

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
COORDENAÇÃO DE TECNOLOGIA EM MANUTENÇÃO INDUSTRIAL  
CURSO DE TECNOLOGIA EM MANUTENÇÃO INDUSTRIAL**

**SAMUEL LUCAS TOLEDO**

**ANÁLISE DA TÉCNICA DE MÍNIMA QUANTIDADE DE FLUIDO NO  
FRESAMENTO DO AÇO 1020**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**GUARAPUAVA**

**2019**

**SAMUEL LUCAS TOLEDO**

**ANÁLISE DA TÉCNICA DE MÍNIMA QUANTIDADE DE FLUIDO NO  
FRESAMENTO DO AÇO 1020**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Tecnólogo em Manutenção Industrial, do curso de Tecnologia em Manutenção Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dra. Sílvia do Nascimento Rosa.

Coorientador: Lucas Franco Wrege.

**GUARAPUAVA**

**2019**



Ministério da Educação  
**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
Campus Guarapuava  
Diretoria de Graduação e Educação Profissional  
Coordenação de Tecnologia em Manutenção Industrial



---

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

### **ANÁLISE DA TÉCNICA DE MÍNIMA QUANTIDADE DE FLUIDO NO FRESAMENTO DO AÇO 1020**

por

**SAMUEL LUCAS TOLEDO**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 20 de fevereiro de 2020 como requisito parcial para a obtenção do título de Tecnólogo em Manutenção Industrial. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Sílvia do Nascimento Rosa  
Prof<sup>a</sup> Orientadora

---

Aldo Przybysz  
Membro titular

---

Ricardo Vinicius Bubna Biscaia  
Membro titular

---

Ricardo Vinicius Bubna Biscaia  
Coordenador do Curso de Tecnologia em Manutenção industrial

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso –

Dedico este trabalho à minha família, que  
lutaram ao meu lado e acreditaram no  
meu potencial.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente quero agradecer à minha orientadora Prof<sup>a</sup> Dra. Sílvia do Nascimento Rosa, pelo incentivo, sabedoria e orientação que tornou possível a conclusão deste trabalho.

Ao coorientador Lucas Franco Wrege por contribuir com o sistema de MQF e auxiliar nos ensaios da pesquisa.

Agradeço à minha família por ser a essência da minha formação.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná campus Guarapuava que propiciou as condições para todo o andamento da pesquisa.

## **Resumo**

TOLEDO, Samuel Lucas. **Análise da técnica de mínima quantidade de fluido no fresamento do aço 1020**. 2019. 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Manutenção Industrial) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2019.

O objetivo da tecnologia de usinagem é produzir com menor custo possível, mas simultaneamente com alta precisão dimensional e geométrica. O aumento da vida da ferramenta, diminuição da força de usinagem e menor quantidade de resíduos gerados no processo é uma das formas para reduzir o custo. Como exemplo de resíduo em usinagem pode-se citar o fluido de corte. Usinagem sem fluido de corte, mínima quantidade de fluido de corte (MQF), resfriamento criogênico, fluido a alta pressão e óleos vegetais biodegradáveis têm sido objeto de estudo para alguns autores, já que tais práticas contribuem para uma produção sustentável. Nesse entendimento este trabalho propõe o estudo do fresamento do aço 1020 utilizando um equipamento desenvolvido no Laboratório de Usinagem para o método de aplicação MQF para avaliar o desgaste da ferramenta e a rugosidade da superfície da peça usinada. Os experimentos foram realizados utilizando uma pastilha de metal duro revestida, três condições de lubri refrigeração (sem fluido, fluido semissintético e fluidos sintéticos) e velocidade, avanço e profundidade, cujos valores foram respectivamente, 230 m/min, 0,19 mm e 1 mm. Os resultados revelaram que o fluido semissintético proporcionou os menores valores de rugosidade, o sistema utilizado para aplicação do método MQF atendeu a função e a ferramenta de corte em todas as condições testadas apresentou bons resultados.

**Palavras-chave:** Fresamento. Aço ABNT 1020. MQL. Rugosidade.

## ABSTRACT

TOLEDO, Samuel Lucas. **Analysis of the minimum quantity fluid technique in milling 1020 steel**. 2019. 59 f. Work of Conclusion Course (Technology in Industrial Maintenance) - Federal Technological University Parana. Guarapuava, 2019.

The aim of machining technology is to manufacture at the lowest possible cost, but simultaneously with high dimension and geometric accurate. The cutting tool life increase, machining force decrease and less quantity of waste generated in the process is one of the ways to reduce cost. As example, of waste in machining can be mentioned the cutting fluid. Dry cutting, minimum quantity cooling lubrication, cryogenic cooling, high pressure coolant and biodegradable vegetable oils have been object of study for some authors, since such practices use contribute to sustainable production. In this understanding, this study proposes the study of milling 1020 steel using the equipment developed in the Machining Laboratory for the MQF application method to assess the tool wear and the workpiece surface roughness. The experiments were carried out using cutting tool coated, three conditions of lubrication (without fluid, semi synthetic fluid and synthetic fluid) and values constants cutting speed ( $v_c$ ), feed ( $f$ ) and depth ( $a_p$ ), whose values were respectively, 230 m/min, 0.19 mm e 1 mm. Results revealed that the semi synthetic fluid provided the lowest values roughness, the system used for application method MQF complied with the function and the cutting tool in all tested conditions presented good results.

**Keywords:** Milling. ABNT 1020 Steel. MQL. Roughness.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: (a) Fresamento tangencial e (b) fresamento frontal.....	17
Figura 2: (a) Fresamento tangencial concordante e (b) fresamento tangencial discordante.....	17
Figura 3: (a) Fresamento frontal simétrico e (b) fresamento frontal assimétrico.....	18
Figura 4: Partes de uma aresta de corte e regiões de desgastes.....	20
Figura 5: Desgaste de cratera.....	21
Figura 6: Desgaste de flanco.....	21
Figura 7: Desgaste de entalhe.....	22
Figura 8: Direções da aplicação do fluido de corte: (1) através da superfície de folga; (2) na saída do cavaco; (3) sobre-cabeça; e (4) por dentro da ferramenta.....	25
Figura 9: (a) Canal externo de aplicação de fluido e (b) fresa com as entradas para a aplicação interna.....	27
Figura 10: Amostra da superfície analisada e elementos que compõem a irregularidade.....	30
Figura 11: Perfil gerado por um rugosímetro (A) e Mapeamento da superfície em 3D (B).....	31
Figura 12: Comprimentos do perfil de rugosidade.....	32
Figura 13: Definição de rugosidade Ra.....	32
Figura 14: Definição dos dez maiores parâmetros de altura.....	33
Figura 15: Definição dos parâmetros Rp, Rv e Rmáx.....	33
Figura 16: Fluxograma das atividades realizadas no trabalho.....	35
Figura 17: Corpo de prova usinado (a) e dimensões finais (b).....	36
Figura 18: Máquina utilizada para o ensaio e o sistema MQF.....	40
Figura 19: Percurso de avanço da ferramenta.....	40
Figura 20: (a) Vista superior da pastilha, (b) Equipamento utilizado para projeção...	41
Figura 21: Micrografia óptica do aço.....	44
Figura 22: Micrografia óptica do aço.....	45
Figura 23: Alturas médias e máximas entre pico e vales.....	46
Figura 24: Alturas máximas de pico e vales.....	47
Figura 25: Avaliação superficial do material sem fluido (A), com fluido sintético I (B), semissintético (C) e sintético II (D).....	48
Figura 26: Avaliação do desgaste na região de corte principal com a utilização de fluido semissintético.....	50
Figura 27: Característica ampliada do desgaste nas quatro condições.....	51
Figura 28: Avaliação do desgaste na região de corte secundário com a utilização de fluido semissintético.....	51
Figura 29: Avaliação do desgaste na região superficial com a utilização de fluido sintético II.....	52

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química do material em porcentagem.....	36
Tabela 2: Dados coletados da vazão.....	39
Tabela 3: Parâmetros de usinagem.....	41
Tabela 4: Características químicas do material em porcentagem.....	43
Tabela 5: Faixa de medição dos valores de vazão.....	44

## LISTA DE ABREVIATURAS

ae	Largura de corte
ap	Profundidade de corte
CNC	Controle Numérico Computadorizado
D	Diâmetro
fz	Avanço por dente
vc	Velocidade de corte
HB	Hardness Brinell
MQF	Mínima Quantidade de Fluido
PVD	Physical Vapor Deposition
WC	Carbeto de Tungstênio

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
1.1 JUSTIFICATIVA.....	14
1.2 OBJETIVO GERAL.....	14
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>16</b>
2.1 FRESAMENTO.....	16
2.2 DESGASTE DA FERRAMENTA DE CORTE.....	18
2.2.1 Tipos de desgaste.....	20
2.3 FLUIDOS DE CORTE.....	22
2.3.1 Classificação dos fluidos.....	24
2.3.2 Métodos de aplicação.....	24
2.3.3 Sistema MQF.....	26
2.3.4 Estudos de casos.....	27
2.4 RUGOSIDADE.....	29
2.4.1 Rugosidade média (Ra).....	32
2.4.2 Altura em dez pontos (Rz).....	32
2.4.3 Altura máxima do perfil (Rmáx).....	33
2.4.4 Altura máxima de pico do perfil (Rp).....	33
2.4.5 Profundidade máxima de vale do perfil (Rv).....	34
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>35</b>
3.1 PREPARAÇÃO DO CORPO DE PROVA.....	35
3.2 CARACTERIZAÇÃO DO AÇO.....	36
3.3 TÉCNICA DE MINIMA QUANTIDADE DE FLUIDO.....	37
3.4 PREPARAÇÃO E ANÁLISES DO PROCESSO DE USINAGEM.....	39
<b>4 RESULTADOS DE DISCUSSÕES.....</b>	<b>43</b>
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL.....	43
4.2 EXPERIMENTO DE USINAGEM.....	44
4.3 AVALIAÇÃO DO DESGASTE DA FERRAMENTA.....	50
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>53</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>54</b>
<b>ANEXO A - Programa gerado pelo software <i>Fusion 360</i> e codificado em forma de instruções formadas por números e letras utilizados para a usinagem da peça.....</b>	<b>57</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A pesquisa e o desenvolvimento de um fluido que conseguisse minimizar as influências produzidas pela operação de usinagem foram descritos há mais de 100 anos, e teve um desenvolvimento crescente com o passar dos tempos. Parte desse desenvolvimento se deve ao surgimento de novos fabricantes de fluidos, e as novas fórmulas e composições trazidas por elas (DINIZ *et al.*, 1999; CORDEIRO *et al.*, 2013). O fluido de corte proporciona melhores resultados frente à condição imposta pela operação, mas que se torna um dos principais resíduos de usinagem após a sua utilização, em relação ao armazenamento, descarte e a reciclagem. A alternativa desenvolvida por indústrias de fabricação é minimizar o custo do produto final sem afetar a sua qualidade.

Como exemplo se pode citar a empresa Ford. Por motivos ecológicos e financeiros, no início de 2000, a empresa adotou como prática a usinagem sem fluido de corte e a mínima quantidade de fluido (MQF) na sua produção. Os resultados bem-sucedidos do pré-projeto, foram decisivos para incorporar a técnica MQF à linha produtiva. Em 2005, numa de suas fábricas, outra linha de produção recebeu o mesmo conceito (ZEILMANN *et al.*, 2017).

A tendência da utilização de mínima quantidade de fluido no processo é o reflexo de estudos da interação desse método de aplicação com o material usinado, e a análise de parâmetros de usinagem pré-definidos. Conseguir avaliar a interação das características de um dado material, com os parâmetros de usinagem e a técnica MQF, é um resultado que pode contribuir com o custo do processo e com o meio ambiente. Portanto, neste estudo será avaliada a influência da técnica MQF (utilizando um dispositivo simples desenvolvido no laboratório) no acabamento do aço 1020 no processo de fresamento.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Durante o processo de usinagem, o calor e o atrito gerado entre a ferramenta e a peça, causam problemas em termos de vida de ferramenta e acabamento superficial. Para minimizar estes problemas, tradicionalmente os fluidos de corte são utilizados com a função de refrigeração e lubrificação. No entanto, o uso de fluidos de corte tem vários efeitos adversos, como poluição ambiental, dermatites em operadores, poluição da água e contaminação do solo durante o descarte (ADLER *et al.*, 2006).

Apesar de todos estes problemas, para obter o resultado desejado de certas peças produzidas com uma determinada liga, se torna imprescindível a utilização de um fluido na operação.

Assim, algumas técnicas são estudadas a fim de suprimir ou minimizar a quantidade de fluido de corte, como por exemplo, usinagem sem fluido de corte, resfriamento criogênico, MQF, resfriamento a alta pressão, nanofluidos, etc (LIEW *et al.*, 2017). Porém, cada técnica gera um custo diferente (referente a equipamentos, aquisição ou tipo de máquina conveniente para aplicação) e resultados diferentes na usinagem.

Nos processos em que a usinagem sem fluido de corte é prejudicial, a técnica MQF pode ser uma das alternativas para o uso consciente do fluido de corte contribuindo com a sustentabilidade. Para isso, é importante uma avaliação quantitativa para saber até que ponto se torna viável tal aplicação em uma liga.

## 1.2 OBJETIVO GERAL

Avaliar a rugosidade da superfície fresada sem fluido de corte e com a técnica de mínima quantidade de fluido (MQF), utilizando três tipos específicos de fluido de corte comercial.

## 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar o material usinado;

- Medir os parâmetros de rugosidade média (Ra), rugosidade total (Rt), altura em dez pontos (Rz), pico máximo (Rp) e vale máximo (Rv).
- Avaliar o desgaste da ferramenta.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 FRESAMENTO

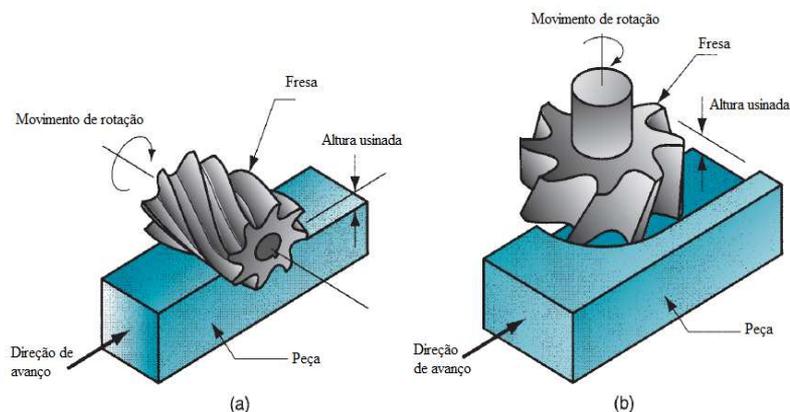
O fresamento é uma operação de usinagem caracterizada pela retirada de material de uma peça por uma ferramenta, chamada fresa, que possui na sua estrutura arestas cortantes dispostas simetricamente em torno de seu eixo. O processo é feito com intervalos sucessivos, isso quer dizer que cada aresta cortante entra e sai da peça devido à rotação da ferramenta. O avanço é feito normalmente pela peça que fica fixada junto à mesa da máquina, fazendo com que aquele passe a obrigue a passar sob a ferramenta, dando assim as dimensões e geometrias desejadas (DINIZ *et al.*, 1999; GROOVER, 2014).

