Tabela 9 - Valores obtidos para <math>R_a</math> (Sem Lubrificação)</i> .....	34
<i>Tabela 10 - Valores obtidos para <math>R_a</math> (Água Ruça)</i> .....	35
<i>Tabela 11 - Valores obtidos para <math>R_a</math> (Óleo de Corte)</i> .....	36
<i>Tabela 12 - Valores obtidos para <math>R_y</math> (sem lubrificação)</i> .....	39
<i>Tabela 13 - Valores obtidos para <math>R_y</math> (Água-Ruça)</i> .....	40
<i>Tabela 14 - Valores obtidos para <math>R_y</math> (Óleo de Corte)</i> .....	41
<i>Tabela 15 – Valores obtidos para a taxa de produção</i> .....	42
<i>Tabela 16 – Valor da razão S/N da rugosidade superficial média</i> .....	45
<i>Tabela 17 – Abreviaturas para os vários níveis dos parâmetros</i> .....	46
<i>Tabela 18 – Resultados S/N para a rugosidade superficial, valores em dB</i> .....	46
<i>Tabela 19 – Valor da razão S/N da taxa de produção</i> .....	50
<i>Tabela 20 – Resultados S/N para a taxa de produção</i> .....	50

# Acrónimos

---

AISI – American Iron and Steel Institute

ANOVA – Análise Estatística da Variância

$a_p$  – Penetração

CN – Comando Numérico

CNC – Comando Numérico Computorizado

EP – Extrema Pressão

ESTIG – Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Bragança

$f_z$  – Velocidade de avanço

ISO – *International Organization for Standardization*

AL – Azoto Líquido

MQL – Quantidade Mínima de Lubrificação

TRM – Taxa de Remoção de Material

$R_a$  – Rugosidade média

$R_t$  – Rugosidade total

$R_y$  – Rugosidade máxima

$Tp$  – Taxa de produção

$V_c$  – Velocidade de corte

# 1. Introdução

---

## 1.1. Enquadramento

O século passado testemunhou avanços significativos no processo de torneamento, nas ferramentas de corte, na otimização das máquinas, nos fluídos de refrigeração e lubrificação. Esses desenvolvimentos aprimoraram, particularmente, a maquinagem de materiais difíceis de cortar, usados para aplicações aeroespaciais, na indústria de rolamentos, aplicações automobilísticas, entre outros. Na operação de torneamento, o atrito e a geração de calor na zona de corte são os problemas mais comuns que afetam a vida útil da ferramenta e o acabamento da superfície, além de outros resultados da maquinagem. A geração de calor desempenha um papel bastante negativo durante a transformação de materiais modernos devido às suas características peculiares, como baixa condutividade térmica, alta resistência à temperatura elevada, resistência ao desgaste e degradação química. Uma boa compreensão dos métodos de lubrificação e refrigeração na zona de corte, reduzem a geração de calor que levará a uma maquinagem mais eficiente e económica desses novos materiais [1].

Os sistemas de lubrificação e refrigeração realizam tarefas importantes no corte do metal. Reduzem a temperatura da peça e o atrito, garantindo, assim, uma temperatura uniforme da peça e da ferramenta, ajudando a manter os parâmetros de acabamento desejados. Atualmente, o sistema mais utilizado é o de refrigeração por inundação, mas este método tem bastantes desvantagens, tais como, o elevado custo na utilização das bombas, da compra, manutenção e eliminação do fluído, a limpeza da área de trabalho e da máquina-ferramenta e os problemas relacionados com a saúde do operador. Portanto, seria ideal implementar a maquinagem a seco, mas o efeito adverso na vida útil da ferramenta, temperaturas induzidas mais altas e desempenho inferior tornam, na maioria dos casos, esta opção inadequada [2].

Portanto, mesmo onde os operadores têm um processo de corte a seco definido, a quantidade mínima de lubrificação (MQL) pode, potencialmente, ajudar a prolongar a vida útil da ferramenta e aumentar o desempenho da maquinagem em termos de acabamento superficial, forças de corte e capacidade do processo. A quantidade mínima

de lubrificação tem crescido cada vez mais na área de maquinagem de corte de metal e, em muitas áreas, já foi estabelecida como uma alternativa ao processamento húmido convencional [2].

Aproximadamente, 85% dos lubrificantes usados em todo o mundo são óleos à base de petróleo. O uso destes óleos criou muitos efeitos negativos no meio ambiente. Este efeito negativo está ligado ao seu uso impróprio, que resulta na contaminação das águas superficiais e subterrâneas, poluição do ar, contaminação do solo, da agricultura e, conseqüentemente, dos produtos alimentares. Para superar esses desafios, várias alternativas aos fluídos de corte à base de petróleo estão a ser exploradas por cientistas. Estas alternativas incluem lubrificantes sintéticos, lubrificantes sólidos, e lubrificantes biológicos naturais à base de vegetais. Em geral, os óleos biológicos naturais são excelentes substitutos para óleos à base de petróleo pois estes são renováveis, menos tóxicos e facilmente biodegradáveis. Por essa razão, são candidatos potenciais para o uso em indústria como lubrificantes e fluídos de corte [3]. Tem-se, como exemplo, o óleo de girassol [4], o óleo de palma [5], o óleo de coco [6], o azeite [3], entre outros.

Nas últimas décadas, foram desenvolvidas muitas técnicas de otimização aplicadas à maquinagem, sendo as mais utilizadas a Lógica Fuzzy [7], os Algoritmos Genéticos [8], o método de Taguchi [9], Análise Relacional de Grey [10] e o Método de Resposta de Superfície [11].

O método de Taguchi possibilita a definição de matrizes ortogonais de experiências, cuja combinação entre diferentes parâmetros permite a determinação da combinação ótima para um determinado fator de controlo como, por exemplo, a rugosidade. Este método está, normalmente, associado a ferramentas estatística, como a análise de variância (ANOVA) que permite modelar alguma incerteza dos resultados experimentais do modo a estimar resultados futuros.

## **1.2. Objetivos**

O principal objetivo desta dissertação é o de avaliar a viabilidade de utilização de um desperdício agrícola (águas ruças) como fluído de corte de baixo impacto ambiental, por tratar-se de um material biodegradável. Para alcançar esse objetivo foram realizados

ensaios experimentais com o processo de torneamento, utilizando, para além das águas ruças, um lubrificante sintético especialmente desenvolvido para maquinagem e o torneamento a seco (sem qualquer lubrificação). Esses ensaios permitirão efetuar uma comparação entre os diferentes tipos de lubrificação e verificar se o fluido biológico tem as condições necessárias para ser uma alternativa viável como lubrificante de corte.

Como objetivos complementares, foram determinados os parâmetros ótimos de torneamento para minimizar a rugosidade superficial das peças e maximizar a taxa de produção para cada tipo de condições de lubrificação. Para o efeito, foi utilizado o método de Taguchi.

### **1.3. Organização dos capítulos**

A dissertação encontra-se organizada em 6 capítulos, de forma a facilitar a sua compreensão. O conteúdo destes pode ser sintetizado da seguinte forma:

- O **Capítulo 1 “Introdução”**, tem a finalidade de apresentar um enquadramento do trabalho, fazendo referência aos principais objetivos da dissertação e uma breve descrição da sua estrutura.

- O **Capítulo 2 “Fundamentos Teóricos”**, visa apresentar alguns fundamentos teóricos considerados relevantes para a correta compreensão do estudo apresentado nesta dissertação. No início, apresenta-se uma descrição dos principais processos de lubrificação e refrigeração, e dos fluídos de corte. Segue-se uma breve descrição do processo de maquinagem utilizado, que foi o torneamento. Seguindo-se os temas em estudo, a rugosidade superficial e a taxa de produção e, por fim, o método de otimização utilizado no trabalho, o método de Taguchi.

- O **Capítulo 3 “Materiais e Métodos”**, descreve a configuração experimental utilizada e os ensaios experimentais realizados no decorrer deste trabalho pelo método de Taguchi.

- O **Capítulo 4 “Resultados Obtidos”**, apresenta os resultados obtidos de cada ensaio experimental relativamente à rugosidade superficial e à taxa de produção.

- O **Capítulo 5 “Análise e Discussão dos Resultados”**, é dedicado à análise dos resultados obtidos e são efetuadas breves considerações aos mesmos.

- O **Capítulo 6 “Conclusões e sugestões para trabalhos futuros”**, são apresentadas as conclusões gerais do presente trabalho e apresentam-se também algumas sugestões para trabalhos futuros.

- Por último, é mencionada toda a bibliografia que serviu de suporte à elaboração desta dissertação e os anexos.

## 2. Fundamentos Teóricos

---

Este capítulo visa apresentar uns breves fundamentos teóricos considerados relevantes para a compreensão do estudo apresentado nesta dissertação. No início, apresenta-se uma breve descrição dos vários processos de refrigeração e lubrificação da peça e da ferramenta, exceto um processo que ocorre sem qualquer tipo de lubrificação e refrigeração. Irá também explicar-se, muito sucintamente, o processo de torneamento, pois é o processo de maquinagem onde vai ser realizado o estudo dos vários fluídos. Finalmente, irá descrever-se os fundamentos teóricos da rugosidade superficial. pois um objetivo complementar do trabalho foi otimizar os parâmetros de lubrificação e refrigeração, para o melhor acabamento possível da peça, bem como, o método de otimização utilizado no trabalho, o método de Taguchi.

### 2.1. Processos de lubrificação e refrigeração

A lubrificação é uma técnica utilizada na aplicação de uma camada chamada lubrificante, com o objetivo de reduzir o atrito e o desgaste entre duas superfícies.

A refrigeração é uma técnica para arrefecer um determinado ambiente, a peça a ser maquinada e a ferramenta de corte, neste caso, para melhorar o desempenho da ferramenta e a qualidade da peça.

Existe uma grande variedade de processos de refrigeração e lubrificação na maquinagem pelo que os mais comuns são:

*Flood Cooling* - Refrigeração por inundação é um recurso frequentemente utilizado em quase todos os processos de maquinagem, dependendo do objetivo. Um bocal é direcionado para a peça de trabalho ou para a ponta da ferramenta de corte e é aplicada uma corrente constante de líquido de refrigeração. O líquido de refrigeração é normalmente recuperado através de um coletor de recuperação localizado sob a base da máquina. Um fluxo constante de refrigerante é eficaz para manter a ferramenta de corte a uma temperatura relativamente baixa e lubrificada, bem como para remover as aparas [12].

*Minimum Quantity Lubrication (MQL)* – Quantidade mínima de lubrificação, é um processo entre a ferramenta e a peça, é realizada por um aerossol, ou seja, gotículas de um fluido que são dispersas num fluxo de ar, formando uma película lubrificante na zona de corte e aplicado a elevada velocidade. Problemas económicos e ecológicos associados ao processamento com óleo abundante são reduzidos pela ampla implementação da MQL em operações de produção. Esta tecnologia, na sua forma mais simples, funciona tendo um pequeno depósito com o fluido ligado a um bocal onde será misturado com ar comprimido. O lubrificante é, então, pulverizado com ar comprimido na zona de contacto ferramenta/peça. Algumas vantagens deste processo são a eliminação da instalação dos componentes tais como filtros, tubagens, tanque. Também o aumento da vida útil das ferramentas, a redução dos tempos de produção, uma melhor qualidade superficial, a redução dos custos em lubrificantes e refrigerantes, possibilidade de alternar entre a maquinagem a seco e com outro tipo de lubrificação e refrigeração na mesma máquina, sem esquecer que é um processo mais ecológico [12].

*Dry Machining* - A maquinagem sem o uso de qualquer fluido de corte (maquinagem a seco ou verde) está a tornar-se cada vez mais popular devido à preocupação com a segurança do meio ambiente. A maioria das indústrias aplica fluidos refrigerantes e lubrificantes quando não são necessários. No entanto, deve-se observar também que alguns dos benefícios dos fluidos de corte não estarão disponíveis para maquinagem a seco e esta só será aceitável sempre que a qualidade da peça e os tempos de maquinagem alcançados na maquinagem a húmido forem iguais ou superados. As vantagens da maquinagem a seco incluem: não poluição da atmosfera ou água, nenhum resíduo na limalha que será refletido na redução dos custos de descarte e limpeza, nenhum perigo para a saúde, entre outros. Além disso, oferece redução de custos na maquinagem. A maquinagem a seco exige uma maior dificuldade na escolha do material da ferramenta, pois é necessário um material mais resistente. No entanto, a aplicação de tais ferramentas pode ocorrer apenas com uma ordem mais baixa de velocidades de corte, sendo a limitação causada pela temperatura de corte [13].

*High Pressure Coolant* - A entrega de refrigerante de alta pressão é uma tecnologia emergente que fornece um fluido de alta pressão para a ferramenta e o material maquinado. A alta pressão do fluido permite uma melhor penetração do fluido nas regiões de contato da peça e da ferramenta, proporcionando, assim, um melhor efeito de

refrigeração e diminuição do desgaste da ferramenta através da lubrificação das áreas de contacto. O jato de refrigeração de alta pressão cria uma cunha hidráulica entre a ferramenta e a peça de trabalho, penetrando na interface com uma velocidade superior à exigida mesmo para maquinagem em alta velocidade e também altera as condições de fluxo das aparas. O fornecimento de refrigerante a alta pressão tende a levantar a avara após passar pela zona de deformação, resultando numa redução na área de comprimento de contacto da avara com a ferramenta [1].

*Cryogenic Coolant* – Na refrigeração criogénica, o azoto líquido (AL) a  $-196^{\circ}\text{C}$  é aplicado à zona de corte para reduzir a temperatura de corte. O fluxo de azoto é cuidadosamente aplicado no local em que é necessário. Como o azoto evapora para o ar, não há fluido de corte a ser descartado. As aparas geradas a partir desta técnica não têm óleo residual e podem ser reciclados como sucata. A maquinagem aprimorada com refrigeração criogénica é atribuída a um mecanismo de desgaste relacionado à difusão reduzida e à dureza da ferramenta menos degradada ou a uma tensão de cedência reduzida em temperaturas mais baixas. A geração de calor torna-se mais intensa na maquinagem de materiais duros, porque o processo de maquinagem requer mais energia do que no corte de um material de baixa resistência. A refrigeração criogénica é a maneira mais eficiente de manter a temperatura abaixo da temperatura de amolecimento do material da ferramenta de corte. Este método é uma alternativa ambientalmente segura à refrigeração por emulsão convencional. No passado, as abordagens comuns de refrigeração criogénica incluíam pré-refrigeração da peça, refrigeração indireta, inundação geral e banho fechado. O azoto líquido absorve o calor, evapora rapidamente e forma uma almofada de gás fluído entre a avara e a face da ferramenta que funciona como lubrificante. Além de ser favorável ao meio ambiente, se utilizado adequadamente, pode proporcionar uma melhoria significativa na produtividade e na qualidade do produto e, portanto, na economia geral de maquinagem, mesmo depois de cobrir o custo adicional do sistema de refrigeração e do fluído. O efeito benéfico pelo azoto líquido pode ser atribuído à refrigeração efetiva, retenção da dureza da ferramenta e interações favoráveis do fluído com a interface avara e ferramenta de trabalho. Este método tem uma influência favorável na quebra de aparas e na redução da temperatura de corte durante o torneamento. O benefício deste método é maior em velocidades de corte mais baixas, pois grande parte do contacto entre a avara e

a ferramenta permanece elástico, o que provavelmente permitirá uma penetração mais eficaz [1].

