

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
DE MINAS GERAIS – *CAMPUS* BETIM  
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Paulo Sérgio Brandão Júnior

**REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE O SISTEMA DE MÍNIMA QUANTIDADE DE  
LUBRIFICANTE.**

Betim

2020

PAULO SÉRGIO BRANDÃO JÚNIOR

**REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE O SISTEMA DE MÍNIMA QUANTIDADE DE LUBRIFICANTE.**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso Bacharelado em Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Minas Gerais – *Campus* Betim para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Norimar de Melo Verticchio.

Betim

2020

---

B817r Brandão Júnior, Paulo Sérgio.  
Revisão sistemática sobre o sistema de mínima quantidade de  
lubrificante. [manuscrito] / Paulo Sérgio Brandão Júnior. – Betim:  
Instituto Federal de Minas Gerais, 2020.  
72f.; il., color.

Orientador: Prof. Norimar de Melo Verticchio

Monografia (Graduação) – Instituto Federal de Minas Gerais –  
*Campus* Betim, Bacharelado em Engenharia Mecânica.

1. Fluidos em metaloplastia. 2. Usinagem. 3. Lubrificação e lubrificantes.  
I. Verticchio, Norimar de Melo. II. – Instituto Federal de Minas Gerais –  
*Campus* Betim. III. Título

CDU 621.7

---

**Catálogo: Luciana Batista Neves - CRB-6/2000**

Paulo Sérgio Brandão Júnior

REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE O SISTEMA DE MÍNIMA QUANTIDADE DE  
LUBRIFICANTE.

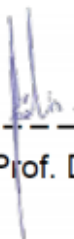
Trabalho de conclusão de curso  
apresentado ao Curso Bacharelado em  
Engenharia Mecânica do Instituto  
Federal de Minas Gerais — *Campus*  
Betim para obtenção do grau de  
bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em: 22 / 02 / 2021 pela banca examinadora:



---

Prof. Me. Norimar de Melo Verticchio – IFMG (Orientador)



---

Prof. Dr. André Fonseca Félix



---

Prof. Me. Evanilton José Alves Barbosa

## RESUMO

Este trabalho fundamenta-se em uma revisão sistemática sobre o sistema de mínima quantidade de lubrificante (MQL). Nesse sentido, o objetivo se baseia no levantamento das contribuições do sistema MQL para a usinagem mecânica, como os níveis de rugosidade, força de corte, desgaste da ferramenta, microdureza superficial, economia e ecologia proporcionadas pelo sistema se comparado com o corte por inundação e corte à seco. Sendo assim, foi realizada uma busca sobre o sistema de mínima quantidade de lubrificante no banco de dados Scopus e depois, foram classificados e analisados os artigos encontrados para formulação de uma síntese dos documentos selecionados e levantamento das contribuições do sistema de mínima quantidade de lubrificante. Dessa forma, foram apontados, os ganhos do sistema MQL em relação ao corte à seco e as semelhanças dos resultados com o método por inundação. Tais ganhos são proporcionados principalmente, pela capacidade de lubrificação do sistema MQL, mesmo com quantidade mínima de fluido, devido a uma potencialização de penetrabilidade do fluido nas interfaces de trabalho.

Palavras-chave: MQL. Mínima quantidade de lubrificante. Usinagem mecânica. Revisão sistemática.

## **ABSTRACT**

This work is based on a systematic review of the minimum quantity lubrication system (MQL). In this sense, the objective is based on the survey of the contributions of the MQL system for mechanical machining, such as the levels of roughness, cutting force, tool wear, surface microhardness, economy and ecology provided by the system compared to flood cutting and cutting dry. Therefore, a search for the minimum quantity lubrication system was carried out in the Scopus database and afterwards, the articles found were classified and analyzed to formulate a synthesis of the selected documents and survey the contributions of the minimum quantity lubrication system. Thus, the gains of the MQL system in relation to dry cutting and the similarities of the results with the flood method were pointed out. Such gains are mainly provided by the lubrication capacity of the MQL system, even with a minimum amount of fluid, due to an increase in fluid penetrability at the work interfaces.

Keywords: MQL. Minimum quantity lubrication. Mechanical machining. Systematic review.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores utilizados nos testes.....	33
Tabela 2 - Parâmetros de usinagem utilizados. ....	36
Tabela 3 - Configuração de vazão e pressão dos sistemas utilizados. ....	41
Tabela 4 - Parâmetros de usinagem utilizados. ....	46

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Direção dos movimentos de corte, de avanço e efetivo no torneamento..	18
Figura 2 - Formas de cavacos produzidas na usinagem dos metais.....	20
Figura 3 - Metodologia desenvolvida.....	25
Figura 4 - Passagem interna do lubrificante.....	36
Figura 5 - Desgaste da ferramenta na usinagem a seco e com uso de MQL. ....	57



## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Levantamento do ano de publicações x número de artigos.....	28
Gráfico 2 - Rugosidade em relação à velocidade de corte utilizando usinagem à seco, lubri-refrigeração abundante e sistema MQL.....	29
Gráfico 3 - Rugosidade em relação ao avanço utilizando usinagem à seco, lubri-refrigeração abundante e sistema MQL. ....	30
Gráfico 4 - Rugosidade em relação à dureza do material utilizando usinagem à seco, lubri-refrigeração abundante e sistema MQL. ....	30
Gráfico 5 - Rugosidade em relação ao raio da ponta da ferramenta utilizando usinagem à seco, lubri-refrigeração abundante e sistema MQL. ....	31
Gráfico 6 - Rugosidade x tipo de lubri-refrigeração. ....	33
Gráfico 7 - Níveis de microdureza em relação aos tipos de lubri-refrigeração. ....	34
Gráfico 8 - Desgaste do rebolo em função dos tipos de lubri-refrigeração.....	35
Gráfico 9 - Média das rugosidades encontradas para velocidade de corte de 90m/min.....	37
Gráfico 10 - Média das rugosidades encontradas para velocidade de corte de 120m/min.....	37
Gráfico 11 - Média das rugosidades encontradas para velocidade de corte de 150m/min.....	38
Gráfico 12 - Força de corte variando a velocidade de corte para cada avanço determinado. ....	39
Gráfico 13 - Força de corte variando o avanço do torneamento para cada velocidade de corte determinada. ....	39
Gráfico 14 - Desgaste de flanco para uma velocidade de corte de 90m/min. ....	40
Gráfico 15 - Força de corte em relação a variação da profundidade de corte para cada sistema de lubri-refrigeração propostas.....	42
Gráfico 16 - Eficiência dos processos em relação a variação da profundidade de corte para cada sistema de lubri-refrigeração propostos. ....	43
Gráfico 17 - Rugosidades encontradas em relação a variação da profundidade de corte para cada sistema de lubri-refrigeração propostos. ....	44
Gráfico 18 - Desgaste do rebolo em relação a variação da profundidade de corte para cada sistema de lubri-refrigeração propostos. ....	44

Gráfico 19 - Microdureza superficial em relação a variação da profundidade de corte para cada sistema de lubri-refrigeração propostos. ....	45
Gráfico 20 - Média das médias para o parâmetro de rugosidade $R_q$ . ....	46
Gráfico 21 - Níveis de rugosidade $R_q$ para cada experimento realizado. ....	47
Gráfico 22 - Média das temperaturas dos testes realizados. ....	48
Gráfico 23 - Temperaturas encontradas em cada experimento. ....	48
Gráfico 24 - Rugosidade variando com a velocidade de corte. ....	50
Gráfico 25 - Rugosidade variando com o avanço da ferramenta. ....	51
Gráfico 26 - Rugosidade variando com a profundidade de corte. ....	51
Gráfico 27 - Força de corte variando com a velocidade de corte. ....	52
Gráfico 28 - Força de corte variando com avanço. ....	52
Gráfico 29 - Força de corte variando com a profundidade de corte. ....	53
Gráfico 30 - Desgaste de flanco (VB) versus tempo de usinagem. ....	54
Gráfico 31 - Força axial (a) e força radial (b) no torneamento. ....	55
Gráfico 32 - Força de atrito proporcional à força normal. ....	56
Gráfico 33 - Comparação entre MQL (utilizando fluido UE-3) e sistemas de lubri-refrigeração. ....	58
Gráfico 34 - Comparação entre MQL (utilizando fluido CO-1) e sistemas de lubri-refrigeração. ....	58
Gráfico 35 - Desgaste de flanco principal. ....	59
Gráfico 36 - Desgaste de flanco auxiliar. ....	60
Gráfico 37 - Nível de rugosidade. ....	60

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Estratificação e classificação dos artigos encontrados. ....	27
Quadro 2 - Parâmetros ideias para aplicação do MQL. ....	61

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas técnicas.
AISI	<i>American Iron and Steel Institute.</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization.</i>
MQF	Mínima quantidade de fluido.
MQCL	<i>Minimum quantity cooling lubrication.</i>
MLQ	Mínima quantidade de Lubrificante.

## SUMÁRIO

RESUMO.....	4
ABSTRACT.....	5
LISTA DE TABELAS .....	6
LISTA DE ILUSTRAÇÕES .....	7
LISTA DE GRÁFICOS .....	8
LISTA DE QUADROS.....	10
SUMÁRIO .....	11
1 INTRODUÇÃO .....	14
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
2.1 Usinagem: conceitos e definições.....	16
2.1.1 <i>Movimentos e grandezas nos processos de usinagem</i> .....	17
2.2 Mecanismo de formação do cavaco .....	18
2.3 Fluidos de corte.....	21
3 METODOLOGIA .....	23
4 RESULTADOS.....	26
4.1 Síntese dos artigos .....	28
4.1.1 <i>Analysis of surface roughness during machining of hardened AISI 4340 steel using minimum quantity lubrication (Análise da rugosidade superficial durante a usinagem do aço endurecido AISI 4340 usando quantidade mínima de lubrificação.)</i> .....	28
4.1.2 <i>Environmentally friendly manufacturing: behavior analysis of minimum quantity of lubricant – mql in grinding process (Fabricação ambientalmente correta: análise do comportamento da mínima quantidade de lubrificante – mql no processo de retificação.)</i> .....	32
4.1.3 <i>Minimal quantity cooling lubrication in turning of Ti6Al4V: influence on surface roughness, cutting force and tool wear (Resfriamento com mínima quantidade de lubrificante no torneamento de Ti6Al4V: influência na rugosidade da superfície, força de corte e desgaste da ferramenta.)</i> .....	35
4.1.4 <i>Performance evaluation of various cooling-lubrication techniques in grinding of hardened AISI 4340 steel with vitrified bonded CBN wheel (Avaliação de desempenho de várias técnicas de lubri-refrigeração no desgaste do aço endurecido AISI 4340 utilizando disco de CBN com ligação vitrificada)</i> .....	41

4.1.5	<i>Machinability investigations of hardened steel with biodegradable oil-based MQL spray system (Investigações da usinabilidade de aço endurecido com sistema de pulverização MQL à base de óleo biodegradável).</i>	45
4.1.6	<i>Comparative assessment of machining environments (dry, wet and MQL) in hard turning of AISI 4140 steel with CC6050 tools (Avaliação comparativa de ambientes de usinagem (seco, inundado e MQL) em torneamento rígido de aço AISI 4140 com ferramentas CC6050).</i>	49
4.1.7	<i>Effect of cutting fluids applied in mql mode on machinability of Ti-6Al-4V (Efeito dos fluidos de corte aplicados no modo mql na usinabilidade de Ti-6Al-4V).</i>	54
4.1.8	<i>Near-dry machining of titanium alloy with MQL and hybrid mist supply (Usinagem quase seca de liga de titânio com MQL e fornecimento de névoa híbrida).</i>	56
4.1.9	<i>An investigation in analysis of dry turning in mql method for predicting tool wear and to improve surface roughness (Uma investigação na análise do torneamento a seco no método mql para prever o desgaste da ferramenta e melhorar a rugosidade da superfície).</i>	59
5	<b>DISCUSSÕES</b>	60
5.1	Rugosidade	61
5.2	Microdureza superficial	62
5.3	Desgaste da ferramenta	63
5.4	Força de corte	64
5.5	Economia e ecologia	65
6	<b>CONCLUSÕES</b>	66
	<b>REFERÊNCIAS</b>	68

## 1 INTRODUÇÃO

Usinagem mecânica é um processo de fabricação que consiste basicamente na remoção de material da peça, denominado cavaco, através de uma ferramenta de corte (CHIAVERINI, 1986). Vários fatores influenciam no processo de usinagem, tais como, o tipo de ferramenta e seus possíveis revestimentos, material da peça e o tipo de fluido de corte. Dentre esses fatores o fluido de corte possui grande influência na produtividade, na qualidade da peça usinada e na remoção do calor gerado durante a usinagem (KIMINAMI; CASTRO; OLIVEIRA, 2018).

A energia utilizada na remoção do cavaco se transforma, quase inteiramente, em calor. Segundo Ferraresi (1970), essa transformação se dá, em grande parte, pela deformação plástica causada na remoção do cavaco e o restante é atribuído ao atrito do sistema. O calor resultante desse atrito, até certo ponto, é considerado benéfico, pois, ele diminui as tensões de cisalhamento do material, entretanto, o excesso de calor é prejudicial ao processo podendo causar problemas dimensionais à peça, prejudicando sua qualidade, além de diminuir a vida da ferramenta que, ao ser exposta a elevadas temperaturas, reduz sua resistência a deformações plásticas. Portanto, é aparente a influência da temperatura no processo de usinagem, sendo necessária a utilização de meios para controle de tal grandeza (SANTOS; SALES, 2007).

Deste modo é necessário, no processo de usinagem, o controle da temperatura que, por consequência, garantirá à ferramenta uma vida útil mais longa e à peça uma melhor qualidade dimensional. Segundo Bianchi, Aguiar e Piubeli (2003), as principais funções dos fluidos de corte são a refrigeração do sistema e a lubrificação entre as regiões de atrito, proporcionando assim o controle do calor gerado na região de corte.

Entretanto, mesmo sendo de grande importância para o processo de usinagem, os fluidos de corte causam impactos negativos no meio ambiente por se tratar de substâncias tóxicas. O descarte desses fluidos possui muita burocracia sendo um dos responsáveis pelo aumento do custo final do processo (BIANCHI et al., 2010).

Dessa forma, segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2014), algumas técnicas de lubrificação têm sido intensamente estudadas e dentre elas está a técnica de mínima quantidade de lubrificante (MQL). Ainda segundo Diniz,

Marcondes e Coppini (2014), no sistema MQL, o fluido é pulverizado num fluxo de ar comprimido durante o processo de corte. É notável o ganho ambiental referente à diminuição da quantidade de fluidos utilizados. Além disso, se comparado com o método de corte à seco, existe um resultado na usinagem com maior qualidade e uma vida de ferramenta maior. Entretanto, o mais preocupante são os subprodutos gerados pelo processo MQL como, por exemplo, a névoa que fica em suspensão no ar tornando essencial um sistema de exaustão na máquina, além disso, todo o fluido pulverizado é consumido no sistema, não sendo possível sua reutilização.

A principal contribuição do MQL é em relação ao ganho ecológico que o sistema proporciona. Ademais, Usinagem Brasil (2012), relata que o sistema MQL proporciona lubrificação mais eficiente por aplicar o fluido com maior precisão e também um custo de usinagem menor se comparado com o sistema de aplicação de fluido de corte por inundação.

Tendo em vista a importância do sistema MQL na usinagem, este trabalho é norteado pela seguinte pergunta: 'Qual a relevância e contribuição, para a usinagem, do sistema de mínima quantidade de lubrificante (MQL)?'.

Como objetivo geral este trabalho realiza um levantamento de publicações científicas relevantes, que estão contidas entre os anos de 2015 a 2020, sobre o sistema MQL e aponta como a utilização desse sistema contribui para o processo de usinagem.

Os objetivos específicos são:

- Pesquisar qual a relevância do sistema de mínima quantidade de lubrificante (MQL) nas pesquisas e trabalhos acadêmicos.
- Analisar a contribuição e desenvolvimento do processo de MQL.
- Apresentar a importância e a contribuição do sistema MQL para melhoria da usinagem.

Devido à importância ambiental e econômica para o uso de métodos de lubri-refrigeração com baixo fluxo de aplicação, o estudo sobre os benefícios e relevância do sistema MQL nos artigos publicados entre 2015-2020 que são tratados neste trabalho, se fez necessário para que novas pesquisas e desenvolvimentos do processo venham ser realizados.

Este trabalho conta com o primeiro capítulo realizando uma breve introdução ao conceito de MQL e a importância do seu estudo, no segundo capítulo foi feita uma revisão bibliográfica para contextualizar e conceituar,



aprofundadamente, o tema e assuntos relacionados a ele, no terceiro capítulo foram apresentados os métodos e materiais utilizados no trabalho sendo estes uma revisão bibliográfica, numa abordagem qualitativa, realizada nos artigos publicados entre os anos de 2015-2020 que foram coletados no portal Scopus. Já no quarto capítulo, foi realizada a apresentação dos resultados, no quinto capítulo foram apresentadas as discussões dos resultados e por fim, no sexto capítulo, foram expostas as conclusões e considerações finais deste trabalho.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Usinagem: conceitos e definições**

Usinagem é um processo de fabricação que consiste na retirada de material da peça por uma ferramenta de corte. Esse material retirado é conhecido como cavaco e possui geometria irregular. O objetivo central é fornecer à peça forma, dimensão e acabamento (FERRARESI, 1970).

Pode se dizer que a revolução industrial teve grande impacto no crescimento e desenvolvimento da usinagem devido à economia de manufatura ter sido fortemente estimulada por esse marco histórico, dessa forma, a usinagem possui grande representação e importância no mercado. Tal importância é consequência da aplicação do processo em diversos tipos de materiais, da possibilidade de fabricar peças com geometrias complexas, com tolerâncias dimensionais estreitas e acabamentos superficiais elevados (GROOVER, 2016).

A usinagem possui grande importância no mercado devido à retenção de diversos processos. Segundo AdNormas (2019) 80% dos furos e 100% dos processos de acabamentos superficiais são realizados através da usinagem. Portanto, sua presença no ambiente metal mecânico é aparente, seja como processo principal ou como complementação.

As operações que compõem o processo de usinagem são classificadas segundo Chiaverini (1986) em: torneamento, aplainamento, furação, mandrilhamento, fresamento, serramento, brochamento, roscamento, retificação entre outros. Tais operações possuem parâmetros e elementos que auxiliam o processo, tais como: velocidade de corte, avanço, profundidade de corte, ferramentas e o fluido de corte.

### 2.1.1 Movimentos e grandezas nos processos de usinagem

Os movimentos que permitem a execução do processo de usinagem são classificados como ativos, ou seja, que são responsáveis pela remoção de material, e passivos, que mesmo não sendo responsáveis pela remoção de material são fundamentais. Tais movimentos são compostos por direção, sentido, velocidade e percurso, realizando assim a parametrização do processo de usinagem (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

Os movimentos ativos são compostos pelo movimento de corte, movimento de avanço e movimento efetivo. De acordo com Silveira ([2019?]), o movimento que retira cavaco, durante uma revolução ou curso, realizado simultaneamente com o movimento que retira cavaco de forma contínua ou cíclica durante várias revoluções ou cursos resultam no movimento efetivo de corte.

As direções e os sentidos dos movimentos relacionados aos tempos de usinagem determinam as velocidades do processo. As velocidades possuem como ponto de referência, segundo Machado et al. (2015), a aresta de corte da ferramenta. Os autores ainda apontam que o módulo da velocidade do ponto de referência na direção e sentido do corte, determina a velocidade de corte, e na direção e sentido do avanço, a velocidade de avanço. Análogo à relação dos movimentos, a velocidade efetiva de corte é a soma vetorial da velocidade de corte com a velocidade de avanço.

Dessa forma, algebricamente, as velocidades na usinagem podem ser definidas como:

$$v_c = \frac{\pi * d * n}{1000} [m/min] \quad (1)$$

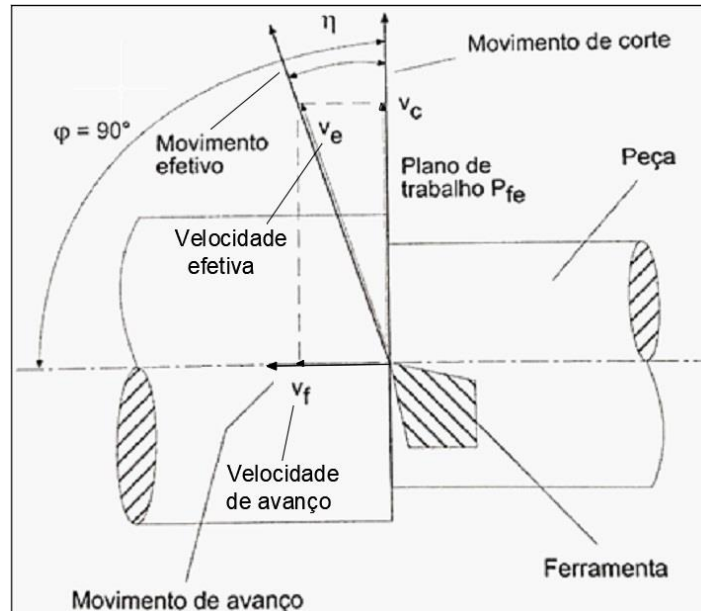
$$v_f = f * n [mm/min] \quad (2)$$

$$\vec{v}_e = \vec{v}_c + \vec{v}_f [m/min] \quad (3)$$

Nota-se a relação direta existente entre a rotação, que em alguns processos é realizada pela ferramenta e em outros pela peça, com as velocidades do sistema.