O tipo de fresamento é definido levando em consideração alguns critérios que, escolhidos corretamente, aperfeiçoam a vida útil da ferramenta e a qualidade do material finalizado que são: posição e trajeto da fresa. A posição dos dentes ativos sob a superfície da peça classifica o tipo de fresamento em (DINIZ *et al.*, 1999; GROOVER, 2014):

- *Fresamento tangencial*: posição em que o eixo principal da ferramenta está paralelo à superfície a ser usinada e os dentes ativos estão sobre a superfície superior.
- *Fresamento frontal ou de topo*: posição em que o eixo da ferramenta está perpendicular à superfície a ser usinada e os dentes ativos estão na superfície frontal da peça. A **figura 1** mostra os dois tipos de fresamento.

O trajeto que a mesa faz em relação à rotação da ferramenta durante a usinagem no fresamento é uma subclassificação do fresamento tangencial e frontal.

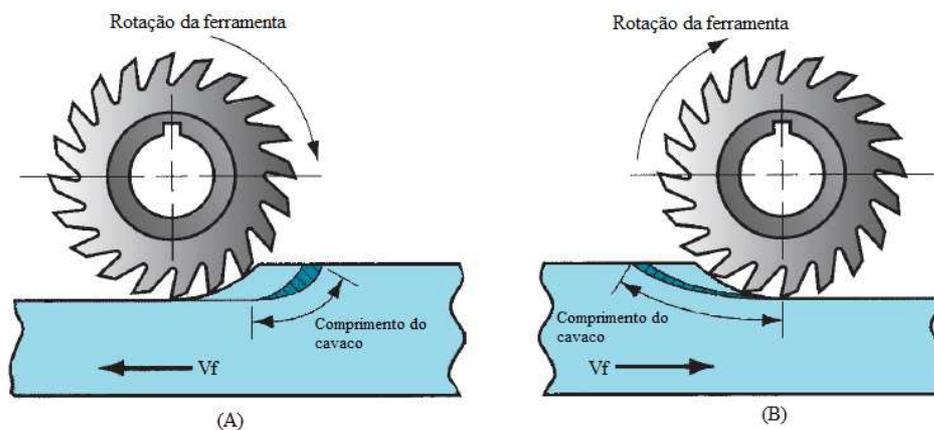
**Figura 1: (a) Fresamento tangencial e (b) fresamento frontal.**



**Fonte: Adaptada de GROOVER, 2014.**

O fresamento tangencial pode ser concordante e discordante como mostrado na **figura 2**. No fresamento concordante a direção do movimento da fresa é igual ao movimento de avanço da peça, ou seja, o avanço e a rotação da ferramenta concordam entre si e a retirada de material ocorre de cima para baixo. A característica do cavaco gerado nesta operação faz com que seja formado a partir de um valor máximo e decaia a um valor mínimo causado pelo avanço da mesa. No fresamento discordante acontece o contrário, o movimento de avanço da peça em relação à rotação da ferramenta é oposto. A usinagem ocorre de baixo para cima e o cavaco gerado cresce de um valor mínimo até um valor máximo (DINIZ *et al.*, 1999).

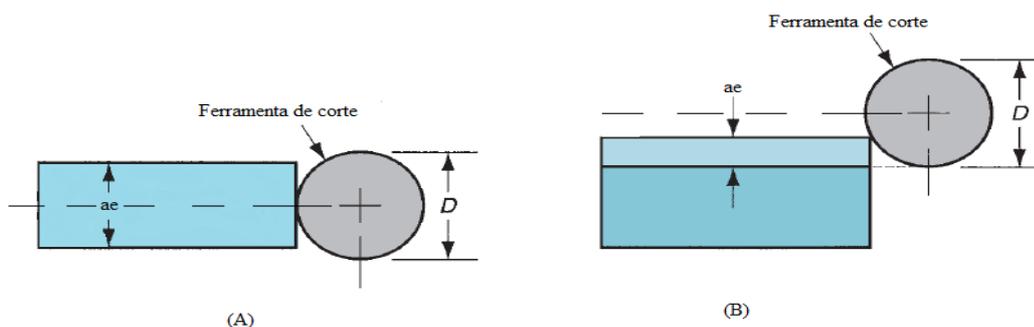
**Figura 2: (a) Fresamento tangencial concordante e (b) fresamento tangencial discordante.**



**Fonte: Adaptada de GROOVER, 2014.**

No fresamento frontal pode ocorrer o processo concordante, discordante ou ambos. O que determina é a linha de simetria da peça como mostra a **figura 3**. Se o fresamento é simétrico, o eixo da ferramenta está alinhado com o eixo de simetria da peça. Esta operação é também chamada de fresamento em cheio devido aos dentes ativos estarem retirando material de forma simétrica. Em uma operação de faceamento na superfície da peça, o fresamento frontal simétrico é mais vantajoso, comparado com o processo assimétrico (DINIZ *et al.*, 1999), devido à simetria dos dentes ativos estarem menos tempo em contato com a peça, o que impacta diretamente na vida útil da ferramenta. As operações mais comuns feitas por esta operação são: rasgos de entrada para chaveta e faceamento na superfície da peça.

**Figura 3: (a) Fresamento frontal simétrico e (b) fresamento frontal assimétrico.**



**Fonte: Adaptada de GROOVER, 2014.**

No fresamento assimétrico o eixo da ferramenta não se desloca na linha de simetria da peça. Esta operação é vantajosa devido ao diâmetro da fresa (muitas vezes ser maior que a largura da peça a ser usinada), o que possibilita mais dentes ativos na região, gerando um fresamento com menos vibrações e tempo de usinagem reduzido (DINIZ *et al.*, 1999).

## 2.2 DESGASTE DA FERRAMENTA DE CORTE

Para retirar material de uma peça em usinagem, independente de qual operação esteja realizando, a ferramenta deve conter uma tecnologia que permita trabalhar com diferentes condições de corte. O tempo em que ela consegue usinar um material e manter suas características, em usinagem é chamado vida

da ferramenta. Vários são os fatores que influenciam a longo ou curto prazo a vida da ferramenta (GROOVER, 2014).

Quando a ferramenta está submetida a uma operação de usinagem e há perda da estrutura ou da geometria de corte, levando à falha final da ferramenta, se diz que houve o desgaste desta. No fresamento a ferramenta está constantemente sujeita a condições que favorecem o desgaste, o que é um problema de usinagem que impacta diretamente nos custos e qualidade. Isto porque, o corte no fresamento ocorre com intervalos, e esta característica da operação pode formar trincas na ferramenta e até mesmo levá-la à quebra (GROOVER, 2014).

A avaria gerada durante a operação de usinagem pode comprometer as propriedades superficiais da peça, que muitas vezes leva o produto já finalizado à operação de retrabalho. Este retrabalho adiciona tempos indesejáveis na produção e custos, e em casos mais extremos, o descarte da peça que sofreu modificações superficiais. Os fatores que favorecem as avarias são em média causados por choques térmicos e mecânicos sofridos pela ferramenta, que pode ocorrer na entrada, durante e no final do corte, aliada à rotação do seu eixo e ao cavaco gerado (GROOVER, 2014; DINIZ *et al.*, 1999).

No fresamento o choque mecânico pode ser definido como a força que a ferramenta faz na entrada do corte, caracterizada pelo impacto inicial de entrada. A força cresce rapidamente neste curto período e logo varia devido ao avanço da mesa. Se o impacto de entrada for muito grande a ferramenta pode quebrar ou haverá a ruptura dos dentes ativos (DINIZ *et al.*, 1999).

A escolha da rotação da ferramenta em usinagem deve ser um critério escolhido a partir do material que vai ser usinado. Esse critério é feito devido à quantidade de ligas que podem ser desenvolvidas para aplicações especiais, pois essas ligas metálicas apresentam características variadas, como por exemplo, a alta dureza ou maleabilidade. Se uma peça tem como característica alta dureza, a rotação da ferramenta normalmente é baixa, pois o acréscimo da velocidade somado com o impacto inicial da ferramenta sob o material pode quebrar ou fraturar um dente. Já para materiais maleáveis, a rotação da ferramenta em média é alta devido ao fato que a redução da rotação da ferramenta sob a peça faz com que a aresta esmague o cavaco durante a operação gerando uma alta temperatura na superfície do material e na aresta de corte. A temperatura

elevada no fresamento favorece o amolecimento da aresta cortante, causando a deformação plástica que nada mais é que o dano permanente do material, impossibilitando a afiação da ferramenta (GROOVER, 2014; DINIZ *et al.*, 1999).

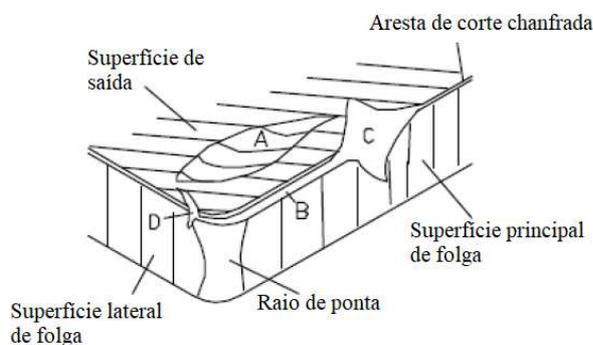
Dessa forma, é viável em um processo trabalhar nas melhores condições que favoreçam o prolongamento da vida da ferramenta, diminuindo o descarte prematuro e reduzindo custos indesejáveis.

### 2.2.1 Tipos de desgaste

Cada parte que compõem uma ferramenta está sujeita a ação da peça durante o corte e que favorece um tipo específico de desgaste. As mudanças podem ser graduais ou repentinas, ou seja, podem acontecer progressivamente ao longo do tempo com a perda da geometria da ferramenta ou subitamente com a quebra ou trinca (SANTOS e WISLEY, 2007).

A **figura 4** mostra as partes que compõem a ferramenta em usinagem, com as suas respectivas indicações de onde ocorre o desgaste.

**Figura 4: Partes de uma aresta de corte e regiões de desgastes**

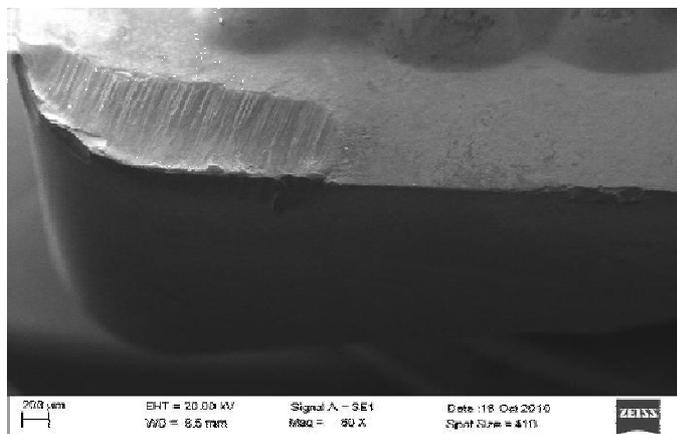


**Fonte: SANTOS e WISLEY, 2007 (apud Dearnley, Trent e Wright, 1982).**

Na superfície de saída da ferramenta acontece o desgaste de cratera, indicado como região A da **figura 4**. É um tipo de desgaste que gera na superfície uma concavidade, devido à pressão aliada a temperatura do cavaco-ferramenta. O mecanismo que favorece este tipo de desgaste acontece quando parte do cavaco fica aderido à superfície de saída, e quando ele se solta parte da ferramenta é levado com o fluxo de cavaco. Com o constante deslizamento do cavaco nesta região, mais material da ferramenta é arrancado favorecendo o

surgimento do desgaste de cratera (DINIZ *et al.*, 1999; GROOVER, 2014), ilustrado na **figura 5**.

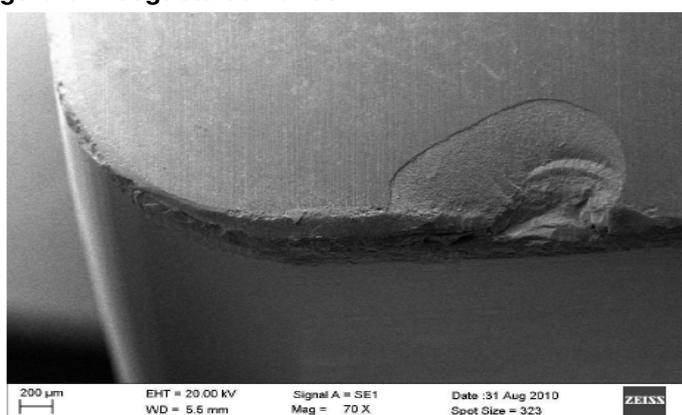
**Figura 5: Desgaste de cratera.**



**Fonte: LIMA, 2012.**

Na superfície lateral de folga, região B da **Figura 4**, ocorre o desgaste de flanco ou frontal, formado devido o contato da superfície gerada com a superfície da ferramenta, favorecendo o atrito entre ambas. Devido ao desgaste acontecer logo que a superfície é gerada, a qualidade e características da peça ficam comprometidas (GROOVER, 2014). A **figura 6** mostra o desgaste de flanco e ao final da aresta de corte um desgaste maior, que se estende para superfície de saída.