*Compressed Air Cooling*- A maquinagem verde tornou-se foco de atenção na proteção ecológica e ambiental. O vapor de água e o ar são alternativas baratas, isentas de poluição e ecológicas na refrigeração. O conselho industrial atual dos fabricantes de ferramentas utiliza o ar comprimido como fluido de corte durante operações de corte em alta velocidade. No entanto, ainda não está claro se esse ambiente auxilia o processo de corte ou se a sua popularidade se deve à disponibilidade do ar comprimido na oficina e à sua capacidade de remover aparas de corte da zona de trabalho. A aplicação de gases (nitrogénio, oxigénio e dióxido de carbono) produz menor força de corte em comparação com o corte a seco e a húmido [1].

## **2.2. Fluidos de corte**

A escolha de um fluido de corte adequado para uma situação específica de maquinagem é bastante importante e requer conhecimento das funções, propriedades e limitações do fluido. A seleção de fluidos de corte é de tal maneira importante quanto a escolha de máquina-ferramenta, velocidades e avanços.

O objetivo em todas as operações convencionais de remoção de metal é aumentar a produtividade e reduzir os custos maquinando na velocidade mais alta possível e consistente com a vida útil da ferramenta, obter o menor número de rejeições, o tempo de inatividade ser mínimo e produzir superfícies com precisão e acabamento satisfatórios. Muitas operações de maquinagem podem ser realizadas a seco, mas a aplicação adequada de um fluido de corte geralmente possibilita maiores velocidades de corte, taxas de avanço mais altas, maior profundidade de corte, maior vida útil da ferramenta, maior precisão dimensional, menor rugosidade da superfície e menor consumo de energia. A principal função de qualquer fluido de corte é a refrigeração da ferramenta e da peça, reduzindo o atrito na zona de contacto e reduzindo ou impedindo a soldadura ou a adesão nas superfícies de contacto, que formam a aresta da ferramenta. Outras funções são remover as aparas da zona de corte e proteger a peça e a ferramenta da corrosão [14].

A importância relativa das funções depende do material que está a ser trabalhado, da ferramenta, das condições de corte e da precisão do acabamento exigida na peça. Por exemplo, fluídos de corte com maior lubrificação são geralmente usados na maquinagem a baixa velocidade e em materiais mais difíceis de maquinar. Fluídos de corte com maior capacidade de refrigeração geralmente são usados na maquinagem de alta velocidade em materiais mais fáceis de maquinar [14].

Nos últimos anos, uma ampla gama de fluídos de corte foi desenvolvida para atender aos requisitos de novos materiais de construção e novos materiais de ferramentas e revestimentos.

Existem quatro tipos básicos de fluídos de corte, sendo eles os óleos de corte, fluídos miscíveis em água, gases e lubrificantes sólidos, cada um com características distintas, além de vantagens e limitações. A seleção do fluído fica mais complexa porque as diferenças entre os vários tipos de fluídos nem sempre são claras. A maioria das oficinas mecânicas tenta usar o menor número possível de fluídos diferentes e prefere fluídos com uma longa vida útil, que não requerem mudanças ou modificações constantes, têm odores razoavelmente agradáveis, não façam fumo em uso, e o mais importante, não sejam tóxicos nem causem irritações na pele. O custo e o modo de eliminação do fluído também têm o seu peso na escolha [14].

As principais divisões e subdivisões usadas na classificação de fluídos de corte são: óleos de corte, incluindo óleos minerais simples e compostos, além de aditivos. Fluídos miscíveis em água, incluindo óleos emulsificáveis, fluídos químicos ou sintéticos e fluídos semi-sintéticos. Gases, pastas e lubrificantes sólidos. Sendo que os óleos de corte e os fluídos miscíveis em água são os mais utilizados nas oficinas.

Óleos de corte - são geralmente compostos de óleo mineral com a adição de óleos animais, vegetais ou marinhos para melhorar as propriedades de humidificação e lubrificação. Cloro de enxofre e compostos de fósforo, às vezes chamados de aditivos de extrema pressão, proporcionam uma lubrificação ainda maior. Em geral, estes óleos de corte não refrigeram tão bem como os fluídos miscíveis em água [14].

Fluídos miscíveis em água - emulsões ou óleos solúveis são uma suspensão de gotas de óleo na água. Essas suspensões são feitas misturando o óleo com agentes emulsificantes (materiais de sabão e semelhantes) e outros materiais. Esses fluídos

combinam as propriedades lubrificantes e de prevenção de ferrugem do óleo nas excelentes propriedades de refrigeração da água. As propriedades são afetadas pela concentração de emulsão, com concentrações "fracas" que proporcionam melhor refrigeração, proporcionando menor lubrificação, e concentrações "fortes" tendo o efeito oposto. Adições de enxofre, cloro e fósforo, como nos óleos de corte, produzem graus de pressão extremos [14].

Fluídos sintéticos – Fluídos sintéticos são soluções compostas por materiais orgânicos e inorgânicos dissolvidos em água. Tipos de superfície inativos são geralmente fluídos claros que combinam alta inibição de ferrugem, altas características de refrigeração e baixa lubrificação com alta tensão superficial. Tipos de superfície ativa (reorientam forças, com resistência à compressão, tração e corte) incluem agentes humidificadores e possuem inibição moderada da ferrugem, alta capacidade de refrigeração e propriedades moderadas de lubrificação com baixa tensão superficial. Eles também podem conter compostos de cloro e ou enxofre para propriedades de pressão extrema [14].

Fluídos Semi-sintéticos - São combinações de fluídos sintéticos e emulsões. Estes fluídos têm um teor de óleo mais baixo, mas um teor mais alto de emulsificante e de agente ativo de superfície do que as emulsões, produzindo gotículas de óleo de diâmetro muito menor. Possuem baixa tensão superficial, propriedades moderadas de refrigeração e lubrificação e uma elevada inibição de ferrugem. Também podem ser adicionados componentes de enxofre, cloro e fósforo [14].

Fluídos naturais de base biológica – também conhecidos como óleos vegetais consistem principalmente em triglicerídeos, que são moléculas de glicerol com três ácidos gordos de cadeia longa ligados à hidroxila via ligações éster. Estes ácidos gordos encontrados nos óleos vegetais naturais diferem no comprimento da cadeia e no número de ligações duplas, as proporções dependem não só do tipo da planta, mas também do clima, o tempo e os alimentos disponíveis. Sabe-se que a estrutura de triglicerídeos fornece qualidades para a lubrificação, isto é, devido às cadeias longas e polares de ácidos gordos, que fornecem filmes lubrificantes de alta resistência que interagem fortemente com as superfícies metálicas reduzindo tanto o atrito como o desgaste. A polaridade dos ácidos gordos produz filmes moleculares que conferem oleosidade e propriedades de anti desgaste [3].

### 2.2.1 Água ruça

As águas ruças correspondem às águas residuais geradas durante o processo de produção de azeite e são caracterizadas por serem um efluente escuro, que contém diversas substâncias dissolvidas e em suspensão. A sua composição é extremamente variável sendo influenciada por diversos fatores, como a variedade e grau de maturação das azeitonas, as condições climáticas, as práticas de cultivo, a duração do armazenamento e o processo de extração de azeite usado [15].

Assim, as águas ruças apresentam uma grande heterogeneidade no que respeita à sua composição, embora se possa dizer que, em geral, é um efluente ácido, composto por água (83 a 92%), matéria orgânica (7 a 15%) e sais minerais (1 a 2%), sendo os seus principais constituintes orgânicos os lípidos, os açúcares, os poliálcoois, os polifenóis, os ácidos voláteis e as pectinas. Dentro das substâncias orgânicas presentes nas águas ruças há que salientar os compostos fenólicos, que apresentam propriedades antioxidantes, sendo responsáveis pela toxicidade destes efluentes contra microrganismos e plantas [16].

A produção de água ruça começa com a produção de azeite que é produzido a partir de azeitonas em lagar, quer pelo método da prensa descontínua, quer pelo método da centrifugação contínua. Nesta dissertação utilizou-se água ruça obtida pelo método da centrifugação contínua de duas fases.

Nos anos 90 do século XX, surgiu o sistema de extração contínuo de duas fases, também designado de sistema ecológico, que tem vindo a substituir os processos de extração tradicional de prensas e o contínuo de três fases, devido às reduzidas quantidades de águas residuais que produz (0,2 m<sup>3</sup> de efluente líquido por tonelada de azeitona). Neste novo sistema a pasta da azeitona é enviada para um *decanter* de duas fases, onde ocorre uma centrifugação. A fase líquida (azeite e alguma água) é, então, separada da fase sólida (bagaço de azeitona húmido), sem que seja necessário fornecer água ao processo. De seguida, a fração que é composta por azeite e água é sujeita a outra centrifugação para separar estes dois componentes, obtendo-se assim no final do processo o azeite virgem, o bagaço húmido e uma reduzida quantidade de água ruça ou água residual (que é quase só composta pela água de lavagem das azeitonas) [17].

## 2.3. Torneamento

O torno é a máquina-ferramenta mais antiga e importante de uma oficina [18].

O torneamento uma operação de corte por arranque de apra na qual a peça roda em torno do eixo da máquina (torno) ao mesmo tempo que uma ferramenta de corte retira material da periferia, de maneira a transformá-la numa peça.

Existem vários tipos de tornos, onde se destaca o torno paralelo ou horizontal, torno vertical, torno revolver, copiador e os tornos automáticos por comando numérico (CN) e por comando numérico computadorizado (CNC). O torno que foi utilizado para os ensaios realizados é o torno paralelo, este torno é dos mais comuns nas oficinas metalomecânicas e constitui o genérico dos tornos primitivos [19].

Através deste método é possível obter superfícies cilíndricas ou cónicas, facejamento de superfícies planas, perfilamento usando ferramentas apropriadas, filetagem, furação e roscagem. A Figura 1 ilustra algumas operações efetuadas no torno e também a forma de atuação das respectivas ferramentas [20].

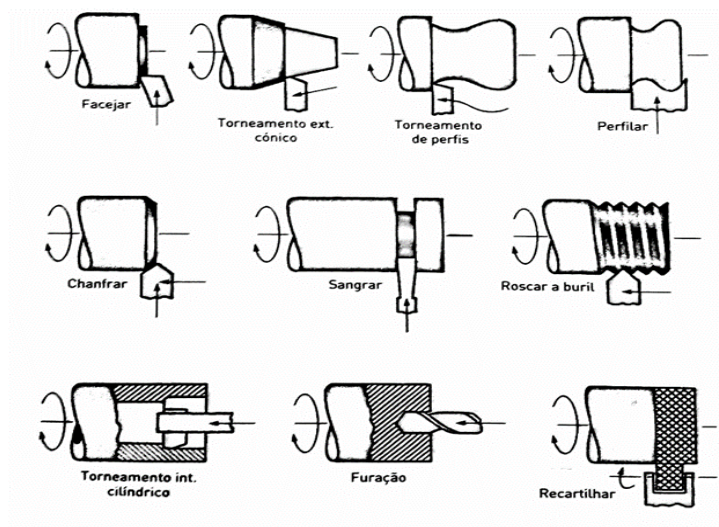


Figura 1 – Algumas operações realizáveis no torno [9]

No torneamento de uma peça cilíndrica pode-se observar, ver Figura 2, os seguintes movimentos [21]:

Movimento Principal – rotação da peça (corte);

Movimentos Auxiliares – Avanço da Ferramenta e Penetramento da Ferramenta.

O movimento de rotação, realizado pela peça (indicado pela seta c da figura 2) constitui o movimento de corte, o movimento da ferramenta, para manter na sua frente nova porção de material (indicado pela seta a da figura 2) designa-se movimento de avanço e por fim o movimento no sentido de penetrar na peça (indicado pela seta p da figura 2) chama-se movimento de penetramento [19].

O movimento de corte é o movimento principal da máquina, mas é sempre um movimento simples, sendo que dependendo do processo de maquinagem poderá ser:

- Um movimento de rotação da ferramenta;
- Um movimento de rotação da peça;
- Um movimento de translação, no caso de nem a peça nem a ferramenta se encontrarem em rotação.

O movimento de avanço é o que corresponde a uma mudança de posição relativa da peça e da ferramenta, durante a geração de uma superfície de corte. O movimento de avanço pode ser composto, capaz de se decompor nos movimentos simples e correspondentes.

Finalmente considera-se o movimento de penetramento, o que corresponde à espessura da camada de material a retirar durante o corte [20].

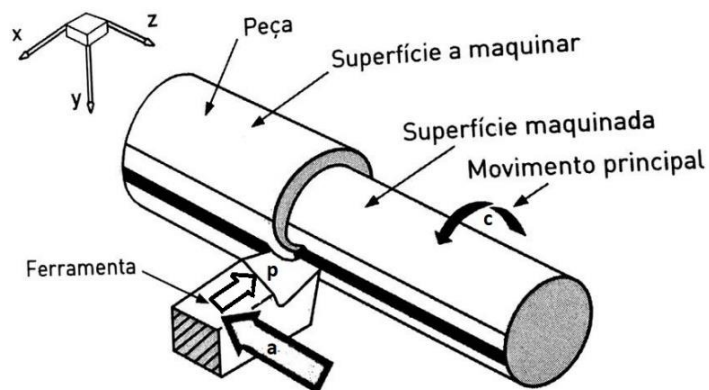


Figura 2 – Operação de torneamento cilíndrico exterior [9]

A escolha dos parâmetros de torneamento são fundamentais para a qualidade superficial das peças obtida [22], nível de tensões residuais nas peças [23] e desgaste das ferramentas [24]. Por isso, é fundamental a determinação dos parâmetros ótimos para minimizar esses efeitos.

## 2.4. Rugosidade Superficial

Durante o processo de fabricação, o material bruto sofre transformações de forma, de tamanho e propriedades. O método de produção interfere na aparência, na funcionalidade e nas características gerais do produto acabado. Por exemplo, quanto melhor for o acabamento final, maior será o custo, posto isto cada peça deve apresentar um acabamento adequado à sua função.

Inicialmente, a avaliação da rugosidade era feita através do tato e da visão. Com o passar dos anos começou-se a utilizar microscópios que já possibilitavam uma visão ampliada da superfície a avaliar. Estes também apresentavam limitações pois apesar de possibilitar a medida da largura entre as saliências não possibilitavam a medição da profundidade. Atualmente existem aparelhos capazes de reunir informações completas e precisas do perfil da superfície a ser analisada, através de uma agulha a percorrer o comprimento da superfície a analisar. Aparelhos como o rugosímetro permitem avaliar com exatidão o estado de superfície da peça.

A rugosidade superficial é uma característica importante da qualidade que pode dominar os requisitos funcionais de muitos componentes. Por exemplo, é necessário um bom valor de rugosidade superficial para evitar falha prematura por fadiga, para melhorar a resistência à corrosão, reduzir atrito, desgaste e ruído e, finalmente, para melhorar a vida útil do produto. Rugosidade superficial representa os desvios aleatórios e repetitivos de um perfil da superfície nominal [25].

Ondulações e falhas devem ser evitadas no fabrico de uma superfície, pois representam erros de fabrico. A rugosidade, por sua vez, é um parâmetro específico de acordo com a aplicação da superfície maquinada. Uma rugosidade baixa é essencial em superfícies que requerem pintura, superfícies que servirão de escoamento de fluídos e gases. Superfícies que trabalham sob lubrificação devem ter uma rugosidade característica, como as paredes dos cilindros de motores de combustão interna [26].

No Sistema Internacional, a unidade de rugosidade é o micrómetro [ $\mu\text{m}$ ] (1 micrómetro = 0,000001 m = 0,001 mm).

### 2.4.1 Rugosidade média ( $R_a$ )

Rugosidade média ( $R_a$ ) é o parâmetro mais utilizado pela indústria. É a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento ( $y_i$ ), dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição ( $l_m$ ). Essa grandeza pode corresponder à altura de um retângulo cuja área é igual à soma absoluta das áreas delimitadas pelo perfil de rugosidade e pela linha média, tendo por comprimento o percurso de medição ( $l_m$ ), como é mostrado na Figura 3, em que:  $(R_a) = (y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_n) / n$  [27].