A figura 1 apresenta os vetores velocidade, os movimentos no processo e os ângulos de direção de avanço e direção efetiva. Trata-se de uma representação esquemática de um processo de torneamento.

Figura 1 - Direção dos movimentos de corte, de avanço e efetivo no torneamento.



Fonte - DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2014.

Portanto, como descrito na equação (3), é possível observar, na figura 1, o vetor resultante da soma vetorial entre a velocidade de corte ( $v_c$ ) e a velocidade de avanço ( $v_f$ ), gerando o movimento responsável por formar cavacos, ou seja, realizar efetivamente a usinagem do material.

As velocidades que formam os movimentos ativos na usinagem influenciam a forma do cavaco retirado através da variação dos seus níveis (MACHADO et al., 2015). Porém, não somente tal variação é determinante para o tipo de cavaco gerado, ou seja, eles também são influenciados pelo tipo de material usinado, processamento realizado e ferramenta utilizada (GROOVER, 2016).

## 2.2 Mecanismo de formação do cavaco

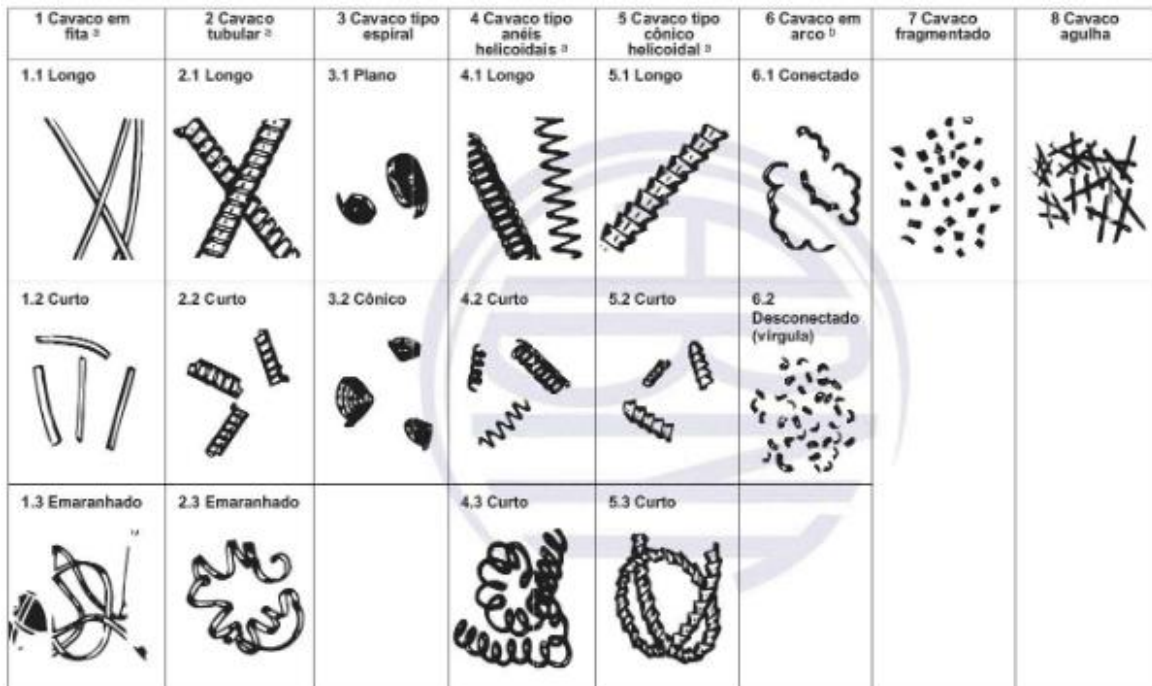
A teoria, desenvolvida por Väino Piispanen em meados da década de 1930 foi que a formação do cavaco se dá pelo escorregamento de finas camadas sobrepostas causadas pelo movimento da ferramenta em relação à peça (RODRIGUES, 2019).

Coelho e Silva (2018) descrevem a formação do cavaco em quatro etapas. A primeira consiste na penetração realizada pela ferramenta na peça e o início da formação do cavaco que pressiona sua superfície de saída. A segunda etapa é caracterizada pela ruptura do material provocada por uma tensão de cisalhamento que se originou na mudança do regime de deformação elástico para plástico. Ainda na segunda etapa, existe a formação de uma trinca e o início do deslizamento da parte rompida sobre a superfície de saída da ferramenta, porém, tal parte rompida ainda está conectada à peça. Na terceira etapa a ferramenta continua penetrando na peça e existe uma propagação da trinca resultando em uma ruptura parcial ou completa na região cisalhada, determinando o tipo de cavaco. Por fim, a quarta etapa consiste no escorregamento do material rompido sobre a superfície de saída da ferramenta e o início de um novo ciclo na formação do cavaco.

Os cavacos podem ser classificados de duas maneiras, quanto ao tipo e quanto à forma. Para o primeiro, os fatores determinantes de formação são a ductilidade e a condutividade térmica da peça, já para a forma o avanço na usinagem é o parâmetro mais determinante. Segundo Machado e Silva (2004), os tipos de cavacos se dividem em quatro possibilidades que são: contínuo, parcialmente contínuo, descontínuo e segmentado. Já, em relação às formas, os cavacos podem ser classificados, exceto os do tipo descontínuo, de acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2014): cavaco em fita, cavaco helicoidal, cavaco espiral e cavaco em lascas ou pedaços.

A seguir está representado um detalhamento das formas dos cavacos conforme a norma ISO 3685:

Figura 2 - Formas de cavacos produzidas na usinagem dos metais.



Fonte – ABNT, 2017.

Dentre as formas de cavacos apresentadas, Coelho e Silva (2018), afirmam que os cavacos com maior comprimento, contribuem para os maiores transtornos quanto à produtividade, podendo ser controlados com o uso de um dispositivo quebra cavacos.

Ferraresi (1970) apresenta que os atritos entre a ferramenta com o cavaco e com a peça somados com a deformação da raiz do cavaco geram calor no final do processo. Esse aumento da temperatura está intimamente ligado ao desgaste da ferramenta, limitando assim a velocidade do processo para conservar sua integridade.

A alta temperatura que o processo de usinagem alcança próximo à aresta cortante da ferramenta está intimamente ligada ao atrito entre peça, cavaco e ferramenta (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014). Na formação do cavaco existe uma geração de calor proveniente da transformação da energia. Segundo Santos e Sales (2007), o calor resultante da formação do cavaco é gerado nas zonas de cisalhamento devido a transformação da energia mecânica, utilizada para realizar a ruptura do material, em energia térmica. Esse calor é transmitido ao sistema em grande parte pelo cavaco e o restante se divide entre a peça, ferramenta e meio ambiente. O calor recebido pela ferramenta é relativamente baixo, porém a temperatura associada pode chegar, em certos casos, à 1100°C, o que compromete

a integridade e a resistência da ferramenta. Portanto, o controle da temperatura na usinagem possui grande importância, pois envolvem aspectos econômicos e de qualidade dos produtos gerados (MACHADO et al., 2015).

Um dos meios de dissipação do calor gerado nas interfaces de trabalho é a utilização de fluido de corte (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014). O fluido de corte é responsável pelo resfriamento e lubrificação das superfícies, da peça e da ferramenta, que estão envolvidos no processo, portanto, contribuem para se obter operações mais rápidas e com melhor acabamento superficial (CHIAVERINI, 1986).

### **2.3 Fluidos de corte**

Em 1890 F. W. Taylor introduziu o conceito e utilização de fluidos de corte na usinagem dos materiais. Seus testes proporcionaram um aumento na velocidade de corte em 33%, e também proporcionaram o resfriamento da ferramenta. Além do fluido composto apenas por água, que possui alto efeito oxidante, Taylor usou também uma mistura de água e sabão para tentar inibir tal problema (LISBOA; MORAES; HIRASHITA, 2013).

Os fluidos de corte para o processo de usinagem possuem algumas funções como: lubrificar, refrigerar, retirar cavaco da região de corte e promover proteção contra corrosão. Suas funções como lubrificante e refrigerante são de extrema importância para a integridade e vida útil da ferramenta. O fluido funciona como lubrificante quando age nas interfaces da ferramenta – peça e ferramenta – cavaco proporcionando uma diminuição do coeficiente de atrito e, por consequência, uma redução do calor gerado. Porém, mesmo com tal redução, ainda há calor gerado pelo processo de formação do cavaco que pode causar efeitos prejudiciais, tanto para a ferramenta, quanto para a peça. Portanto, a função refrigerante do fluido de corte proporciona a extração desse calor, protegendo de igual forma a ferramenta e garantindo uma usinagem com qualidade (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

Machado et al. (2015) relatam que os fluidos de corte apresentam-se nas três fases da matéria, sendo que as fases sólida e gasosa são limitadas às funções específicas, como, redução do coeficiente de atrito e retirada do cavaco da região de corte, respectivamente. Portanto, os fluidos no estado líquido possuem maior representatividade nas aplicações em processos de usinagem e são classificados

como óleos, emulsões e soluções. Para se determinar a escolha do fluido de corte ideal para cada operação três fatores são levados em consideração, e são eles: o material da peça, o material da ferramenta e a operação. Segundo A Voz da Indústria (2017) a importância dos fluidos de corte para a usinagem é refletida na variedade de fluidos encontrados no mercado para diferentes ocasiões. Para a usinagem em geral os fluidos mais indicados são os óleos solúveis, de origem mineral, semissintético, vegetal ou sintético. Já na retificação, para evitar que ocorra empastamento no rebolo, são mais utilizados os lubrificantes solúveis de alto poder de lavagem.

Segundo Alves e Oliveira (2007) são notáveis a importância da utilização de fluidos de corte na usinagem para a obtenção de um produto processado com qualidade, preservação da máquina e ferramenta entre outros benefícios. Entretanto, tal utilização agride o meio ambiente e afeta o ambiente de trabalho devido às emissões, descartes inadequados, contato com o operador, etc. Dessa forma, duas técnicas têm se mostrado eficientes que são a usinagem com mínima quantidade de lubrificante e a usinagem sem utilização de fluido (corte a seco). Existe uma limitação da usinagem sem a utilização de fluidos tornando o corte com mínima quantidade de lubrificante como uma boa alternativa (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

Segundo Lisboa, Moraes e Hirashita (2013), nas operações de usinagem que utilizam MQL são utilizadas pequenas porcentagens de óleo, pulverizando-o na região de corte com vazões na faixa de ml/h, que, quando comparado com a lubri-refrigeração abundante existe uma diferença considerável, pois, esta trabalha com fluxos na faixa de L/min. Segundo Walker (2013), O fluxo de fluido comumente utilizado no sistema MQL varia entre 5 a 80 ml/h, visto que, em casos excepcionais pode variar até 150 ml/h.

Segundo Araujo Junior (2013), a utilização do sistema MQL, mesmo que de um modo geral, é benéfica, considerando uma visão econômica e ecológica. O autor apresenta pontos que devem ser observados e desenvolvidos como: a projeção dos cavacos devido a alta pressão de trabalho e gotículas em suspensão no ar que podem interferir na integridade física do operador e, para que isso não ocorra, é necessário a instalação de um sistema de exaustão e uma vedação na máquina. Além disso, Diniz, Marcondes e Coppini, (2014) levantam outros pontos a serem melhorados no processo, que são: o consumo do fluido utilizado não pode ser

reaproveitado e o ruído gerado pelo compressor no qual contribui fortemente para a poluição sonora do ambiente.

### 3 METODOLOGIA

Gil (2002) define pesquisa como um meio de busca lógica e estruturada, utilizada quando as informações não são suficientes para se responder alguma questão. Em relação aos tipos de pesquisa, o autor afirma que pesquisa bibliográfica se baseia em materiais já formulados como livros e artigos científicos e que grande parte dos estudos exploratórios podem ser atribuídos às pesquisas bibliográficas.

Como definição, esse trabalho se enquadra como sendo uma pesquisa básica de caráter descritiva e exploratória, “Estuda um problema relativo ao conhecimento científico ou à sua aplicabilidade.” (MARCONI; LAKATOS, 2003, p. 160). Segundo Gil (2002), a pesquisa exploratória possui o objetivo de tornar o tema em estudo mais explícito através dos mais diversos meios de coleta de dados e análise, já a pesquisa descritiva, utiliza de meios padronizados de coleta de dados e análise, e possui o objetivo principal de descrever as características e realizar comparações entre as variáveis envolvidas no estudo.

A abordagem de tratamento dos dados foi qualitativa devido às análises sistemáticas que foram realizadas. O método de análise escolhido foi o hipotético-dedutivo pelo fato de a pesquisa girar em torno de uma problemática. Para isso, foi utilizado, um procedimento de pesquisa bibliográfica na literatura, como também, revisão sistemática em artigos científicos publicados entre 2015 e 2020.

Este trabalho possui o objetivo principal de responder a seguinte pergunta: ‘qual a relevância e contribuição, para a usinagem, o sistema de mínima quantidade de lubrificante (MQL) possui baseado nas pesquisas e trabalhos acadêmicos desenvolvidos entre 2015 a 2020?’, para isso, foram pesquisadas publicações científicas relevantes para o processo de MQL e apresentados os pontos de pesquisa encontrados nos artigos.

Segundo a metodologia desenvolvida por Conforto, Silva e Amaral (2011), os seguintes passos foram aplicados:

- a) primeiro passo – Foi realizada uma busca na base de dados scopus da *string*: ‘*minimal AND amount AND of AND fluid AND lubrificante AND machining*’. Os filtros de busca que foram utilizados na pesquisa são:



- Anos de publicações dos documentos, estão entre 2015 e 2020;
- O tipo dos documentos encontrados são artigos científicos.

b) segundo passo – Para os artigos encontrados foram analisados os títulos, resumos e palavras chave observando os seguintes pontos:

- O tema central do artigo relaciona o sistema MQL com a usinagem mecânica;
- Se trata de um estudo de comparação entre o sistema MQL e os meios de lubri-refrigeração abundante e a seco;
- As palavras chave levantadas pelo autor possuem relação com: MQF, MQL, ‘Sistema MQF’, ‘Sistema MQL’, ‘mínima quantidade de fluido’ e ‘mínima quantidade de lubrificante’;
- Os artigos apresentam um estudo de caso e aplicação do sistema MQL.

c) terceiro passo – Depois de realizada a busca e selecionados os artigos foi feito um levantamento dos dados encontrados, estratificando e ordenando os artigos por ano de publicação e número de citações. Em relação ao número de citações, segundo Lopes e Carvalho (2012), foi aplicado o ICc que envolve o número de citações dos artigos e o fator de impacto dos periódicos ao qual os artigos foram publicados. A equação que define o ICc (Índice de correção de citações) é a seguinte:

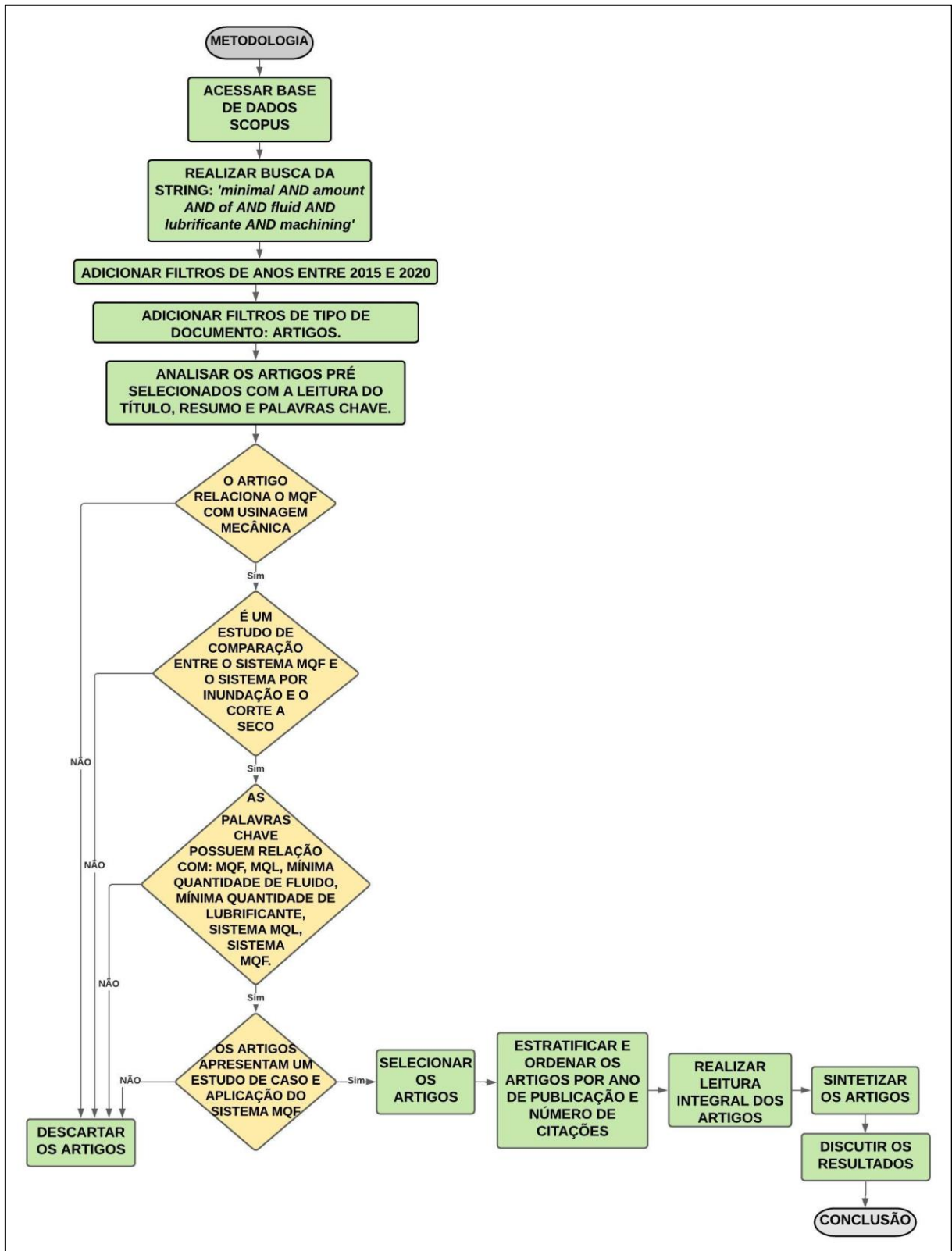
$$ICc = IC * (FI + 1); \quad (4)$$

Onde IC é o número de citações do artigo e FI é o fator de impacto levantado pela JCR (*Journal Citation Reports*);

d) quarto passo – Os artigos aprovados foram lidos integralmente para que fossem obtidos os principais pontos de contribuição e os pontos em progresso do sistema MQL para a usinagem mecânica. O resultado da pesquisa é uma síntese dos artigos que foi apresentada nos tópicos de resultados e discussões. Por fim, o tópico conclusões levantou os principais aspectos observados nas sínteses em uma análise global, considerando todos os artigos lidos.

A seguir está representado, esquematicamente, o fluxo da metodologia que foi utilizada neste trabalho:

Figura 3 - Metodologia desenvolvida.



Fonte – Próprio autor.

## 4 RESULTADOS

Este tópico do trabalho está destinado a apresentar os principais resultados da revisão sistemática referente ao sistema de mínima quantidade de fluido.

A busca realizada na base de dados Scopus com a string '*minimal AND amount AND of AND fluid AND lubrificante AND machining*' resultou em 210 documentos. A aplicação do primeiro contorno de pesquisa que foi o tempo de publicação compreendido entre 2015 a 2020 abateu 113 documentos resultando em 97. Com a aplicação do segundo contorno de pesquisa que foi a aprovação de documentos que fossem artigos científicos, houve a eliminação de 7 documentos restando assim, 90 artigos. Por fim, os filtros de inclusão foram aplicados resultando num total de nove artigos.

Em relação ao local e ano de publicação e ao número de citações, os artigos foram classificados de acordo com o ICc (Equação 4) do “mais representativo” para o “menos representativo” e está apresentado no quadro 1:

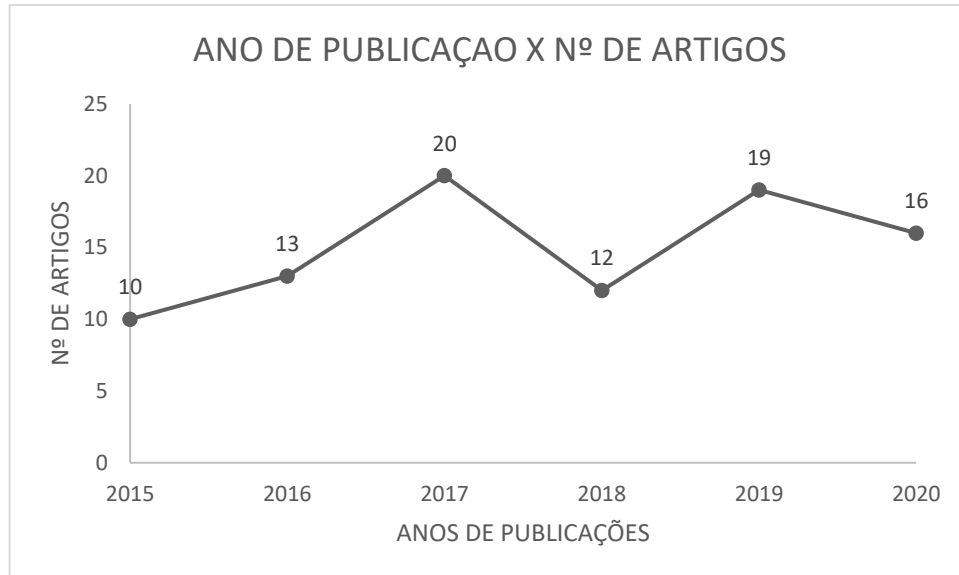
Quadro 1 - Estratificação e classificação dos artigos encontrados.