**Figura 6: Desgaste de flanco.**

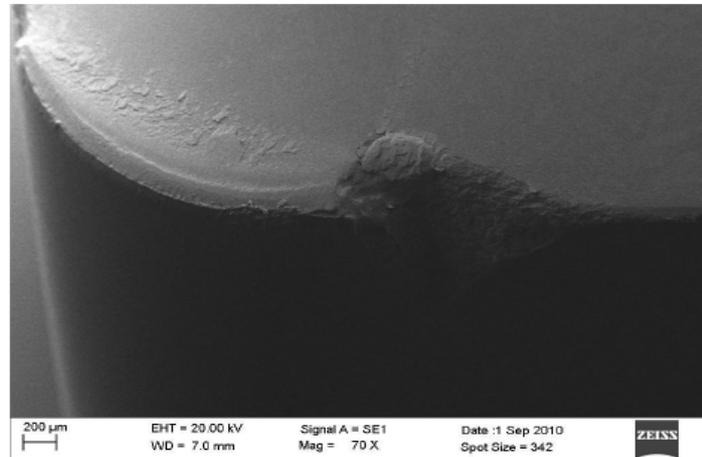


**Fonte: LIMA, 2012.**

O desgaste de entalhe, exemplificado nas **Figuras 4 (C e D) e 7**, surge na aresta de corte da ferramenta, ao final do valor da profundidade de corte, e pode

ocorrer devido à formação de óxidos sobre a ferramenta e o contato direto da peça e a ferramenta.

**Figura 7: Desgaste de entalhe.**



**Fonte: LIMA, 2012**

A formação de óxidos acontece devido à alta temperatura gerada no processo, aliada à aplicação de fluido de corte, favorecendo a ocorrência de uma película de óxido sobre a ferramenta. A ferramenta em contato direto com esta película de óxido faz surgir o desgaste que se torna crescente, quando as características da liga metálica favorecem a formação de uma película muito dura e resistente (DINIZ *et al.*, 1999).

### 2.3 FLUIDOS DE CORTE

O fluido de corte é um dos meios de se obter bons resultados de qualidade no produto final, aliado à vida da ferramenta frente às condições impostas pela operação de usinagem (DINIZ *et al.*, 1999; GROOVER, 2014).

Historicamente, a aplicação de um líquido que aperfeiçoasse as condições de corte em usinagem foi descrita por Taylor em 1890. Sua pesquisa se baseou em utilizar água para resfriar a ferramenta, que era afetada termicamente pela ação da retirada de material. Porém, somente a água no processo acelerava processos corrosivos no material e tinha pouca ação lubrificante. A solução para a época foi adicionar junto à água uma espécie de detergente, que parcialmente conseguiu diminuir os desgastes da ferramenta e da peça (CORDEIRO *et al.*, 2013; DINIZ *et al.*, 1999).

Atualmente, se tratando dos vários processos convencionais de usinagem, para alguns processos é imprescindível a utilização de um fluido na operação. Sabendo dessa importância e atentos ao mercado consumidor e as legislações ambientais, os fabricantes de fluido de corte têm investido em pesquisas e disponibilizado várias composições de fluidos. É a partir destas composições que o fluido de corte desempenha uma dada função na operação, que pode ser classificada como específica e geral (SANTOS e WISLEY, 2007). A específica se baseia na necessidade de refrigeração ou lubrificação na operação. Já a geral se baseia em minimizar impactos ambientais, redução de custos adicionais oriundos do processo e problemas causados a saúde.

Se uma operação de usinagem é caracterizada por velocidades muito alta de rotação da peça ou ferramenta, haverá um acréscimo proporcional da temperatura durante a remoção do volume, portanto, a refrigeração da área exposta deve ser feita. Quando a velocidade de rotação durante o processo é relativamente pequena, o atrito entre ferramenta, volume a retirar da peça e cavaco gerado é bastante significativo. Com isso, uma forma de diminuir a ação do atrito é adicionar um lubrificante no processo (DINIZ *et al.*, 1999).

Além das propriedades específicas do fluido de corte, é desejável durante o processo alcançar melhores resultados operacionais. Uma vazão de fluido localizada, que tenha o objetivo de expelir cavaco gerado durante o processo de usinagem, é uma forma de reduzir custos evitando outras operações para se chegar a tolerâncias ou acabamento de projeto e o desgaste prematuro da ferramenta. Outro custo adicional é o resíduo de usinagem. Toda operação de usinagem gera resíduos, e um dos mais importantes é o resíduo do fluido de corte. A vazão, dependendo da máquina e peça, é grande e gera um grande volume de armazenamento. Na composição do fluido utilizado pode existir inibidores de corrosão, antiespumantes, detergentes, biocidas, etc. (SANTOS e WISLEY, 2007), e isso faz com que o custo para reciclar o fluido seja significativo. O aditivo biocida é um exemplo disso. Apesar de ele evitar ou controlar a ação bactericida, protegendo e prolongando a vida útil dos fluidos, se for utilizado em grandes quantidades se torna tóxico, o que gera um problema ambiental (NAKAGAWA *et al.*, 2017).

### 2.3.1 Classificação dos fluidos

Segundo Diniz *et al.* (1999) os diversos tipos de fluidos são classificados como ar, soluções, emulsões ou fluidos sintéticos.

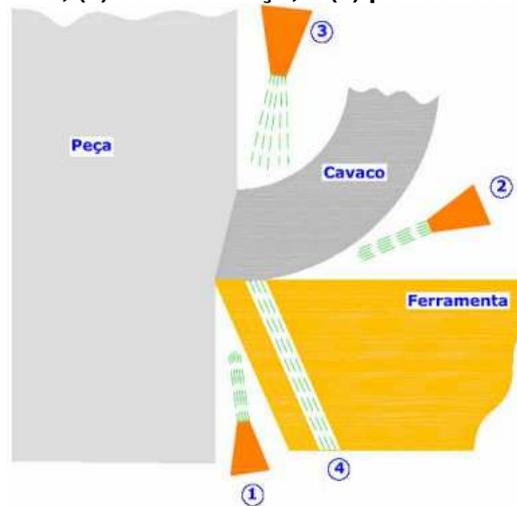
O ar é utilizado para retirar o volume de cavaco gerado durante o corte e com pouca ação refrigerante. As vantagens estão ligadas a fatores ecológicos e o custo reduzido de não precisar manter um sistema lubrificante e/ou refrigerante (GOMES *et al.*, 2007). Entretanto, as desvantagens são em relação ao cavaco em forma de poeira produzido na usinagem do ferro fundido, que é um problema devido à inalação desse pó pelo operador da máquina; a superfície da peça durante o processo e mesmo depois do término fica afetada termicamente, e em alguns casos pode comprometer o acabamento, além do tempo de usinagem ser muitas vezes maior (DINIZ *et al.*, 1999).

As soluções é um tipo de fluido derivado do petróleo, gerado a partir da mistura com aditivos (antioxidantes, anticorrosivos, etc.), resultando em uma solução sintética (SANTOS e WISLEY, 2007). Já a emulsão é o resultado parcial entre o óleo mineral e água, causada pela dispersão de pequenas gotículas de água no óleo. O fenômeno acontece por meio de emulsificadores de óleo, que reduzem a tensão superficial da água e a separação de ambos se torne uma emulsão. Devido ao fato de encontrar em uma emulsão com uma grande quantidade de água, a característica de servir como refrigerante é incomparável. A outra parte dispersa do óleo consegue superar a desvantagem corrosiva que a água oferece, tornando o fluido, uma escolha acessível em condições de refrigeração e ao mesmo tempo lubrificação (DINIZ *et al.*, 1999).

### 2.3.2 Métodos de aplicação

O fluido de corte em usinagem pode ser aplicado de diferentes formas, conforme a **figura 8**. A posição e vazão são parâmetros ajustados conforme necessidade de usinagem, e a direção do fluido posicionada na peça é ajustada de forma a expelir cavaco gerado, ou diretamente na superfície diminuindo a temperatura de operação (SANTOS e WISLEY, 2007).

**Figura 8: Direções da aplicação do fluido de corte: (1) através da superfície de folga; (2) na saída do cavaco; (3) sobre-cabeça; e (4) por dentro da ferramenta.**



**Fonte: ALMEIDA et al., 2006.**

Os métodos mais convencionais de aplicação são: (SANTOS e WISLEY, 2007).

- *Fluido de baixa pressão:* É o sistema mais simples devido à aplicação da porção do líquido sobre a peça acontecer de uma só vez, sem a necessidade de um sistema complexo para isso.
- *Mínima quantidade de fluido (MQF):* Sistema em que o fluido é aplicado a região de corte com o auxílio de ar comprimido previamente parametrizado. O resultado é um sistema que reduz de forma muito significativa, a quantidade de fluido durante a operação.
- *Sistema de alta pressão:* Método que deposita o fluido em conjunto com a alta pressão. É um sistema muitas vezes utilizado para quebrar o cavaco em usinagem.

O que distingue estes três métodos de aplicação são os efeitos no custo final de operação, fatores ecológicos e de saúde. O custo para manter um sistema de alta pressão muitas vezes é alto e devido à característica desse processo, os riscos de acidentes também são fatores que devem ser levados em conta. O sistema de baixa pressão tem a garantia de uma refrigeração localizada, mas é um sistema que deve haver um controle sobre armazenamento do fluido utilizado. Já o método de aplicação de fluido, que tem o objetivo de utilizar a mínima quantidade, é uma tendência estudada pelas indústrias, devido a custos

que incidem sobre o fluido, armazenagem e questões ambientais (RIBEIRO *et al.*, 2017).

### 2.3.3 Sistema MQF

Em um sistema convencional de usinagem, a vazão de fluido de corte durante a operação varia em torno de 5 l/min (SANTOS e WISLEY, 2007). Esta vazão é uma quantidade grande, e que pode, em alguns casos ser até maior, se uma peça de grande porte estiver em usinagem.

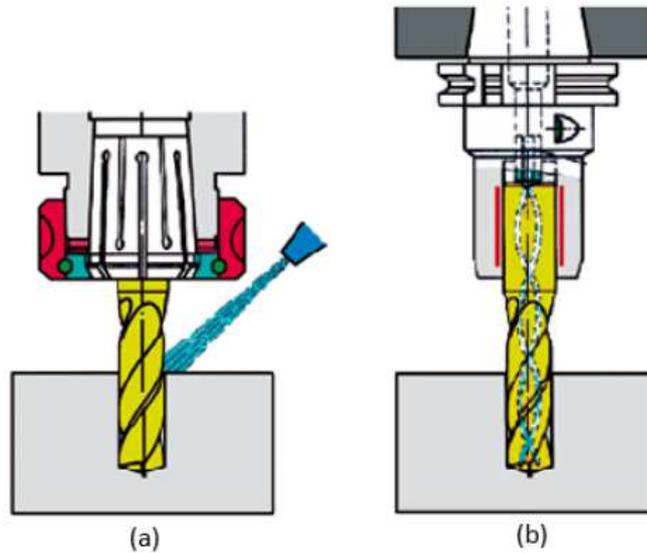
Estudos realizados por Silva e Wallbank (1998), formularam cálculos baseados na necessidade de uma vazão ideal, e chegaram à conclusão que ela pode chegar a ser de 0,1 ml/h. No trabalho de Krolczik *et al.* (2019) cita que a taxa média de fluido no sistema MQL fica em uma faixa entre 10 a 500 ml/h. Dependendo do tipo de material que está sendo usinado, e estudando as influências do decréscimo de lubrificante durante o processo, aquele valor pode variar. Isso se justifica devido ao contato do cavaco e ferramenta ser pequeno, e que conseqüentemente a vazão necessária para refrigerar ou lubrificar seja também pequena (SANTOS e WISLEY, 2007).

Para a aplicação de MQF, um tubo de Venturi normalmente é utilizado para a mistura do fluido e o ar comprimido, que é regulado conforme a vazão desejada na superfície da peça (SANTOS e WISLEY, 2007).

A aplicação pode ser externa ou interna, sendo que a aplicação externa é feita em forma de aerossol (RIBEIRO *et al.*, 2017). O sistema externo, como exemplificado na **figura 9** (a), não necessita de acessórios para a sua implementação, muito menos é um sistema complexo, o que torna a técnica externa de aplicação mais viável em processos convencionais tais como fresamento e torneamento (RIBEIRO *et al.*, 2017).

A aplicação interna **figura 9** (b) é feita por orifícios na própria ferramenta, e o dispositivo utilizado para esta aplicação, muitas vezes, já vem de fábrica com os acessórios para a circulação do fluido dentro da própria máquina.

Figura 9: (a) Canal externo de aplicação de fluido e (b) fresa com as entradas para a aplicação interna.



Fonte: RIBEIRO *et al.*, 2017.

A quantidade transportada de fluido na região da usinagem é determinada pelo reservatório ou dispositivo do sistema. A técnica da lubrificação externa pode ser feita por bombas dosadoras ou tanque de pressão (RIBEIRO *et al.*, 2017). Bombas dosadoras é um sistema em que o fluido é transportado por uma bomba pneumática para um cilindro hidráulico, que age de forma a aplicar sob a superfície de usinagem a quantidade de fluido através de golpes do pistão. Já no tanque de pressão o fluido fica pressurizado no reservatório de forma a ser ejetado para fora pelo controle ajustado da quantidade de fluido por meio de acessórios reguladores de pressão.

#### 2.3.4 Estudos de casos

NAKAGAWA *et al.*, (2017) avaliaram a recontaminação do fluido de corte por meio da quantificação de bactérias presentes após a limpeza do reservatório de fluido que estava na máquina há aproximadamente um ano. Os autores justificaram o estudo, com base no sistema água e óleo que é um ambiente favorável ao surgimento de microrganismos que se desenvolvem causando danos de degradação rápida do fluido e problemas a saúde, como dermatite.

Para o estudo foi feita uma coleta do fluido presente na máquina, limpeza do reservatório, esvaziando completamente e adicionando por 30 minutos o biocida, que age de forma a evitar a contaminação, e por fim, acrescentado um novo fluido de corte. A coleta e análise de amostra dos fluidos foram feitos em períodos pré-definidos: coleta do fluido antigo, após 30 minutos coleta do fluido novo e outra coleta após 16 horas em que o fluido novo estava na máquina.

Os resultados das análises evidenciaram que mesmo realizando a limpeza do reservatório, não foi suficiente para conter o crescimento microbiano. Segundo o estudo, isso aconteceu devido ao tempo que o fluido estava na máquina antes da limpeza, o que favoreceu o desenvolvimento de um biofilme. O biofilme é uma forma de proteger o meio em que as bactérias se desenvolvem, e que não foi completamente eliminado mesmo com a adição de biocida. Os autores ressaltaram que quando o meio bactericida está aderido ao reservatório, o mesmo deve ser descartado, já que a eliminação completa das bactérias somente pode acontecer com concentrações elevadas de biocida, o que, devido às legislações ambientais e de saúde, é proibido devido a problemas tóxicos e de contaminação do lençol freático.

O trabalho de Nakagawa *et al.* (2017) mostrou a importância de controle do fluido de corte, pois a falta de manutenção e a utilização em períodos prolongados pode levar a custos ainda maiores.