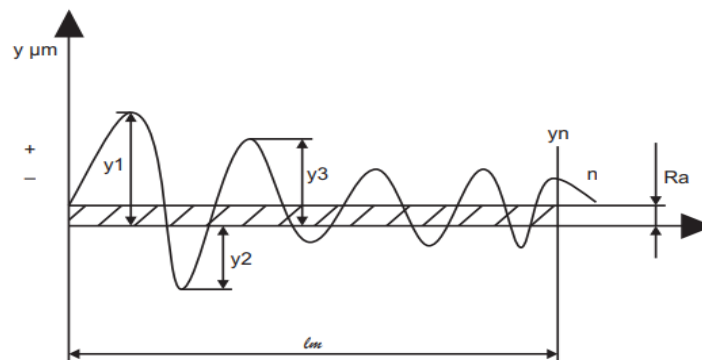


Figura 3 – Rugosidade média [12]

Por ser o parâmetro mais utilizado na indústria, a rugosidade média ( $R_a$ ) pode ser utilizada em vários componentes, como peças fabricadas por torneamento, fresagem, aplainamento e retificação, entre outros, que não necessitem de acabamento especial. Além disso, este parâmetro é o mais escolhido porque pode ser usado tanto quando for necessário controlo contínuo da rugosidade nas linhas de produção como quando o acabamento apresentar sulcos de maquinagem, sendo aplicável à maioria dos processos de fabricação. Devido à sua grande utilização, quase todos os equipamentos apresentam esse parâmetro (de forma analógica ou digital) [27].

De acordo com a Norma ISO 1302 de indicação do Estado de Superfícies em Desenhos Técnicos esclarece que a característica principal (o valor) da rugosidade  $R_a$  pode ser indicada pelos números (N) da classe de rugosidade correspondente, conforme a Tabela 1. Quanto maior for o valor de N maior será o valor da rugosidade em micrómetros [ $\mu\text{m}$ ] que caracteriza pior acabamento superficial [27]:

Tabela 1 - Classe de Rugosidade [12]

Classe	R <sub>a</sub> [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

### 2.4.2 Rugosidade máxima (R<sub>y</sub>)

Está definida como o maior valor das rugosidades parciais ( $Z_i$ ) que se apresenta no percurso de medição ( $l_m$ ). Por exemplo: na Figura 4, o maior valor parcial é o  $Z_3$  e corresponde à rugosidade máxima  $R_y$ . Com base nessas informações, conclui-se que  $R_y$  é o parâmetro indicado para analisar as rugosidades dos seguintes casos [27]:

- Superfícies de vedação.
- Assentos de anéis de vedação.
- Superfícies dinamicamente carregadas.
- Tampões em geral.
- Parafusos altamente carregados.
- Superfícies de deslizamento em que o perfil efetivo é periódico.

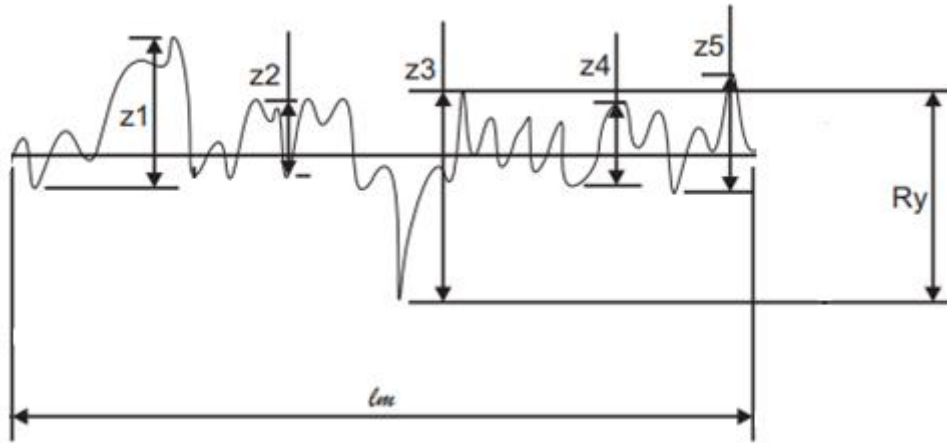


Figura 4 – Rugosidade Máxima [12]

### 2.4.3 Rugosidade total ( $R_t$ )

Corresponde à distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento de avaliação ( $l_m$ ), independentemente dos valores de rugosidade parcial ( $Z_i$ ), como mostrado na Figura 5. As aplicações da rugosidade total ( $R_t$ ) são semelhantes às aquelas aplicadas no  $R_y$ . No entanto, ( $R_t$ ) é mais abrangente, porque considera todos os picos e vales existentes no comprimento de amostragem [27].

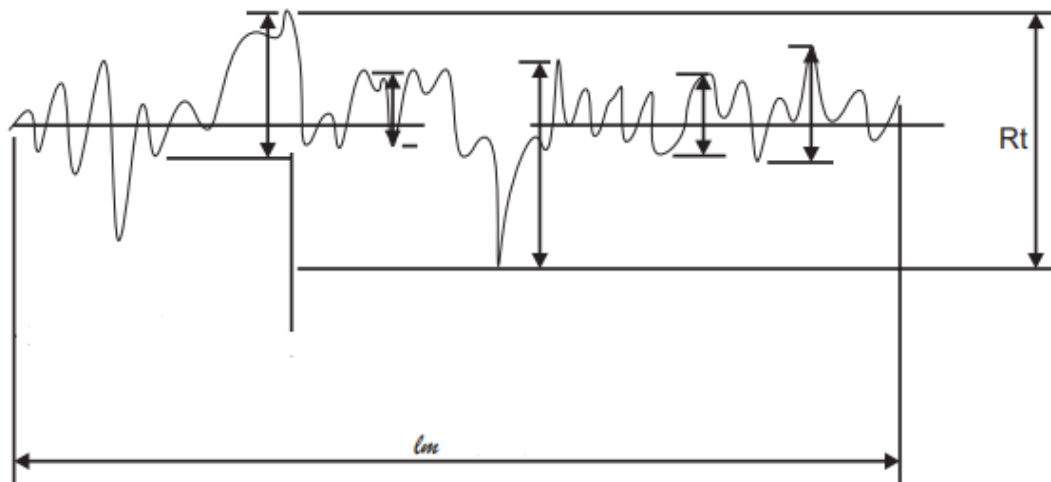


Figura 5 – Rugosidade Total [12]

### 2.4.4 Rugosímetro

O rugosímetro é um dos instrumentos utilizados para medir a rugosidade. O funcionamento do rugosímetro consiste em fazer percorrer a superfície da peça com um

apalpador que possui um sensor que a toca. O apalpador é acionado por um sistema mecânico que lhe permite movimentar-se para a frente e para trás, visando fazer uma varredura da superfície da peça. O movimento do apalpador é responsável pela caracterização da rugosidade, que é formada em função das ondulações varridas pelo apalpador. No sensor existe uma agulha, cujo movimento é transformado em impulsos elétricos no amplificador de sinais. Em seguida, esses sinais são registrados no display do rugosímetro, que corresponde a um gráfico do perfil da rugosidade. Em alguns casos, esse perfil pode ser impresso para arquivo ou análise [27]. A Figura 6 mostra o esquema de funcionamento de um rugosímetro.

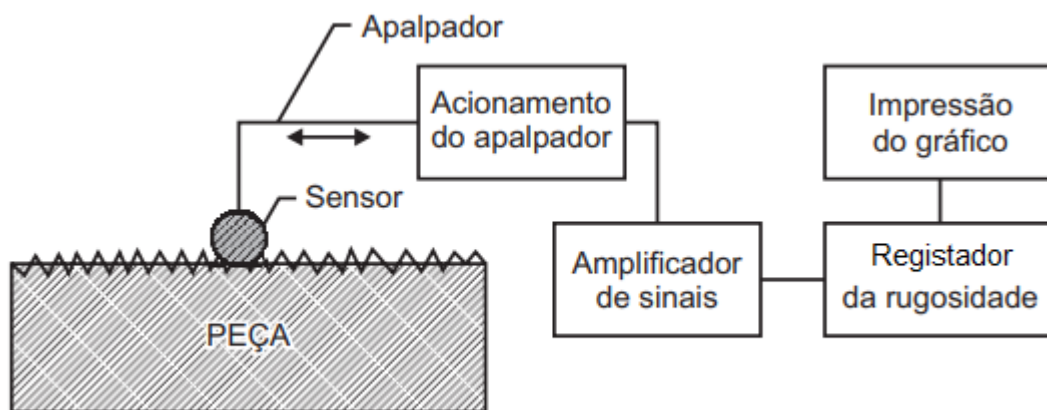


Figura 6 – Esquema de funcionamento de um rugosímetro [12]

Existem dois grupos em que os rugosímetros são divididos ou classificados:

- Aparelhos que fornecem a leitura dos parâmetros de rugosidade (podendo ser analógico e digital), mais usados em linhas de produção;
- Aparelhos que, além da leitura, permitem o registo em papel do perfil efetivo da superfície. Estes são mais utilizados em laboratórios, pois geram gráficos e realizam uma análise mais profunda.

Os rugosímetros tem uma estrutura básica, que é composta por diferentes partes, todas essenciais para a realização das medições. São elas:

- Apalpador – ou “pick-up”, é o dispositivo que desliza sobre a superfície que será analisada, levando os sinais da agulha até o amplificador;

- Unidade de acionamento – é responsável por deslocar o apalpador sobre a superfície que está a ser analisada. Faz o movimento em velocidade e direção constante pela distância desejada;
- Amplificador – contém a parte eletrónica principal, com um indicador de leitura que recebe os sinais da agulha, ampliando e calculando em função do parâmetro escolhido;
- Registador – é um acessório do amplificador. É responsável por fornecer a reprodução, em papel, do corte efetivo da superfície, nos casos em que se tem essa função.

## 2.5. Taxa de Produção

A taxa de produção ( $Tp$ ), que significa, taxa de remoção de material (MRR) é outro fator importante para avaliação nesta dissertação. Esta taxa consiste na quantidade de material que se consegue maquinar num determinado período de tempo, onde o objetivo é maximizar essa taxa e pode ser calculada com a ajuda da equação (1) [28].

$$Tp = V_c \times a_p \times f_z \quad (1)$$

Onde:

$Tp$  – Taxa de produção [ $cm^3/min$ ]

$V_c$ - Velocidade de corte [m/min]

$f_z$  - Velocidade de avanço [mm/rot]

$a_p$ - Penetração [mm]

## 2.6. Método de Taguchi

Genichi Taguchi era um estatístico e engenheiro conhecido pelos métodos de controlo da qualidade que melhoram a qualidade e reduzem custos. Ele foi responsável

pela criação de métodos responsáveis para melhorar a qualidade dos produtos manufaturados.

A filosofia de Taguchi baseia-se em três conceitos simples e fundamentais, pois toda a tecnologia e as técnicas surgem inteiramente a partir dessas três ideias. Esses conceitos são [29]:

- A qualidade deve ser projetada no produto e não inspecionada nele.
- A qualidade é melhor alcançada minimizando o desvio de um alvo. O produto deve ser concebido de forma a ser imune a fatores ambientais incontrolláveis.
- O custo da qualidade deve ser medido em função do desvio da norma e as perdas devem ser medidas em todo o sistema.

### 2.6.1. Conceito da função perda na qualidade de Taguchi

O início da função de perda total empregada por Taguchi forçou engenheiros a examinar seriamente as práticas de controlo de qualidade do passado. O conceito é simples, mas eficaz.

Existem duas categorias principais de perda para a sociedade em relação à qualidade do produto. A primeira categoria refere-se às perdas ocorridas como resultado de efeitos nocivos à sociedade (por exemplo a poluição), e a segunda refere-se às perdas decorrentes de variação excessiva no desempenho funcional [29]. Neste caso, refere-se essencialmente à segunda categoria. A Figura 7 mostra o gráfico da função perda de Taguchi.

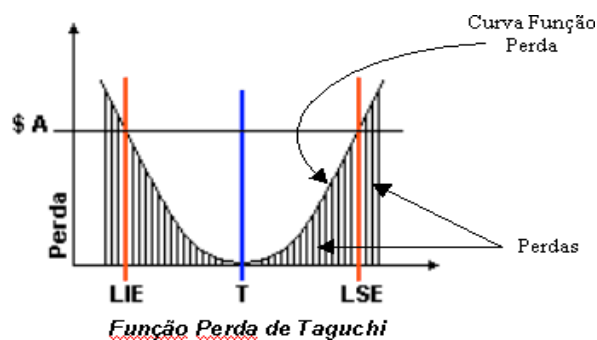


Figura 7 - Gráfico da função perda de Taguchi [14]

### 2.6.2. Estratégia de design das experiências

Taguchi construiu um conjunto especial de matrizes ortogonais para apresentar as suas experiências. Combinando as matrizes ortogonais de uma maneira única, Taguchi preparou um novo conjunto de padrões para serem usados em várias situações experimentais [29]. A Tabela 2 é um exemplo de uma matriz L9 segundo Taguchi.

Tabela 2 – Matriz ortogonal L9 segundo Taguchi

CONDITION \ COLUMN	L <sub>9</sub>		
	1	2	3
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

Cada linha representa uma condição de teste com os níveis de fator indicados pelos números na linha. As colunas verticais correspondem aos fatores especificados no estudo.

### 2.6.3. Taguchi e razão sinal-ruído

Taguchi propôs uma abordagem de delinear experiências para o projeto de parâmetros do produto ou processo. As variáveis que afetam as características de desempenho são classificadas em dois tipos: parâmetros do projeto e fontes de ruído [30].

Parâmetros do projeto são aqueles cujo valor nominal define as especificações do projeto. As fontes de ruído compreendem todas as variáveis que fazem com que a característica de desempenho se desvie do valor nominal. Nem todas as fontes de ruído podem ser incluídas no delineamento de experiências para definição dos parâmetros de projetos. O objetivo deste delineamento proposto por Taguchi é encontrar os valores para os parâmetros de projetos para os quais os efeitos dos fatores de ruído na característica de desempenho são mínimos. Esses valores “ótimos” para os parâmetros do projeto são

obtidos através da variação sistemática dos valores dos parâmetros na experiência e comparação do efeito dos fatores de ruído para cada ensaio realizado. Assim, este método desenvolve-se através de duas etapas: uma matriz de parâmetros de projeto e uma matriz de fatores de ruído. A experiência consiste na combinação das duas matrizes. Cada ensaio realizado na matriz de parâmetros do projeto é seguido de testes com todas as linhas da matriz de fatores de ruído [30].

A filosofia de Taguchi diz que a qualidade deve ser projetada num produto, não inspecionada para ele. A forma de concretizar é através de projetos de sistemas, design de parâmetros de tolerância. Se um fabricante decide escolher a qualidade de "inspeção" de um produto, significa que o produto é produzido com níveis de qualidade aleatórios e aqueles estão muito longe dos níveis desejados por quem o usa. Consegue-se mais facilmente atingir a qualidade minimizando o desvio a partir de um alvo, evitando a influência de fatores incontroláveis [30].

Existem três relações sinal-ruído para o parâmetro desejado:

- Nominal é o melhor:

$$S/N_t = 10 \times \log \left( \frac{\bar{y}^2}{s_y^2} \right) \quad (2)$$

Onde:  $\bar{y} = \frac{\sum y_i}{n}$  e  $s_y^2 = \frac{1}{n-1} \times \sum (y_i - \bar{y})^2$

- Maior é o melhor (maximizar):

$$S/N_L = -10 \times \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (3)$$

- Menor é o melhor (minimizar):

$$S/N_S = -10 \times \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (4)$$

Onde:

$\bar{y}$  – Média dos dados observados

$s_y^2$  – Variância de  $y$

$n$  – Número de observações

$y_i$  – Dados observados

O objetivo da função  $S/N_t$  é reduzir a variabilidade em torno de um alvo específico, a função  $S/N_L$  diz se o sistema é otimizado quando a resposta é tão grande quanto possível e  $S/N_S$  se o sistema é otimizado quando a resposta é tão pequena quanto possível. Quanto maior a relação S/N melhor é o resultado [30].