	TÍTULO	LOCAL DE PUBLICAÇÃO	ANO DE PUBLICAÇÃO	CITAÇÕES	FI	lcc
1º	Analysis of Surface Roughness during Machining of Hardened AISI 4340 Steel using Minimum Quantity lubrication	Materials Today: Proceedings	2017	24	26,416	657,984
2º	Environmentally friendly manufacturing: Behavior analysis of minimum quantity of lubricant - MQL in grinding process	Journal of Cleaner Production	2020	44	7,246	362,824
3º	Minimal quantity cooling lubrication in turning of Ti6Al4V: Influence on surface roughness, cutting force and tool wear	Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture	2017	27	1,982	80,514
4º	Performance evaluation of various cooling-lubrication techniques in grinding of hardened AISI 4340 steel with vitrified bonded CBN wheel	International Journal of Advanced Manufacturing Technology	2017	14	2,633	50,862
5º	Machinability investigations of hardened steel with biodegradable oil-based MQL spray system	International Journal of Advanced Manufacturing Technology	2020	5	2,633	18,165
6º	Comparative assessment of machining environments (dry, wet and MQL) in hard turning of AISI 4140 steel with CC6050 tools	International Journal of Advanced Manufacturing Technology	2019	4	2,633	14,532
7º	Effect of cutting fluids applied in MQCL mode on machinability of Ti-6Al-4V	Journal of Manufacturing Processes	2019	2	4,086	10,172
8º	Near-dry machining of titanium alloy with MQL and hybrid mist supply	Key Engineering Materials	2015	6	0,224	7,344
9º	An investigation in analysis of dry turning in MQL method for predicting tool wear and to improve surface roughness	Indian Journal of Science and Technology	2016	0	1,644	0

Fonte – Próprio autor.

A seguir está representado o levantamento gráfico, do número de artigos publicados em relação aos anos de (2015-2020), que se enquadraram aos requisitos de busca predeterminados:

Gráfico 1 - Levantamento do ano de publicações x número de artigos.



Fonte – Próprio autor.

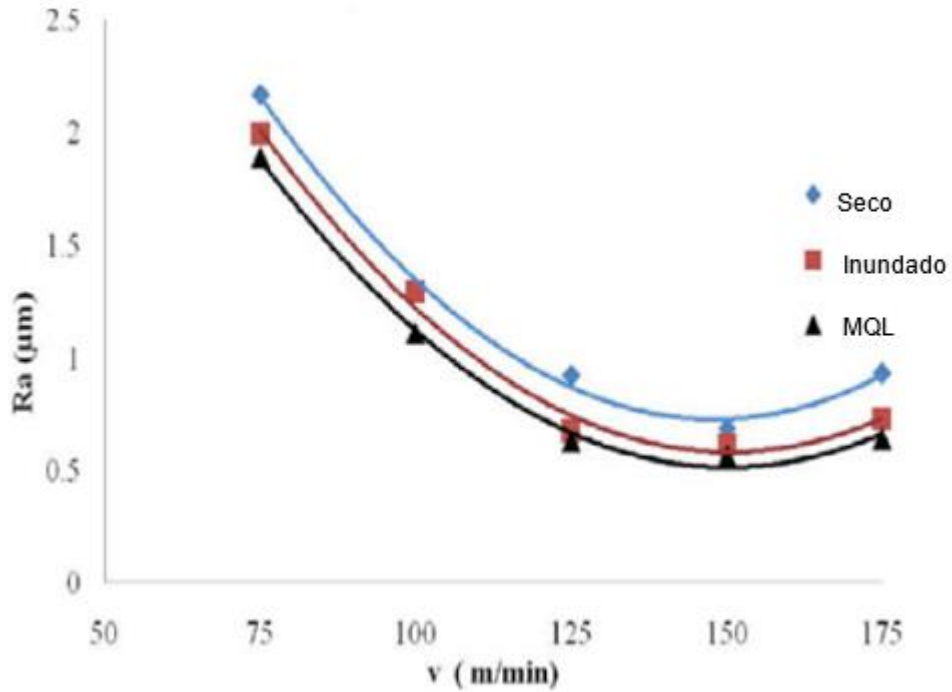
#### 4.1 Síntese dos artigos

##### 4.1.1 *Analysis of surface roughness during machining of hardened AISI 4340 steel using minimum quantity lubrication (Análise da rugosidade superficial durante a usinagem do aço endurecido AISI 4340 usando quantidade mínima de lubrificação).*

Kumar, Singh e Kalsi (2017) realizaram um trabalho que consiste em testes de torneamento de amostras com diferentes níveis de dureza do aço AISI 4340, usando pastilhas de CBN. Para esses testes foram usados cinco níveis diferentes de quatro parâmetros de trabalho que são: velocidade de corte, avanço, dureza da amostra e raio da ponta da ferramenta. Esses testes foram realizados num total de três ciclos, sendo que, em cada ciclo foi usado um tipo de sistema de lubri-refrigeração contando com a usinagem a seco, lubri-refrigeração abundante e sistema MQL. Os dados referentes a composição do sistema abundante e MQL não foram relatados pelo autor.

A seguir estão expostos os resultados de rugosidade encontrados em relação a cada parâmetro de trabalho determinado:

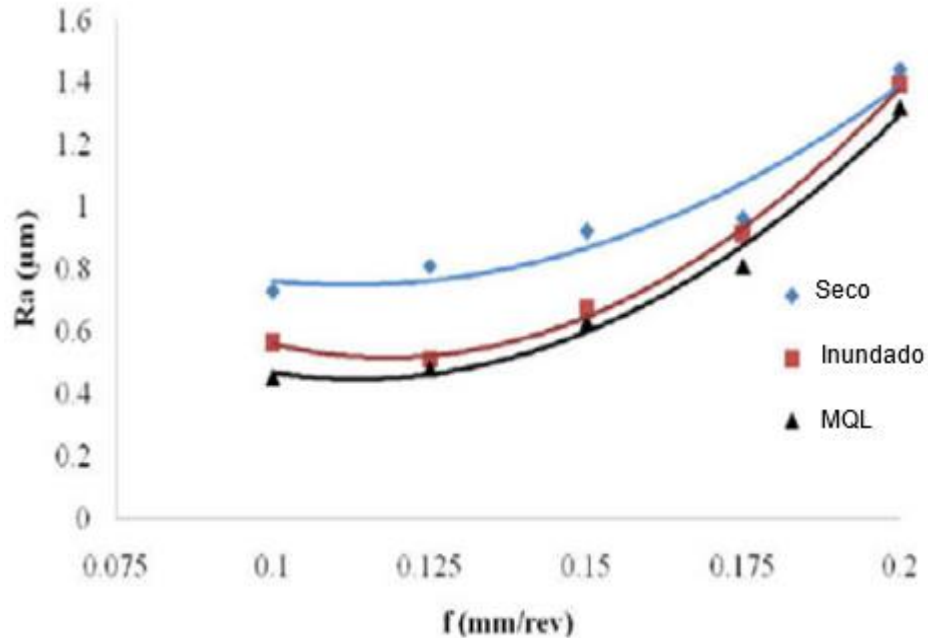
Gráfico 2 - Rugosidade em relação à velocidade de corte utilizando usinagem à seco, lubri-refrigeração abundante e sistema MQL.  
 $f=0,15\text{mm/rev}$  -  $H=50\text{HRC}$  -  $r=0,8\text{mm}$ .



Fonte – KUMAR, SINGH e KALSI, 2017 (Tradução do autor).

Gráfico 3 - Rugosidade em relação ao avanço utilizando usinagem à seco, lubri-refrigeração abundante e sistema MQL.

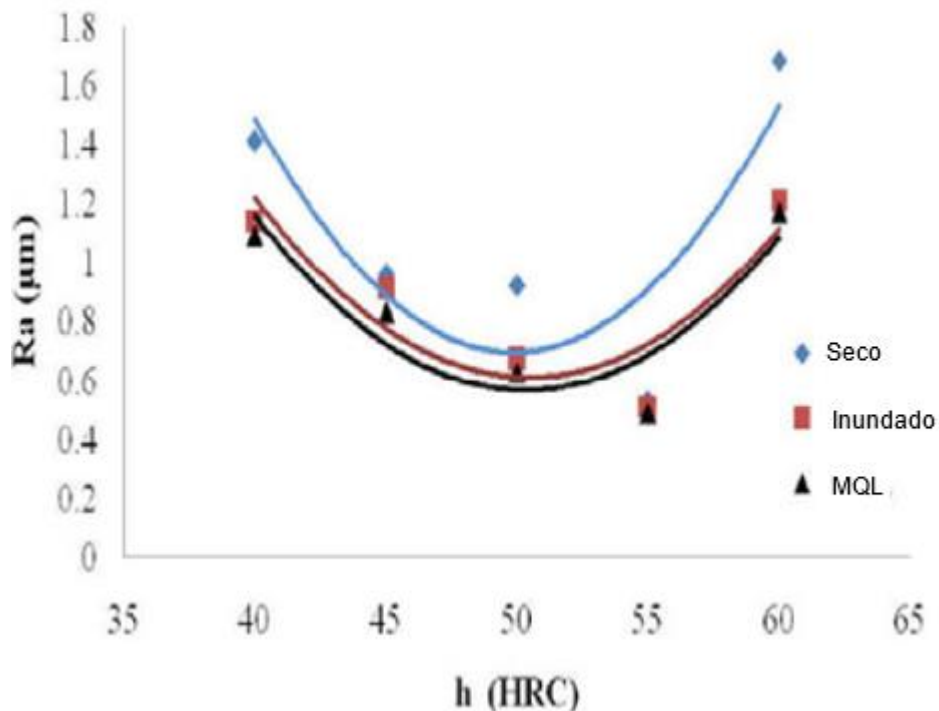
$V_c=125\text{m/min}$  -  $H=50\text{HRC}$  -  $r=0,8\text{mm}$ .



Fonte – KUMAR, SINGH e KALSI, 2017 (Tradução do autor).

Gráfico 4 - Rugosidade em relação à dureza do material utilizando usinagem à seco, lubri-refrigeração abundante e sistema MQL.

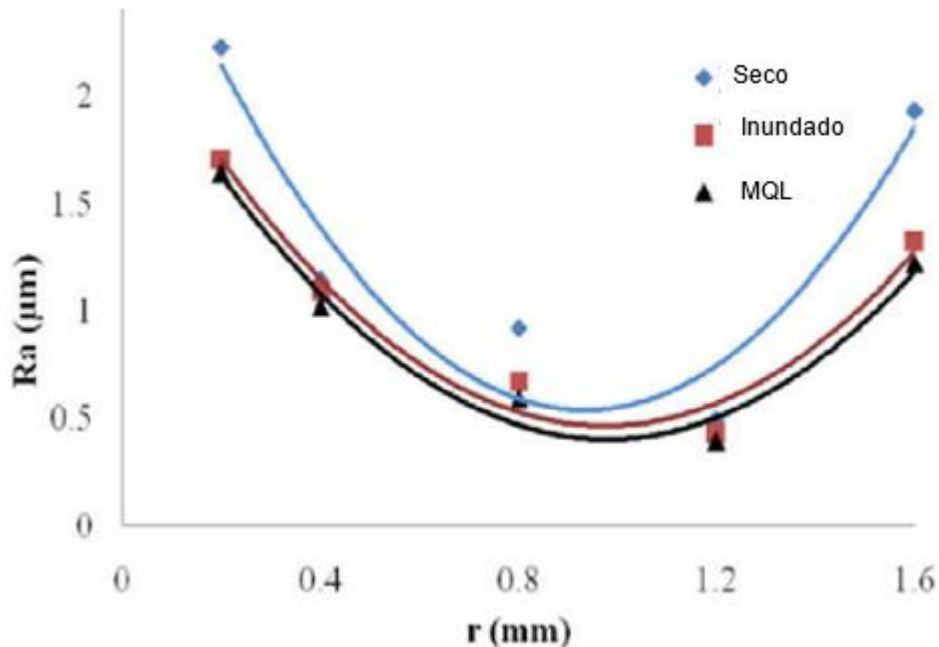
$V_c=125\text{m/min}$  -  $f=0,15\text{mm/rev}$  -  $r=0,8\text{mm}$ .



Fonte – KUMAR, SINGH e KALSI, 2017 (Tradução do autor).

Gráfico 5 - Rugosidade em relação ao raio da ponta da ferramenta utilizando usinagem à seco, lubri-refrigeração abundante e sistema MQL.

$V=125\text{m/min}$  -  $f=0,15\text{mm/rev}$  -  $h=50\text{HRC}$ .



Fonte – KUMAR, SINGH e KALSI, 2017 (Tradução do autor).

A análise dos gráficos nos permite observar a influência positiva do sistema MQL, em relação ao nível de rugosidade da superfície do material, em comparação com a usinagem à seco e o sistema de lubri-refrigeração abundante.

O gráfico 2 retrata a diminuição da rugosidade com o aumento da velocidade de corte. O resultado do MQL, se comparado com o sistema de lubri-refrigeração abundante, foi melhor devido a maior penetrabilidade que o sistema alcança entre as interfaces de trabalho.

O gráfico 3 permite observar um aumento da rugosidade em relação ao aumento do avanço da ferramenta. O sistema MQL proporcionou os menores valores de rugosidade, porém, tais valores não possuem grandes diferenças do sistema por inundação.

Os gráficos 4 e 5 apresentaram comportamentos parecidos, mas, causas diferentes. O gráfico 4 apresenta um declínio da rugosidade até um nível de 55HRC causado pelo auxílio da temperatura do sistema na deformação plástica do material. Após 55HRC a rugosidade aumenta pelo fato do material possuir maior dureza e facilitar o desgaste da ferramenta. Já o gráfico 5 apresenta alta rugosidade quando a ponta da ferramenta possui um raio de aproximadamente 0,2 mm, com o aumento



do raio a rugosidade diminui até um certo ponto crítico que, com o aumento do raio novamente, a rugosidade volta a aumentar.

**4.1.2 *Environmentally friendly manufacturing: behavior analysis of minimum quantity of lubricant – mql in grinding process (Fabricação ambientalmente correta: análise do comportamento da mínima quantidade de lubrificante – mql no processo de retificação).***

Silva et al. (2020) desenvolveram um trabalho que compara diferentes níveis de pulverização do sistema MQL com o sistema de lubri-refrigeração por inundação e corte à seco para o processo de retificação de um corpo de prova com geometria cilíndrica. Como critérios de avaliação de desempenho foram analisadas as rugosidades e microdurezas das superfícies das amostras e o desgaste do rebolo que realizou as operações.

As amostras são compostas pelo aço AISI 4340 temperado e revenido e com dureza superficial de 52HRC. O rebolo utilizado no processo é de óxido de alumínio. O processo contou com a utilização de um dressador de diamante que realizou o ajuste da superfície do rebolo após cada amostra ser retificada.

Em relação aos fluidos utilizados, o sistema MQL contou com o fluido de corte LB1000, já o sistema por inundação contou com uma solução sintética na concentração de 5%. A vazão de fluido que o sistema por inundação utilizou foi na faixa de 11L/min, já o sistema MQL, combinado com uma vazão de ar comprimido, utilizou uma variação de 20 a 80ml/h.

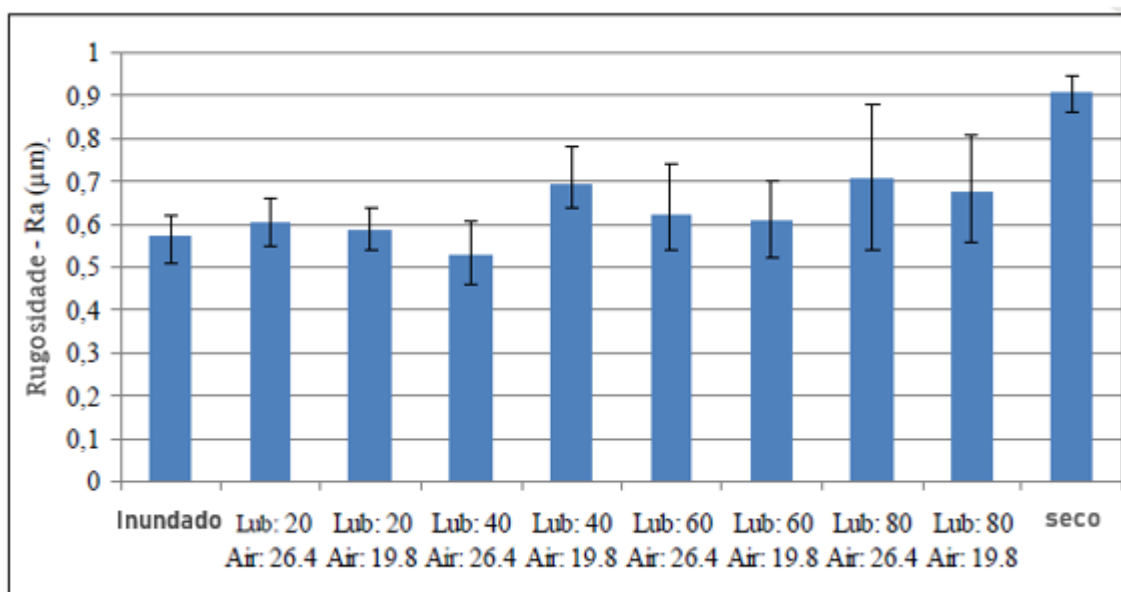
Tabela 1 - Valores utilizados nos testes.

ENSAIOS	TAXA DE FLUXO DO LUBRIFICANTE LB 1000 (ml/h)	VELOCIDADE DO AR COMPRIMIDO (m/s)	TAXA DE FLUXO DO FLUIDO DE CORTE (L/min)
1	20	26,40	-
2	20	19,80	-
3	40	26,40	-
4	40	19,80	-
5	60	26,40	-
6	60	19,80	-
7	80	26,40	-
8	80	19,80	-
9	-	-	11
10	-	-	-

Fonte - SILVA et al., 2020 (Tradução do autor).

A seguir está representado o gráfico 6 que conta com as médias das rugosidades encontradas das cinco análises realizadas de cada configuração de lubri-refrigeração, além da média das rugosidades encontradas no processo de corte à seco:

Gráfico 6 - Rugosidade x tipo de lubri-refrigeração.

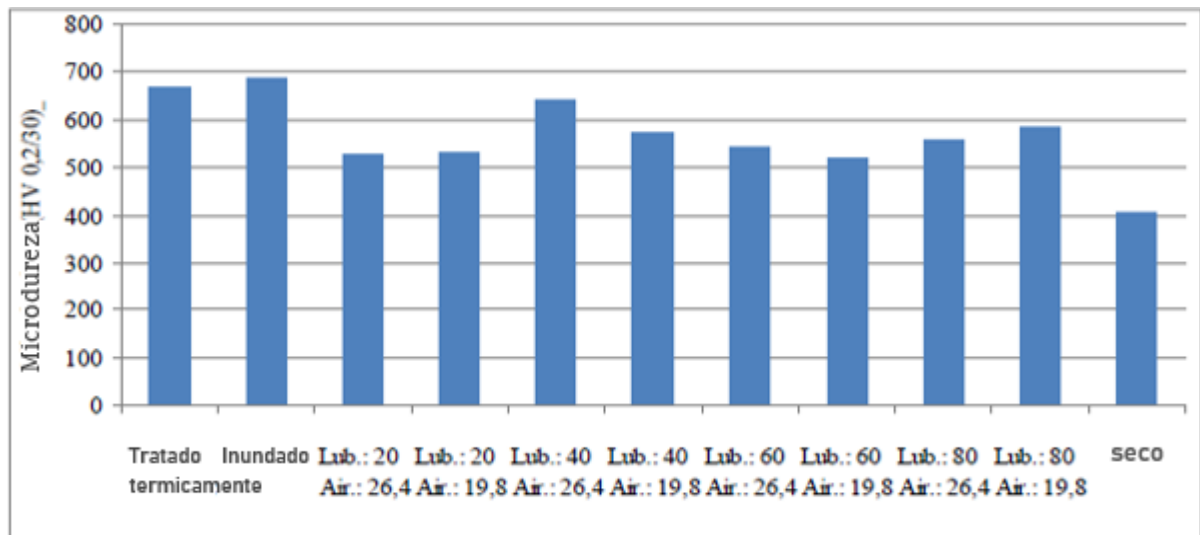


Fonte – SILVA et al., 2020 (Tradução do autor).

Pode ser observado que os níveis de rugosidade utilizando o sistema MQL foram bem parecidos com a média de rugosidades utilizando o sistema de lubri-refrigeração por inundação. Sendo que, em um caso de MQL, quando o fluido possuía um fluxo de 40ml/h e o ar 26,4m/s, a média das rugosidades encontradas foi menor do que a média na lubri-refrigeração por inundação.

A próxima análise realizada foi a microdureza superficial das amostras em relação aos tipos de sistema de lubri-refrigeração que está representada no gráfico a seguir:

Gráfico 7 - Níveis de microdureza em relação aos tipos de lubri-refrigeração.