SOUZA *et al.*, (2018) estudaram a usinagem do aço ANSI D6 utilizando o sistema MQL e o corte a seco. O motivo do estudo foi fundamentado no material usinado e a sua relação com o desgaste prematuro dos insertos durante o processo, visto que, as características do material como alta dureza, favorecem o desgaste da ferramenta. A alternativa convencional era a utilização de fluido de corte em abundância, porém, o resíduo de usinagem produzido gera custos envolvendo o descarte correto.

Para escolher se a operação de fresamento seria mais viável com ou sem fluido de corte, o estudo se baseou nos resultados de rugosidade superficial da peça e a das análises microscópicas do desgaste da ferramenta. No experimento foram utilizados quatro corpos de prova para cada situação, variando dois parâmetros de corte: profundidade de corte ( $ap$ ) e avanço por dente ( $fz$ ), em dois níveis. A velocidade de corte ( $vc$ ) manteve-se constante.

Os valores comparados da rugosidade superficial após a usinagem mostraram que houve diferenças nos resultados dos parâmetros e condição de corte. Parte das alterações de valores médios de rugosidade ( $R_a$ ) ocorreu com os valores expressivos de desgaste da ferramenta, além disso, a combinação dos parâmetros de usinagem com valores maiores também contribuiu na formação de rebarba e que conseqüentemente alterou os valores de pico e vale do comprimento de amostragem. Porém, os resultados avaliados do sistema MQL, com valores menores de profundidade de corte e avanço por dente com os estados inicial e intermediário da ferramenta de corte, foram de redução percentual da rugosidade. Segundo o estudo, isso se justifica devido à precisão de aplicação de fluido na área a ser usinada, que diminui o atrito entre ferramenta-peça.

O desgaste da ferramenta no sistema MQL e sem fluido de corte também foi acelerado com valores maiores de profundidade de corte e avanço por dente, principalmente nos últimos passes. A análise microscópica mostrou trincas de origem térmica e lascamento no sistema MQL devido à ação refrigerante do sistema que interage com a temperatura no processo de usinagem e trincas significativas na usinagem a seco.

Os resultados comprovaram que o acréscimo nos parâmetros de usinagem tem influência no aumento da rugosidade média ( $R_a$ ), porém, não é o único fator que interage nas características superficiais da peça e que pode ser contrabalanceada se estudado o sistema MQL e as suas influências do decréscimo de lubrificação nas características superficiais da peça com novos ajustes dos parâmetros da ferramenta de corte.

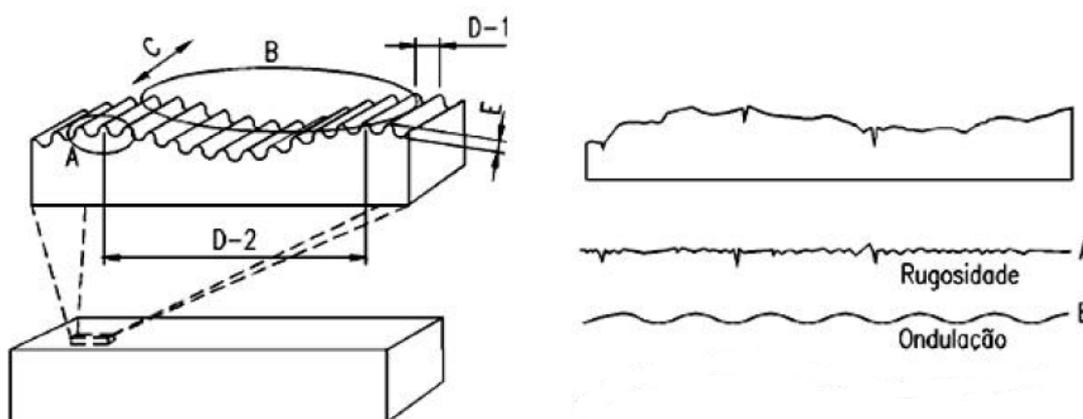
## 2.4 RUGOSIDADE

A qualidade da peça ou material produzido por um processo convencional de usinagem depende em geral do tipo de material que está sendo usinado, da ferramenta de corte, do tipo de máquina e da operação. Em específico, ela depende da superfície gerada pelo processo, que está submetida a erros e irregularidades que podem comprometer o funcionamento de um elemento de transmissão, ou componente mecânico de fixação (DINIZ *et al.*, 1999).

Numa operação de fresamento, a fixação da peça na morsa sem um alinhamento correto, bem como o desvio durante o processo de usinagem gera irregularidades evidentes que, com o auxílio de instrumentos convencionais de medição é logo constatada. Esse tipo de irregularidade é definido como erro macro geométrico (ALVES, 2011).

Uma forma precisa de avaliar o erro ou irregularidade é analisar a micro geometria formada. O erro micro geométrico é chamado de rugosidade. A rugosidade é um conjunto de irregularidades, ou seja, reentrâncias ou saliências que caracterizam uma superfície (DIN 4762, 1989). Esse tipo de irregularidade é medido por instrumentos eletrônicos, e através de métodos estatísticos e parâmetros normalizados são realizadas as quantificações dos dados para caracterizar a superfície (MACHADO *et al.*, 2009). A forma de analisar é feita tomando como base uma pequena parcela da superfície e observando-a conforme mostra a **figura 10**.

**Figura 10: Amostra da superfície analisada e elementos que compõem a irregularidade.**



Fonte: FERREIRA, S.d.

Cada elemento que compõe a irregularidade, representado na figura pelas letras de A à D, são respectivamente:

- (A) *Rugosidade primária*: Conjunto de irregularidades causadas pelo processo de produção, e as impressões deixadas pelo processo caracterizam a superfície.
- (B) *Ondulação*: Irregularidade causada pela vibração da máquina durante o processo, ou o desvio da posição inicial da peça durante o corte.

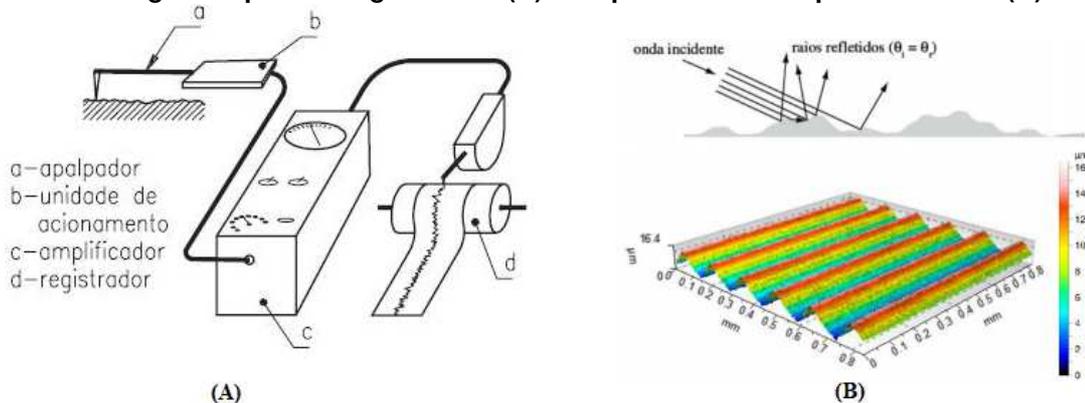
(C) *Orientação das irregularidades*: Direção da irregularidade e se classifica em orientação periódica (quando a direção da falha é definida) e orientação aperiódico (ocorre quando a falha não tem direção definida).

(D) *Passo das irregularidades*: Média das distâncias entre falhas.

(E) *Altura da irregularidade ou profundidade da falha*.

Portanto, a rugosidade de uma superfície é avaliada por parâmetros que permitem afirmar as influências que o material estava sujeito sob a ação da condição de corte ou máquina. Estes parâmetros são obtidos por um rugosímetro digital ou um rugosímetro 3D de interferometria, também chamado perfilômetro óptico. O primeiro sistema de medição se baseia no princípio de uma agulha extremamente sensível que percorre a superfície da peça medida, e o segundo sistema se baseia em princípios físicos relacionados à luz (DOMINGOS *et al.*, 2014). A **Figura 11** mostra um exemplo de medição para ambas as técnicas.

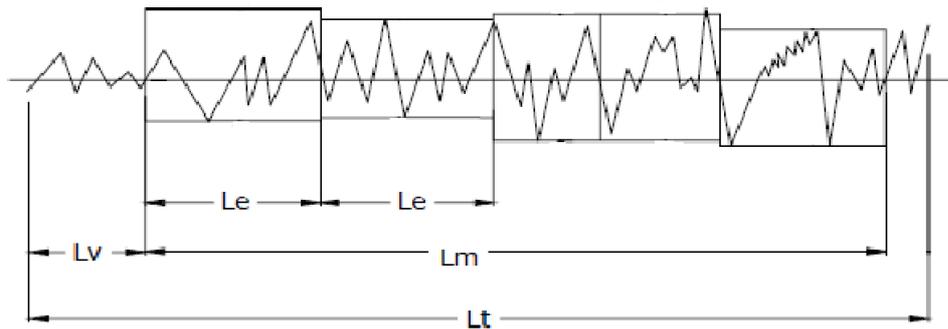
**Figura 11: Perfil gerado por um rugosímetro (A) e Mapeamento da superfície em 3D (B).**



**FONTE: DUMOND TREINAMENTOS, (2019); PARRA *et al.*, (2006); DOMINGOS *et al.*, (2014).**

Para a obtenção dos parâmetros de rugosidade, o perfil obtido pelo deslocamento da agulha na superfície é tratado e um perfil de rugosidade é gerado, como indicado na **Figura 12**. Para este perfil o software calcula uma linha média (em que a soma das áreas acima e abaixo é a mesma) e analisa o perfil contido no comprimento de medição ( $L_m$ ). Conforme norma, o perfil pode ser dividido em três ou cinco comprimentos e estes são chamados de comprimentos de amostragem ( $L_e$ ).

**Figura 12: Comprimentos do perfil de rugosidade.**



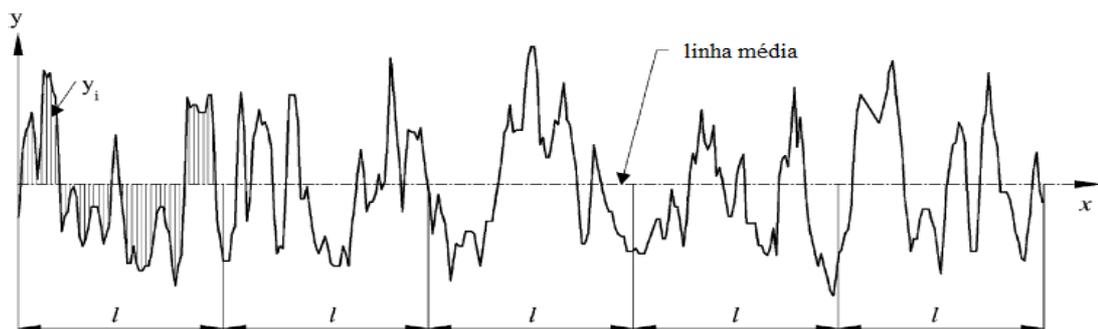
**FONTE: NOVASKI, (1994).**

Finalizado estas etapas o perfil está pronto para que os parâmetros de rugosidade pretendidos possam ser calculados.

#### 2.4.1 Rugosidade média (Ra)

Tendo como base a **figura 13**, a rugosidade média é a média aritmética das alturas de pico e profundidade de vale em relação à linha média dentro de um percurso de medição ( $L_m$ ).

**Figura 13: Definição de rugosidade Ra.**



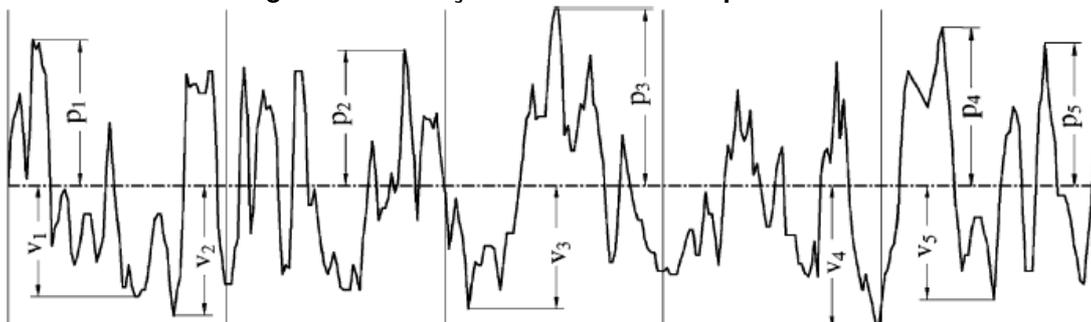
**Fonte: Gadelmawla et al., 2002.**

#### 2.4.2 Altura em dez pontos (Rz)

O parâmetro  $R_z$  é mais sensível do que  $R_a$  para vales e picos ocasionais. A norma ISO define este parâmetro como a diferença em alturas entre a média dos

cinco maiores picos e dos cinco mais baixos vales no comprimento de medição, como ilustrado na **Figura 14**.

**Figura 14: Definição dos dez maiores parâmetros de altura**

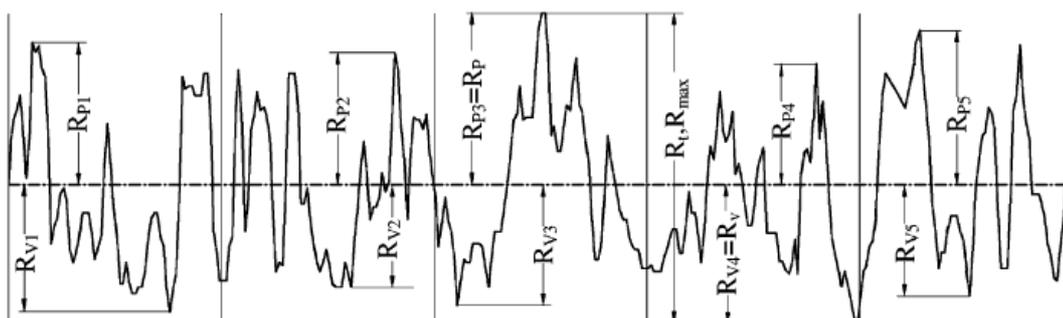


Fonte: Gadelmawla *et al.*, 2002.

#### 2.4.3 Altura máxima do perfil ( $R_{m\acute{a}x}$ )

A verificação de uma superfície pode conter irregularidades que se sobressaem no intervalo de medição feita pelo percurso do apalpador. A rugosidade total é a distância entre essas irregularidades que são chamadas de pico máximo e vale máximo em um comprimento de medição, conforme mostra a **figura 15**.