#### **2.6.4. Análise de resultados**

Os resultados das experiências são analisados para atingir um ou mais dos três objetivos a seguir [29]:

- para estabelecer a melhor ou a condição ideal para um produto ou processo;
- para estimar a contribuição de fatores individuais;
- para estimar a resposta nas melhores condições.

A condição ideal é identificada pelo estudo dos principais efeitos de cada fator. O processo envolve uma pequena manipulação aritmética dos resultados numéricos e geralmente pode ser feito com a ajuda de uma calculadora. Conhecendo a característica, isto é, se um valor mais alto ou mais baixo produz o resultado preferido, podem ser previstos os níveis dos fatores que produzam os melhores resultados [29].

O conhecimento da contribuição de fatores individuais é essencial para decidir a natureza do controle a ser estabelecido num processo de produção. A análise de variância (ANOVA) é o tratamento estatístico mais comum e aplicado aos resultados da experiência para determinar a percentagem de contribuição de cada fator. O estudo da tabela ANOVA para uma determinada análise ajuda a determinar quais fatores precisam de controle e quais não [29].

De notar que a condição ideal pode não estar necessariamente entre as muitas experiências já realizadas, pois a matriz ortogonal utilizada representa apenas uma pequena fração de todas as possibilidades [29].

Taguchi sugere rotas diferentes para realizar a análise completa. Para este caso será a abordagem padrão, em que o resultado de uma única execução, ou a média de execuções repetitivas, é processado através do efeito principal e das análises ANOVA [29].

### 3. Materiais e Métodos

---

Este capítulo visa apresentar a configuração experimental utilizada e os ensaios experimentais realizados no decorrer deste trabalho pelo Método de Taguchi. Inicialmente, serão apresentados os valores a utilizar nos diferentes parâmetros de maquinagem e a matriz ortogonal segundo Taguchi.

Descrever-se-á, também, como se realizam os ensaios experimentais e o processo de medição da rugosidade.

#### 3.1. Equipamento e material utilizado

Os ensaios experimentais foram realizados na Escola Superior de Tecnologia e Gestão (ESTIG) do Instituto Politécnico de Bragança (IPB), no Laboratório de Tecnologia Mecânica (LTM). O objetivo é obter a menor rugosidade superficial possível e a máxima vida útil da ferramenta, para isso, serão otimizados os parâmetros de lubrificação e refrigeração. Os ensaios foram realizados pelo processo de torneamento de um bloco cilíndrico de aço de construção com 20 mm de diâmetro. Este aço, também conhecido por Ck45 tem a composição química apresentada na Tabela 3.

*Tabela 3 – Composição química do DIN Ck45*

Composição Química %	
Cu	Máx 0,020
Ni	Máx 0,025
Cr	Máx 0,025
P	Máx 0,025
S	Máx 0,020
Mn	0,500 – 0,800
Si	0,170 – 0,370
C	0,420 – 0,500

Para a lubrificação e refrigeração utilizou-se água ruça, na segunda etapa, e um fluído de corte solúvel semi-sintético (MAFCOLL 51 da BALIS). Para a aplicação dos fluídos utilizou-se uma pistola de pintura, esta pulveriza o fluído contra a pastilha e a peça a maquinar.

Foi necessário usar a serrote de fita (Figura 8) da marca Quantum Maschinen, modelo S 181, para cortar os blocos de aço cilíndricos com 60 mm de comprimento.



Figura 8 – Serra elétrica

Depois de cortar os blocos com as dimensões pretendidas é necessário garantir que se elimina a sua excentricidade. Para tal, efetua-se uma primeira passagem no torno, da marca Tos Trencin, modelo SN 32 (Figura 9), antes de realizar os ensaios.



Figura 9 – Torno

No caso das pastilhas utilizadas no torno na Tabela 4 são apresentados os valores de referência do fabricante, neste caso da empresa CoroKey com o modelo das pastilhas DCMT 11T308-PM, em que as suas ferramentas podem trabalhar.

Tabela 4 – Valores de referência do fabricante

Valores de referência do fabricante	
Velocidade de corte $V_c$	210-300 [m/min]
Penetração $a_p$	0,5-3,0 [mm]
Velocidade de avanço $f_z$	0,10-0,30 [mm/rot]

Devido às restrições do torno, os valores a utilizar podem não se encontrar dentro do recomendado pelo fabricante das pastilhas.

Durante alguns ensaios vai ser utilizada uma pistola de pintura que foi suportada manualmente, de forma a obter o melhor ângulo para lubrificar e refrigerar a peça e a ferramenta de corte, como é possível verificar na Figura 10.



*Figura 10– Demonstração da utilização da pistola de pintura*

Após a realização dos ensaios vai ser necessário medir a rugosidade superficial, para tal utilizou-se um rugosímetro da marca Mitutoyo e modelo SJ-301 (Figura 11).



*Figura 11 – Rugosímetro utilizado*

### **3.2. Matriz ortogonal segundo o método de Taguchi**

Nos processos de maquinagem existem várias características a ter em conta, mas a taxa de produção e a rugosidade superficial são das mais importantes. Para conseguir

estes objetivos, utilizam-se diferentes combinações de parâmetros de maquinagem. Os parâmetros de torneamento mais comuns são a velocidade de corte ( $V_c$ ), a velocidade de avanço ( $f_z$ ) e a penetração ( $a_p$ ).

Conhecendo os parâmetros e sabendo os valores para os diferentes níveis, é possível definir o arranjo ortogonal adequado. A escolha adequada da matriz de Taguchi faz-se a partir do número de parâmetros a controlar e dos níveis por fator. Na Tabela 5 são apresentados alguns arranjos ortogonais de Taguchi.

Tabela 5 – Alguns tipos de arranjos ortogonais de Taguchi

Arranjo Ortogonal	Número de ensaios	Número de níveis	Número máximo de parâmetros
L4	4	2	3
L8	8	2	7
L9	9	3	4
L12	12	2	11
L18	18	3	8
L27	27	3	13

A matriz ortogonal de Taguchi mais simples é a L4 (estuda dois ou três parâmetros A, B e C, com dois níveis cada). Para realizar uma matriz de experiências com o intuito de avaliar a influência de três parâmetros (velocidade de corte ( $V_c$ ), velocidade de avanço ( $f_z$ ) e penetração ( $a_p$ )), onde cada parâmetro tem três valores de níveis, pode ser definido o arranjo ortogonal de Taguchi L9. Esta matriz ortogonal destina-se a compreender o efeito de três ou quatro parâmetros, cada um com três níveis definidos. Esta matriz assume que não existe interação entre dois fatores.

De acordo com a Tabela 4 e as restrições do torno obtemos a Tabela 6, os parâmetros e os níveis escolhidos para o estudo.

Tabela 6 – Valores dos diferentes níveis para cada parâmetro

Parâmetros	Símbolo	Nível 1	Nível 2	Nível 3
Velocidade de corte [m/min]	A	160	224	290
Velocidade de avanço [mm/rot]	B	0,16	0,22	0,28
Penetração [mm]	C	0,3	0,6	0,9

Dito isto, são necessárias 9 combinações, como é possível ver na Tabela 7. Na matriz ortogonal L9 são estudados três parâmetros sendo eles, a velocidade de corte ( $V_c$ ), velocidade de avanço ( $f_z$ ) e a penetração ( $a_p$ ).

Tabela 7 – Matriz ortogonal segundo Taguchi

Número de 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

Depois de definir a matriz de Taguchi, os níveis de cada parâmetro foram substituídos pelos valores escolhidos, ficando, assim, definida como representado na Tabela 8.

Tabela 8 – Matriz L9 com o valor dos parâmetros escolhidos (sem lubrificação)

Número de Ensaio (Sem Lubrificação)	Velocidade de corte [m/min]	Velocidade de avanço [mm/rot]	Penetração [mm]
1	160	0,16	0,3
2	160	0,22	0,6
3	160	0,28	0,9
4	224	0,16	0,6
5	224	0,22	0,9
6	224	0,28	0,3
7	315	0,16	0,9
8	315	0,22	0,3
9	315	0,28	0,6

Como vão ser feitos ensaios sem lubrificação, com água ruça e com o óleo de corte é necessário o uso de mais duas matrizes. Estas matrizes mantêm os parâmetros e níveis que a Tabela 8, sendo que a única diferença é a utilização da água ruça e do óleo de corte através da técnica de quantidade mínima de lubrificação.

### 3.3. Ensaios experimentais

Para começar os ensaios experimentais estabeleceram-se as dimensões iniciais do bloco de aço cilíndrico, sendo elas de 20 mm de diâmetro e 60 mm de comprimento. Para

tal, utilizou-se o serrote de fita, como se pode ver na Figura 12, e obtiveram-se os blocos de aço apresentados na Figura 13.



*Figura 12 – Serrote de fita*

Após o corte das peças necessárias, preparam-se os fluídos de corte a utilizar.



*Figura 13 – Blocos cortados nas dimensões referidas de 60 milímetros*

Estes blocos serão utilizados nos ensaios experimentais que serão realizados de acordo com as combinações da matriz ortogonal de Taguchi, definidas anteriormente.

Devido às folgas do torno foi necessário garantir a eliminação da excentricidade da peça com uma primeira passagem do torno e, após eliminada a excentricidade, é que se alteraram os parâmetros do torno para corresponder aos escolhidos (velocidade de corte, velocidade de avanço e penetração) e, posteriormente, realizar a passagem correspondente ao ensaio experimental. Na Figura 14 é possível observar o exemplo de um bloco de aço após o ensaio experimental. Cada peça foi marcada com um número e as aparas de cada ensaio foram recolhidas para um envelope identificado com o número da peça.



*Figura 14 – Bloco do ensaio 26 após torneamento*

Primeiramente foram realizados nove ensaios sem qualquer tipo de lubrificação, como se pode observar na Figura 15.



*Figura 15 – Torneamento sem lubrificação*

Após estes ensaios foi necessário realizar outros nove ensaios, desta vez a utilizar as águas-ruças como fluido de corte e após esses ensaios estarem completos, foram realizados os últimos nove ensaios, com o fluido de corte solúvel semi-sintético (MAFCOLL 51 da BALIS). A Figura 16 ilustra um dos ensaios com a lubrificação.



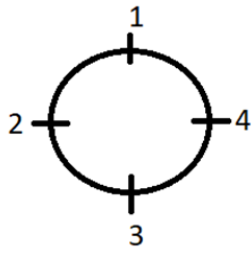
*Figura 16 – Torneamento com lubrificação por MQL*

Depois das passagens pelo torno foi necessário utilizar o rugosímetro para medir a rugosidade das peças (Figura 17).

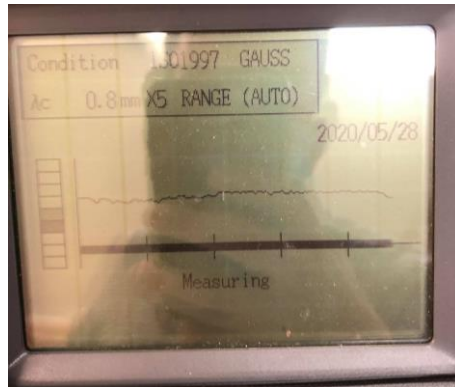


*Figura 17 – Medição de rugosidade de uma peça*

A rugosidade foi medida em quatro regiões diferentes do bloco de aço cilíndrico, com posições angulares de  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $270^\circ$ , que se encontram representados, esquematicamente, na Figura 18. Foram realizadas quatro medições de rugosidade para cada peça. A medição da rugosidade foi feita adotando um comprimento de amostragem de 0.8 mm, seguindo a norma ISO e filtro GAUSS. A Figura 19 mostra o resultado de uma das medições apresentado no écran do rugosímetro.



*Figura 18 – Posição das medições no bloco cilíndrico*



*Figura 19 – Rugosímetro em funcionamento*

## 4. Resultados Obtidos

---

Este capítulo visa apresentar os resultados de cada ensaio experimental, relativamente à rugosidade média, rugosidade máxima e taxa de produção.

### 4.1. Resultados obtidos segundo o método de Taguchi

#### 4.1.1 Rugosidade Média ( $R_a$ )

Relativamente aos valores da rugosidade média, foram realizadas quatro medições em cada peça, em zonas diferentes, para poder calcular a média da rugosidade  $R_a$  da peça, podendo, assim, obter as tabelas seguintes (Tabela 9, Tabela 10 e Tabela 11), onde se pode ver os parâmetros utilizados no ensaio e a rugosidade medida em cada ponto. Para facilitar a interpretação dos valores da rugosidade, estes serão, também, apresentados sob a forma de gráficos, em função do número de ensaio (Figura 20, Figura 21 e Figura 22).

Tabela 9 - Valores obtidos para  $R_a$  (Sem Lubrificação)

Número de Ensaio	Velocidade de corte [m/min]	Velocidade de avanço [mm/rot]	Penetração [mm]	$R_a$ (Sem Lubrificação) [ $\mu\text{m}$ ]				
				P1	P2	P3	P4	Média de $R_a$
1	160	0,16	0,3	5,56	4,86	3,56	7,09	5,27
2	160	0,22	0,6	6,32	6,08	8,05	5,79	6,56
3	160	0,28	0,9	9,42	9,49	8,98	7,20	8,77
4	224	0,16	0,6	5,34	4,46	4,37	4,15	4,58
5	224	0,22	0,9	4,58	5,29	5,13	5,41	5,10
6	224	0,28	0,3	8,70	4,23	7,42	8,57	7,23
7	315	0,16	0,9	5,12	4,76	4,71	4,95	4,89
8	315	0,22	0,3	4,50	4,60	4,81	4,58	4,62
9	315	0,28	0,6	6,00	6,31	4,52	5,98	5,70

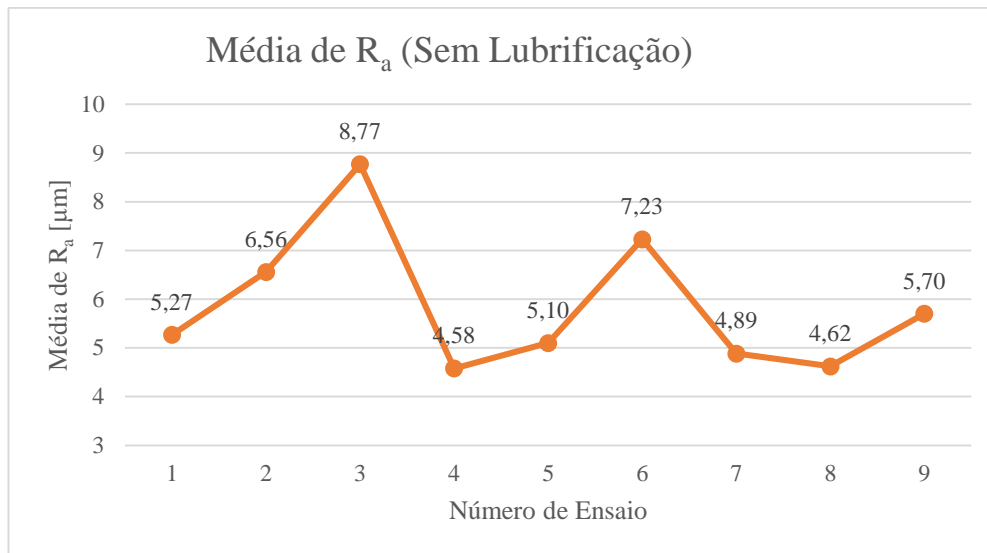


Figura 20 – Média de  $R_a$  (sem lubrificação)

Como se pode observar pela Tabela 9 e Figura 20, o ensaio número quatro obteve o menor valor de rugosidade média sem lubrificação ( $4,58 \mu\text{m}$ ), com os parâmetros:  $V_c = 224$  [m/min],  $f_z = 0,16$  [mm/rot] e  $a_p = 0,6$  [mm]. O ensaio número três obteve o maior valor de rugosidade média sem lubrificação ( $8,77 \mu\text{m}$ ), com os parâmetros:  $V_c = 160$  [m/min],  $f_z = 0,28$  [mm/rot] e  $a_p = 0,9$  [mm].