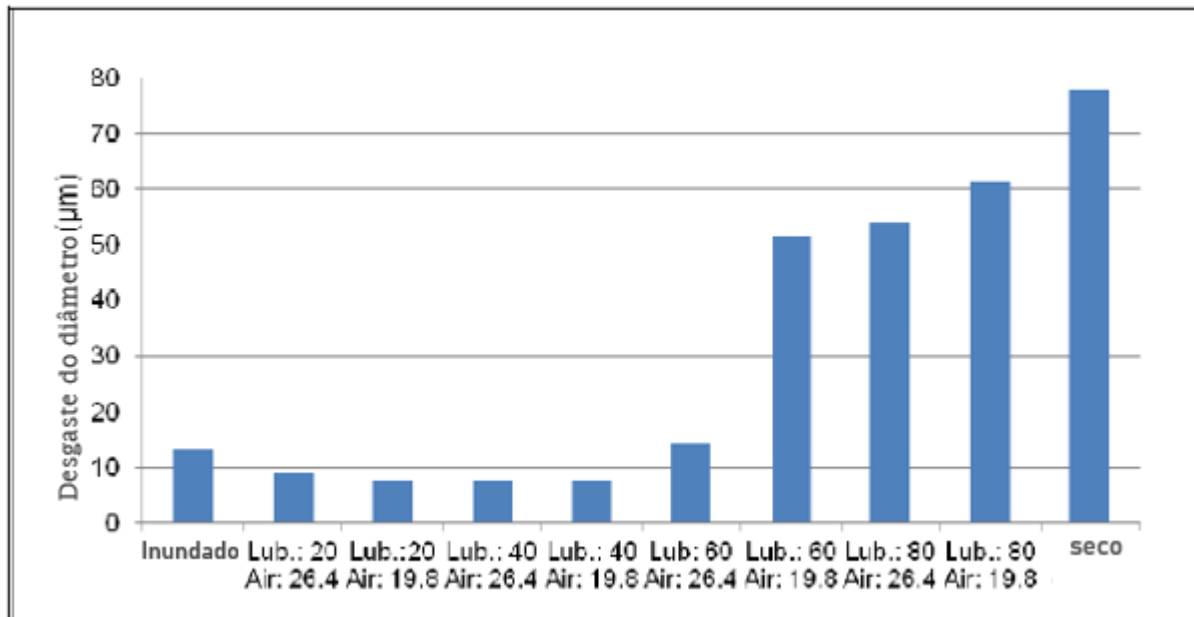
Fonte – SILVA et al., 2020 (Tradução do autor).

No gráfico 7 também está representado o valor da dureza superficial encontrada na amostra sem ser processada por retificação para servir de comparação. Dessa forma, duas situações proporcionaram durezas superficiais parecidas com a amostra original que foram o sistema por inundação e o MQL com 40ml/h e fluxo de ar de 26,4m/s. Em geral, o sistema MQL não superou o sistema por inundação pelo fato de possuir boa capacidade lubrificante, porém, razoável capacidade refrigerante proporcionada pelo ar comprimido. Em relação ao corte a seco, as altas temperaturas alcançadas no processo e o resfriamento lento causam um rearranjo estrutural e, por consequência, uma diminuição da dureza superficial.

Por fim, o gráfico 8 mostra que, em cinco casos de MQL em relação ao sistema por inundação, houve menores desgastes do rebolo. Já o corte à seco proporciona um alto desgaste do rebolo pelo fato de ocorrer o entupimento dos

poros e aderência de material à superfície. Dessa forma se faz necessário a realização da limpeza da superfície através do processo de dressagem, aumentando assim o desgaste e, por consequência, tornando o corte à seco ineficiente para o processo de torneamento.

Gráfico 8 - Desgaste do rebolo em função dos tipos de lubri-refrigeração.



Fonte – SILVA et al., 2020 (Tradução do autor).

#### ***4.1.3 Minimal quantity cooling lubrication in turning of Ti6Al4V: influence on surface roughness, cutting force and tool wear (Resfriamento com mínima quantidade de lubrificante no torneamento de Ti6Al4V: influência na rugosidade da superfície, força de corte e desgaste da ferramenta).***

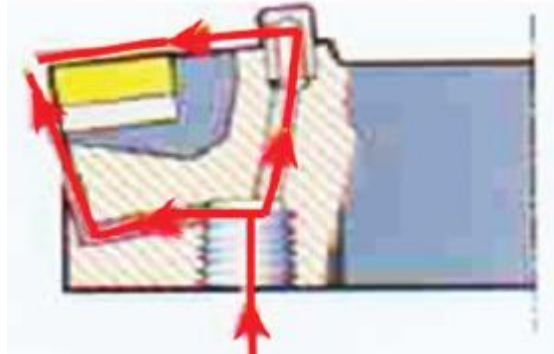
Pervaiz et al. (2017) desenvolveram um trabalho de análise comparativa de desempenho, que utilizou dos resultados de rugosidade da superfície, força de corte e desgaste da ferramenta, entre três tipos de torneamento em relação à lubri-refrigeração, e são eles: corte a seco, lubri-refrigeração abundante e um sistema híbrido, chamado de MQCL, que utiliza MQL, com uma pulverização de ar frio. O material envolvido no processo foi a liga de titânio Ti6Al4V que, segundo o autor, provoca grande aquecimento nas áreas de atrito entre ferramenta, peça e cavaco.

Para o sistema MQCL foi utilizada uma combinação de ar de baixa temperatura (0°C a -6°C) com névoa a base de óleo vegetal que utilizou uma vazão de 4 ml/min. O sistema MQCL ainda contou com uma adaptação na aplicação do

fluido que usou duas saídas na ferramenta, uma externa que lubrificou a parte superior e uma interna que lubrificou a parte inferior.

A seguir está representado na figura 4 o esquema do fluxo do lubrificante na ferramenta e na tabela 2 os parâmetros de usinagem utilizados:

Figura 4 - Passagem interna do lubrificante.



Fonte – PERVAIZ et al., 2017.

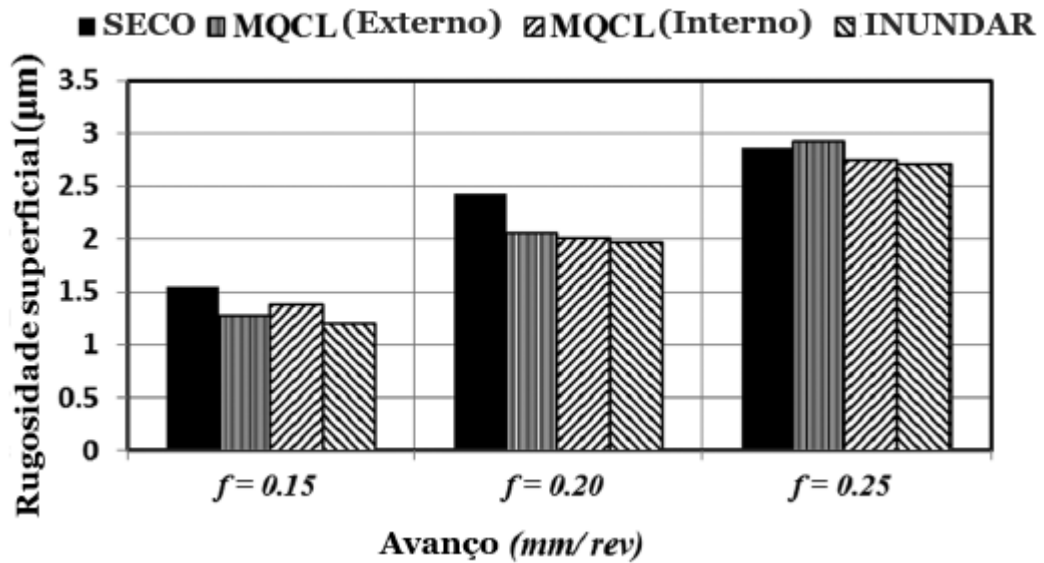
Tabela 2 - Parâmetros de usinagem utilizados.

Parâmetros de usinagem	Níveis
Velocidade de corte	90, 120 e 150 m/min
Avanço	0,15, 0,2 e 0,25 mm/rev
Profundidade de corte	Constante 0,8 mm
Estratégias de resfriamento	Seco
	Resfriamento por inundação (2 L/min)
	MQCL – Mistura de ar à baixa temperatura (0°C à -6°C) e óleo de base vegetal (4 ml/min).
	MQCL interno. MQCL externo.

Fonte – PERVAIZ et al., 2017, p. 7 (Tradução do autor).

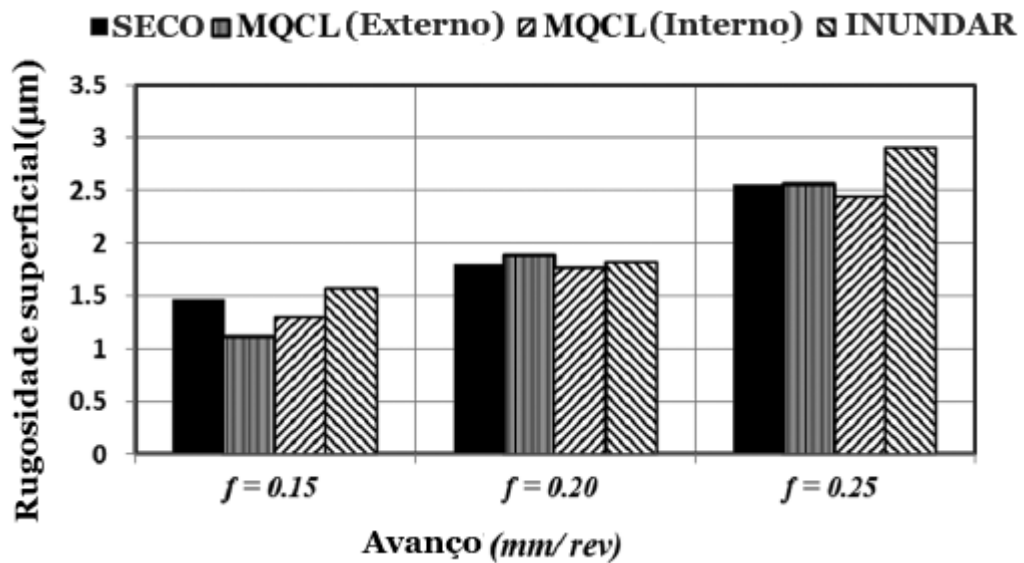
As medidas de rugosidade encontradas, para as velocidades de corte com 90m/min, 120m/min e 150m/min são apresentadas nos gráficos 9, 10 e 11:

Gráfico 9 - Média das rugosidades encontradas para velocidade de corte de 90m/min.



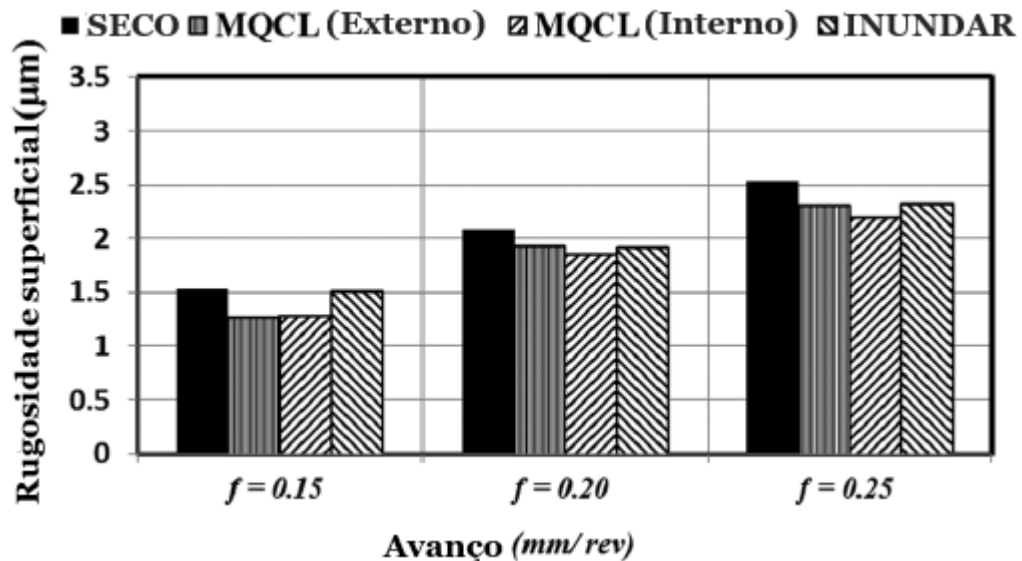
Fonte – PERVAIZ et al., 2017 (Tradução do autor).

Gráfico 10 - Média das rugosidades encontradas para velocidade de corte de 120m/min.



Fonte – PERVAIZ et al., 2017 (Tradução do autor).

Gráfico 11 - Média das rugosidades encontradas para velocidade de corte de 150m/min.



Fonte – PERVAIZ et al., 2017 (Tradução do autor).

Pode-se observar no gráfico 9 que para os avanços testados o sistema MQCL forneceu valores de rugosidade superficial do material semelhantes para o sistema por inundação e menores para o corte a seco, exceto no avanço de 0,25mm/rev que todos os sistemas se aproximaram e o MQCL com aplicação externa sobressaiu aos demais.

Ao alterar a velocidade de corte para 120m/min pôde-se observar, no gráfico 10, menores valores de rugosidade do sistema MQCL para o sistema por inundação e a seco nos avanços de 0,15 e 0,25mm/rev. Quando o torneamento utilizou um avanço de 0,20mm/rev os níveis de rugosidade encontrados para os diferentes sistemas se aproximaram.

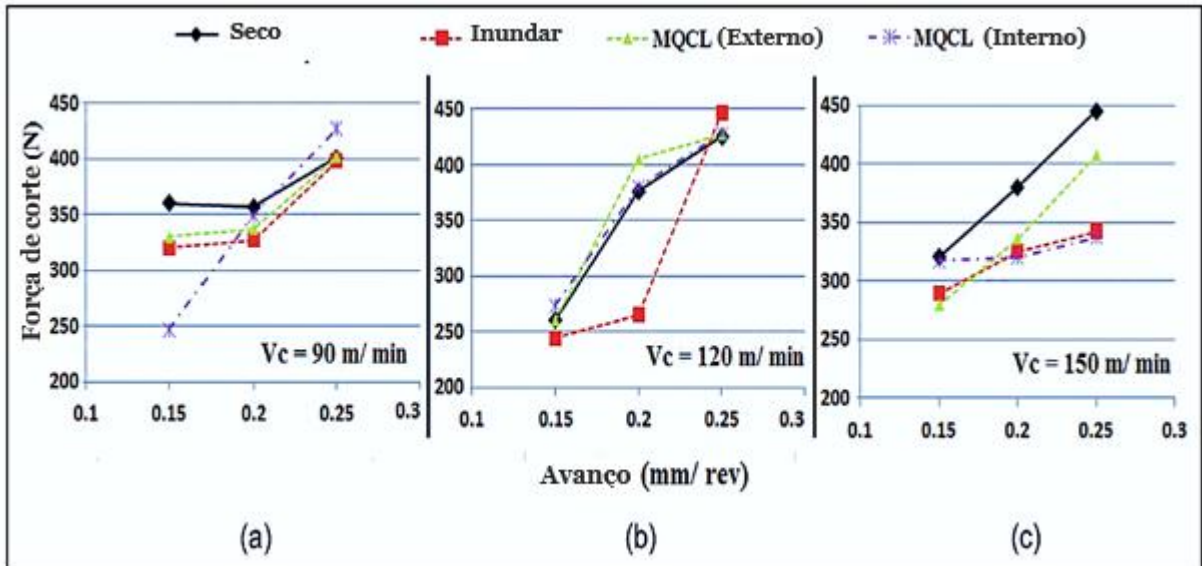
Por fim, no gráfico 11, que utilizou uma velocidade de corte de 150m/min, o MQCL proporcionou menores valores de rugosidade superficial, em relação ao corte à seco, nos três níveis de avanço. Em relação ao sistema por inundação o MQCL proporcionou menores níveis de rugosidade para o menor avanço e nos demais, os níveis de rugosidade encontradas se aproximaram.

A variação encontrada entre os sistemas MQCL interno e externo demonstra que o método de aplicação do sistema MQL é determinante para os níveis de rugosidade superficial.

A segunda análise realizada foi referente à força de corte encontrada para cada sistema de lubri-refrigeração, variando o avanço e a velocidade de corte.

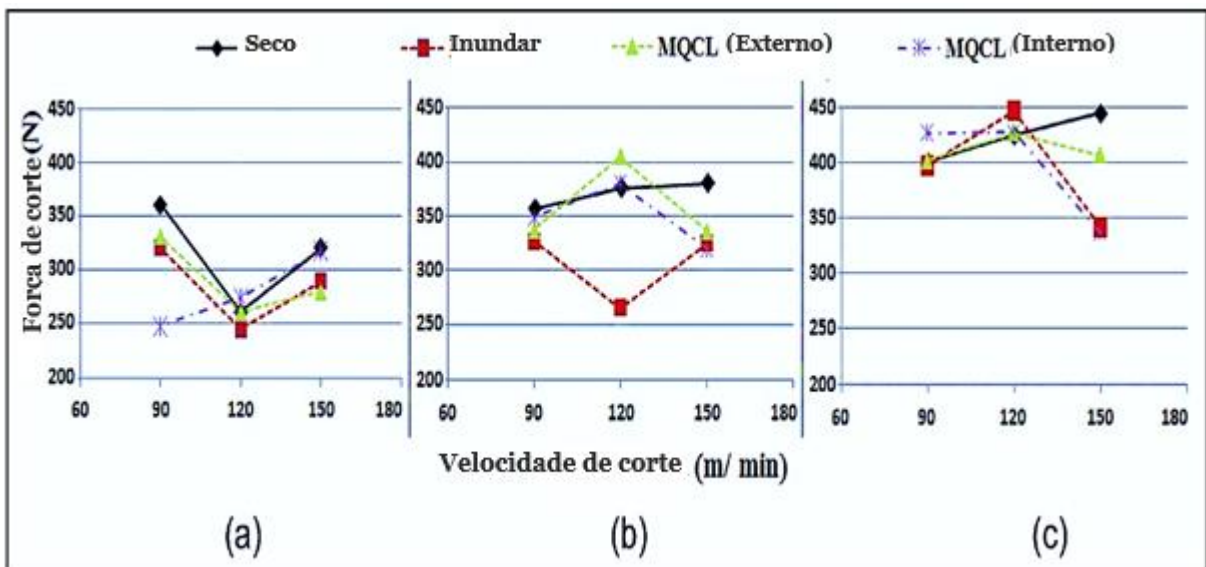
A seguir estão representados os gráficos 12 e 13 que retratam os valores de força de corte encontrados:

Gráfico 12 - Força de corte variando a velocidade de corte para cada avanço determinado.



Fonte – PERVAIZ et al., 2017 (Tradução do autor).

Gráfico 13 - Força de corte variando o avanço do torneamento para cada velocidade de corte determinada.



Fonte – PERVAIZ et al., 2017 (Tradução do autor).

O gráfico 13(a) é referente ao avanço de 0,15mm/rev, o gráfico 13(b) é referente ao avanço de 0,20mm/rev e o gráfico 13(c) é referente ao avanço de 0,25mm/rev.



Para o gráfico 12(a) o método MQCL interno no avanço de 0,15mm/rev obteve o menor resultado da força de corte se comparado com os demais métodos.

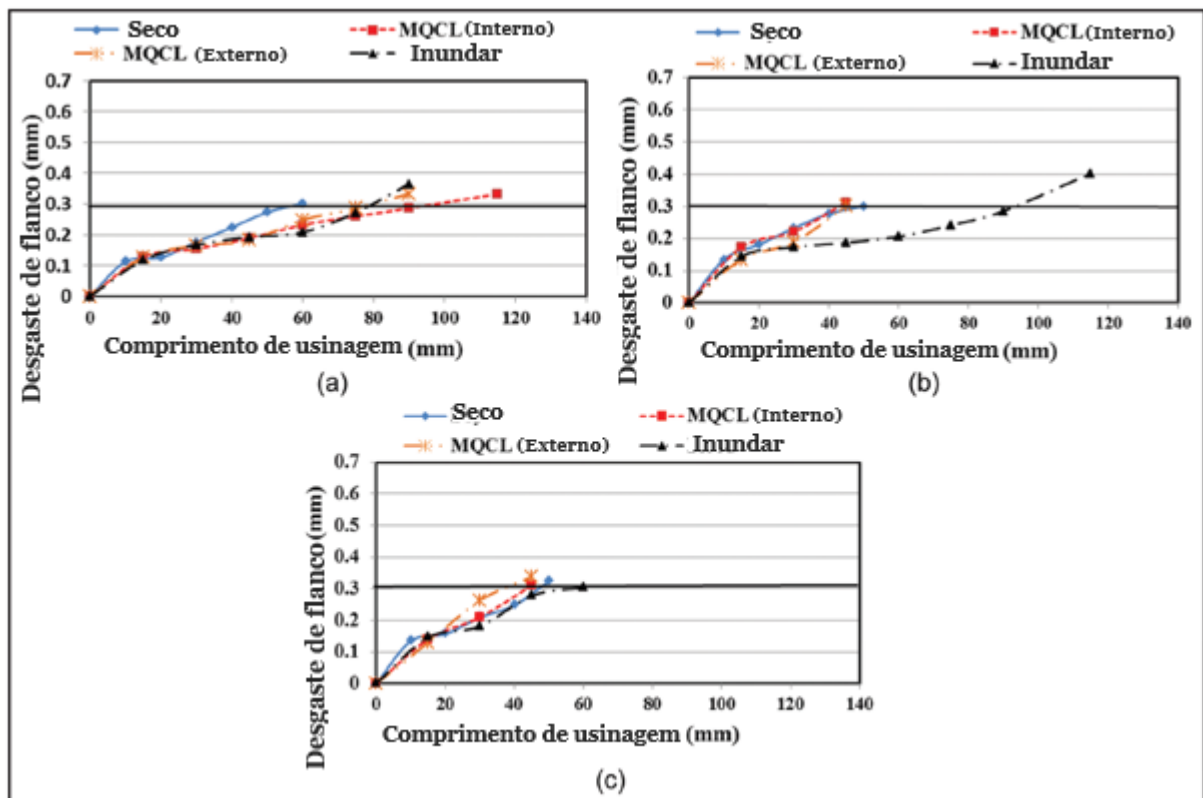
Para o gráfico 12(b) e avanço de 0,2mm/rev o método por inundação proporcionou a menor força de corte e o MQCL externo a maior força da análise.