**Figura 15: Definição dos parâmetros  $R_p$ ,  $R_v$  e  $R_{m\acute{a}x}$ .**



Fonte: Gadelmawla *et al.*, 2002.

#### 2.4.4 Altura máxima de pico do perfil ( $R_p$ )

Tendo a linha média como referência, o pico máximo é a maior altura em relação à linha média de um comprimento de amostragem, e esta altura é denominada  $R_p$ , conforme mostrado na **figura 15**.

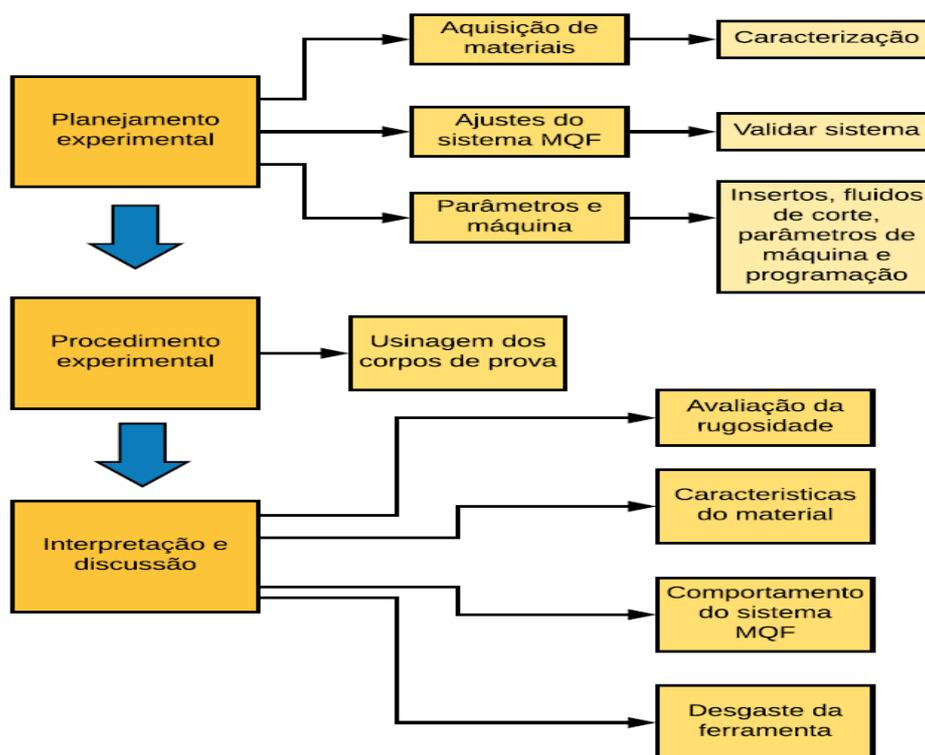
#### 2.4.5 Profundidade máxima de vale do perfil (Rv)

O vale máximo é a profundidade máxima de um perfil analisado em relação à linha média de um comprimento de amostragem, como pode ser visto na **figura 15**.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para alcançar os objetivos específicos do trabalho é necessário um planejamento quantitativo dos meios utilizados nos procedimentos experimentais. Este planejamento incluiu estudo do equipamento utilizado para caracterização do aço usinado, técnica MQF, preparação e análises do processo de usinagem conforme **figura 16**.

**Figura 16: Fluxograma das atividades realizadas no trabalho.**

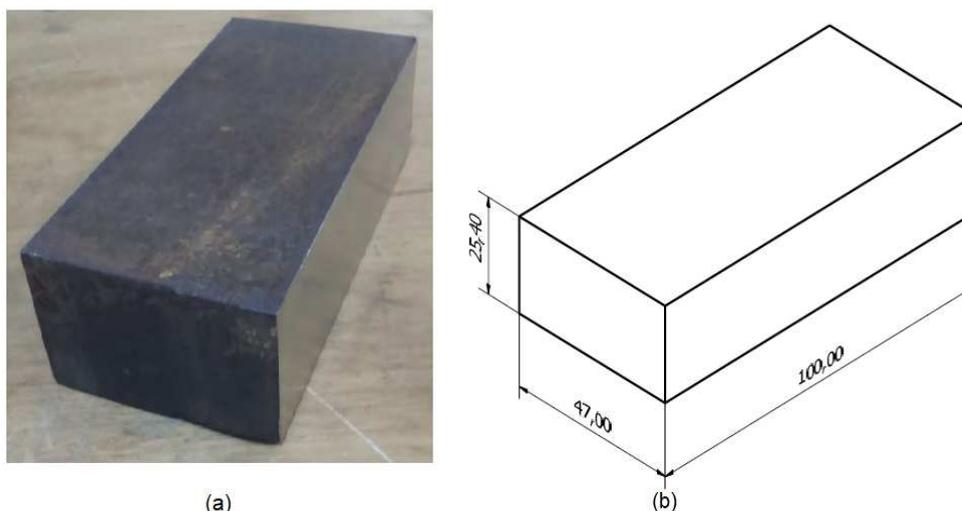


Fonte: Autoria própria.

#### 3.1 PREPARAÇÃO DO CORPO DE PROVA

O material foi adquirido nas dimensões de 50 x 25,4 x 1500 mm e cortado com o auxílio de uma serra fita do Laboratório de Usinagem da UTFPR-GP. A rotação utilizada durante o corte foi obtida na própria máquina, que especifica a rotação conforme a liga do material. Após o corte, o comprimento e a largura dos corpos de prova foram usinados em uma fresadora universal marca DIPLOMAT modelo FVF 2500, para garantir dimensões finais de 47 x 25,4 x 100 mm, conforme a **figura 17**.

**Figura 17: Corpo de prova usinado (a) e dimensões finais (b).**



**Fonte: Autoria própria.**

Com esse procedimento conseguiu-se doze peças e parte do refugo foi utilizado para a caracterização do material.

### 3.2 CARACTERIZAÇÃO DO AÇO

Para a caracterização do material foi utilizado um microscópio Olympus e Durômetro Digimess do Laboratório de Materiais da UTFPR-GP. O aço utilizado no experimento foi o ABNT 1020 e a composição segundo o fabricante está na **Tabela 1**.

**Tabela 1: Composição química do material em porcentagem.**

<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Al</b>	<b>Nb</b>	<b>V</b>	<b>Cu</b>
0,16	0,280	1,490	0,017	0,004	0,042	0,030	0,068	0,00
<b>Ti</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Sn</b>	<b>N</b>	<b>B</b>	<b>Ca</b>	<b>Sb</b>	<b>Pb</b>
0,018	0,19	0,01	0,001	0,0041	0,0001	0,0022	0,0030	0,0060

**Fonte: Certificado de Inspeção Usiminas.**

Para confirmação da composição da liga foi enviada ao Laboratório de Química da Unicentro Câmpus CEDETEG uma amostra com as dimensões de 10x30 mm e avaliada em um espectrômetro de fluorescência de raio-X Oxford Instruments, modelo X-MET XMDS 2726.

Para a análise microestrutural, as amostras foram cortadas no tamanho de aproximadamente 5 mm em uma cortadora metalográfica e embutidas utilizando uma embutidora metalográfica marca Teclago, modelo EM30D. Depois de embutidas, as amostras foram lixadas com lixas de granulometria 300, 600 e 1200 mesh, respectivamente e polidas com a alumina em suspensão com granulometria média de 1µm. O ataque químico foi realizado com Nital 3% e o tempo de ataque foi de 7 segundos.

O ensaio de dureza foi realizado em 10 pontos da superfície da peça, utilizando a escala Rockwell B, com o penetrador esférico de 1,58 mm de diâmetro e uma carga de 100 kgf. A limpeza superficial da peça e a aplicação de pré-carga foram as etapas básicas feitas antes da aplicação da carga nos pontos distintos da área de medição.

O resultado de medição da dureza do material foi composto pela média das indicações e a incerteza de medição, sendo esta a parcela de dúvida sobre o resultado de medição (ALBERTAZZI *et al.*, 2008). Portanto, para estimar corretamente os valores próximos do verdadeiro é necessário aplicar meios quantitativos que permita conhecer as fontes da incerteza. Assim, o resultado de medição da dureza do material pode ser escrito como indicado na equação 1:

$$R.M = I + C \pm IM \qquad \text{Eq.1}$$

I = Média das dez medições;

C = Correção (obtida no relatório de calibração);

IM = Incerteza de medição (produto do desvio padrão e do coeficiente de Student, para 95% de probabilidade).

### 3.3 TÉCNICA DE MINIMA QUANTIDADE DE FLUIDO

O dispositivo de aplicação de mínima quantidade de fluido foi desenvolvido pelo técnico de laboratório Lucas Franco Wrege da UTFPR-GP. O dispositivo trabalha com pressão de ar comprimido de 0,3 a 4 bar, em que o ajuste é feito com um filtro regulador de ar em conjunto com o manômetro, e o nebulizador é composto por um bocal para alimentação de fluido sobre a peça.

A alimentação primária do sistema é fornecida diretamente do compressor com pressão de 6 bar, e a alimentação secundária que recebe esta pressão é ajustada para ser utilizada diretamente no dispositivo, sendo de 2 bar o ajuste feito para validação do sistema. Uma válvula de esfera tipo borboleta foi conectada à alimentação primária por meio de um niple duplo, para o fechamento e abertura durante o processo de usinagem com o sistema MQF.

Regulado a pressão, o ar se distribui através de uma conexão em T galvanizada, ou seja, 2 bar é transferido para o regulador de pressão diretamente no nebulizador e ao mesmo tempo, a mesma pressão é transferida ao reservatório de fluido, de forma que o mesmo seja ejetado para a conexão da válvula de regulagem de fluido do sistema.

O nebulizador é o dispositivo que faz o ajuste da proporção conforme o tipo de aplicação e a distribuição de fluido na superfície da peça no processo de usinagem. O fluxo de ar e do fluido é feito através de reguladores pneumáticos de fluxo. A mistura ar e fluido após regulagem fluem através de um tubo colocado sob os elos flexíveis ajustáveis.

Para encontrar o valor ideal de vazão do sistema foi utilizado o Laboratório de Pneumática e Hidráulica da UTFPR-GP. A validação do sistema consistiu em fazer pré-marcações utilizando água no reservatório. As marcações foram feitas somente no regulador de saída de fluido do sistema, sendo a regulagem de ar constante, ou seja, totalmente aberta.

A primeira marcação do regulador foi feita com a válvula totalmente fechada, e este ponto serviu como referência zero do controle de fluido utilizado. A segunda marcação foi feita com o objetivo de atingir um valor próximo do ideal de utilização de mínima quantidade de fluido de corte conforme a literatura descreve. Os primeiros resultados encontrados foram referentes à utilização de água, e após fixado o valor ideal, foi feito o experimento com adição do fluido de corte.

A duração de cada ensaio foi de 5 minutos com a regulagem de ar totalmente aberta e parcialmente a de fluido. O fluido foi armazenado em um béquer de 1000 ml e medido com o auxílio de uma proveta de 25 ml. Catorze ensaios preliminares com água foram realizados e desses ensaios encontrou-se um valor mais próximo do ideal e para certifi-cá-lo, foram realizados mais cinco ensaios. Esses ensaios foram novamente feitos com água e após a validação dos resultados, foram

repetidos com os fluidos de corte. A **tabela 2** mostra os resultados da prática bem como os fluidos comerciais utilizados.

**Tabela 2: Dados coletados da vazão da água e fluidos utilizados.**

Fluido	Pressão (psi)	Tempo (min)	Volume médio (ml)	Vazão média (ml/h)	Desvio padrão da vazão
Água	20	5	8,04	96,48	2,18
Sintético I (Raisol bio N)			6,02	72,24	1,00
Sintético II (Cort sol)			9,98	119,76	1,78
Semissintético (Sigma 20/78)			9,15	109,8	0,13

Fonte: A autoria própria.

Os fluidos de corte RAISOL BIO N e SIGMA 20/78, ambos fabricados pela empresa Katio Raiden Lubrificantes Industriais possuem proporções que variam conforme a aplicação e máquina. Para a proporção de fluido foi utilizado o catálogo com as informações que o fabricante determina. Pelas informações encontradas no site da empresa a proporção ideal para trabalhos de usinagem em geral é de 1:20 para ambos os fluidos de corte. Em contato com a empresa Brasminer Produtos Lubrificantes e Químicos, fabricante do fluido CORT SOL, a mesma informou para aplicações de usinagem a proporção ideal é de 1:20.

Portanto, no trabalho foi utilizado 1425 ml de água e 75 ml de fluido de corte, e a medição da vazão foi medida após a usinagem para determinar o valor mais próximo do real utilizado durante o processo.

### 3.4 PREPARAÇÃO E ANÁLISES DO PROCESSO DE USINAGEM.

A usinagem do material foi realizada no Laboratório de Usinagem da UTFPR câmpus Guarapuava, utilizando o centro de usinagem ROMI D600 e a programação das operações foi feita com o *software Fusion 360* da *Autodesk*. O centro de usinagem **Figura 18** (A) possui rotação máxima de 8000 rpm e capacidade de 20 ferramentas no magazine. A **Figura 18** (A e B) mostra o sistema MQF montado na máquina.

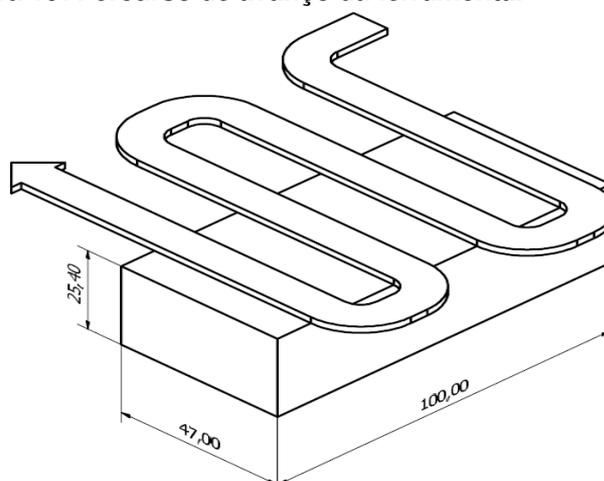
**Figura 18: Máquina utilizada para o ensaio e o sistema MQF.**



**Fonte: Autoria própria.**

Para o experimento foi realizada operação de faceamento e o percurso de avanço da ferramenta está indicado na **figura 19**.