Tabela 10 - Valores obtidos para  $R_a$  (Água Ruça)

Número de Ensaio	Velocidade de corte [m/min]	Velocidade de avanço [mm/rot]	Penetração [mm]	$R_a$ (Água-Ruça com MQL) [ $\mu\text{m}$ ]				Média de $R_a$
				P1	P2	P3	P4	
10	160	0,16	0,3	5,23	5,60	5,06	5,25	5,29
11	160	0,22	0,6	1,85	3,29	4,84	4,40	3,60
12	160	0,28	0,9	9,58	8,16	7,86	7,63	8,31
13	224	0,16	0,6	4,65	4,89	4,96	4,54	4,76
14	224	0,22	0,9	4,93	7,12	6,51	5,87	6,11
15	224	0,28	0,3	6,28	5,00	6,74	7,32	6,34
16	315	0,16	0,9	3,11	3,52	4,16	3,37	3,54
17	315	0,22	0,3	3,53	3,71	3,83	4,14	3,80
18	315	0,28	0,6	8,77	7,31	7,03	7,56	7,67

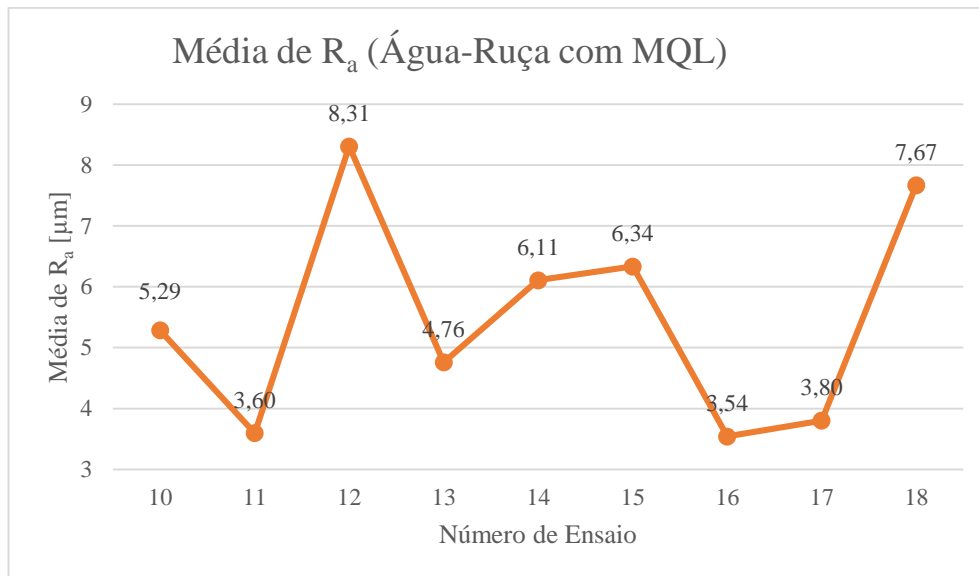


Figura 21 - Média de  $R_a$  (Água Ruça)

Como se pode ver pela Tabela 10 e Figura 21, o ensaio número dezasseis obteve o menor valor de rugosidade média com lubrificação de Água-Ruça com MQL ( $3,54 \mu\text{m}$ ), com os parâmetros:  $V_c = 315$  [m/min],  $f_z = 0,16$  [mm/rot] e  $a_p = 0,9$  [mm]. O ensaio número doze obteve o maior valor de rugosidade média com lubrificação de Água-Ruça com MQL ( $8,31 \mu\text{m}$ ), com os parâmetros:  $V_c = 160$  [m/min],  $f_z = 0,28$  [mm/rot] e  $a_p = 0,9$  [mm].

Tabela 11 - Valores obtidos para  $R_a$  (Óleo de Corte)

Número de Ensaio	Velocidade de corte [m/min]	Velocidade de avanço [mm/rot]	Penetração [mm]	$R_a$ (Óleo de Corte com MQL) [ $\mu\text{m}$ ]				Média de $R_a$
				P1	P2	P3	P4	
19	160	0,16	0,3	4,71	4,17	4,83	2,72	4,11
20	160	0,22	0,6	4,96	4,66	5,87	5,09	5,15
21	160	0,28	0,9	7,09	6,04	7,69	10,47	7,82
22	224	0,16	0,6	4,48	3,29	4,45	3,87	4,02
23	224	0,22	0,9	5,01	6,77	6,76	5,39	5,98
24	224	0,28	0,3	7,88	6,13	6,12	6,74	6,72
25	315	0,16	0,9	4,55	3,31	4,57	2,79	3,81
26	315	0,22	0,3	7,04	5,56	6,08	5,76	6,11
27	315	0,28	0,6	8,76	6,67	7,64	6,40	7,37

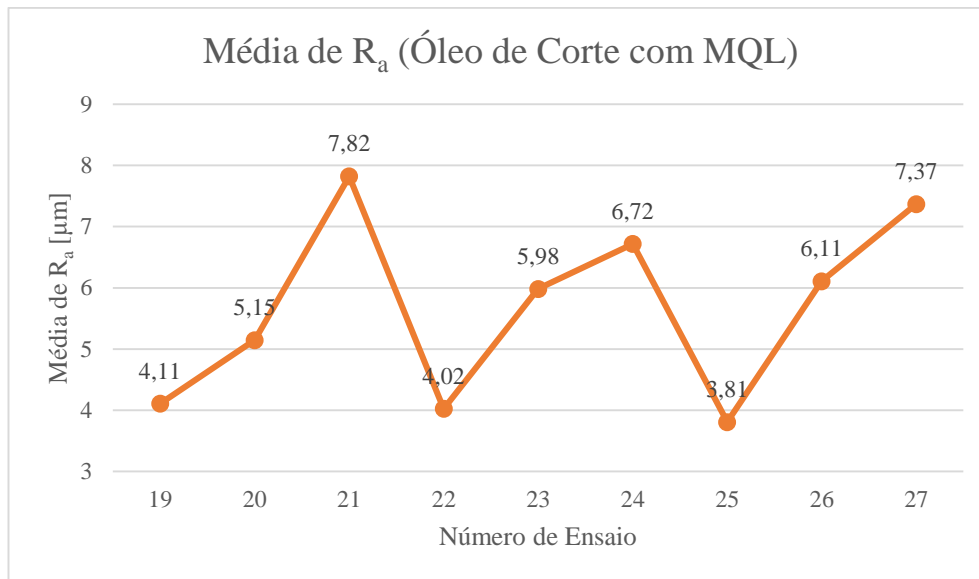


Figura 22 - Média de  $R_a$  (Óleo de Corte)

Como se pode analisar pela Tabela 11 e Figura 22, o ensaio número vinte e cinco obteve o menor valor de rugosidade média com lubrificação do Óleo de Corte com MQL (3,81  $\mu\text{m}$ ), com os parâmetros:  $V_c = 315$  [m/min],  $f_z = 0,16$  [mm/rot] e  $a_p = 0,9$  [mm]. O ensaio número vinte e um obteve o maior valor de rugosidade média com lubrificação do Óleo de Corte com MQL (7,82  $\mu\text{m}$ ), com os parâmetros:  $V_c = 160$  [m/min],  $f_z = 0,28$  [mm/rot] e  $a_p = 0,9$  [mm].

De notar que a combinação:  $V_c = 160$  [m/min],  $f_z = 0,28$  [mm/rot] e  $a_p = 0,9$  [mm] foi a que obteve os maiores valores de rugosidade média independentemente da utilização de lubrificação ou do tipo de fluído utilizado.

Para facilitar a leitura apresenta-se na Figura 23 uma sobreposição das figuras apresentadas anteriormente.

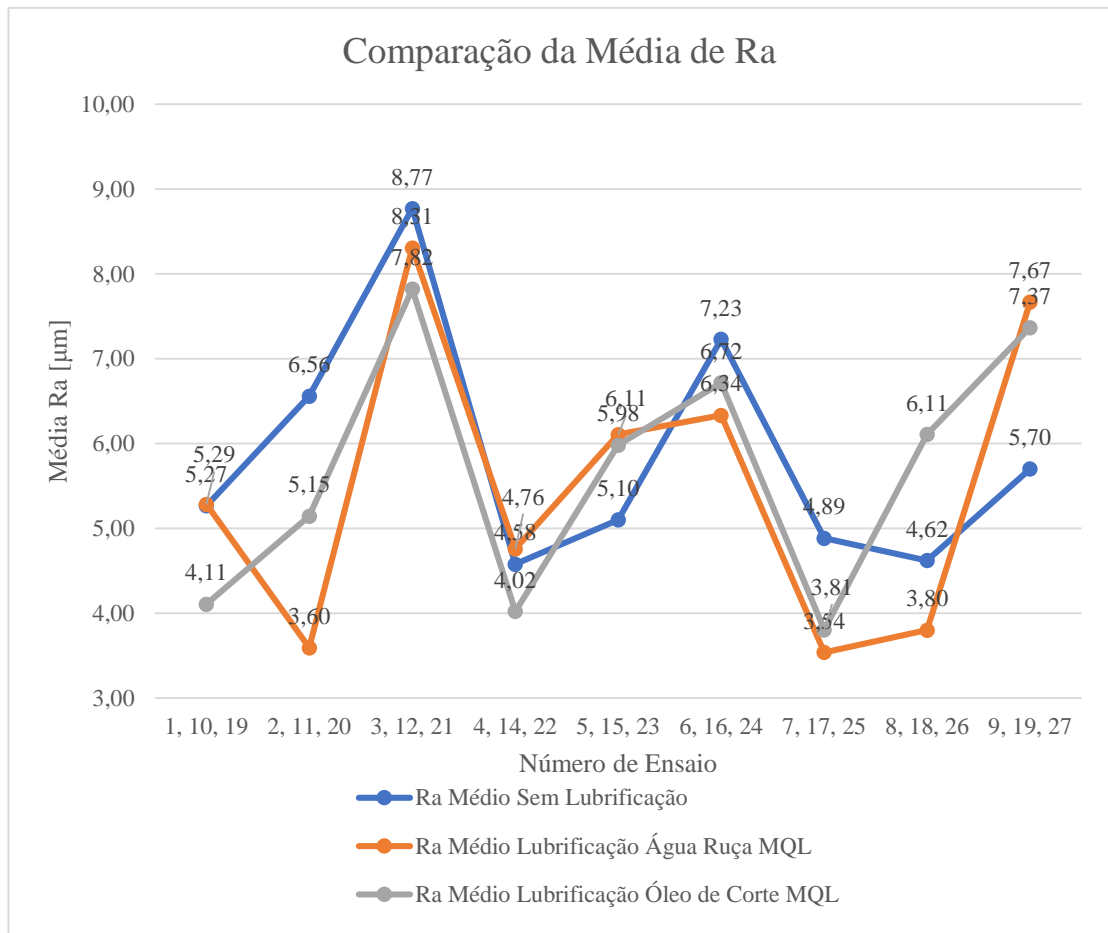


Figura 23 – Comparação da Média de Ra [µm]

#### 4.1.2 Rugosidade Máxima (R<sub>y</sub>)

A medição efetuada para cada um dos ensaios também permite a obtenção dos valores de rugosidade máxima nas quatro zonas da peça. Assim, as tabelas seguintes (Tabela 12, Tabela 13 e Tabela 14) juntamente com os gráficos (Figura 23, Figura 24 e Figura 25) permitem uma interpretação mais fácil dos valores de rugosidade máxima obtidos em cada ponto e para os parâmetros utilizados em cada ensaio.

Tabela 12 - Valores obtidos para  $R_y$  (sem lubrificação)

Número de Ensaio	Velocidade de corte [m/min]	Velocidade de avanço [mm/rot]	Penetração [mm]	$R_y$ (Sem Lubrificação) [ $\mu\text{m}$ ]				
				P1	P2	P3	P4	Média de $R_y$
1	160	0,16	0,3	29,95	25,36	18,59	30,57	26,12
2	160	0,22	0,6	29,73	30,19	40,74	31,24	32,98
3	160	0,28	0,9	42,17	41,93	47,33	35,28	41,68
4	224	0,16	0,6	26,45	24,71	25,15	23,32	24,91
5	224	0,22	0,9	24,95	26,74	25,03	27,84	26,14
6	224	0,28	0,3	40,92	23,74	40,46	43,27	37,10
7	315	0,16	0,9	28,59	21,80	22,66	24,37	24,36
8	315	0,22	0,3	24,77	29,70	23,96	25,84	26,07
9	315	0,28	0,6	32,58	34,72	23,19	34,18	31,18

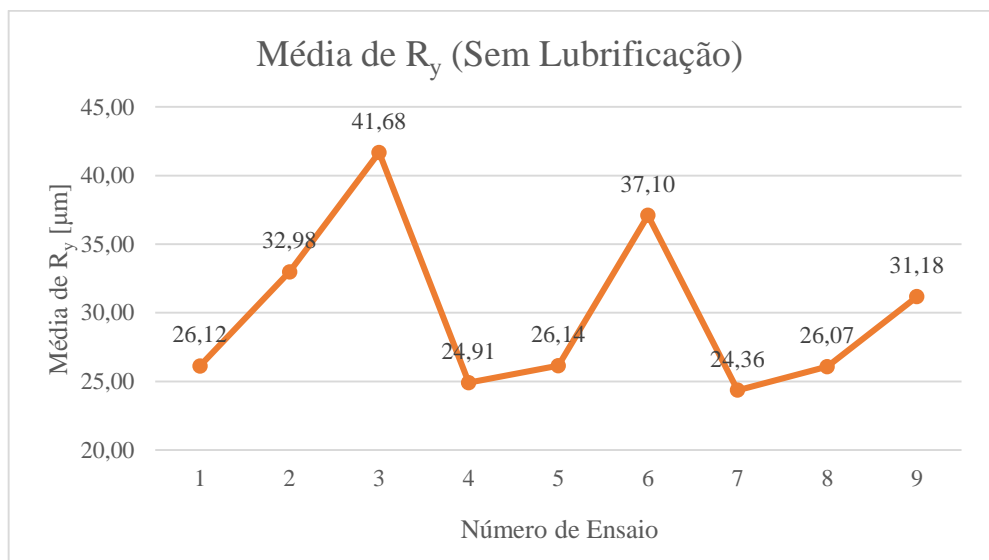


Figura 24 – Média de  $R_y$  (sem lubrificação)

Como se pode ver pela Tabela 12 e Figura 23, o ensaio número sete obteve o menor valor médio de rugosidade máxima sem lubrificação (24,36  $\mu\text{m}$ ), com os parâmetros:  $V_c = 315$  [m/min],  $f_z = 0,16$  [mm/rot] e  $a_p = 0,9$  [mm]. O ensaio número três obteve o maior valor médio de rugosidade máxima sem lubrificação (41,68  $\mu\text{m}$ ), com os parâmetros:  $V_c = 160$  [m/min],  $f_z = 0,28$  [mm/rot] e  $a_p = 0,9$  [mm].