Por fim, o gráfico 12(c) retratou para todos os avanços que o corte a seco proporcionou as maiores forças de corte. Entre os sistemas MQCL o externo obteve melhor desempenho no avanço de 0,15mm/rev e o interno obteve melhor desempenho nos demais avanços analisados.

A terceira análise realizada foi a de desgaste da ferramenta em função do tipo de lubri-refrigeração utilizada. O mecanismo de desgaste analisado foi o desgaste de flanco, sendo que a vida útil da ferramenta foi determinada com o desgaste de flanco de no máximo 0,3mm.

Gráfico 14 - Desgaste de flanco para uma velocidade de corte de 90m/min.

(a) avanço de 0,15mm/rev; (b) avanço de 0,2mm/rev; (c) avanço de 0,25mm/rev.



Fonte – PERVAIZ et al., 2017, p. 11 (Tradução do autor).

Para a velocidade de corte igual a 90m/min, pode ser observado, segundo o gráfico 14(a) que o MQCL interno proporciona maior vida útil da ferramenta

seguido por MQCL externo e aplicação por inundação. Já para os gráficos 14(b e c) o método por inundação de lubri-refrigeração apresentou as maiores vidas de ferramenta.

Para os testes de desgaste de flanco com velocidade de corte entre 120 e 150m/min foi observado o mesmo comportamento regressivo da vida útil da ferramenta relatado no gráfico 14.

**4.1.4 Performance evaluation of various cooling-lubrication techniques in grinding of hardened AISI 4340 steel with vitrified bonded CBN wheel (Avaliação de desempenho de várias técnicas de lubri-refrigeração no desgaste do aço endurecido AISI 4340 utilizando disco de CBN com ligação vitrificada).**

Damasceno et al. (2017) desenvolveram um trabalho de comparação do desempenho de três tipos de lubri-refrigeração, sendo eles: sistema por inundação, MQL e um sistema por inundação otimizado, no qual, a pressão de saída do fluido foi aumentada. O processo utilizado para realizar os testes foi o de retificação do aço AISI 4340, utilizando uma roda de CBN vitrificada.

O parâmetro de entrada que variou nos testes foi a profundidades de corte (20, 50 e 80 $\mu$ m). Para as saídas dos testes foi analisado a força de corte, energia específica, rugosidade da superfície, microdureza superficial e desgaste do rebolo.

A seguir está representada na tabela 3 as configurações de vazão e pressão utilizadas nos sistemas de lubri-refrigeração:

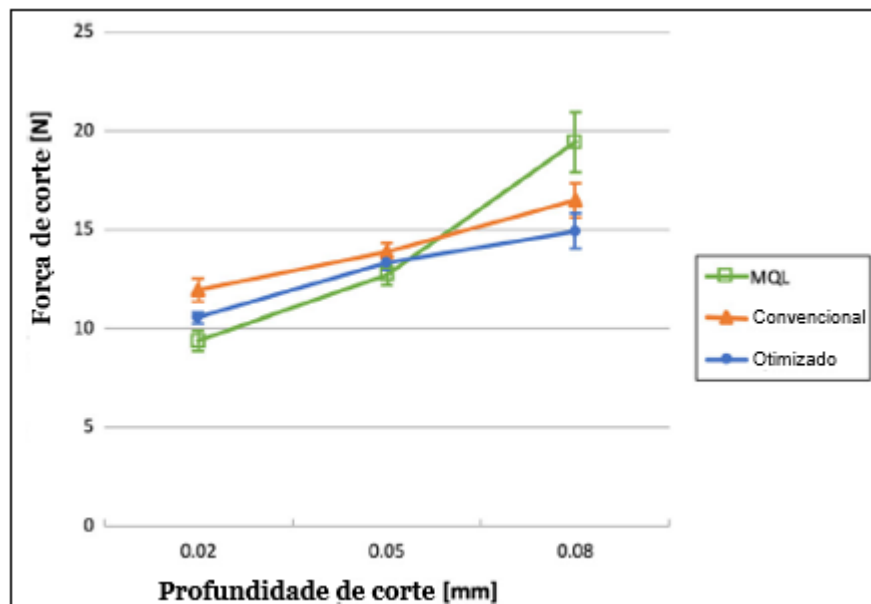
Tabela 3 - Configuração de vazão e pressão dos sistemas utilizados.

<b>Técnica de entrega de Lubri-refrigerante</b>	<b>Fluido de corte</b>	<b>Vazão</b>	<b>Pressão (Mpa)</b>
MQL	Accu-Lube LB 1000	Óleo – 100 ml/h	0,60
		Ar – 4.000.000 ml/h	-
Inundação	ULTRACUT 370	1650.000 ml/h	0,40
Otimizado		27,5 l/min	0,70

Fonte – DAMASCENO et al., 2017, p. 3799 (Tradução do autor).

A primeira saída do processo foi a força de corte. O gráfico 15 demonstra que a força de corte aumentou com relação ao crescimento da profundidade de corte para todos os tipos de lubri-refrigeração utilizados. O sistema MQL proporcionou as menores forças para as profundidades de corte entre 0,02 e 0,05mm. Isso representa a eficácia da lubrificação do sistema MQL para condições menos severas de usinagem. Já para a profundidade de corte de 0,08mm o MQL proporcionou a maior força de corte, ou seja, o fluxo do sistema não foi capaz de reduzir o atrito nessa configuração do processo.

Gráfico 15 - Força de corte em relação a variação da profundidade de corte para cada sistema de lubri-refrigeração propostas.

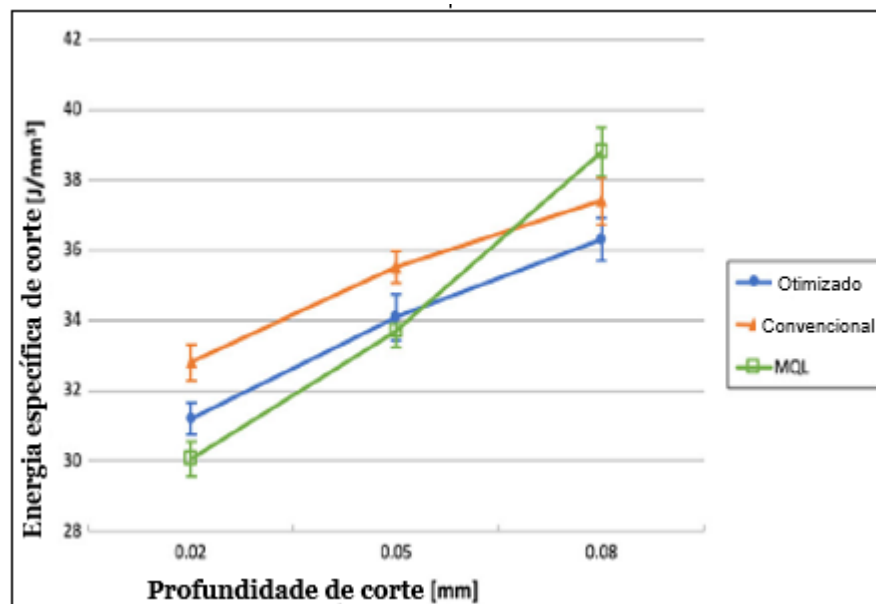


Fonte – DAMASCENO et al., 2017 (Tradução do autor).

A segunda saída do processo foi a energia específica que representa a energia necessária para remover um certo volume de material. O gráfico 16 apresenta os resultados obtidos nos testes, cujos sistemas utilizados proporcionaram curvas semelhantes ao gráfico 15.

O MQL proporcionou menores energias de usinagem para as profundidades de corte entre 0,02 e 0,05mm, porém, para o avanço de 0,08mm proporcionou a pior eficiência entre os sistemas, ou seja, o MQL, para a profundidade de corte de 0,08mm não foi eficaz na remoção de calor do processo, se comparado com o sistema por inundação e otimizado.

Gráfico 16 - Eficiência dos processos em relação a variação da profundidade de corte para cada sistema de lubri-refrigeração propostos.

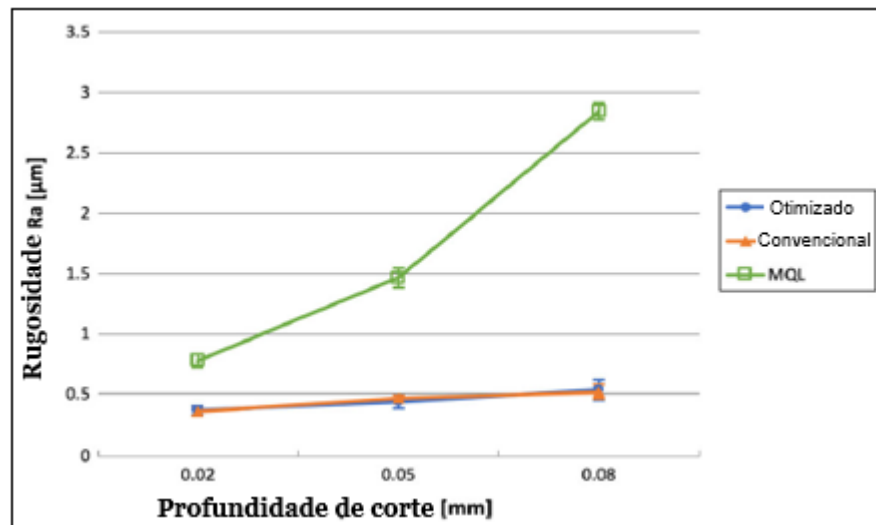


Fonte – DAMASCENO et al., 2017 (Tradução do autor).

A próxima saída verificada foi o nível de rugosidade em relação ao tipo de corte utilizado. A partir do gráfico 17 pôde-se observar um crescimento da rugosidade com o aumento da profundidade de corte utilizada, sendo que, o sistema otimizado e o sistema por inundação apresentaram resultados semelhantes, porém, o MQL se comportou de forma diferente em relação à análise da força de corte e eficiência. O sistema MQL, desde a profundidade de corte de 0,02mm até 0,08mm, apresentou os maiores valores de rugosidade, sendo que, a cada aumento de profundidade de corte ocorreu aumentos acentuados nos níveis de rugosidade.

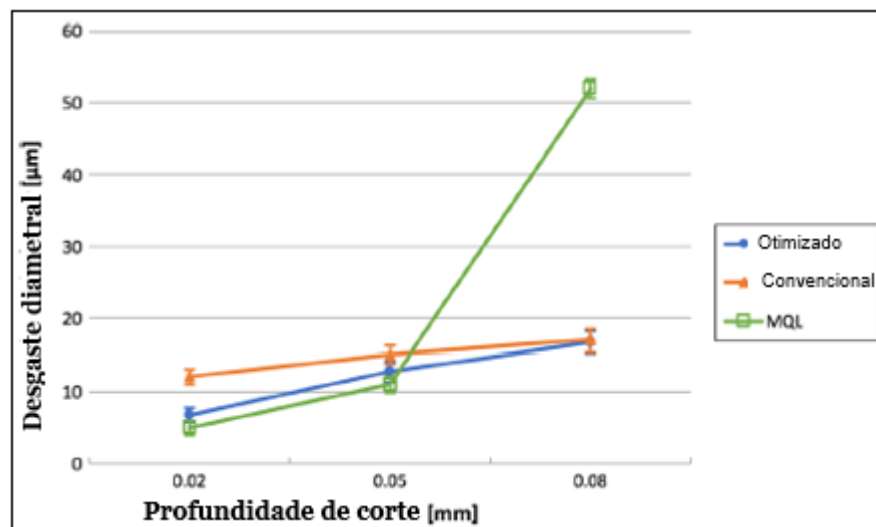
O gráfico 18 demonstra que o sistema MQL com profundidades de corte de até 0,05mm apresentou um desgaste do rebolo menor que os outros sistemas. Entretanto, para profundidade de corte igual a 0,08mm houve um aumento abrupto do desgaste da ferramenta.

Gráfico 17 - Rugosidades encontradas em relação a variação da profundidade de corte para cada sistema de lubri-refrigeração propostos.



Fonte – DAMASCENO et al., 2017 (Tradução do autor).

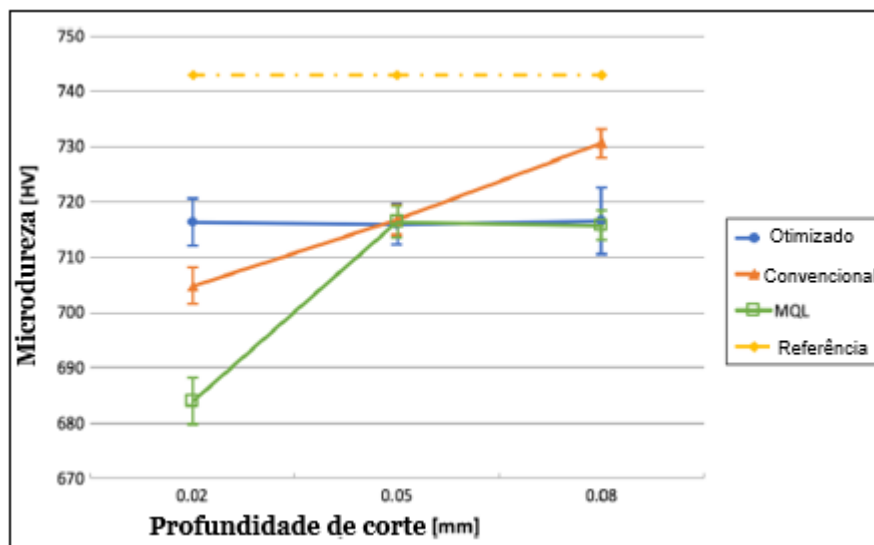
Gráfico 18 - Desgaste do rebolo em relação a variação da profundidade de corte para cada sistema de lubri-refrigeração propostos.



Fonte – DAMASCENO et al., 2017 (Tradução do autor).

A seguir está representado no gráfico 19 a relação de microdureza superficial para cada sistema de lubri-refrigeração usado:

Gráfico 19 - Microdureza superficial em relação a variação da profundidade de corte para cada sistema de lubri-refrigeração propostos.



Fonte – DAMASCENO et al., 2017 (Tradução do autor).

Todos os sistemas estudados proporcionaram durezas inferiores em relação ao valor de referência que corresponde ao material antes do processo. O fato de manter a dureza do material mais próximo do ponto de referência significa que o sistema possui boa capacidade de refrigerar e evitar o aquecimento através da lubrificação. Analisando o sistema MQL, o mesmo apresentou valores similares ao sistema otimizado para profundidades de corte entre 0,05 e 0,08mm, porém, para o menor valor de profundidade de corte, houve uma queda acentuada da dureza superficial.

Os testes feitos tiveram como parâmetro de parada a quantidade de material removido, ou seja, para remover uma quantidade de material utilizando 0,02mm como profundidade de corte o sistema MQL proporcionou a menor dureza superficial se comparado com os demais sistemas.

#### **4.1.5 Machinability investigations of hardened steel with biodegradable oil-based MQL spray system (Investigações da usinabilidade de aço endurecido com sistema de pulverização MQL à base de óleo biodegradável).**

Gupta et al. (2020) realizaram um trabalho de comparação entre o sistema MQL e corte à seco para o torneamento de um aço com dureza superficial de 40HRC.

Para o sistema MQL foi utilizado como fluido azeite de oliva apresentando fluxo de 100ml/h, com pressão de 5 bar. A seguir está representado na tabela 4 os parâmetros de usinagem utilizados:

Tabela 4 - Parâmetros de usinagem utilizados.

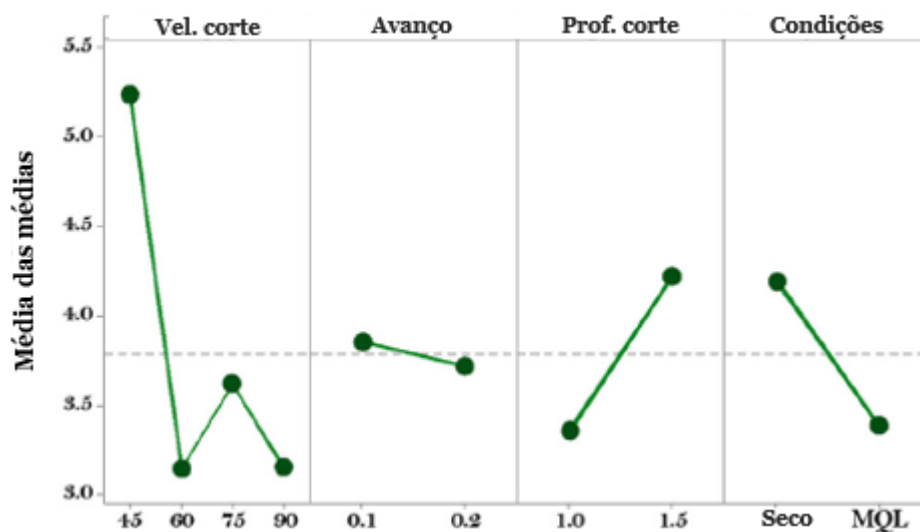
PARÂMETROS	NÍVEL 1	NÍVEL 2	NÍVEL 3	NÍVEL 4
<b>VELOCIDADE DE CORTE</b>	45	60	75	90
<b>AVANÇO</b>	0,10	0,20	-	-
<b>PROFUNDIDADE DE CORTE</b>	1,0	1,50	-	-
<b>TIPO DE CORTE</b>	seco	MQL	-	-

Fonte - GUPTA et al., 2020 (Tradução do autor).

Os resultados se basearam no nível de rugosidade superficial, temperatura na interface cavaco-ferramenta, desgaste das ferramentas de corte e morfologia dos cavacos produzidos.

A seguir está representado o gráfico 20 a média das médias das rugosidades  $R_q$  encontradas para cada variação dos parâmetros de entrada dos testes realizados:

Gráfico 20 - Média das médias para o parâmetro de rugosidade  $R_q$ .

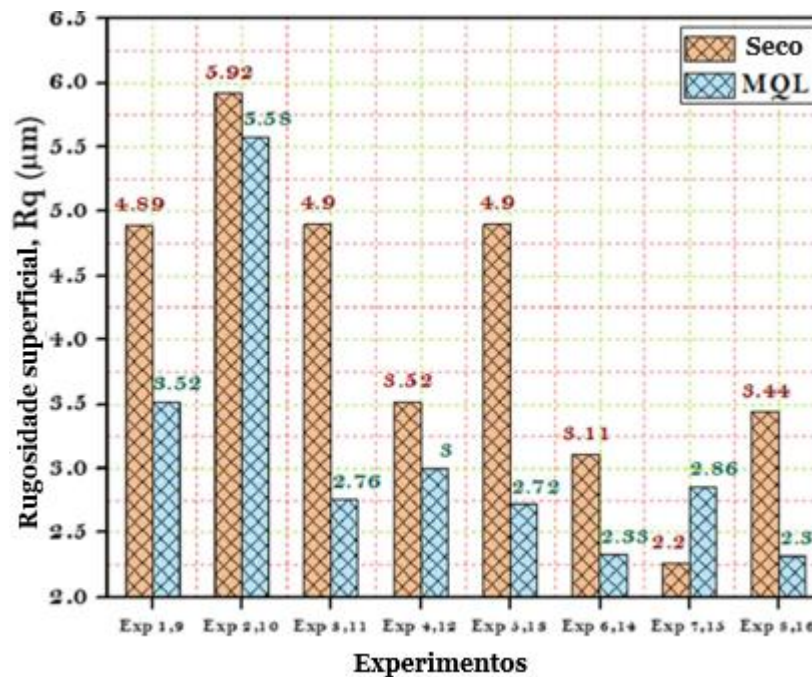


Fonte: GUPTA et al., 2020 (Tradução do autor).

Pode ser observado a forte influência da velocidade de corte, da profundidade de corte e do tipo de resfriamento utilizado. O sistema MQL de um modo geral obteve melhor desempenho em nível de rugosidade do que o corte à seco.

A seguir está representado através do gráfico 21 os níveis de rugosidade encontrados em cada experimento:

Gráfico 21 - Níveis de rugosidade Rq para cada experimento realizado.