**Figura 19: Percurso de avanço da ferramenta.**



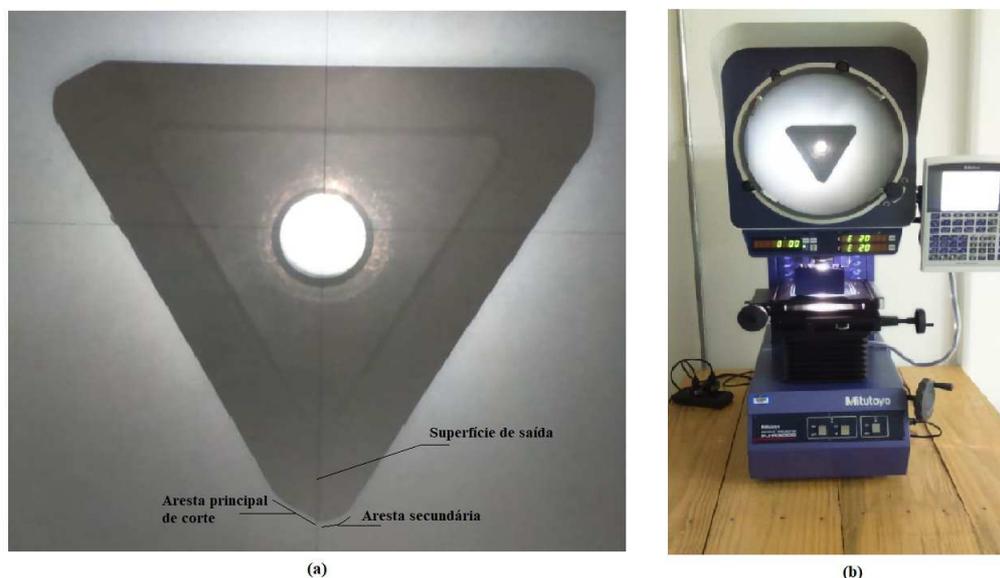
**Fonte: Autoria própria.**

O inserto utilizado foi o modelo TPKN1603 PDTR LT30 do fabricante Lamina, revestida pelo processo PVC e com grãos de WC submicrometro. O cabeçote utilizado para alojar os insertos contém as informações de 50 mm de diâmetro com três canais para fixação dos insertos, da marca Black Tools.

A Figura 20 (a) mostra a imagem ampliada do inserto e os pontos onde foram feitas as análises do desgaste. A figura 20 (b) mostra o projetor de perfil da

Mitutoyo, modelo PJ-A3000 do Laboratório de Metrologia da UTFPR-GP utilizado para projeção do inserto.

**Figura 20: (a) Vista superior da pastilha, (b) Equipamento utilizado para projeção.**



**Fonte: Autoria própria.**

Os parâmetros de corte utilizados para o experimento estão na **tabela 3** e são valores especificados no catálogo do fabricante da pastilha. Para cada condição de ensaio foi realizada tréplica, totalizando 12 ensaios e o tempo de operação em cada corpo de prova foi de 12 minutos. Ao total foram 12 passadas.

**Tabela 3: Parâmetros de usinagem.**

Parâmetros de corte	Operação	
	Utilizado	Recomendado
Velocidade de corte ( $vc$ )	230 m/min	90 – 230 m/min
Profundidade de corte ( $ap$ )	1 mm	0,5 – 11,4 mm
Avanço por dente ( $fz$ )	0,19 mm	0,13 – 0,21 mm
Largura de usinagem ( $ae$ )	26 mm	-

**Fonte: Autoria própria.**

O desgaste da ferramenta foi medido em todos os insertos, nas duas arestas de corte e na superfície de saída, para cada corpo de prova usinado, conforme mostrado na Figura 23(a). Para a análise os insertos, estes foram lavados em uma lavadora ultrassônica da marca SANDERS MEDICAL, modelo SoniClean 2 com a programação do aparelho feita em 15 minutos de lavagem. Após a limpeza os insertos foram enxaguados em água corrente e secados. Para que as três

superfícies fossem analisadas o aluno Adriel Maier Farias, do projeto de extensão 4print, fabricou um suporte para alojar os insertos durante a medição dos desgastes, pelo processo de manufatura aditiva. Assim, os insertos foram analisados em um microscópio Olympus, do Laboratório de Materiais da UTFPR-GP.

A medição da influência das operações aliada ao tipo de fluido foi realizada por um rugosímetro, da marca Mitutoyo e modelo SJ-410, do Laboratório de Metrologia da UTFPR do câmpus Guarapuava. Devido ao valor da largura de usinagem utilizada, a ferramenta passou quatro vezes pela superfície para atingir os 100 mm de usinagem e foi possível distinguir quatro regiões na superfície. Assim, a medição da rugosidade foi realizada na posição central destas quatro regiões, com uma única medição em cada região, ao final da usinagem de cada corpo de prova. Em seguida, foi calculada a média e desvio dos quatro resultados de forma a garantir a confiabilidade do resultado.

## 4 RESULTADOS DE DISCUSSÕES

Os resultados apresentados foram obtidos a partir da coleta e análise da caracterização do material usinado, experimento de usinagem e o desgaste da ferramenta.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL.

O resultado da dureza corrigido do aço utilizado para o experimento foi de  $(79,00 \pm 6,12)$  HRB.

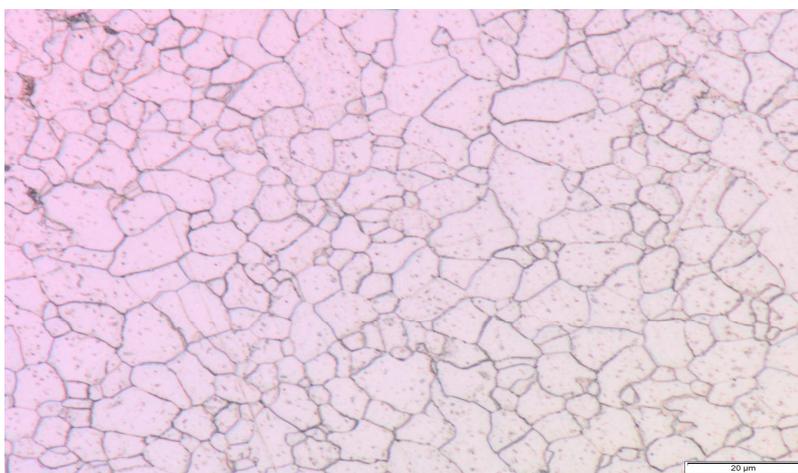
A análise química realizada na Unicentro identificou o aço 1020 e o resultado se encontra na **Tabela 4**. Comparando os valores da tabela 4 com aqueles do certificado da **tabela 1**, verifica-se que a variação percentual do certificado de inspeção da Unicentro é 97,8% maior para o teor de Alumínio em relação ao valor especificado no certificado de compra e também houve o decréscimo de 27%; 17,32% e 50% dos valores de Silício, Manganês e Nióbio, respectivamente.

**Tabela 4: Características químicas do material em porcentagem.**

Al	Si	Mn	Fe	Cu	Nb
1,900	0,010	1,270	98,050	0,000	0,020

**Fonte: Relatório de inspeção Unicentro.**

A análise microestrutural do material usinado é mostrada na **Figura 21**, e mostra a forma com que os grãos estão distribuídos.

**Figura 21: Micrografia do aço.**

**Fonte: Autoria própria.**

Na figura é possível observar a corrosão da solução química de modo que em contraste com o filtro do microscópio os grãos se revelaram predominantemente brancos com finos contornos escuros. O grão claro representa a ferrita (ferro  $\alpha$ ) e o contorno escuro é a propagação da perlita.

#### 4.2 EXPERIMENTO DE USINAGEM.

A vazão medida com a montagem do sistema na máquina encontra-se na **tabela 5** e mostra a faixa dos valores com os diferentes fluidos que foram obtidos depois de cada experimento. Os valores são as faixas encontradas entre o primeiro e segundo ensaio de cada corpo de prova para os três diferentes fluidos utilizados.

**Tabela 5: Faixa de medição dos valores de vazão.**

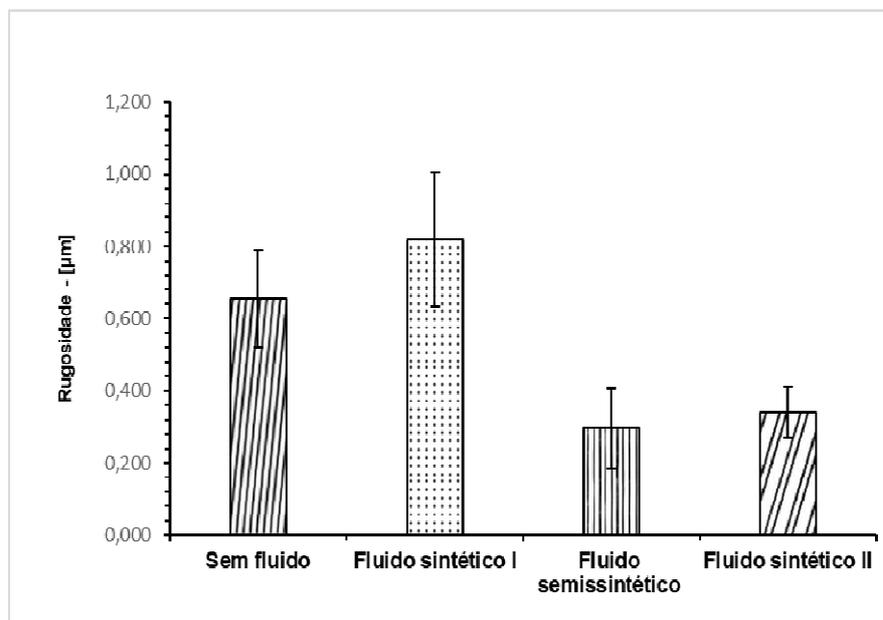
Sintético I (ml/h)	Sintético II (ml/h)	Semissintético (ml/h)
62,4 - 90	69,6 - 127	57,6 - 100,8

**Fonte: Autoria própria.**

Pela tabela 5 percebe-se que os resultados das vazões com os diferentes fluidos se comportaram com certa variação que ocorreram devido ao tipo de ajuste do sistema, mas que pode ser classificado como mínima quantidade de fluido conforme alguns autores chegaram à conclusão em seus trabalhos- (SANTOS e WISLEY, 2007; KROLCZIK *et al.*, 2019).

A **Figura 22** mostra os resultados obtidos da rugosidade média na condição sem fluido de corte e com os três tipos de fluidos de corte utilizados.

**Figura 22: Rugosidade média (Ra).**

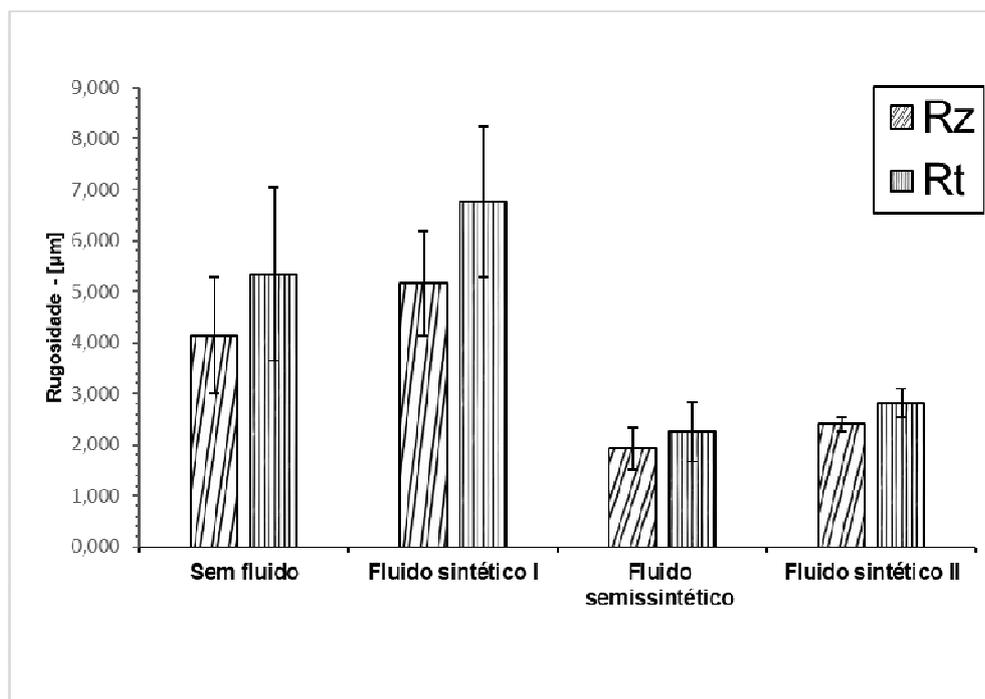


Fonte: Autoria própria.

Pela **Figura 22**, percebe-se que com a utilização do fluido semissintético e do sintético II o corpo de prova obteve a menor rugosidade média e para os dois fluidos essa rugosidade foi praticamente a mesma. Já a usinagem com fluido sintético I apresentou rugosidade média maior que a condição sem fluido de corte.

As **Figuras 23 e 24** mostram os resultados da média das medições do comprimento entre pico máximo e vale mais profundo (Rz), rugosidade total (Rt), pico máximo (Rp) e vale máximo (Rv). Pelas figuras, percebe-se que a mesma tendência dos resultados dos fluidos na usinagem se repete, ou seja, o fluido semissintético e o sintético II apresentam os menores valores de rugosidade. Nos cinco parâmetros de rugosidade analisados, a média da rugosidade é menor para o semissintético, mas a dispersão dos resultados deste fluido se assemelha com o resultado do fluido sintético II.