Tabela 13 - Valores obtidos para  $R_y$  (Água-Ruça)

Número de Ensaio	Velocidade de corte [m/min]	Velocidade de avanço [mm/rot]	Penetração [mm]	$R_y$ (Água-Ruça com MQL) [ $\mu\text{m}$ ]				
				P1	P2	P3	P4	Média de $R_y$
10	160	0,16	0,3	26,59	29,97	24,24	27,72	27,13
11	160	0,22	0,6	10,82	18,69	25,41	25,09	20,00
12	160	0,28	0,9	46,81	43,44	35,65	35,02	40,23
13	224	0,16	0,6	20,77	21,50	21,02	22,70	21,50
14	224	0,22	0,9	26,02	31,26	32,68	28,61	29,64
15	224	0,28	0,3	29,35	25,85	30,71	36,51	30,61
16	315	0,16	0,9	19,28	19,52	25,24	21,47	21,38
17	315	0,22	0,3	17,64	20,22	19,74	20,90	19,63
18	315	0,28	0,6	36,44	35,39	33,3	34,83	34,99

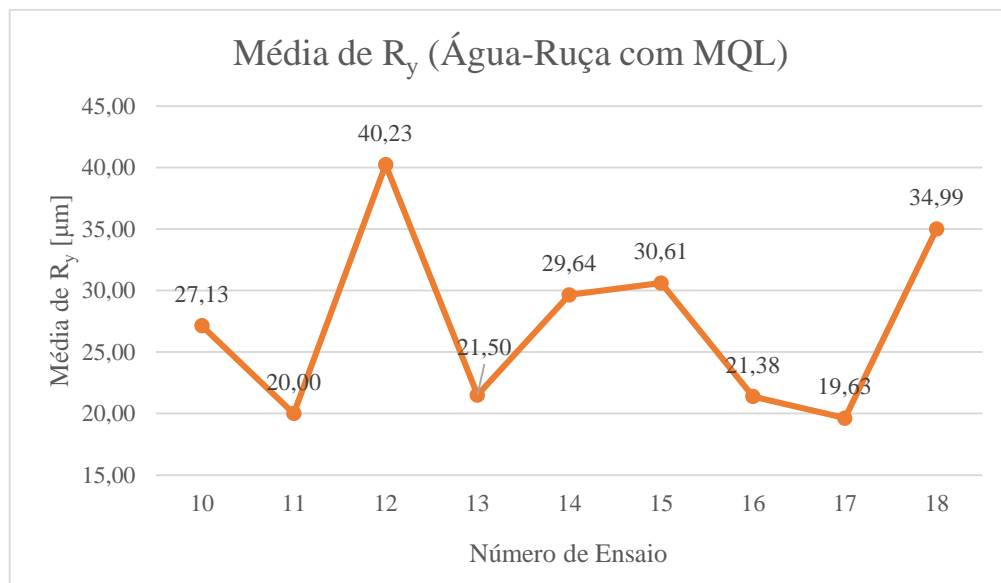


Figura 25 - Média de  $R_y$  (Água Ruça)

Como se pode analisar pela Tabela 13 e Figura 24, o ensaio número dezassete obteve o menor valor médio de rugosidade máxima com lubrificação de Água-Ruça com MQL (19,63  $\mu\text{m}$ ), com os parâmetros:  $V_c = 315$  [m/min],  $f_z = 0,22$  [mm/rot] e  $a_p = 0,3$  [mm]. O ensaio número doze obteve o maior valor médio de rugosidade máxima com

lubrificação de Água-Ruça com MQL (40,23  $\mu\text{m}$ ), com os parâmetros:  $V_c = 160$  [m/min],  $f_z = 0,28$  [mm/rot] e  $a_p = 0,9$  [mm].

Tabela 14 - Valores obtidos para  $R_y$  (Óleo de Corte)

Número de Ensaio	Velocidade de corte [m/min]	Velocidade de avanço [mm/rot]	Penetração [mm]	$R_y$ (Óleo de Corte com MQL) [ $\mu\text{m}$ ]				Média de $R_y$
				P1	P2	P3	P4	
19	160	0,16	0,3	24,14	21,94	25,28	14,52	21,47
20	160	0,22	0,6	23,18	22,47	25,70	28,25	24,90
21	160	0,28	0,9	35,17	32,04	39,53	41,66	37,10
22	224	0,16	0,6	24,99	18,89	24,65	19,29	21,96
23	224	0,22	0,9	33,21	34,38	32,28	30,69	32,64
24	224	0,28	0,3	33,58	29,65	29,37	31,96	31,14
25	315	0,16	0,9	23,02	18,28	22,10	14,34	19,44
26	315	0,22	0,3	32,78	27,85	29,08	29,10	29,70
27	315	0,28	0,6	42,89	34,75	35,99	35,18	37,20

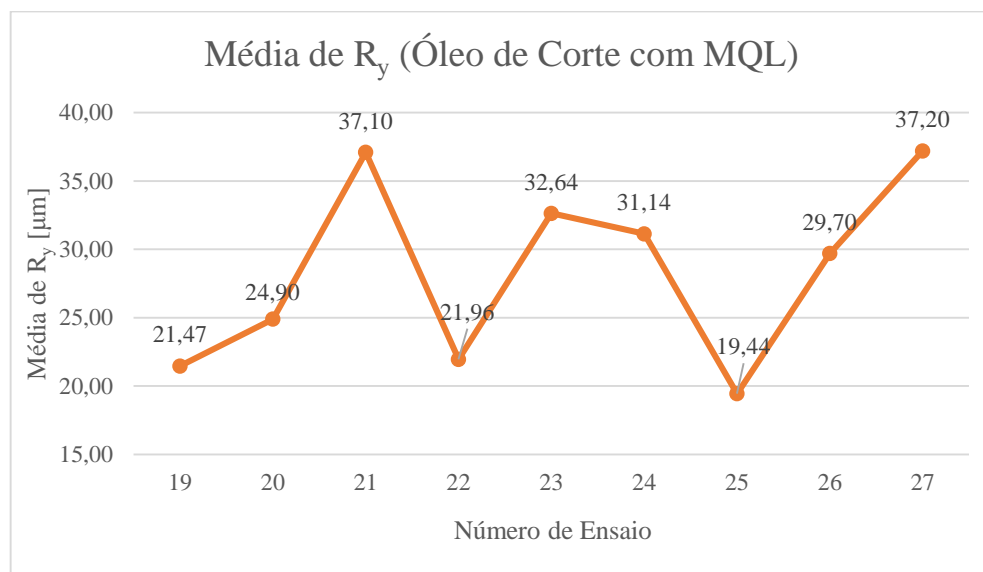


Figura 26 - Média de  $R_y$  (Óleo de Corte)

Como se pode observar pela Tabela 14 e Figura 25, o ensaio número vinte e cinco obteve o menor valor médio de rugosidade máxima com lubrificação do Óleo de Corte com MQL (19,44  $\mu\text{m}$ ), com os parâmetros:  $V_c = 315$  [m/min],  $f_z = 0,16$  [mm/rot] e  $a_p = 0,9$  [mm]. O ensaio número vinte e sete obteve o maior valor médio de rugosidade

máxima com lubrificação do Óleo de Corte com MQL (37,20  $\mu\text{m}$ ), com os parâmetros:  $V_c = 315$  [m/min],  $f_z = 0,28$  [mm/rot] e  $a_p = 0,6$  [mm].

### 4.1.3 Taxa de Produção

A taxa de produção refere-se à velocidade de processamento e está relacionado com o período de tempo de maquinagem. Na Tabela 15 apresentam-se os valores da taxa de produção, sendo eles calculados através da equação (1), apresentada no capítulo 2 (secção 2.5).

$$Tp = V_c \times a_p \times f_z \quad (1)$$

Tabela 15 – Valores obtidos para a taxa de produção

Número de Ensaio	Parâmetros			Tp [cm <sup>3</sup> /min]
	Velocidade de corte [m/min]	Velocidade de avanço [mm/rot]	Penetração [mm]	
1; 10; 19	160	0,16	0,3	7,68
2; 11; 20	160	0,22	0,6	21,12
3; 12; 21	160	0,28	0,9	40,32
4; 13; 22	224	0,16	0,6	21,50
5; 14; 23	224	0,22	0,9	44,35
6; 15; 24	224	0,28	0,3	18,82
7; 16; 25	315	0,16	0,9	45,36
8; 17; 26	315	0,22	0,3	20,79
9; 18; 27	315	0,28	0,6	52,92

Com base nos dados da Tabela 15, relativamente à taxa de produção, os ensaios que correspondem ao maior valor de taxa de produção são os ensaios 9, 18 e 27 (52,92 cm<sup>3</sup>/min).

Em contrapartida, os ensaios 1, 10 e 19 originou o menor valor de taxa de produção (7,68 cm<sup>3</sup>/min). Para uma melhor visualização dos valores da Tabela 15 é mostrado em gráfico na Figura 26, a taxa de produção em função do número de ensaio.

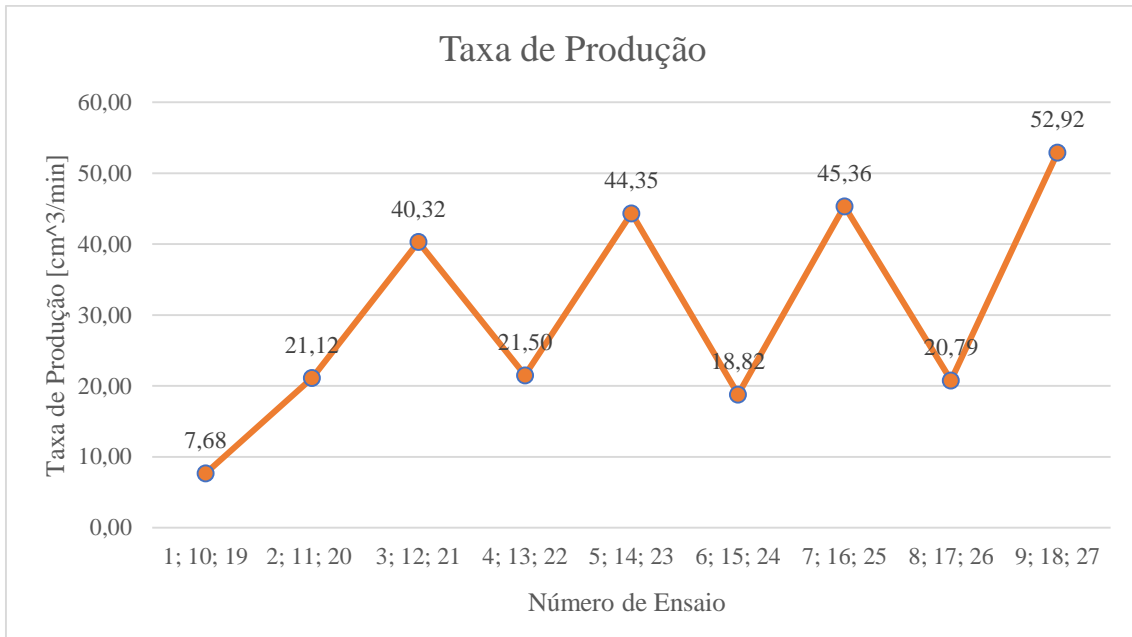


Figura 27 – Gráfico da taxa de produção

## 5. Análise e Discussão dos Resultados

---

### 5.1. Método de Taguchi

#### 5.1.1 Razão Sinal-Ruído

Os principais objetivos nas operações de maquinagem são os de diminuir a rugosidade superficial e aumentar a taxa de produção.

Existem três relações sinal-ruído para o parâmetro desejado, “nominal é o melhor”, “maior é o melhor” e “menor é o melhor” onde cada uma é adequada para um determinado objetivo. Assim, como os objetivos são minimizar a rugosidade superficial e maximizar a taxa de produção utilizou-se o “menor é o melhor” e “maior é o melhor”, respetivamente.

- **Rugosidade Superficial**

O objetivo é obter a menor rugosidade possível, portanto a razão Sinal-Ruído para este parâmetro é “menor é o melhor”.

Através das Tabelas 9, 10 e 11 e da equação (4), determinaram-se as relações Sinal-Ruído para os vinte e sete ensaios realizados, obtendo assim a Tabela 16.

$$S/N_S = -10 \times \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (4)$$

Onde:

$n$  - Representa os quatro posicionamentos representados no bloco de aço cilíndrico (P1, P2, P3 e P4) para a medição da rugosidade

$y_i$  - Representa o valor da rugosidade média em cada ponto definido no bloco.

Segue-se o exemplo de como foi determinada a razão S/N para o ensaio número 1:

$$S/N = -10 \times \log \left( \frac{1}{4} \times (5,56^2 + 4,86^2 + 3,56^2 + 7,09^2) \right) = -14,68 [dB]$$

Tabela 16 – Valor da razão S/N da rugosidade superficial média

	Número de Ensaio	P1	P2	P3	P4	Média de R <sub>a</sub> [µm]	S/N [dB]
<b>Sem Lubrificação</b>	<b>1</b>	5,56	4,86	3,56	7,09	5,27	-14,68
	<b>2</b>	6,32	6,08	8,05	5,79	6,56	-16,42
	<b>3</b>	9,42	9,49	8,98	7,20	8,77	-18,91
	<b>4</b>	5,34	4,46	4,37	4,15	4,58	-13,26
	<b>5</b>	4,58	5,29	5,13	5,41	5,10	-14,17
	<b>6</b>	8,70	4,23	7,42	8,57	7,23	-17,44
	<b>7</b>	5,12	4,76	4,71	4,95	4,89	-13,78
	<b>8</b>	4,50	4,60	4,81	4,58	4,62	-13,30
	<b>9</b>	6,00	6,31	4,52	5,98	5,70	-15,19
<b>Água Ruça MQL</b>	<b>10</b>	5,23	5,60	5,06	5,25	5,29	-14,47
	<b>11</b>	1,85	3,29	4,84	4,40	3,60	-11,54
	<b>12</b>	9,58	8,16	7,86	7,63	8,31	-18,43
	<b>13</b>	4,65	4,89	4,96	4,54	4,76	-13,56
	<b>14</b>	4,93	7,12	6,51	5,87	6,11	-15,79
	<b>15</b>	6,28	5,00	6,74	7,32	6,34	-16,11
	<b>16</b>	3,11	3,52	4,16	3,37	3,54	-11,03
	<b>17</b>	3,53	3,71	3,83	4,14	3,80	-11,62
	<b>18</b>	8,77	7,31	7,03	7,56	7,67	-17,73
<b>Óleo de Corte MQL</b>	<b>19</b>	4,71	4,17	4,83	2,72	4,11	-12,45
	<b>20</b>	4,96	4,66	5,87	5,09	5,15	-14,26
	<b>21</b>	7,09	6,04	7,69	10,47	7,82	-18,05
	<b>22</b>	4,48	3,29	4,45	3,87	4,02	-12,15
	<b>23</b>	5,01	6,77	6,76	5,39	5,98	-15,61
	<b>24</b>	7,88	6,13	6,12	6,74	6,72	-16,59
	<b>25</b>	4,55	3,31	4,57	2,79	3,81	-11,78
	<b>26</b>	7,04	5,56	6,08	5,76	6,11	-15,76
	<b>27</b>	8,76	6,67	7,64	6,40	7,37	-17,41

A partir da Tabela 16, o ensaio que apresenta o valor mais elevado da razão S/N é o ensaio 16 (-11,03 dB), este resultado é confirmado pelo menor valor da rugosidade superficial, enquanto o ensaio 3 originou o menor valor da razão S/N (-18,91 dB) que, por sua vez, é o maior valor da rugosidade superficial (8,77 µm). Com base na mesma tabela, é, também, possível determinar o valor médio da rugosidade para cada processo de lubrificação, verificando-se que o acabamento com maior rugosidade média ocorre para a condição “sem lubrificação” com um valor de 5.86 µm, seguido da utilização da

água-ruça (5.56  $\mu\text{m}$ ) e o melhor acabamento superficial é obtido quando é utilizado o óleo de corte (5.47  $\mu\text{m}$ ). Contudo, a diferença entre o valor da rugosidade média para as duas situações extremas é de apenas 7,1%.