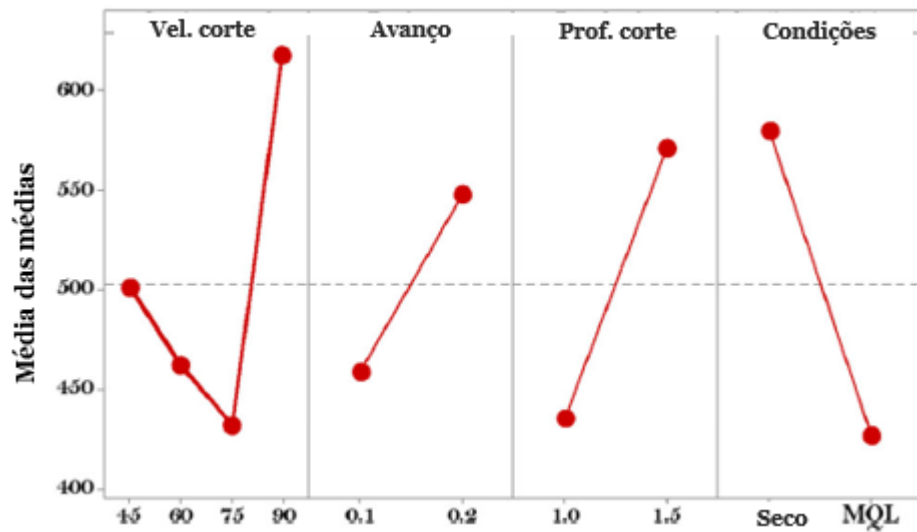
Fonte: GUPTA et al., 2020 (Tradução do autor).

Foi observado que na maioria dos testes realizados o sistema MQL possuiu níveis de rugosidade Rq menor que o sistema à seco.

Para a análise de temperatura na interface cavaco ferramenta foi observado no gráfico 22 a influência de todos os parâmetros que variaram nos testes. A média das temperaturas coletadas demonstra que o uso do MQL, em comparação com o corte à seco, diminui fortemente a temperatura de trabalho, essa diminuição é causada pela diminuição do atrito que o MQL proporciona na interface peça-ferramenta e cavaco-ferramenta.



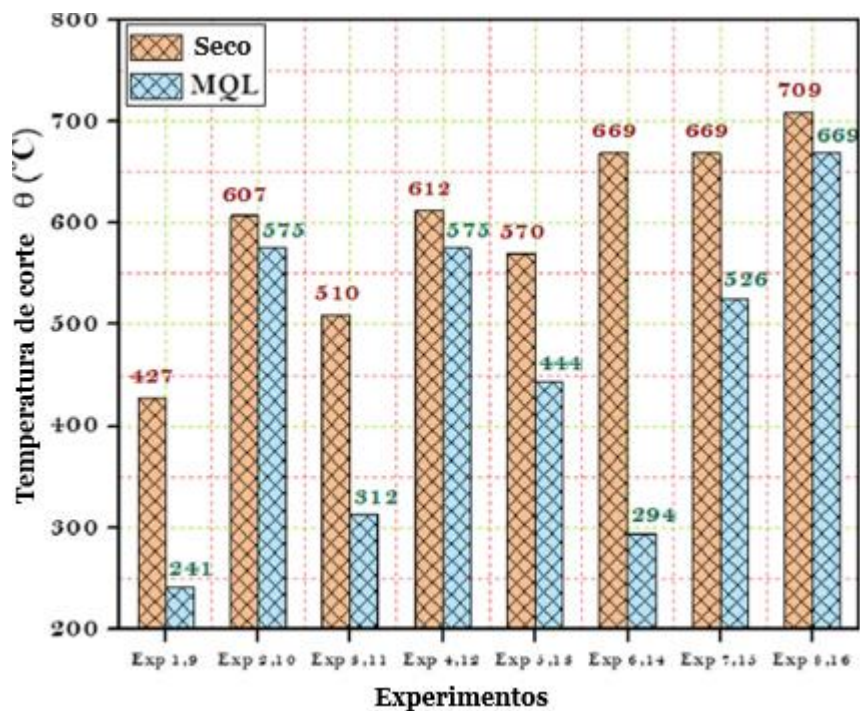
Gráfico 22 - Média das temperaturas dos testes realizados.



Fonte: GUPTA et al., 2020 (Tradução do autor).

A seguir está representado no gráfico 23 as análises de temperaturas coletadas para cada experimento realizado:

Gráfico 23 - Temperaturas encontradas em cada experimento.



Fonte: GUPTA et al., 2020 (Tradução do autor).

O gráfico 23 demonstra um ganho na diminuição da temperatura utilizando o sistema MQL para todos os testes realizados.

Analisando o desgaste da ferramenta, foi observado que a condição de corte à seco proporcionou desgastes mais severos se comparado com a utilização do sistema MQL. O corte à seco proporcionou a geração de mecanismos de abrasão, rachaduras térmicas, deslocamento do revestimento e arestas postiças, já o sistema MQL apresentou a tendência de evitar as rachaduras térmicas e o deslocamento do revestimento para a maioria dos testes.

Em relação ao desgaste de flanco, o sistema MQL apresentou melhor controle do desgaste, devido à diminuição do atrito entre as interfaces de trabalho, se comparado com o corte à seco.

Por fim, a análise da morfologia dos cavacos gerados indicou que o uso de MQL produziram cavacos com largura menor que o produzido no corte à seco, isso aconteceu devido à menor área de contato entre a peça e a ferramenta proporcionado pelo fluido de corte presente na interface, que resulta na geração de menor atrito e, por consequência, menor desgaste na ferramenta. Além disso, o sistema MQL proporcionou cavacos descontínuos diferente dos cavacos contínuos e serrilhados proporcionados pelo corte à seco, os cavacos descontínuos contribuem para a remoção de calor, melhor acabamento da peça usinada, menor desgaste da ferramenta e maior segurança para o operador.

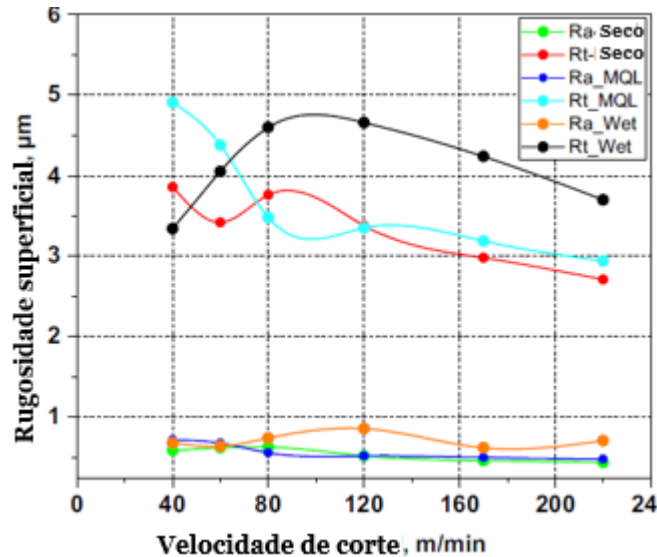
#### ***4.1.6 Comparative assessment of machining environments (dry, wet and MQL) in hard turning of AISI 4140 steel with CC6050 tools (Avaliação comparativa de ambientes de usinagem (seco, inundado e MQL) em torneamento rígido de aço AISI 4140 com ferramentas CC6050).***

Elbah et al. (2019) realizaram um estudo de levantamento dos efeitos dos parâmetros de corte como velocidade de corte, taxa de avanço e profundidade de corte, assim como os meios de resfriamento (seco, inundado e MQL), no nível de rugosidade da superfície, componentes da força de corte e desgaste da ferramenta para o torneamento do aço AISI 4140, que possui dureza superficial de 60HRC com pastilha de cerâmica mista revestida.

Análisisando os níveis de rugosidade foram levantadas três análises, variando entre as velocidades de corte, a taxa de avanço e a profundidade de corte na usinagem. A seguir está representado no gráfico 24 as rugosidades Ra (média aritmética das rugosidades) e Rt (rugosidade total) para os três métodos de

resfriamento. Os dados apresentados no gráfico 24 possuem avanço constante de 0,12mm/rev e profundidade de corte de 0,15mm.

Gráfico 24 - Rugosidade variando com a velocidade de corte.



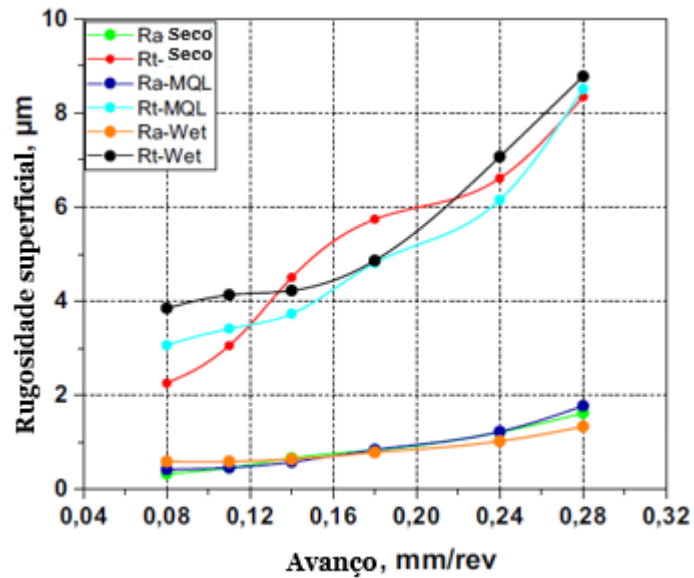
Fonte: ELBAH et al., 2019 (Tradução do autor).

O gráfico 24 apresenta um bom desempenho do sistema MQL e da usinagem à seco nos níveis de rugosidade se comparado com o método de inundação. A diminuição das rugosidades com o aumento da velocidade de corte representa que não houve geração de aresta postiça com os métodos utilizados.

O gráfico 25 retrata os níveis de rugosidade encontrados variando o avanço da ferramenta na usinagem usando velocidade de corte constante de 120m/min e profundidade de corte de 0,15mm. De modo geral, os níveis de rugosidade aumentaram com o crescimento da taxa de avanço da ferramenta. Esse comportamento pode ser explicado pelo aparecimento de sulcos na superfície da peça proporcionados pelo crescimento da taxa de avanço.

A rugosidade total apresenta menores níveis utilizando sistema MQL, já o sistema à seco variou com o aumento da taxa de avanço.

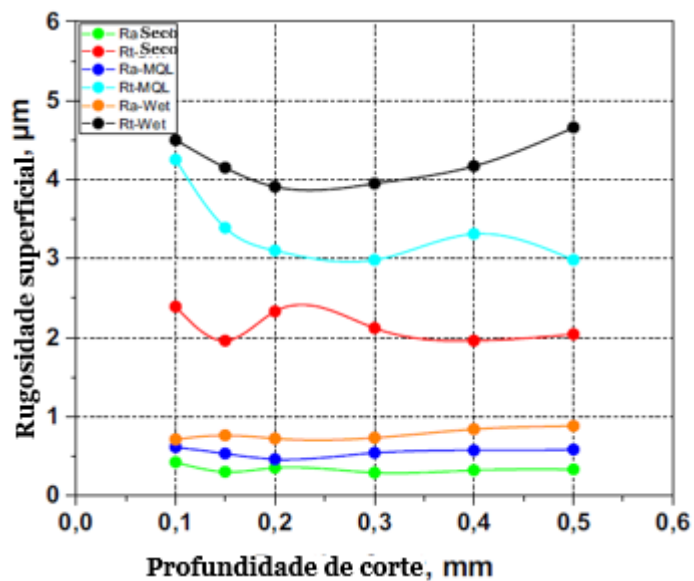
Gráfico 25 - Rugosidade variando com o avanço da ferramenta.



Fonte: ELBAH et al., 2019 (Tradução do autor).

Por fim, a última análise feita de rugosidade foi em relação à profundidade de corte e está representada no gráfico 26. A variação da profundidade de corte, mantendo uma velocidade de corte de 120m/min e um avanço de 0,12mm/rev, não obteve variações significativas, como foi o caso da variação do avanço, sendo que o sistema à seco obteve os menores valores de rugosidade, seguido pelo MQL e o sistema por inundação.

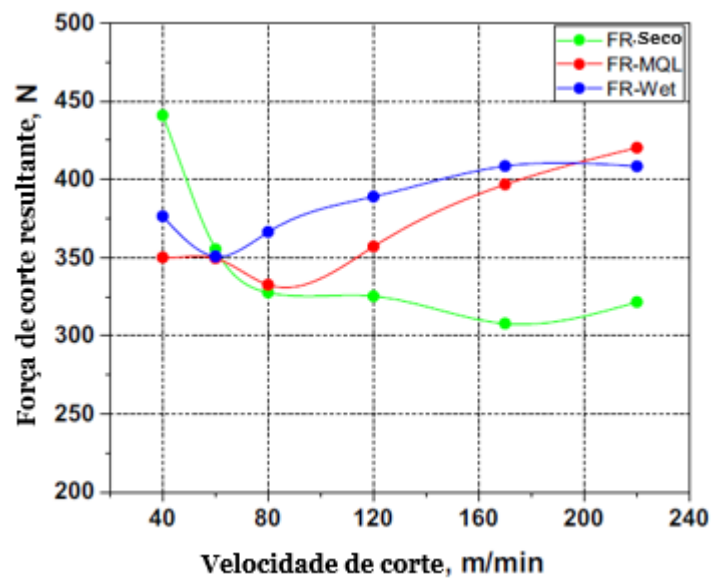
Gráfico 26 - Rugosidade variando com a profundidade de corte.



Fonte: ELBAH et al., 2019, p. 2584 (Tradução do autor).

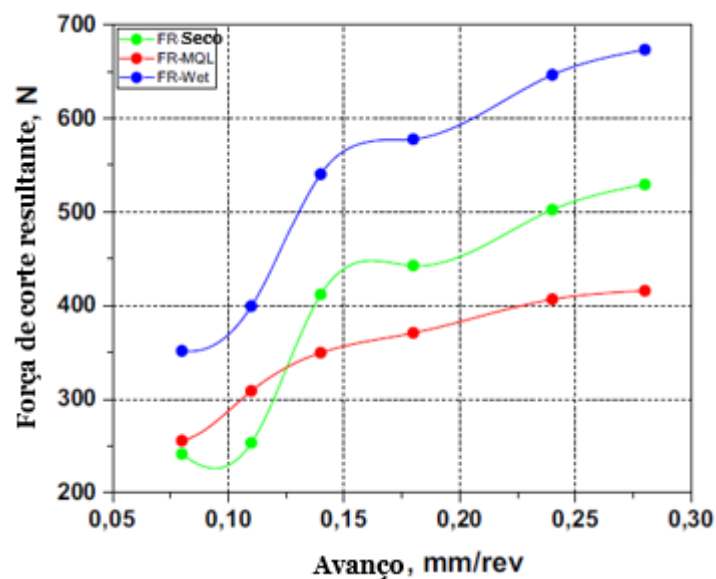
Para as análises de força de corte foram usadas as mesmas configurações de velocidade de corte, avanço e profundidade de corte das análises de rugosidade. O gráfico 27 mostra as forças de corte encontradas variando a velocidade de corte, o gráfico 28 mostra as forças de corte encontradas variando o avanço da ferramenta e por fim, o gráfico 29 apresenta as forças de corte encontradas variando a profundidade de corte.

Gráfico 27 - Força de corte variando com a velocidade de corte.



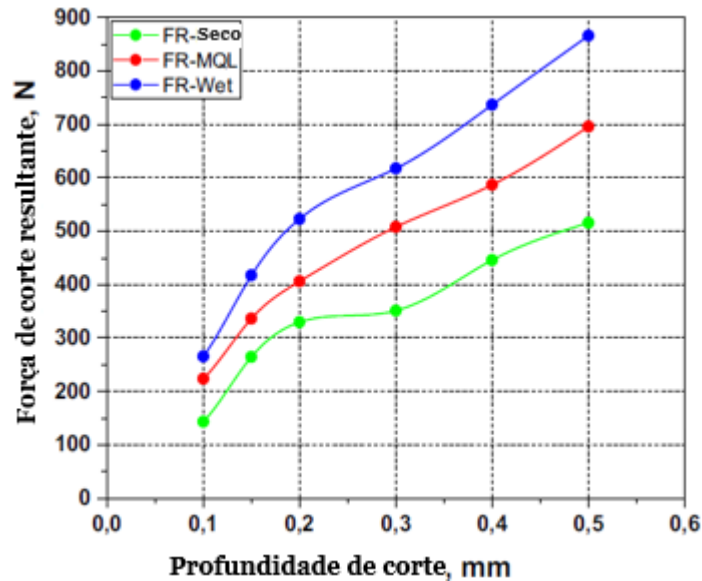
Fonte: ELBAH et al., 2019 (Tradução do autor).

Gráfico 28 - Força de corte variando com avanço.



Fonte: ELBAH et al., 2019 (Tradução do autor).

Gráfico 29 - Força de corte variando com a profundidade de corte.



Fonte: ELBAH et al., 2019 (Tradução do autor).

Observando as forças de corte com a variação das velocidades de corte nota-se que de 40m/min para 80m/min houve uma queda, porém, de 80m/min até 220 m/min os métodos por MQL e inundação proporcionaram um aumento da força de corte, já o torneamento à seco obteve baixa variação da força de corte, proporcionando as melhores condições.

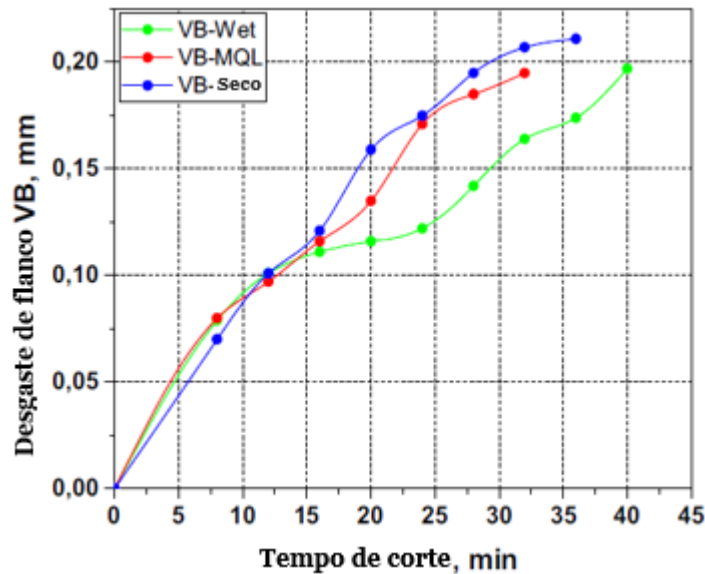
O aumento do avanço de corte provoca aumento da força de corte em todas as situações devido ao fato de aumentar a largura do cavaco e consequentemente, a resistência à ruptura do material. O sistema MQL apresentou as melhores configurações nesta análise.

O comportamento observado com a variação da profundidade de corte é consequência de causa semelhante ao aumento do avanço, ou seja, a profundidade de corte é diretamente proporcional à resistência de ruptura do cavaco gerado.

Para o desgaste da ferramenta foi realizada uma análise de comparação entre o tempo de usinagem e o desgaste de flanco da ferramenta utilizando avanço de 0,12mm/rev, profundidade de corte de 0,15mm e velocidade de corte de 120m/min. Foi observado que o desgaste da ferramenta aumentou para todas as configurações de usinagem apresentando três características: quebra inicial, taxa de desgaste uniforme e quebra rápida da aresta de corte.

A seguir está representado no gráfico 30 as análises de desgaste encontradas:

Gráfico 30 - Desgaste de flanco (VB) versus tempo de usinagem.



Fonte: ELBAH et al., 2019 (Tradução do autor).

No gráfico 30 pode ser observado que até 15 min de corte os três métodos de resfriamento proporcionaram desgaste semelhantes para a ferramenta, porém, após 15 min o método por inundação proporcionou os menores valores de desgaste de flanco por diminuir o atrito de trabalho, seguidos por MQL e corte à seco.

#### **4.1.7 Effect of cutting fluids applied in mql mode on machinability of Ti-6Al-4V (Efeito dos fluidos de corte aplicados no modo mql na usinabilidade de Ti-6Al-4V).**

Anand, Kumar e Paul (2019), realizaram um estudo de comparação do torneamento da liga de Ti-6Al-4V entre o sistema MQL utilizando óleo solúvel, alumina e hBN com refrigeração por inundação utilizando óleo solúvel. Como análises das comparações foram observadas as forças de corte, formação de cavacos, diferentes parâmetros de desgaste da ferramenta e adesão de material de trabalho na superfície da ferramenta.

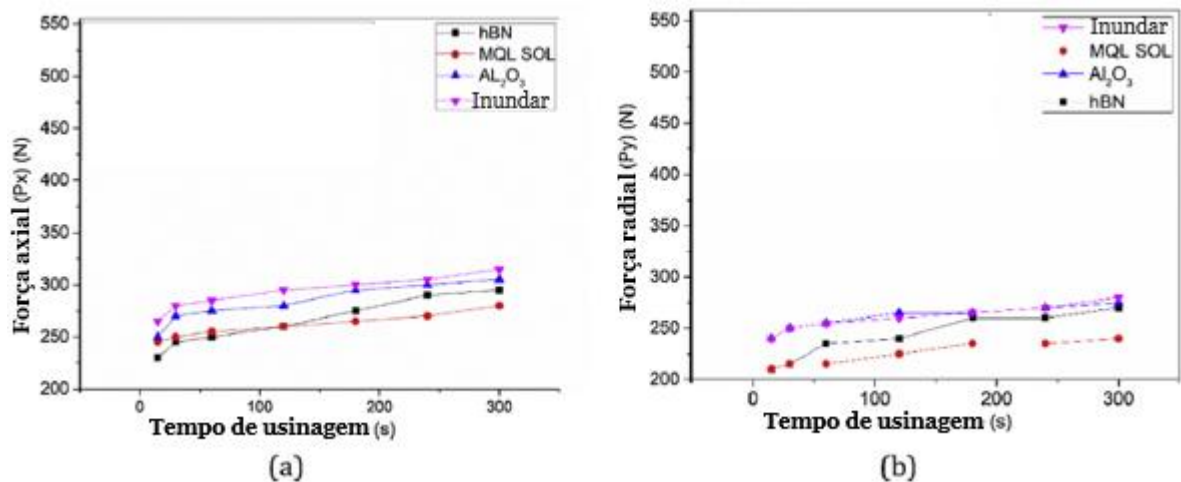
Os parâmetros utilizados para os testes foram o seguinte:

- Velocidade de corte ( $V_c$ ) = 80m/min;
- Avanço da ferramenta ( $s$ ) = 0,1mm/rev;
- Profundidade de corte ( $t$ ) = 1,5mm;

- Pressão do MQL = 5 bar;
- Vazão MQL = 200ml/h.