**Figura 23: Alturas médias e máximas entre pico e vales.**

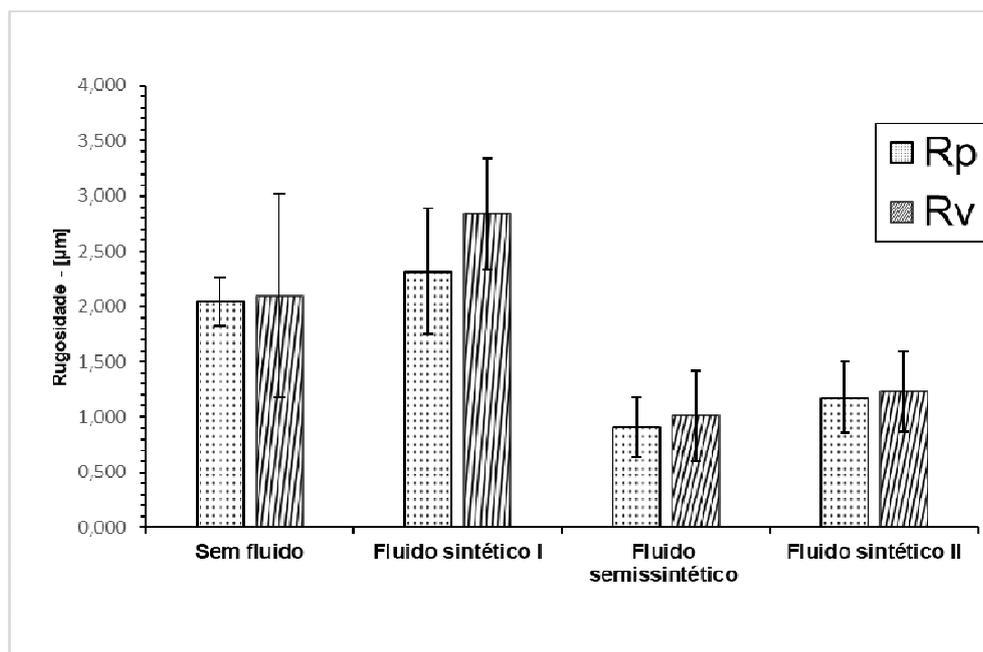


**Fonte: Autoria própria.**

Os valores da rugosidade (Rz) sem fluido e com a utilização de fluido sintético I foram similares. Os menores valores de Rz foram na utilização do fluido sintético II e semissintético, sendo que para este último fluido o valor de RZ foi menor. Para o parâmetro da rugosidade total (Rt), que leva em conta parte do comprimento total avaliado, a condição com o fluido sintético I foi maior em relação ao mesmo parâmetro avaliado sem fluido. O resultado da dispersão desse parâmetro na condição do fluido sintético II foi menor tanto na avaliação (Rz) quanto (Rt), em contra partida, novamente o fluido semissintético obteve os melhores valores para as duas condições.

A **figura 24** mostra os resultados de pico mais alto (Rp) e vale mais profundo (Rv). A avaliação do pico mais alto foi similar para a condição sem fluido e sintético I e obtiveram maiores valores. Na comparação do fluido semissintético com sintético II pouca foi a variação do resultado e os valores foram inferiores a aproximadamente metade daqueles encontrados sem fluido e sintético I. A profundidade de vale (Rv) com o fluido sintético I foi maior com ênfase para a dispersão alta sem fluido. Com o fluido sintético II e semissintético o valor foi próximo e melhor.

**Figura 24: Alturas máximas de pico e vales.**



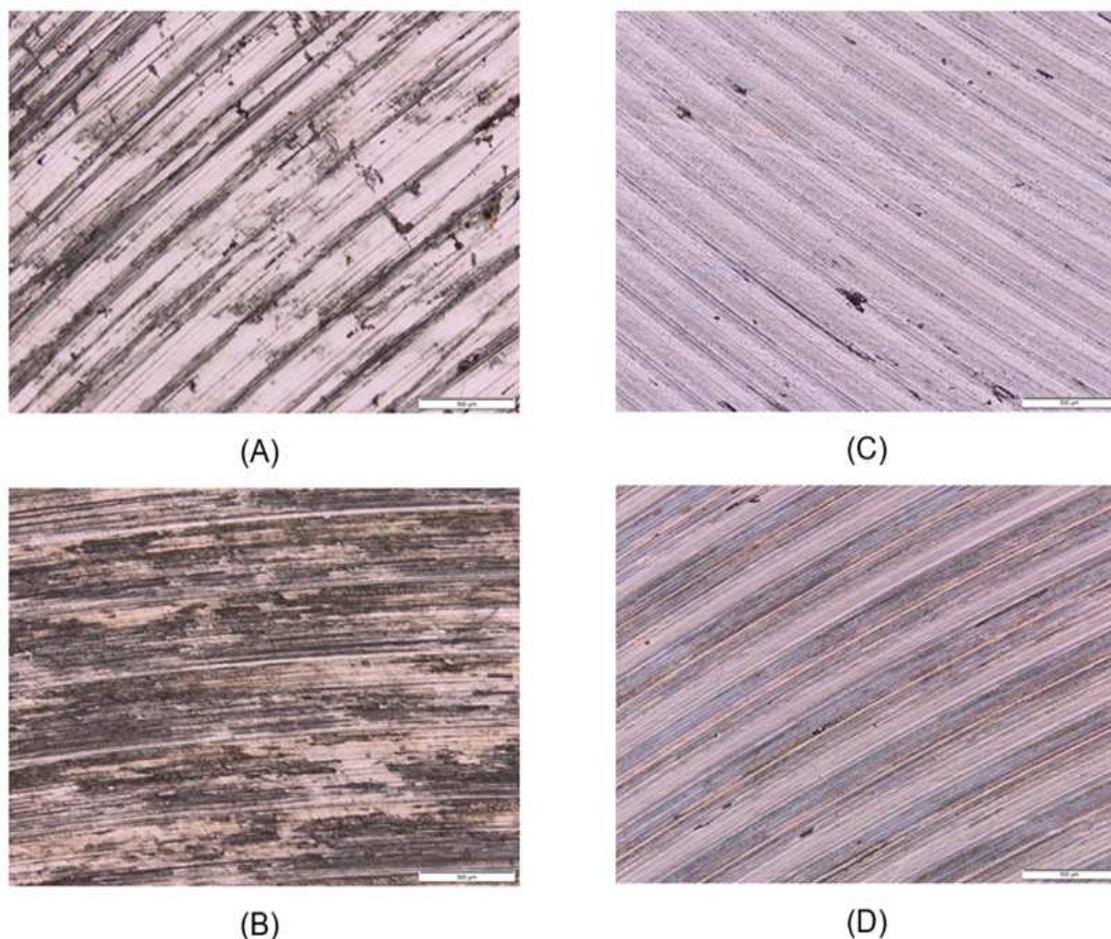
**Fonte: Autoria própria.**

De forma geral, os valores conseguidos em função dos quatro parâmetros avaliados estão dentro da faixa esperada do parâmetro de rugosidade ( $R_a$ ) conforme a literatura descreve (GROOVER, 2014, p. 91). O que diferencia é o tipo de acabamento conseguido para cada uma das condições citadas, uma vez que as características do meio lubri refrigerante pode proporcionar um decréscimo significativo nos valores de rugosidade.

Para conseguir uma melhor compreensão dos valores de rugosidade, a superfície dos corpos de prova foi analisada no microscópio óptico. A **figura 25** mostra o resultado das superfícies para o último passe de usinagem para as quatro condições estudadas.

Na superfície usinada sem fluido de corte, como pode ser visto na **figura 25** (A), foi observado riscos em todos os passes de máquina (lembrado que devido ao valor de  $a_e$  utilizado a ferramenta percorre quatro vezes a superfície em um mesmo valor em  $z$ ). A causa desses riscos pode ter relação devido à saída do cavaco ser deficiente, diferente das outras três condições com fluido de corte que promoveu um passe mais homogêneo em todos os corpos de prova.

**Figura 25: Avaliação superficial do material sem fluido (A), com fluido sintético I (B), semissintético (C) e sintético II (D).**



**Fonte: Autoria própria.**

Com a utilização do fluido sintético I, como mostrado na **figura 25 (B)**, a superfície ficou com um aspecto mais homogêneo devido à função do sistema MQF que provavelmente ajudou a expelir o cavaco da região de usinagem, porém sem um espelhamento, conseguido pelos outros dois tipos de fluido utilizados. Possivelmente, a não utilização de óleo mineral na composição do fluido, que torna o mesmo menos eficiente em ação lubrificante, não ofereceu à superfície esse espelhamento.

A alteração significativa dos parâmetros da rugosidade ocorreu com a aplicação dos fluidos semissintético e sintético II, conforme a **figura 25 (C) e (D)**. As propriedades intrínsecas de cada um contribuíram para que os valores medidos da rugosidade  $R_a$ , vales mais profundos e picos mais altos tivessem valores abaixo daqueles medidos com a usinagem sem fluido e com o fluido sintético. O resultado

foi uma superfície totalmente acabada e com pontos de espelhamento. Uma provável diferença, devido o fluido sintético I não apresentar esse espelhamento e o sintético II apresentar espelhamento, pode estar ligado à composição diferentes desses fluidos. Em contato com a empresa, esta não passou informações suficientes para o autor.

Vale ressaltar que, o fluido de corte semissintético possui 20 a 40% de óleo mineral na sua composição, que faz com que a característica do fluido seja leitosa e com grande capacidade de lavabilidade, impedindo que o cavaco gerado fique em contato com a superfície da peça e na ferramenta de corte.

No resultado total das análises percebe-se que ao utilizar fluido não teve presença de riscos em nenhum corpo de prova, ou seja, o sistema conseguiu expelir o cavaco gerado durante o processo. Apenas na usinagem sem fluido ocorreu riscos aparentes e profundos nos passes.

Os resultados desse trabalho também são confirmados por outros trabalhos realizados com MQF, como o trabalho de Ribeiro (2017) e Ozbek e Saruhan (2020). Ribeiro (2017) estudou a aplicação de fluido de corte (a quatro níveis: sem fluido, MQL naftênico, MQL parafínico e jorro), velocidade de corte, profundidade de corte e avanço por dente (a dois níveis) no processo de fresamento no aço SAE 8640, em resposta com a força e rugosidade. Os resultados desse estudo mostraram que a substituição do jorro pelo MQL é possível, pois são estatisticamente semelhantes para o acabamento superficial e com o MQL indicou menor valor de força de usinagem.

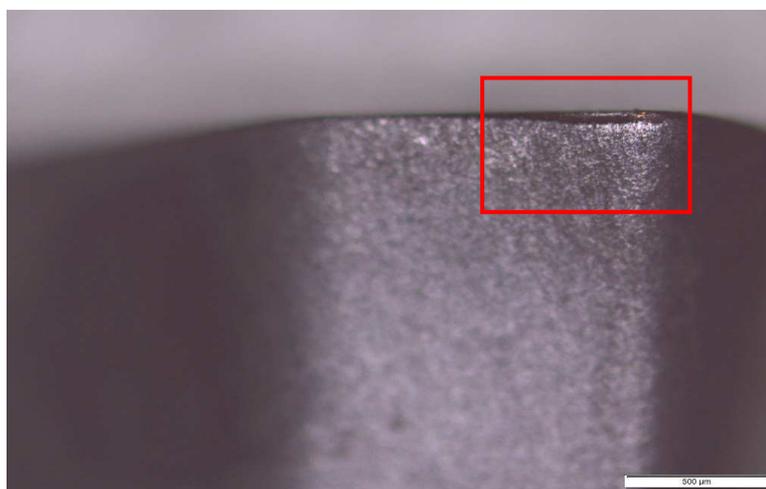
Ozbek e Saruhan (2020) estudaram a influência de aplicação de fluido com MQL e sem fluido do torneamento do aço AISI D2 na temperatura, amplitude da vibração da ferramenta de corte, desgaste da ferramenta, rugosidade e vida da ferramenta. Os autores utilizaram dois tipos ferramentas de corte (metal duro revestidas com PVD e CVD), três valores de velocidade de corte diferentes, avanço e profundidade de corte constantes. Os resultados do estudo revelaram que o desgaste da ferramenta, temperatura de corte, amplitude de vibração da ferramenta diminuíram em 23, 25 e 45% em comparação do corte sem fluido. Com esse resultado a rugosidade foi melhorada em 89% e a vida da ferramenta aumentou em 267%.

### 4.3 AVALIAÇÃO DO DESGASTE DA FERRAMENTA.

O desgaste nas ferramentas foi analisado nas superfícies de saída, superfície de corte principal e secundária. Porém, somente nas superfícies principal de corte houve desgaste que fosse possível medir. Isso porque, na análise superficial do inserto, houve a propagação de uma mancha característica, mas que pelo microscópio ótico não era possível afirmar com certeza se era desgaste. Essa análise seria confirmada, se fosse utilizado um microscópio de varredura eletrônica.

Como já comentado, o cabeçote contém três pastilhas e no desgaste avaliado da ferramenta na região principal de corte, houve o mesmo tipo específico de desgaste tanto na usinagem sem fluido quanto para os outros três tipos de fluido. Essa característica formada na aresta principal foi identificada apenas em uma das três arestas utilizada em cada condição de corte dos três insertos utilizados no conjunto. A **figura 26** mostra a característica do desgaste encontrado para as quatro condições.

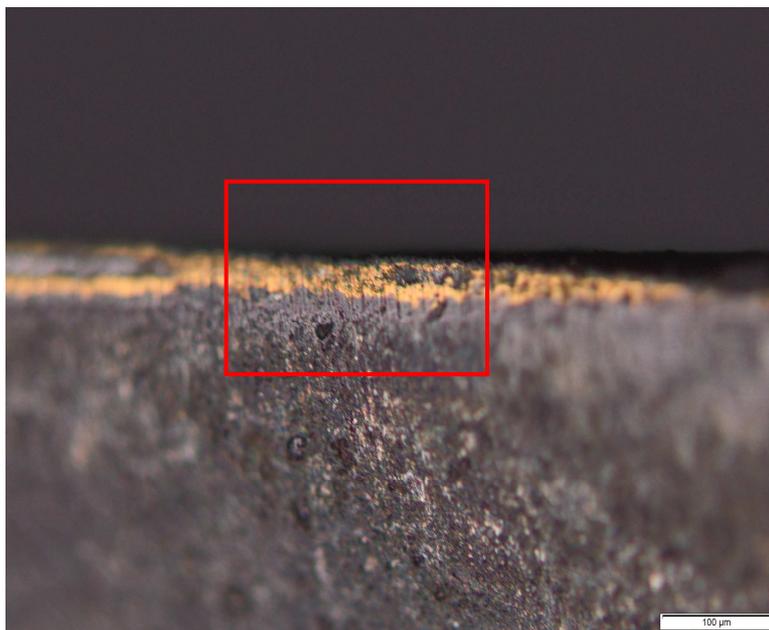
**Figura 26: Avaliação do desgaste na região de corte principal com a utilização de fluido semissintético.**



**Fonte: Autoria própria.**

Na Figura 27 é possível observar uma ampliação do desgaste na região principal. Os valores médios de desgaste ( $VB_{Bm}$ ) foram de 40,98; 34,22; 43,04 e 31,12  $\mu\text{m}$  para as condições sem fluido, semissintético, sintético I e sintético II, respectivamente.