Para simplificar os valores da razão S/N para os diferentes valores de parâmetros de maquinagem foram criadas abreviaturas como é possível observar na Tabela 17.

Tabela 17 – Abreviaturas para os vários níveis dos parâmetros

Designação	
<b>A1</b>	$V_c = 160$ [m/min]
<b>A2</b>	$V_c = 224$ [m/min]
<b>A3</b>	$V_c = 315$ [m/min]
<b>B1</b>	$f_z = 0,16$ [mm/rot]
<b>B2</b>	$f_z = 0,22$ [mm/rot]
<b>B3</b>	$f_z = 0,28$ [mm/rot]
<b>C1</b>	$a_p = 0,3$ [mm]
<b>C2</b>	$a_p = 0,6$ [mm]
<b>C3</b>	$a_p = 0,9$ [mm]

Segue-se um exemplo de como foi determinado o resultado da razão S/N para o parâmetro  $V_c = 160$  [m/min] e o nível 1 sem lubrificação:

$$S/N = \frac{-14,68 - 16,42 - 18,91}{3} = -16,67 \text{ [dB]}$$

Na Tabela 18 é apresentada a razão S/N para os três grupos de ensaios experimentais.

Tabela 18 – Resultados S/N para a rugosidade superficial, valores em dB

Designação		Sem Lubrificação	Água Ruça MQL	Óleo de Corte MQL
<b>A1</b>	$V_c = 160$ [m/min]	-16,67	-14,81	-14,92
<b>A2</b>	$V_c = 224$ [m/min]	-14,96	-15,15	-14,79
<b>A3</b>	$V_c = 315$ [m/min]	-14,09	-13,46	-14,99
<b>B1</b>	$f_z = 0,16$ [mm/rot]	-13,91	-13,02	-12,13
<b>B2</b>	$f_z = 0,22$ [mm/rot]	-14,63	-9,74	-15,21
<b>B3</b>	$f_z = 0,28$ [mm/rot]	-17,18	-17,42	-17,35
<b>C1</b>	$a_p = 0,3$ [mm]	-15,14	-14,07	-14,93
<b>C2</b>	$a_p = 0,6$ [mm]	-14,95	-14,27	-14,61
<b>C3</b>	$a_p = 0,9$ [mm]	-15,62	-15,08	-15,15

Os gráficos seguintes (Figura 27, Figura 28 e Figura 29) apresentam os valores médios da razão Sinal-Ruído para os diferentes parâmetros relativamente à rugosidade superficial.

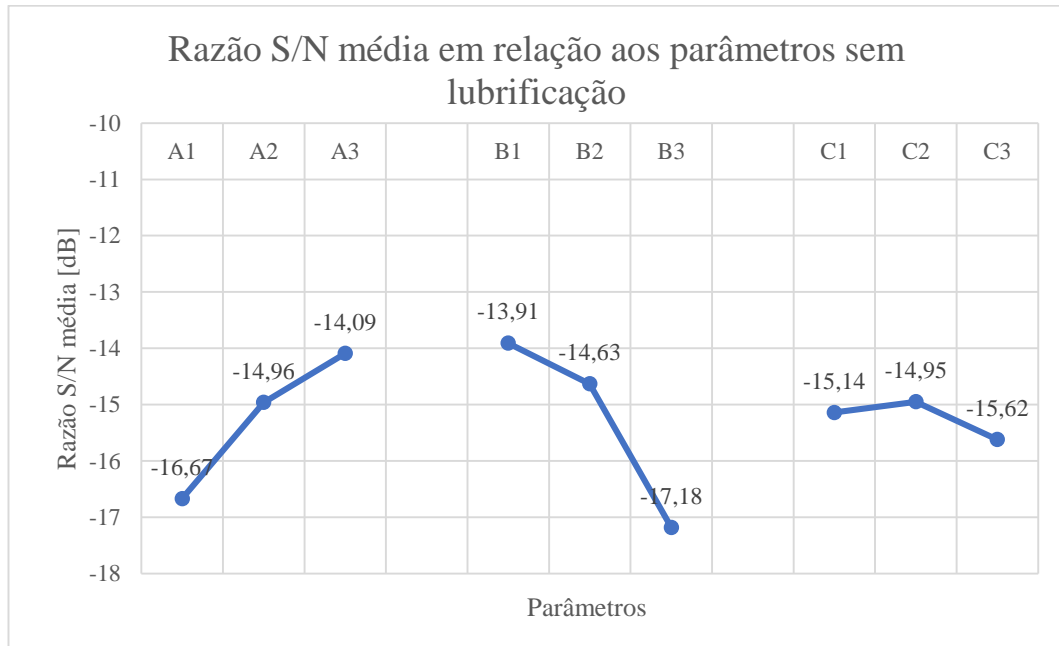


Figura 28 – Valor médio S/N para os diferentes parâmetros relativamente à rugosidade superficial (sem lubrificação)

Observando a Figura 27, é possível concluir que a melhor combinação para a menor rugosidade superficial sem lubrificação é A3B1C2, ou seja,  $V_c = 315$  [m/min],  $f_z = 0,16$  [mm/rot] e  $a_p = 0,3$  [mm]. De notar que existem várias combinações possíveis que não foram testadas, sendo esta uma delas.

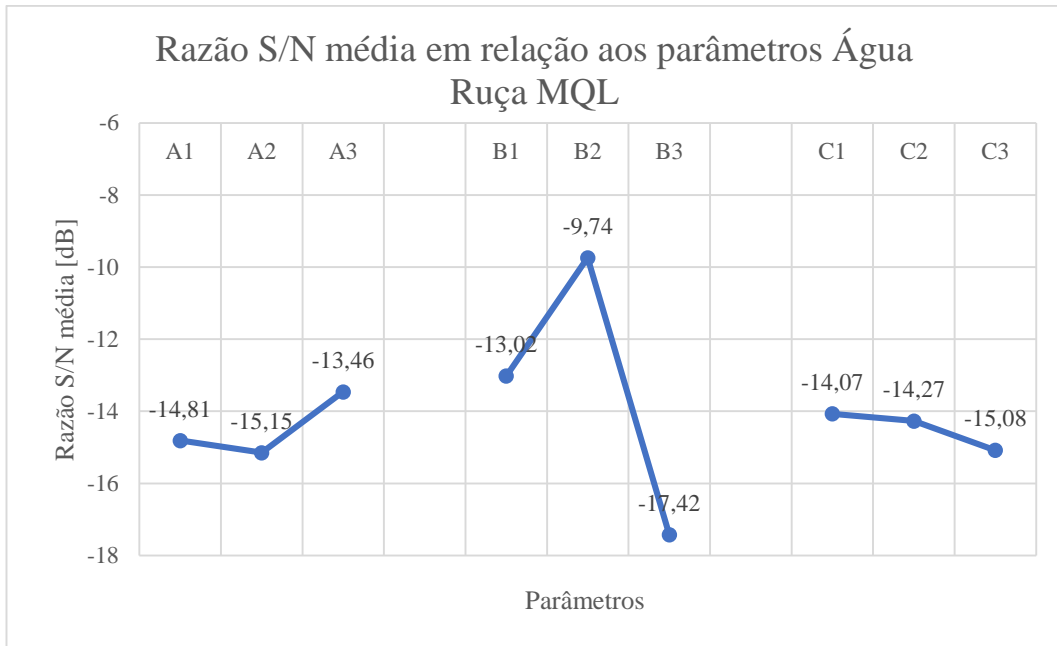


Figura 29 - Valor médio S/N para os diferentes parâmetros relativamente à rugosidade superficial (Água Ruça)

Observando a Figura 28, é possível concluir que a melhor combinação para a menor rugosidade superficial com lubrificação de Água Ruça por MQL é A3B2C1, ou seja,  $V_c = 315$  [m/min],  $f_z = 0,22$  [mm/rot] e  $a_p = 0,3$  [mm].

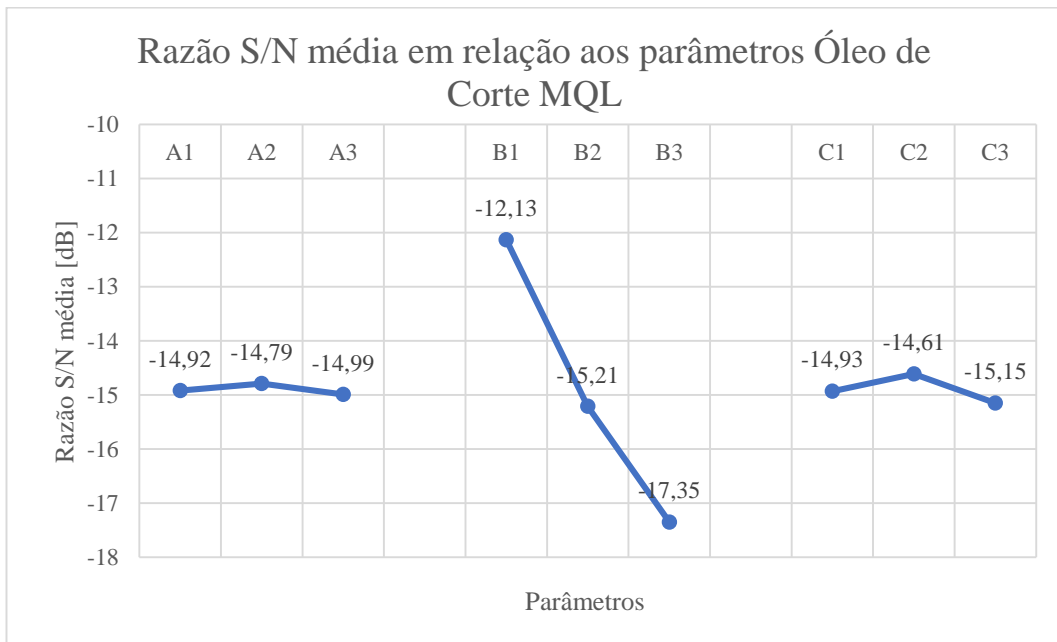


Figura 30 - Valor médio S/N para os diferentes parâmetros relativamente à rugosidade superficial (Óleo de Corte)

Observando a Figura 29, é possível concluir que a melhor combinação para a menor rugosidade superficial com lubrificação de Óleo de Corte por MQL é A2B1C2, ou seja,  $V_c = 224$  [m/min],  $f_z = 0,16$  [mm/rot] e  $a_p = 0,6$  [mm].

- **Taxa de produção**

A taxa de produção é dos parâmetros mais importantes para a indústria, onde o objetivo é sempre aumentar essa taxa. Para isso, a categoria da razão S/N deverá ser “maior é o melhor”. Com a ajuda da Tabela 15, onde estão representados os valores da taxa de produção e com a equação (3) é possível chegar aos valores da razão S/N para a taxa de produção, como é possível verificar na Tabela 19.

$$S/N_L = -10 \times \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (3)$$

Onde:

$n$  - Representa um único valor da taxa de produção para cada ensaio

$y_i^2$  - Representa o valor da taxa de produção

Segue-se o exemplo de como foi determinada a razão S/N para o ensaio número 1:

$$S/N = -10 \times \log \left( \frac{1}{1} \times \left( \frac{1}{7,68^2} \right) \right) = 17,71 [dB]$$

Tabela 19 – Valor da razão S/N da taxa de produção

Número de Ensaio	Parâmetros			Tp [cm <sup>3</sup> /min]	S/N [dB]
	Velocidade de corte [m/min]	Velocidade de avanço [mm/rot]	Penetração [mm]		
1; 10; 19	160	0,16	0,3	7,68	17,71
2; 11; 20	160	0,22	0,6	21,12	26,49
3; 12; 21	160	0,28	0,9	40,32	32,11
4; 13; 22	224	0,16	0,6	21,50	26,65
5; 14; 23	224	0,22	0,9	44,35	32,94
6; 15; 24	224	0,28	0,3	18,82	25,49
7; 16; 25	315	0,16	0,9	45,36	33,13
8; 17; 26	315	0,22	0,3	20,79	26,36
9; 18; 27	315	0,28	0,6	52,92	34,47

A partir da Tabela 19 os ensaios que apresentam o valor mais elevado da razão S/N são os ensaios 9, 18 e 27 (34,47 dB), este resultado é confirmado pelo maior valor da taxa de produção (52,92 [cm<sup>3</sup> /min]).

A Tabela 20 apresenta os valores da razão S/N para os diferentes parâmetros relativamente à taxa de produção. As abreviaturas são as mesmas da Tabela 17.

Segue-se um exemplo de como foi determinada o resultado da razão S/N para o parâmetro  $V_c = 160$  [m/min] e o nível 1:

$$S/N = \frac{17,71 + 26,49 + 32,11}{3} = 25,44[\text{dB}]$$

Tabela 20 – Resultados S/N para a taxa de produção

	Designação	S/N [dB]
<b>A1</b>	$V_c = 160$ [m/min]	25,44
<b>A2</b>	$V_c = 224$ [m/min]	30,91
<b>A3</b>	$V_c = 315$ [m/min]	31,32
<b>B1</b>	$f_z = 0,16$ [mm/rot]	25,83
<b>B2</b>	$f_z = 0,22$ [mm/rot]	28,60
<b>B3</b>	$f_z = 0,28$ [mm/rot]	30,69
<b>C1</b>	$a_p = 0,3$ [mm]	23,18
<b>C2</b>	$a_p = 0,6$ [mm]	29,21
<b>C3</b>	$a_p = 0,9$ [mm]	32,73

A Figura 30 apresenta os valores médios da razão Sinal-Ruído para os diferentes parâmetros relativamente à taxa de produção.

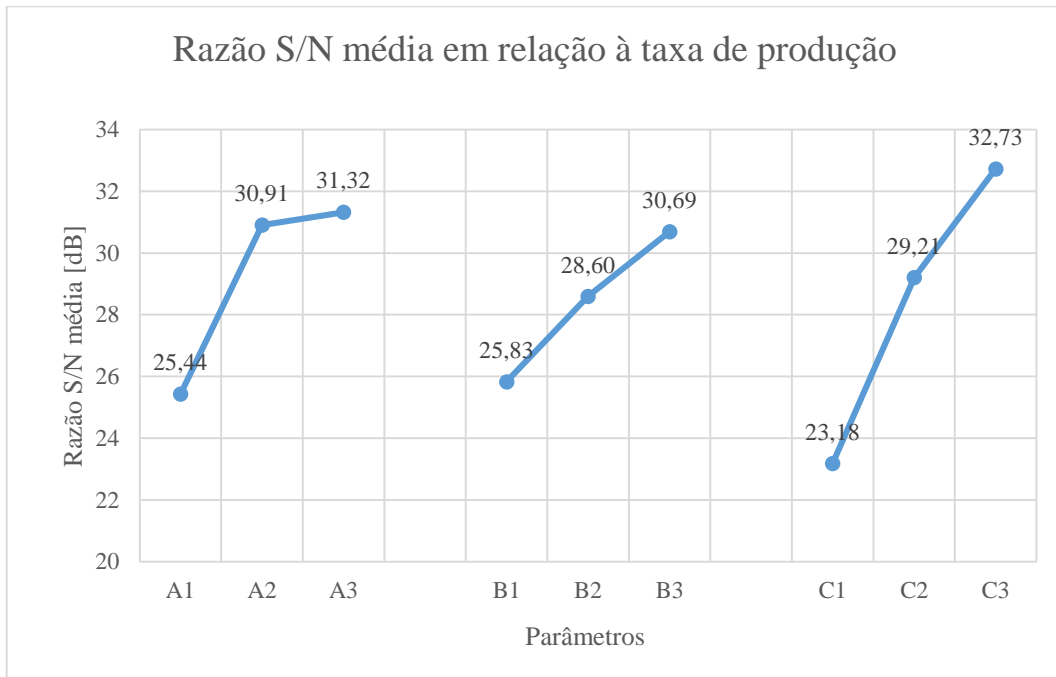


Figura 31 – Valor médio S/N para os diferentes parâmetros relativamente à taxa de produção

Observando a Figura 30, é possível concluir que a melhor combinação para a maior taxa de produção é A3B3C3, ou seja,  $V_c = 315$  [m/min],  $f_z = 0,28$  [mm/rot] e  $a_p = 0,9$  [mm].