A primeira análise realizada foi a influência dos meios de lubri-refrigeração para as forças de usinagem. O gráfico 31 (a) representa as forças axiais do torneamento e o gráfico 31 (b) representa as forças radiais. Nos dois gráficos, comparando com o método de inundação, os métodos que utilizaram MQL proporcionaram menores valores de força de corte devido a maior penetrabilidade deste método se comparado com o método tradicional.

Gráfico 31 - Força axial (a) e força radial (b) no torneamento.

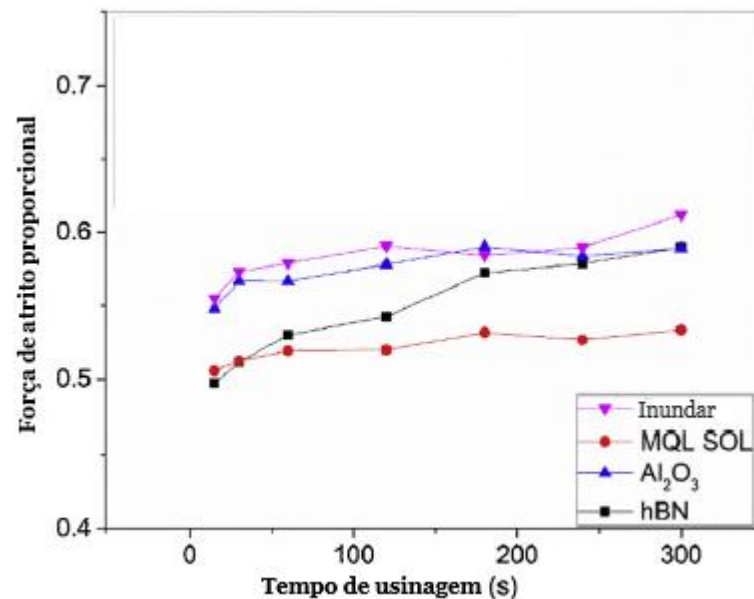


Fonte: ANAND, KUMAR e PAUL, 2019 (Tradução do autor).

O gráfico 32 expressa, através da força de atrito na interface cavaco-ferramenta, o nível de lubri-refrigeração dos sistemas utilizados. Pode ser observado que o sistema por inundação apresentou as maiores forças de atrito, diferente dos métodos que utilizaram MQL. O sistema MQL com óleo solúvel apresentou as menores forças de atrito. Os resultados apresentados no gráfico 32 são diretamente ligados ao nível de penetrabilidade dos sistemas utilizados.



Gráfico 32 - Força de atrito proporcional à força normal.



Fonte: ANAND, KUMAR e PAUL, 2019 (Tradução do autor).

O torneamento da liga de titânio apresentou cavacos segmentados, independente do tipo de lubri-refrigeração utilizado. O material usinado possui baixa condutividade térmica, o que gera um aumento rápido na temperatura e mudança cristalina para um arranjo que contribui para a formação de camadas de deslizamento, contribuindo para o tipo de cavaco descrito.

Em relação ao desgaste da ferramenta os métodos de lubri-refrigeração por inundação e MQL com óleo solúvel apresentaram baixa adesão de material na superfície da ferramenta proporcionando desgastes mais brandos comparados com os sistemas MQL que utilizaram os dois nanofluidos.

Em relação ao desgaste de flanco os sistemas apresentaram situações parecidas, sobressaindo o sistema MQL com nanofluido hBN.

#### **4.1.8 Near-dry machining of titanium alloy with MQL and hybrid mist supply (Usinagem quase seca de liga de titânio com MQL e fornecimento de névoa híbrida).**

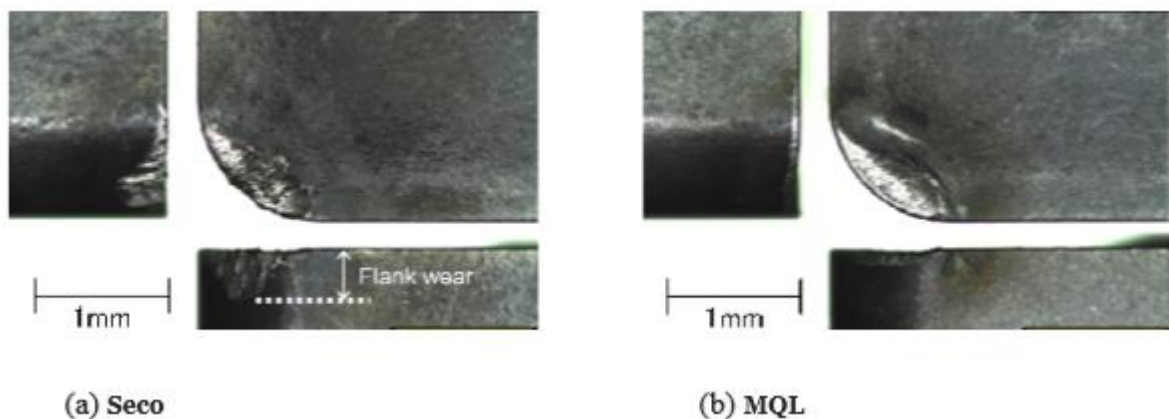
O estudo desenvolvido por Wakabayashi et al. (2015) realiza comparações de desempenho do uso de MQL, sistema apenas de refrigeração, usinagem a seco e sistema híbrido, que utiliza o MQL e um sistema de refrigeração. O processo em estudo é o de torneamento de titânio.

Para o torneamento utilizando MQL foram usados dois tipos de lubrificantes, identificados pelo autor como UE-3 e CO-1, sendo que, em relação a viscosidade dos fluidos, o UE-3 é mais viscoso que o CO-1. O sistema apenas de refrigeração utilizou um fluido de corte solúvel em água com óleo vegetal, denominado pelo autor como (CM). Para o sistema híbrido foram usadas combinações do MQL com o CM.

Foi utilizado como parâmetro de vida útil da ferramenta um desgaste de flanco superior à 0,2 mm.

A seguir está representado a comparação do desgaste de flanco da ferramenta que foi exposta a uma usinagem a seco e a uma usinagem com uso de MQL.

Figura 5 - Desgaste da ferramenta na usinagem a seco e com uso de MQL.



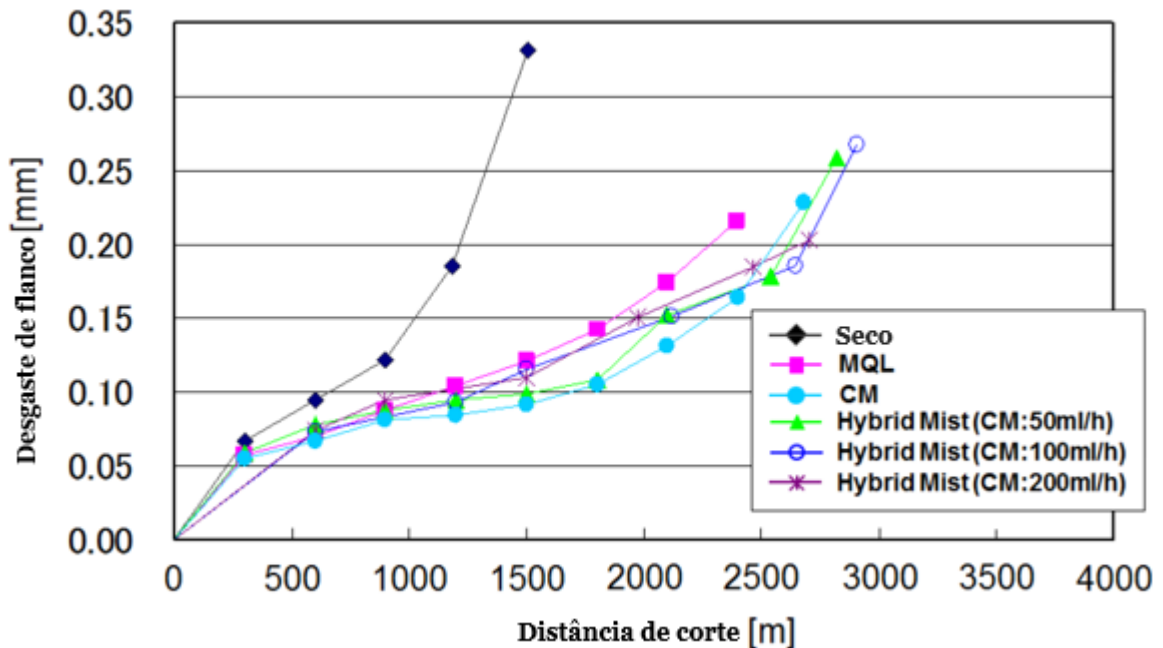
Fonte – WAKABAYASHI et al., 2015 (Tradução do autor).

O primeiro teste compara o desgaste de flanco na ferramenta em duas situações. A situação (a) retrata o torneamento à seco, na qual o desgaste de flanco apresentado ultrapassa o limite de vida da ferramenta, já o caso (b) representa o torneamento utilizando MQL. Ambos os casos se tratam de um comprimento de usinagem igual à 1500m.

Pode se observar o grande desgaste apresentado na usinagem à seco se comparado com o uso de MQL.

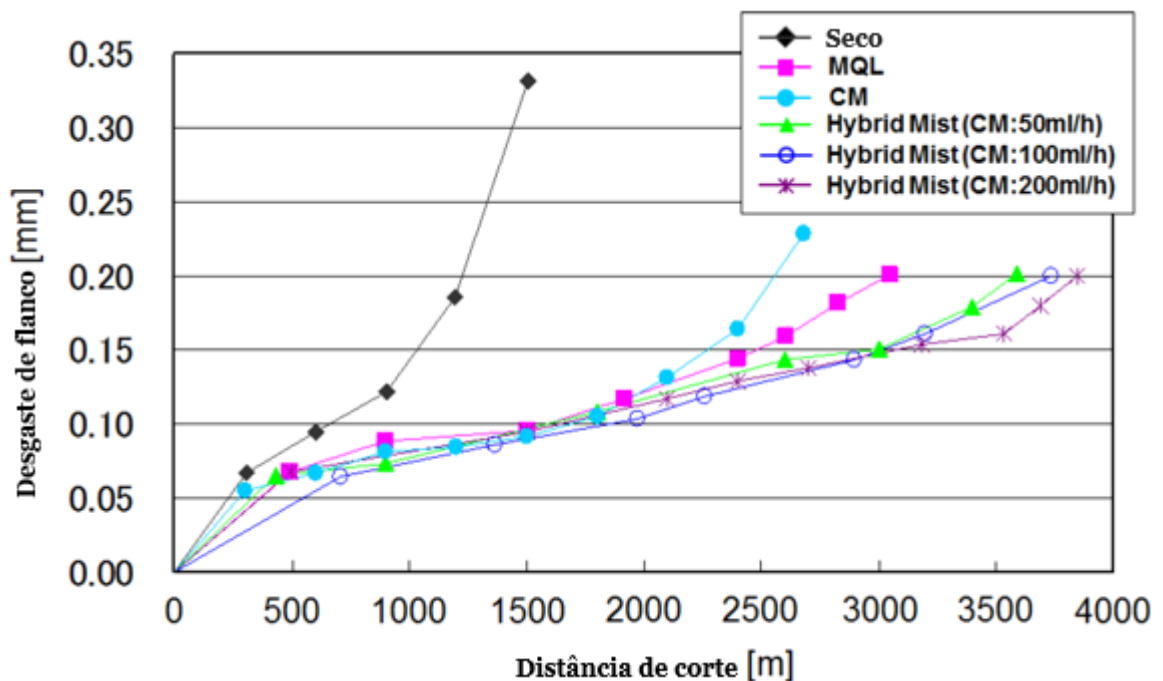
A seguir estão representados dois gráficos que comparam a distância de usinagem com o desgaste de flanco, na ferramenta, em função do uso de MQL com os demais meios de lubri-refrigeração.

Gráfico 33 - Comparação entre MQL (utilizando fluido UE-3) e sistemas de lubri-refrigeração.



Fonte – WAKABAYASHI et al., 2015 (Tradução do autor).

Gráfico 34 - Comparação entre MQL (utilizando fluido CO-1) e sistemas de lubri-refrigeração.



Fonte – WAKABAYASHI et al., 2015 (Tradução do autor).

Se comparado com a usinagem a seco, os sistemas de lubri-refrigeração estudados apresentam um melhor desempenho em relação ao desgaste de flanco e

distância de usinagem. Entre os sistemas é importante ressaltar que o MQL com uso de CO-1 apresentou desempenho melhor em relação ao UE-3. Esse desempenho se dá pelo fato de o CO-1 realizar maior penetrabilidade nas interfaces de trabalho devido ao fato deste possuir menor viscosidade otimizando a lubrificação.

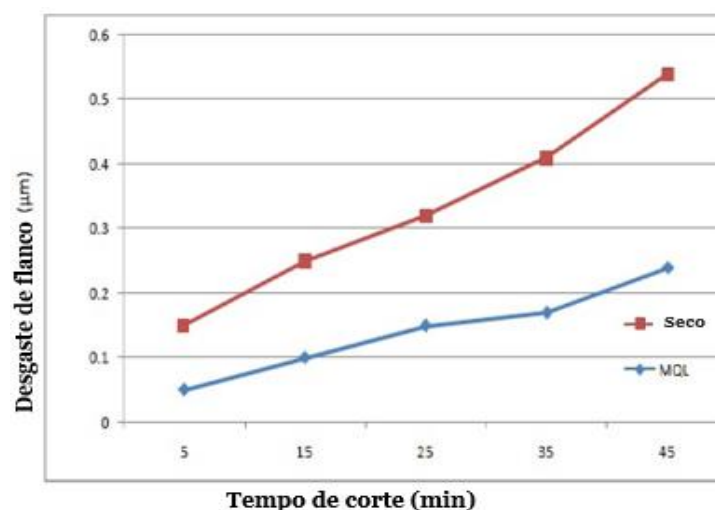
#### ***4.1.9 An investigation in analysis of dry turning in mql method for predicting tool wear and to improve surface roughness (Uma investigação na análise do torneamento a seco no método mql para prever o desgaste da ferramenta e melhorar a rugosidade da superfície).***

Ragul et al. (2016) realizaram um estudo comparativo do torneamento de liga de titânio utilizando corte à seco e sistema MQL. Para os testes a velocidade de corte e o avanço foram mantidos constantes, já a profundidade de corte variou com o tempo de usinagem. Como respostas aos testes foram analisados os níveis de rugosidade e desgaste de flanco da ferramenta.

Em relação as análises de saída que consistiram no desgaste de flanco principal e auxiliar e nos níveis de rugosidade encontrados, pôde ser observado que o sistema MQL apresentou os melhores resultados em todas as análises.

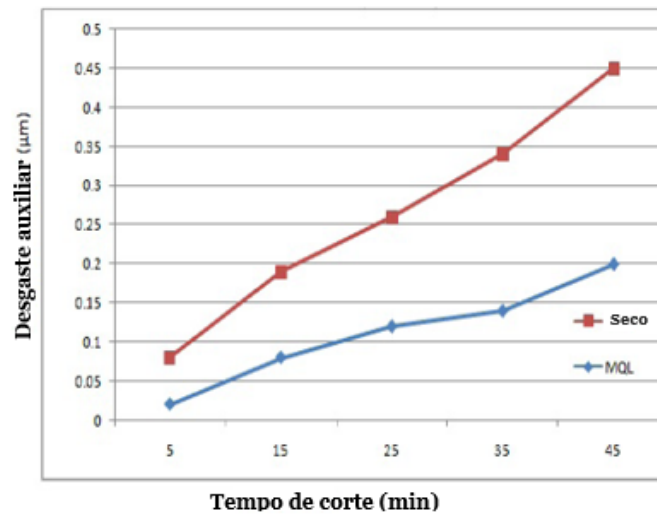
Os gráficos 35, 36 e 37 demonstram que mesmo o sistema MQL possuindo menores valores de desgaste de flanco e rugosidade se comparado com o corte à seco, os resultados também sofreram acréscimos com o passar do tempo de usinagem.

Gráfico 35 - Desgaste de flanco principal.



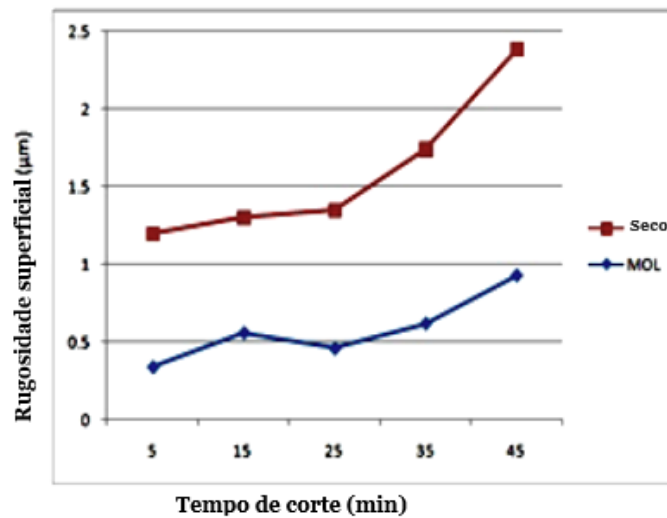
Fonte: RAGUL et al., 2016 (Tradução do autor).

Gráfico 36 - Desgaste de flanco auxiliar.



Fonte: RAGUL et al., 2016, p. 9 (Tradução do autor).

Gráfico 37 - Nível de rugosidade.



Fonte: RAGUL et al., 2016 (Tradução do autor).

## 5 DISCUSSÕES

O quadro a seguir apresenta um resumo das melhores condições de aplicação de MQL, em relação aos parâmetros analisados nos artigos e as grandezas estudadas.

Quadro 2 - Parâmetros ideais para aplicação do MQL.

COMBINAÇÕES DE PARÂMETROS PARA MELHORES NÍVEIS DAS GRANDEZAS NO TORNEAMENTO (T) E RETIFICAÇÃO (R) UTILIZANDO MQL				
GRANDEZAS	PARÂMETROS			
	VELOCIDADE DE CORTE	AVANÇO	TEMPO DE CORTE	PROFUNDIDADE DE CORTE
RUGOSIDADE	↑(T)	↓(T)	↓(T)	↓(T) ↓(R)
MICRODUREZA SUPERFICIAL	↓(R)	-	-	-
DESGASTE DA FERRAMENTA	-	-	↓(T)	↓(R)
FORÇA DE CORTE	↓(T)	↓(T)	-	↓(T)

Fonte - Próprio autor.

## 5.1 Rugosidade

Em relação à rugosidade pode se observar que, para o torneamento, o sistema MQL variando os parâmetros como velocidade de corte, avanço da ferramenta, dureza da amostra e raio da ponta da ferramenta, proporcionou valores de rugosidade menores ou, em alguns casos, semelhantes para as amostras analisadas, se comparado com os sistemas por inundação e de corte à seco.

Comparando o sistema MQL com o corte à seco pode ser observado que o sistema de mínima quantidade de lubrificante proporciona os menores valores de rugosidade, devido ao fato de proporcionar lubrificação eficiente ao sistema.

O sistema MQL proporciona uma melhoria da qualidade superficial, se comparado com o sistema por inundação e corte a seco, devido à redução do desgaste da ferramenta, limpeza da aresta de corte e extração de calor mais eficiente (KUMAR; SINGH; KALSI, 2017).

Segundo Gupta et al. (2020), o sistema MQL apresentou os menores níveis de rugosidade se comparado com o sistema a seco devido a lubrificação fornecida para as interfaces de trabalho. Além disso, Gupta et al. (2020) relataram que o sistema MQL controlou a tendência de geração de aresta postiça, o que não ocorria no corte a seco prejudicando a superfície do material ensaiado.

Os níveis de rugosidade possuem ligação direta com a lubrificação fornecida, portanto o sistema MQL consegue lubrificar melhor as interfaces de

trabalho no torneamento, devido a maior penetrabilidade que o processo proporciona em relação aos outros métodos.

Segundo Kumar, Singh e Kalsi (2017), o sistema MQL, devido a sua aplicação em alta velocidade e pressão, consegue penetrar na interface cavaco ferramenta, aumentando a lubrificação e reduzindo o atrito, que proporciona uma melhor qualidade da superfície.

Pervaiz et al. (2017) relatam que, o sistema de mínima quantidade de lubrificante proporciona melhor desempenho dos níveis de rugosidade superficial, se comparado com o corte a seco e sistema por inundação, devido a aplicação do fluido em forma de névoa.