## 5.2. Comparação das peças e aparas após os diferentes tipos de lubrificação e refrigeração

Durante os vários ensaios realizados foram recolhidas amostras das aparas de todos os ensaios com o objetivo de verificar se existiam diferenças entre os três tipos de ensaios realizados.

Serão apresentados os ensaios 7, 16 e 25, pois têm os mesmos parâmetros e foi para o ensaio 16 que se obteve o menor valor de rugosidade média, nos quais os parâmetros

são:  $V_c = 315$  [m/min],  $f_z = 0,22$  [mm/rot] e  $a_p = 0,3$  [mm]. Na Figura 31 são apresentados três provetes resultantes dos ensaios experimentais.



Figura 32 – Da esquerda para a direita (ensaio 7, 16 e 25)

Relativamente às aparas, as geometrias e dimensões relativas aos ensaios 7, 16 e 25 encontram-se apresentadas na Figura 32.

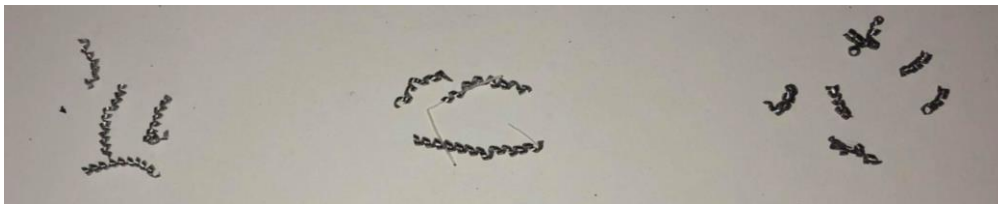


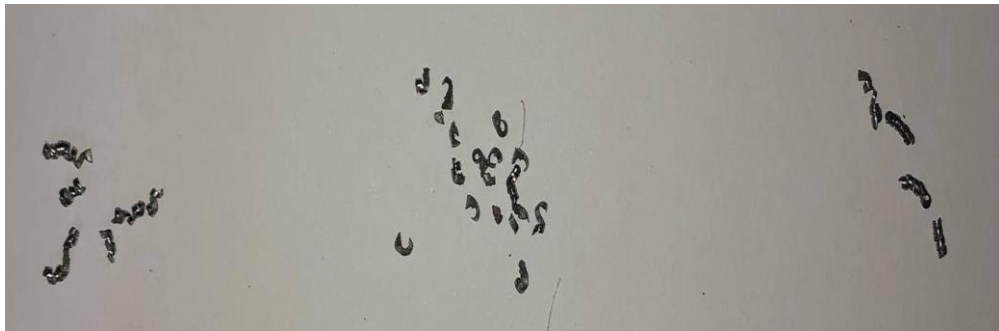
Figura 33 – Da esquerda para a direita aparas dos ensaios 7, 16 e 25

Em relação à taxa de produção a melhor combinação era A3B3C3, mas essa combinação não foi realizada. Foi utilizada a A3B3C2, onde os parâmetros são:  $V_c = 315$  [m/min],  $f_z = 0,28$  [mm/rot] e  $a_p = 0,6$  [mm]. Esta combinação foi utilizada nos ensaios 9, 18 e 27, cujos provetes estão apresentados na Figura 33.



*Figura 34 – Da esquerda para a direita (ensaio 9, 18 e 27)*

Relativamente às aparas desses mesmos ensaios, pode observar-se o seu tipo e geometria pela Figura 34.



*Figura 35 – Da esquerda para a direita aparas dos ensaios 9, 18 e 27*

## 6. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

---

### 6.1. Conclusões

Nesta dissertação foi apresentado um método de otimização, o método de Taguchi. O uso deste método comprova que é possível otimizar os parâmetros do torneamento para determinar, individualmente, qual a melhor combinação para obter uma menor rugosidade superficial e uma elevada taxa de produção.

Foram realizados vinte e sete ensaios através deste método, os quais foram divididos em três grupos de nove ensaios cada. O primeiro grupo não foi utilizado qualquer sistema de lubrificação e refrigeração e foi possível concluir que a melhor combinação para a menor rugosidade superficial sem lubrificação foi o ensaio oito com os parâmetros  $V_c = 315$  [m/min],  $f_z = 0,22$  [mm/rot] e  $a_p = 0,3$  [mm], apresentando uma rugosidade superficial de  $4,62 \mu\text{m}$  e apresenta o valor mais elevado da razão S/N (-13,30 dB). Teoricamente a melhor combinação seria A3B1C2, ou seja,  $V_c = 315$  [m/min],  $f_z = 0,16$  [mm/rot] e  $a_p = 0,3$  [mm]. Relativamente a essa combinação ela não foi realizada, pois existem várias combinações possíveis fora da matriz utilizada. Deveria ter sido realizado o ensaio de confirmação com a melhor combinação obtida teoricamente, para confirmar que iria dar origem ao menor valor de rugosidade superficial. Contudo, devido às circunstâncias excepcionais, provocadas pela pandemia do Covid-19, o acesso aos laboratórios da ESTIG foi muito restritivo, impedindo, por isso, a realização do ensaio de confirmação.

Para o segundo grupo, onde se utilizou um sistema de lubrificação e refrigeração com Água Ruça por MQL concluiu-se que a melhor combinação para a menor rugosidade superficial é A3B2C1, ou seja,  $V_c = 315$  [m/min],  $f_z = 0,22$  [mm/rot] e  $a_p = 0,3$  [mm] (ensaio 17). Apesar de, teoricamente, esta combinação ser a melhor, e apresentar o valor mais elevado da razão S/N (-11,03 dB), na prática isso não aconteceu, pois a combinação  $V_c = 315$  [m/min],  $f_z = 0,16$  [mm/rot] e  $a_p = 0,9$  [mm] (ensaio 16) obteve o menor valor de rugosidade superficial ( $3,54 \mu\text{m}$ ).

Finalmente, para o terceiro grupo, onde se utilizou um sistema de lubrificação e refrigeração com Óleo de Corte por MQL concluiu-se que a melhor combinação para a

menor rugosidade superficial é A2B1C2, ou seja,  $V_c = 224$  [m/min],  $f_z = 0,16$  [mm/rot] e  $a_p = 0,6$  [mm] (ensaio 22), este ensaio obteve uma rugosidade superficial de  $4,02 \mu\text{m}$  e uma razão S/N de  $-12,15$  dB. Novamente, na prática o ensaio 25 com a combinação  $V_c = 315$  [m/min],  $f_z = 0,16$  [mm/rot] e  $a_p = 0,9$  [mm] obteve o menor valor de rugosidade superficial ( $3,81 \mu\text{m}$ ) e a melhor razão S/N de  $-11,78$  dB.

Relativamente à taxa de produção, a melhor combinação era A3B3C3, mas essa combinação não foi realizada. Foi utilizada a A3B3C2, onde os parâmetros são:  $V_c = 315$  [m/min],  $f_z = 0,28$  [mm/rot] e  $a_p = 0,6$  [mm]. Esta combinação foi utilizada nos ensaios 9, 18 e 27. Corresponde a uma taxa de produção de  $52,92$  centímetros cúbicos por minuto e uma razão S/N de  $34,47$  dB.

Visualmente, é possível notar que as peças do segundo grupo (lubrificação por água ruça) sofreram uma alteração na sua coloração após alguns dias da realização dos ensaios, denotando a ocorrência de oxidação superficial. Relativamente ao óleo de corte Balis Mafcool 51, este é um fluido de corte solúvel semi-sintético de longa duração, a sua aditivação confere ótima proteção anticorrosiva e excelente capacidade de lavagem. Apresenta ainda elevada resistência à contaminação bacteriológica.

Devido ao baixo número de ensaios realizados não foi possível comparar o desgaste da pastilha entre os três grupos de teste. Convém, contudo, salientar que este não era um objetivo deste trabalho.

Da análise feita neste trabalho foi possível verificar que os fluídos biológicos de origem natural ainda estão longe de substituírem os originados a partir de petróleo, principalmente, devido às suas propriedades de estabilidade à oxidação.

Pode-se, também, concluir que os fluídos biológicos de origem natural são considerados uma alternativa promissora (num futuro próximo) para usar como fluídos de corte devido às suas características amigas do ambiente. Muitos destes fluídos são já utilizados para desenvolver lubrificantes biodegradáveis para várias aplicações industriais. Contudo, devido às suas características biológicas têm uma grande tendência a acidificar e a permitir o desenvolvimento de colónias bacterianas, pelo que, deverão estar sempre associados a aditivos que evitem esses fenómenos.

## **6.2. Sugestões para trabalhos futuros**

O objetivo deste estudo foi avaliar a rugosidade superficial e a taxa de material removido, pelo que seria interessante realizar o mesmo tipo de ensaios com materiais e ferramentas distintas.

Outra análise muito importante seria o estudo do desgaste de ferramentas e também estudar a temperatura das pastilhas para diferentes combinações de parâmetros de maquinagem, de lubrificação e refrigeração. Poder-se-ia recorrer à utilização de uma câmara termográfica.

Seria também interessante uma análise aprofundada às aparas nos vários grupos de teste para observar e caracterizar as principais diferenças ocorridas para as diferentes condições de lubrificação e de fluídos lubrificantes.

Um outro estudo importante para complementar o presente trabalho, seria o da caracterização comparativa das propriedades físico-químicas dos fluídos utilizados.

## Referências bibliográficas

---

- [1] V. S. Sharma, M. Dogra, and N. M. Suri, “Cooling techniques for improved productivity in turning,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 49, no. 6, pp. 435–453, 2009.
- [2] S. Madhukar, A. Shravan, G Sreeram Reddy, and P. Vidyanand, “A Critical review on Minimum Quantity Lubrication (MQL) Coolant System for Machining Operations,” *Int. J. Curr. Eng. Int. J. Curr. Eng. Technol.*, vol. 6, no. 5, 2016.
- [3] 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.
- [4] Y. Shokoohi, E. Khosrojerdi, and B. H. Rassolian Shiadhi, “Machining and ecological effects of a new developed cutting fluid in combination with different cooling techniques on turning operation,” *J. Clean. Prod.*, vol. 94, pp. 330–339, 2015.
- [5] Y. Wang *et al.*, “Comparative evaluation of the lubricating properties of vegetable-oil-based nanofluids between frictional test and grinding experiment,” *J. Manuf. Process.*, vol. 26, pp. 94–104, 2017.
- [6] B. S. Kumar, G. Padmanabhan, and P. V. Krishna, “Performance Assessment of Vegetable Oil based Cutting Fluids with Extreme Pressure Additive in Machining,” *J. Adv. Res. Mater. Sci.*, vol. 19, no. 1, pp. 1–13, 2016.
- [7] K. Palanikumar, L. Karunamoorthy, R. Karthikeyan, and B. Latha, “Optimization of machining parameters in turning GFRP composites using a carbide (K10) tool based on the taguchi method with fuzzy logics,” *Met. Mater. Int.*, vol. 12, no. 6, pp. 483–491, 2006.
- [8] X. Wang and I. S. Jawahir, “Web-based optimization of milling operations for the selection of cutting conditions using genetic algorithms,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 218, no. 6, pp. 647–655, 2004.
- [9] J. Ribeiro, H. Lopes, L. Queijo, and D. Figueiredo, “Optimization of cutting parameters to minimize the surface roughness in the end milling process using the

- Taguchi method,” *Period. Polytech. Mech. Eng.*, vol. 61, no. 1, pp. 30–35, 2017.
- [10] 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.
- [11] H. Öktem, T. Erzurumlu, and H. Kurtaran, “Application of response surface methodology in the optimization of cutting conditions for surface roughness,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 170, no. 1–2, pp. 11–16, 2005.
- [12] Y. Altintas, *Manufacturing Automation*. Cambridge: Edited by Cambridge University Press, 2012.
- [13] P. S. Sreejith and B. K. A. Ngoi, “Dry machining: Machining of the future,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 101, no. 1, pp. 287–291, 2000.
- [14] E. Oberg, F. D. Jones, H. L. Horton, and H. H. Ryffel, *26th Edition Machinery’s Handbook*. Industrial Press Inc, 2000.
- [15] J. F. Kennedy and M. R. Kosseva, “M. Niaounakis C.P. Halvadakis Olive Processing Waste Management: Literature Review and Patent Survey second ed. Waste Management vol. 5 2006 Elsevier Amsterdam 0-08-044851-8 xvi 498 pp.,” *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 40, no. 2. p. 173, 2007.
- [16] L. M. G. M. Gomes, “Oliveira, Azeite e Águas Residuais – Parte V.” [Online]. Available: <https://scientificusblogpt.wordpress.com/2015/07/07/oliveira-azeite-e-aguas-residuais-parte-v/>. [Accessed: 11-Sep-2020].
- [17] D. Martins, “Valorização de resíduos da indústria do azeite: análise do potencial da recuperação de antioxidantes e de água,” Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, 2016.
- [18] R. G. Bercedo, I. I. Hernando, A. C. Urkullu, and E. D. Tajada, *Tecnología mecáni[1] R. G. Bercedo, I. I. Hernando, A. C. Urkullu, and E. D. Tajada, Tecnología mecánica. .ca. .*
- [19] A. T. da Rocha, *Tecnologia Mecânica - Volume III*, 6ª Edição. Coimbra, 1994.
- [20] J. P. Davim, A. Festas, and A. Completo, *Tecnologia de fabrico*, 2009th ed. Porto: Publindustria.

- [21] Heinrich Gerling, *À volta da Máquina-Ferramenta*. Rio de Janeiro: Editora Reverté Lda, 1977.
- [22] V. Sahithi, T. Malayadri, and N. Srilatha, “Optimization Of Turning Parameters On Surface Roughness Based On Taguchi Technique,” *Mater. today Proc.*, vol. 18, pp. 3657–3666, 2019.
- [23] J. Ribeiro, “Caracterização Experimental e Numérica de Campos de Tensões Residuais Provocadas por Processos de Fabrico,” Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2006.
- [24] S. Das, R. Nayak, and D. Dhupal, “Optimization of cutting parameters on tool wear and workpiece surface temperature in turning of AISI D2 steel,” *Int. J. Lean Think.*, vol. 3, no. 2, pp. 140–156, 2012.
- [25] N. H. Rafai and M. N. Islam, “An investigation into dimensional accuracy and surface finish achievable in dry turning,” *Mach. Sci. Technol.*, vol. 13, no. 4, pp. 571–589, 2009.
- [26] A. R. Machado, A. M. Abrão, R. T. Coelho, and M. B. Silva, *Teoria da usinagem dos materiais*, 2ª Edição. São Paulo: Blucher, 2009.
- [27] J. C. da S. Neto, *Metrologia e Controle Dimensional*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.
- [28] S. Coromant, “Fórmulas e definições gerais de torneamento.” [Online]. Available: <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/machining-formulas-definitions/pages/general-turning.aspx%0D>. [Accessed: 03-Jun-2020].
- [29] R. K. Roy, *A Primer on the Taguchi Method*. New York: Society of Manufacturing Engineers, 1990.
- [30] J. C. de Toledo and H. S. de Almeida, “Qualidade voltada para o projeto do produto e do processo,” *Technometrics*, vol. 32, no. 4. 1989.