O processo de retificação possui uma particularidade que é o fato de o cavaco gerado acumular nos poros do rebolo, sendo necessário um sistema de limpeza do mesmo. Portanto, para profundidades de corte baixas o sistema MQL proporcionou valores de rugosidade no processo de retificação próximos dos valores fornecidos pelo sistema por inundação. Essa semelhança só é possível pelo fato de o sistema MQL apresentar boa lubrificação nas interfaces de trabalho.

Segundo Silva et al. (2020), o corte a seco, por não conseguir realizar a limpeza dos poros do rebolo, gerando o entupimento do mesmo, proporcionou os maiores valores de rugosidade se comparado com os métodos MQL e por inundação, tornando sua aplicação inviável para o processo de retificação.

Além da limpeza do sistema, na retificação, o sistema MQL, de acordo com Silva et al. (2020), proporciona maior penetrabilidade do lubrificante na região de corte, gerando superfícies com valores de rugosidade semelhantes ao sistema por inundação.

Damasceno et al. (2017) relatam que o sistema MQL, se comparado com o sistema por inundação, mesmo que proporcione boa lubrificação nas interfaces de trabalho, não realiza a limpeza adequada do rebolo, gerando assim níveis de rugosidade mais altos do que o sistema por inundação.

## **5.2 Microdureza superficial**

De modo geral, o sistema MQL proporcionou valores de durezas superficiais localizados entre os valores proporcionados pelo sistema de lubri-refrigeração abundante e o corte a seco. O fato do sistema MQL não conseguir

manter a dureza do material é devido ao seu baixo potencial refrigerante, que permite que o material obtenha um resfriamento lento, o que proporciona um rearranjo estrutural e uma diminuição da dureza do mesmo. Porém, um fator importante que acentua a dificuldade do MQL retirar calor do sistema é o tempo de corte, ou seja, quanto maior o tempo de corte, maior a exposição do material à alta temperatura, portanto, menor valor de dureza superficial.

Silva et al. (2020) relatam que, o sistema por inundação contribui para a manutenção da microdureza superficial devido a sua maior capacidade refrigerante, sendo que, para o MQL e corte a seco, o material é submetido a temperatura elevada na retificação e resfriamento mais lento se comparado com o sistema por inundação, proporcionando uma diminuição da microdureza superficial.

De acordo com Damasceno et al. (2017), a dificuldade que o sistema MQL encontra em manter a microdureza superficial do material ensaiado é devido ao sistema possuir baixa capacidade refrigerante e, por consequência, proporcionar um resfriamento lento.

### **5.3 Desgaste da ferramenta**

Analisando o desgaste da ferramenta de trabalho, o sistema MQL, para o processo de retificação, proporcionou níveis de desgaste menores se comparado com o corte à seco e semelhantes à aplicação por inundação. O MQL, além de proporcionar maior penetrabilidade do fluido na interface de trabalho, reduzindo o atrito, realiza parcialmente uma limpeza dos poros do rebolo aumentando o tempo útil de trabalho do mesmo sem que seja necessário a realização de dressagem. Entretanto, o uso do MQL apresentou uma tendência de aumento do desgaste do rebolo com o aumento da profundidade de corte.

Segundo Silva et al. (2020), a maior capacidade de lubrificação na interface de trabalho cavaco ferramenta, devido a melhor penetrabilidade, proporcionado pelo MQL, se comparado com os métodos por inundação e a seco, contribui para a manutenção da vida útil da ferramenta, gerando menores desgastes. Além disso, Silva et al. (2020), também relatam que a falta de aplicação de fluido no sistema, como é o caso do corte a seco, geram um acúmulo de cavacos nos poros do rebolo, prejudicando o acabamento superficial do material, sendo necessário a



realização, com maior frequência, de dressagem do rebolo, o que proporciona maior desgaste se comparado com os outros sistemas de resfriamento.

Damasceno et al. (2017) relatam que o sistema MQL não proporciona boa limpeza dos poros do rebolo, ou seja, para baixos níveis de profundidade de corte, o acúmulo de cavaco nos poros do rebolo levam consigo fluidos lubrificantes que auxiliam na redução do atrito do sistema proporcionando menor desgaste do rebolo, porém, Damasceno et al. (2017) também relataram que com o aumento da profundidade de corte os cavacos gerados são maiores não sendo possível mais o alojamento dos mesmos nos poros do rebolo prejudicando, assim, a lubrificação que o MQL realizava e, por consequência, aumentando o desgaste do rebolo.

Em relação ao torneamento, analisando a vida da ferramenta baseado no desgaste de flanco, o MQL apresentou resultados semelhantes à aplicação por inundação devido à diminuição do atrito de trabalho, porém, com o aumento das taxas de avanço da ferramenta a lubrificação por MQL foi se tornando ineficiente, proporcionando valores de vida útil semelhantes ao proporcionado pelo corte à seco. É importante ressaltar a influência da penetrabilidade do fluido na interface de trabalho que o MQL proporciona, mesmo em menor fluxo se comparado com o método por inundação, tal fator diminui o atrito na interface de trabalho e reduz o desgaste de flanco da ferramenta.

Segundo Pervaiz et al. (2017), a vida útil da ferramenta é influenciada pelo nível de lubrificação do sistema e ainda relatam que o sistema MQL, com o aumento do nível do avanço da ferramenta proporciona lubrificação ineficiente em relação ao atrito gerado, o que gera um aumento do desgaste na ferramenta, diminuindo, assim, sua vida útil.

Gupta et al. (2020) demonstram que o MQL, devido a lubrificação proporcionada e à diminuição do atrito na interface de trabalho, se comparado com o corte a seco, auxilia para a diminuição do desgaste da ferramenta.

#### **5.4 Força de corte**

Para a força de corte foi observado que o sistema MQL não consegue reduzir tal grandeza quando o avanço da ferramenta, a profundidade de corte e a velocidade de corte estão aumentando. Esse fator pode ser consequência da formação de aresta postiça considerando o processo de torneamento. Ou seja,

quando aplicado a baixos níveis de avanço e velocidade de corte o sistema MQL proporciona lubrificação eficiente que auxilia na redução do atrito entre as interfaces de trabalho, porém, com o aumento desses níveis ocorre um aumento de temperatura, que por sua vez, torna o sistema MQL ineficiente por possuir propriedade refrigerante baixa, nesses casos ocorrem a tendência de produção de arestas postiças nas ferramentas aumentando as forças de corte.

Pervaiz et al. (2017) relatam que o sistema MQL para níveis de avanço e velocidades de corte baixos, consegue controlar a força de corte com melhor lubrificação do que os métodos convencionais e a seco, porém, quando o avanço da ferramenta e a velocidade de corte aumentam, o sistema por inundação se sobressai ao sistema MQL por possuir maior capacidade refrigerante.

Segundo Damasceno et al. (2017), o MQL é eficaz na redução do atrito, para o processo de retificação, em condições de baixa profundidade de corte devido à uma lubrificação adequada, porém, quando aplicado no mesmo sistema com maior profundidade foi incapaz de reduzir o atrito.

Segundo Elbah et al. (2019), o sistema MQL proporciona baixas forças de corte se comparado com o sistema por inundação, por reduzir o atrito nas interfaces de trabalho.

Anand, Kumar e Paul (2019) apresentaram que a utilização do sistema MQL proporcionou as menores forças de corte se comparado com o sistema por inundação devido a maior penetrabilidade da aplicação do MQL, proporcionando melhor lubrificação.

## **5.5 Economia e ecologia**

Um fator importante que destaca o MQL como um agente econômico e ecologicamente correto é a taxa de fluxo usada para o sistema. Os experimentos analisados neste trabalho demonstram que os sistemas convencionais apresentam fluxo do fluido com unidade de medida na faixa de L/min, sendo que nos mesmos experimentos que utilizam MQL pode se observar o fluxo do fluido com unidade de medida na faixa de ml/h. Tal diferença das grandezas das unidades de medida contribui para que o MQL seja um sistema ecologicamente correto e econômico, pois, ao mesmo tempo que possui um baixo consumo, proporciona um baixo descarte.

Silva et al. (2020) destacaram que nos seus testes as vazões utilizadas no sistema MQL proporcionaram menor descarte de fluido em relação ao sistema por inundação, gerando assim, uma fabricação ecologicamente correta.

Anand, Kumar e Paul (2019) concluíram que o MQL, a partir dos resultados experimentais, pode ser uma alternativa viável para o torneamento de ligas de titânio no lugar do sistema por inundação que possui grande potencial de poluição.

Ragul et al. (2016) concluíram que o sistema MQL, se comparado com o corte a seco, proporciona uma melhoria na taxa produtiva e ainda, um custo de aquisição de fluido baixo.

## **6 CONCLUSÕES**

Os artigos trabalhados contemplaram apenas dois processos de usinagem que foram a retificação e o torneamento. Pôde ser observado a diferença de fluxo dos fluidos utilizados nos experimentos, sendo que os experimentos que utilizaram sistema por inundação proporcionaram, em média, fluxos na faixa de litros por minuto, já o sistema MQL utilizou fluxos na faixa de mililitros por hora. Esta diferença é determinante para uma usinagem econômica e menos nociva para o meio ambiente.

Analisando os artigos pode-se concluir que o sistema MQL proporcionou melhores desempenhos se comparado com o corte a seco e desempenho semelhante, sendo que em alguns casos foi melhor e em outros pior, se comparado com o sistema por inundação.

Um fator determinante para o sistema MQL, que compensa os baixos fluxos de trabalho, é a alta penetrabilidade proporcionada nas interfaces de contato entre peça, ferramenta e cavaco.

Uma deficiência do sistema estudado é a baixa capacidade refrigerante, que pode prejudicar os parâmetros de saída, por isso, em situações nos experimentos em que altas temperaturas eram proporcionadas, o sistema MQL não obteve bom desempenho se comparado com o sistema por inundação.

Portanto, de modo geral, o sistema MQL se mostrou, baseado nos artigos estudados, eficiente para substituir o sistema por inundação em casos específicos,

que os parâmetros de saída são beneficiados ou semelhantes aos níveis encontrados com o sistema por inundação.

## REFERÊNCIAS

A VOZ DA INDÚSTRIA. **Veja como escolher corretamente o fluido de corte nos processos produtivos da indústria.** [S.l.], 2017. Disponível em: <https://avozdaindustria.com.br/gest-o/veja-como-escolher-corretamente-o-fluido-de-corte-nos-processos-produtivos-da-ind-stria>. Acesso em: 22 Jun. 2020.

ALVES, S. M.; OLIVEIRA, J. F. G. Adequação ambiental dos processos usinagem utilizando produção mais Limpa como estratégia de gestão ambiental. **Prod.** São Paulo, v. 17, n. 1, p. 129-138, Abr. 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-65132007000100009>. Acesso em: 23 Jun 2020.

ANAND, N.; KUMAR, A. S.; PAUL, S. Effect of cutting fluids applied in MQCL mode on machinability of TI-6Al-4V. **Journal of Manufacturing Processes**, West Bengal, v. 43, p. 154-163, 2019. Disponível em: [encurtador.com.br/ekEQX](http://encurtador.com.br/ekEQX). Acesso em: 28 Set. 2020.

ARAUJO JUNIOR, A. S. **Desempenho de óleos vegetais comestíveis aplicados por MQF no fresamento frontal do aço ABNT 1045.** 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/14756/1/DesempenhoOleosVegetais.pdf>. Acesso em: 23 Jun. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 3685:** ensaio de vida da ferramenta de ponta única para torneamento. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

BIANCHI, E. C.; AGUIAR, P. R.; PIUBELI, B. A. **Aplicação e utilização dos fluídos de corte nos processos de retificação.** 1. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2003. 110 p.

BIANCHI, E. C. et al. O impacto do problema ambiental do fluido de corte nas indústrias e novas alternativas para sua utilização mais racional nos processos de retificação. **Fórum Ambiental da Alta Paulista**, [S.l.], v. 6, n. 1, p. 71-82, 2010. Disponível em: [http://www.amigosdanatureza.org.br/publicacoes/index.php/forum\\_ambiental/article/viewFile/57/60](http://www.amigosdanatureza.org.br/publicacoes/index.php/forum_ambiental/article/viewFile/57/60). Acesso em: 22 Jun. 2020.

CHIAVERINI, V. **Processos de fabricação e tratamento**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986. 315 p., (Tecnologia Mecânica, v.2).

COELHO, R. T.; SILVA, E. J. **Força e potência de corte em torneamento**. Desenvolvido pela Escola de Engenharia de São Carlos - EESC - USP, Departamento de Engenharia de Produção, Núcleo de manufatura avançada - NUMA, Abr. 2018. Apresenta uma revisão bibliográfica sobre conceitos e definições de usinagem com foco no torneamento. Disponível em: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4647331/mod\\_resource/content/1/5-For%C3%A7a%20e%20Pot%C3%Aancia%20em%20Torneamento.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4647331/mod_resource/content/1/5-For%C3%A7a%20e%20Pot%C3%Aancia%20em%20Torneamento.pdf). Acesso em: 3 Jun. 2020.

CONFORTO, E. C.; SILVA, S. L.; AMARAL, D. C. **Roteiro para revisão bibliográfica sistemática**: aplicação no desenvolvimento de produtos e gerenciamento de projetos. Artigo desenvolvido para o 8º Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento de Produto - CBGDP, Porto Alegre, 2011. Disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/Edivandro\\_Conforto/publication/267380020\\_Roteiro\\_para\\_Revisao\\_Bibliografica\\_Sistematica\\_Aplicacao\\_no\\_Developolvimento\\_de\\_Produtos\\_e\\_Gerenciamento\\_de\\_Projetos/links/585c18ef08aebf17d386967e.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Edivandro_Conforto/publication/267380020_Roteiro_para_Revisao_Bibliografica_Sistematica_Aplicacao_no_Developolvimento_de_Produtos_e_Gerenciamento_de_Projetos/links/585c18ef08aebf17d386967e.pdf). Acesso em: 16 Jun. 2020.

DAMASCENO, R. F. et al. Performance Evaluation of Various Cooling-lubrication Techniques in Grinding of Hardened AISI 4340 Steel with Vitrified Bonded CBN Wheel. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. [S.l.], v. 92, n. 9--12, p. 3795-3806, 2017. Disponível em: [encurtador.com.br/dwZ23](http://encurtador.com.br/dwZ23). Acesso em: 28 Set. 2020.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 9. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2014. 270 p.

ELBAH, M. et al. Comparative assessment of machining environments (dry, wet and MQL) in hard turning of AISI 4140 steel with CC6050 tools. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. [S.l.], v. 105, n. 5-6, p. 25581-2597, 2019. Disponível em: [encurtador.com.br/FKMPV](http://encurtador.com.br/FKMPV). Acesso em: 28 Set. 2020.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 1970. 751 p.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002. 175 p. Disponível em: [http://www.uece.br/nucleodelinguasitaperi/dmdocuments/gil\\_como\\_elaborar\\_projeto\\_de\\_pesquisa.pdf](http://www.uece.br/nucleodelinguasitaperi/dmdocuments/gil_como_elaborar_projeto_de_pesquisa.pdf). Acesso em: 29 de Jun. 2020.

GROOVER, M. P. **Introdução aos processos de fabricação**. Tradução de Anna Carla Araujo. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. 737 p.

GUPTA, M. K. et al. Machinability Investigations of Hardened Steel with Biodegradable Oil-Based MQL Spray System. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. [S.l.], v. 108, n. 3, p. 735-748, 2020. Disponível em: [encurtador.com.br/kDQR8](http://encurtador.com.br/kDQR8). Acesso em: 28 Set. 2020.

KIMINAMI, C. S.; CASTRO, W. B.; OLIVEIRA, M. F. **Introdução aos processos de fabricação de produtos metálicos**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2018. 235 p.

KUMAR, S.; SINGH, D.; KALSI, N. S. Analysis of Surface Roughness during Machining of Hardened AISI 4340 Steel using Minimum Quantity Lubrication. **5th International Conference of Materials Processing and Characterization (ICMPC 2016)**. Gurdaspur (Punjab), v. 4, ed. 2, p. 3627-3635, 2017. Disponível em: [encurtador.com.br/nGOQR](http://encurtador.com.br/nGOQR). Acesso em: 28 Set. 2020.

LISBOA, F. C.; MORAES, J. J.; HIRASHITA, M. A. **Fluidos de Corte: Uma Abordagem Geral e Novas Tendências**. Artigo desenvolvido para o XXXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Salvador, 2013. Disponível em: [http://abepro.org.br/biblioteca/enegep2013\\_TN\\_STO\\_185\\_056\\_23095.pdf](http://abepro.org.br/biblioteca/enegep2013_TN_STO_185_056_23095.pdf). Acesso em: 22 Jun. 2020.

LOPES, A. P. V. B. V.; CARVALHO, M. M. Evolução da literatura de inovação em relações de cooperação: um estudo bibliométrico num período de vinte anos. **Gest. Prod.** São Carlos, v. 19, n. 1, p. 203-217, 2012. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0104-530X2012000100014&lng=pt&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-530X2012000100014&lng=pt&nrm=iso). Acesso em: 6 Out. 2020.

MACHADO, A. R.; SILVA, M. B. Usinagem dos Metais. **Universidade Federal de Uberlândia**. [S.l.], 2004. Apresenta conceitos e definições gerais sobre usinagem mecânica. Disponível em: [https://www.academia.edu/37307326/LABORAT%C3%93RIO\\_DE\\_ENSINO\\_E\\_PESQUISA\\_EM\\_USINAGE](https://www.academia.edu/37307326/LABORAT%C3%93RIO_DE_ENSINO_E_PESQUISA_EM_USINAGE)

M\_FACULDADE\_DE\_ENGENHARIA\_MEC%C3%82NICA\_UNIVERSIDADE\_FEDE  
RAL\_DE\_UBERL%C3%82NDIA\_USINAGEM\_DOS\_METAIS. Acesso em: 5 Jun.  
2020.

MACHADO, A. R. et al. **Teoria da usinagem dos materiais**. 3. ed. São Paulo:  
Blucher, 2015. 407 p.

MARCONI, M. d.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica**. 5. ed.  
São Paulo: Atlas, 2003. 311 p. Disponível em: [http://docente.ifrn.edu.br/olivianeta/  
disciplinas/copy\\_of\\_historia-i/historia-ii/china-e-india/view](http://docente.ifrn.edu.br/olivianeta/disciplinas/copy_of_historia-i/historia-ii/china-e-india/view). Acesso em: 29 de Jun.  
2020.

PERVAIZ, S. et al. Minimal Quantity Cooling Lubrication in Turning of Ti6Al4V:  
Influence on Surface Roughness, Cutting Force and Tool Wear. **Proceedings of the  
Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering  
Manufacture**. [S.l], v. 231, n. 9, p. 1542-1558, 2017. Disponível em:  
[encurtador.com.br/mpxMO](http://encurtador.com.br/mpxMO). Acesso em: 28 Set. 2020.

RAGUL, G. et al. An investigation in analysis of dry turning in MQL method for  
predicting tool wear and to improve surface roughness. **Indian Journal of Science  
and Technology**. [S.l], v. 9, n. 36, p. 1-11, 2016. Disponível em:  
[encurtador.com.br/enrCO](http://encurtador.com.br/enrCO). Acesso em: 28 Set. 2020.

REVISTA DIGITAL ADNORMAS. **A qualidade normativa dos processos de  
usinagem**. [S.l], 2019. Disponível em:  
[https://www.revistaadnormas.com.br/2019/03/05/a-qualidade-normativa-dos-  
processos-de-usinagem](https://www.revistaadnormas.com.br/2019/03/05/a-qualidade-normativa-dos-processos-de-usinagem). Acesso em 1 Jun. 2020.

RODRIGUES, M. A. A teoria da formação de cavacos e o baralho de Piispanen.  
**Usinagem brasil**. [S.l], [2020?]. Disponível em: [http://www.usinagem-  
brasil.com.br/14372-a-teoria-da-formacao-de-cavacos-e-o-baralho-de-piispanen/](http://www.usinagem-brasil.com.br/14372-a-teoria-da-formacao-de-cavacos-e-o-baralho-de-piispanen/).  
Acesso em: 3 Jun. 2020.

SANTOS, S. C.; SALES, W. F. **Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais**.  
1. ed. São paulo: Artliber Editora, 2007. 246 p.



SILVA, L. R. et al. Environmentally Friendly Manufacturing: Behavior Analysis of Minimum Quantity of Lubricant – MQL in Grinding Process. **Journal of Cleaner Production**. [S.l.], v. 256, n. 103287, não paginado, 2020. Disponível em: [encurtador.com.br/INOT9](http://encurtador.com.br/INOT9). Acesso em: 28 Set. 2020.

SILVEIRA, J. L. Notas de Aula de Usinagem. **Escola de Engenharia - UFRJ**. ([2019?]). Disponível em: <http://www.mecanica.ufrj.br/util/b2evolution/media/blogs/joseluis/usinagem.pdf>. Acesso em: 1 Jun. 2020.

USINAGEM BRASIL. **Vantagens e benefícios do uso do MQL**. São Paulo, 2012. Disponível em: <http://www.usinagem-brasil.com.br/6791-vantagens-e-beneficios-do-uso-do-mql/>. Acesso em: 08 Mar. 2021.

WAKABAYASHI, T. et al. Near-dry Machining of Titanium Alloy With MQL and Hybrid Mist Supply. **Key Engineering Materials**. [S.l.], v. 656-657, p. 341-346, 2015. Disponível em: [encurtador.com.br/qvAL4](http://encurtador.com.br/qvAL4). Acesso em: 28 Set. 2020.

WALKER, Tim. **The MQL Handbook: A Guide To Machining With Minimum Quantity Lubrication**. [S.l.]: Unist, Inc., 2013. 43p.