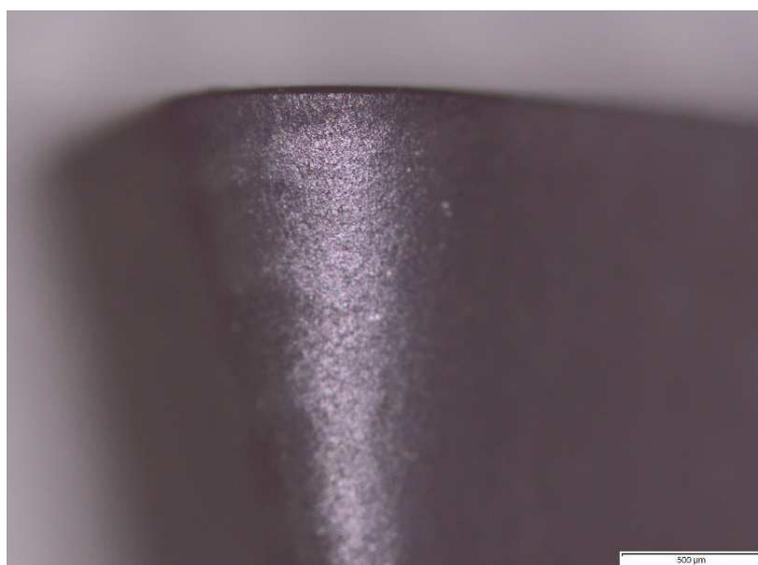
**Figura 27: Característica ampliada do desgaste nas quatro condições.**



**Fonte: Autoria própria.**

O desgaste na aresta secundária de corte foi mínimo devido à geometria do inserto que não interage de forma efetiva durante a usinagem. A **figura 28** ilustra o desgaste em uma das condições utilizadas.

**Figura 28: Avaliação do desgaste na região de corte secundário com a utilização de fluido semissintético.**

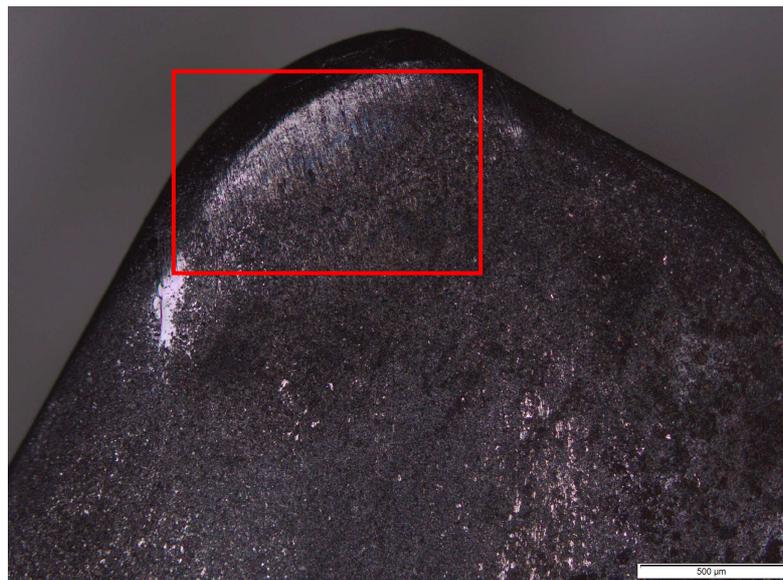


**Fonte: Autoria própria.**

A hipótese provável para o desgaste nesta região é devido ao percurso da ferramenta, que é um faceamento. O percurso de usinagem no sentido transversal da peça permite que a aresta principal de corte participe efetivamente na retirada de material enquanto que a aresta secundária fica em atrito com a parede lateral da peça durante o percurso. No caso do faceamento a aresta secundária entra em contato com a parede muito menos vezes do que o contato da aresta principal com a superfície usinada.

A análise superficial de um dos insertos é mostrada na **figura 29**. E mostra que em todas as condições houve a propagação de uma mancha característica que se alojou em boa parte aresta secundária de corte e parcialmente na aresta principal de corte, mas desgaste aparente e significativo não foi identificado, como comentado no início do tópico.

**Figura 29: Avaliação do desgaste na região superficial com a utilização de fluido sintético II.**



**Fonte: Autoria própria.**

Esta característica pode ser a remoção de parte do revestimento da pastilha, ou é apenas material do corpo de prova que ficou aderido, mas que apenas pode ser comprovado com uma análise mais aprofundada com instrumentos que permitam tal conclusão.

## 5 CONCLUSÃO

Os objetivos gerais e específicos do trabalho foram alcançados e permitiram avaliar as influências do decréscimo de lubrificação e a ausência do mesmo para as mesmas condições de corte. Portanto foi possível concluir que:

- A melhor condição para os parâmetros de rugosidade analisado diante do parâmetro fixo de operação da máquina estudado foi o fluido de corte semissintético.
- Os valores de rugosidade média para todos os fluidos ensaiados ficaram em uma faixa aceitável para a condição de fresamento conforme literatura descreve, e até mesmo sem fluido compensa usinar, dependendo das características superficiais de projeto;
- As pastilhas apresentaram bons resultados quando solicitadas pelo impacto entre passes de máquina (pois não apresentaram lascamentos ou trincas) além de propiciar uma repetibilidade de rugosidade;
- O comportamento do sistema de fluido obteve bons resultados mesmo com variação, tornando assim, conforme literatura utilizada, um processo que está dentro do que é proposto: sistema em mínima quantidade de fluido;

### Sugestões para trabalhos futuros

De forma a contribuir com novas pesquisas, algumas sugestões para futuros trabalhos ficam em aberto tais como:

- Realização de novos ensaios variando parâmetros de usinagem para condições diferenciadas de lubri refrigeração com o sistema MQF;
- Avaliação da rugosidade Ra na usinagem de um material de alta liga utilizando o sistema MQF;
- Propor melhorias no sistema MQF feito pelo técnico administrativo Lucas Franco Wrege de forma a garantir o ajuste da vazão com a menor variação possível.

## REFERÊNCIAS

ADLER, D. P.; HIL, W. W. S; MICHALEK, D. J.; SUTHERLAND, J. W. Examining the role of cutting fluids in machining and efforts to address associated environmental/health concerns. **Journal Machining Science and Technology**. V. 10, Issue 1. 2006.

ALMEIDA, D. O. **Investigação de desvios geométricos no alargamento de ferro fundido com ferramentas revestidas**. 2008. 100 f.: il. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Uberlândia, MG.

ALBERTAZZI, A. G; SOUZA, A.R. **Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial**. 1.ed. São Paulo: Manole, 2008.

ALVES, M. L. **Reconhecimento da rugosidade em imagens monocromáticas por meio de análise de textura**. 2011. 197f. Tese de Doutorado em Engenharia mecânica, Universidade Federal Fluminense. Niterói, RJ.

CORDEIRO, de L, F; MORAES, J. J. B; HIRASHITA, M. A. Fluidos de corte: uma abordagem geral e novas tendências. **XXXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, Salvador (BA), p. 02, out. 2013.

DEARNLEY, P. A; TRENT, E. M. **Wear Mechanisms of coated carbide tools**, Metals Technology. 1982.

ALMEIDA, D.O.; NAVES, V.T. G.; MACHADO, A.R.; BACCI, M. da S. Influência da direção de aplicação do fluido de corte na temperatura da interface cavaco-ferramenta. **Congresso Brasileiro Científico de Comunicação Organizacional e de Relações Públicas** - Abrapcorp, 4, 2010, Porto Alegre, RS. Anais (on-line). São Paulo: Abrapcorp, 2010. Disponível: <http://www.abrapcorp.org.br/anais2010>.

DIN 4762:1989. Surface roughness, terminology, 1989.

DINIZ, A. E; MARCONDES, F. C; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 1.ed. São Paulo: MM editora, 1999.

DOMINGOS, F.C.; FREITAS, S.V.C; NETO, V.M. Análise metrológica de rugosímetros. **3º CIMEC**. 2014. Disponível em:

<[http://www.energiapura.net.br/Trabalhos%20Publicados/2014/incertezas\\_rugosimetros\\_cimtec\\_2014.pdf](http://www.energiapura.net.br/Trabalhos%20Publicados/2014/incertezas_rugosimetros_cimtec_2014.pdf)>. Acesso em: 25 de abril de 2019.

DUMONT TREINAMENTOS. **Processo de determinação da rugosidade**. Disponível em: <[https://www.dumonttreinamentos.com.br/representacao\\_de\\_rugosidade](https://www.dumonttreinamentos.com.br/representacao_de_rugosidade)>. Acesso em: 25 de abril de 2019.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. 1.ed. São Paulo: Editora Blucher, 1969.

FERREIRA, J.C.E. **Rugosidade**. Transparências da disciplina Planejamento do Processo Assistido pelo Computador. Grima, Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC. Sem data. Acesso em 25 de abril de 2019. Disponível em: [http://www.grima.ufsc.br/capp/transparencias/TransparenciasCAPP\\_Rugosidades1.pdf](http://www.grima.ufsc.br/capp/transparencias/TransparenciasCAPP_Rugosidades1.pdf)

GADELMAWLA, E.S; KOURA, M.M.; MAKSOUD, T.M.A.; ELEWA, I.M.; SOLIMAN, H.H. Roughness parameters. **Journal of Materials Processing Technology**. V.123, pp 133-145. 2002.

GOMES, J. F.de O; ALVES, S. M. Adequação ambiental dos processos de usinagem utilizando produção mais limpa como estratégia de gestão ambiental. **SciELO**, Prod. online. 2007, vol.17, n.1, pp.129-138, jan. abr. 2007.

GROOVER, M. P. **Introdução aos Processos de Fabricação**. 1.ed. Rio de Janeiro: Grupo Editorial Nacional, 2014.

KROLCZYK, G.M.; MARUDA, R.W.; KROLCZYK, J.B., WOJCIECHOWSKI, S., MIA, M., NIESLONY, P., BUDZIK, G. Ecological trends in machining as a key factor in sustainable production – A review. **Journal of Cleaner Production**, v.218, p. 601-615, feb. 2019.

LIEWNA, P. J; SHAARONIA, A.; SIDIKB, N. A. C.; YAND, J. An overview of current status of cutting fluids and cooling techniques of turning hard steel. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. V. 114, pp 380-394. November 2017.

LIMA, F. F. **Estudo do desgaste de ferramentas de metal duro e cerâmicas no torneamento do Inconel 751 e Inconel 718**. 2012. 229 f. Tese de doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

MACHADO, Á. R; SILVA, M. B; COELHO, R. T; ABRÃO, A. M. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 1.ed. São Paulo: Editora Blucher,2009.

NAKAGAWA, D.H; ANA, A. de S. P; GABRIELLA, de O. M; FRANCYELLI, P. S; FÁBIO, de S. S; ISABEL, C. M; KÁTIA, V. M. C. P; JANAÍNA, F. de S. G. Recontaminação do fluido de corte presente em máquina de fresamento. **XIII Congresso Nacional de Meio Ambiente de Poços de Caldas**. Arana, São Paulo (SP), prod. Online. 2017, ano 53, n 612, jan. 2017.

NOVASKI, O. **Introdução à engenharia de fabricação mecânica**. São Paulo: Blucher, 1994.

ÖZBEK O.; SARUHAN, H. The effect of vibration and cutting zone temperature on surface roughness and tool wear in eco-friendly MQL turning of AISI D2. **J Mater Res Technol**. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.01.010>.

PARRA B. S; GENNARI R. C; MELCHIADES F. G; BOSCHI A. O. Rugosidade Superficial de Revestimentos Cerâmicos. **Cerâmica Industrial**, 11 (2), março/abril. 2006.

RIBEIRO, A. de S. **Aplicação de mínima quantidade de lubrificante no fresamento do aço SAE 8640**. 2007. 110p. Dissertação de graduação em engenharia Automotiva, Universidade de Brasília, Campus Gama, DF.

SANTOS, S. C; WISLEY, F. S. **Aspectos Tribológicos da Usinagem dos Materiais**. 1.ed. Artliber, 2007.

STOLL, A. Inovações na usinagem de grandes séries dentro de uma montadora. **Revista Máquinas e Metais**, São Paulo, n. 514, p. 42-57, nov. 2008.

SOUZA, A. J; FELIPE, A. Análise do processo de fresamento do aço ANSI D6 endurecido utilizando mínima quantidade de lubrificante. **23º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**. Foz do Iguaçu, Paraná (PR), Prod. Online. 2018, nov. 2018.

ZEILMANN, R. P; BORDIN, M. F; VACARO, T; SONDA, V. Processos de usinagem e responsabilidade ambiental através da redução da utilização de fluidos de corte. **ResearchGate**, 2019. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/266462912> **PROCESSOS DE USINAGEM E R**

[ESPONSABILIDADE AMBIENTAL ATRAVES DA REDUCAO DA UTILIZACAO DE FLUIDOS DE CORTE](#)>. Acesso em: 07 de abril de 2019.

**ANEXO A** - Programa gerado pelo software *Fusion 360* e codificado em forma de instruções formadas por números e letras utilizados para a usinagem da peça.

%	N58 G02 Y79.972 Z-2. J-5.
O1001 (TCC SAMUEL -12mm)	N60 G01 Y72.5
(T1 D=50. CR=0. - ZMIN=-12. - FACE	N62 Y-25. F571.
MILL)	N64 G17 G02 X75.875 I-14.206
N10 G90 G94 G17 G49 G40 G80	N66 G01 Y72.5
N12 G21	N68 G03 X47.463 I-14.206
N14 G28 G91 Z0.	N70 G01 Y-25.
N16 G90	N72 G02 X19.05 I-14.206
	N74 G01 Y72.5
(FACEAMENTO)	N76 G19 G03 Y77.5 Z3. K5. F400.
N18 T1	N78 G00 Z5.
N19 M06	N80 X104.287 Y84.972
N20 S1464 M03	N82 G01 Z2. F400.
N22 G54	N84 G02 Y79.972 Z-3. J-5.
N24 G00 X104.287 Y84.972	N86 G01 Y72.5
N26 G43 Z15. H01	N88 Y-25. F571.
N28 G00 Z5.	N90 G17 G02 X75.875 I-14.206
N30 G01 Z4. F400.	N92 G01 Y72.5
N32 G19 G02 Y79.972 Z-1. J-5.	N94 G03 X47.463 I-14.206
N34 G01 Y72.5	N96 G01 Y-25.
N36 Y-25. F571.	N98 G02 X19.05 I-14.206
N38 G17 G02 X75.875 I-14.206	N100 G01 Y72.5
N40 G01 Y72.5	N102 G19 G03 Y77.5 Z2. K5. F400.
N42 G03 X47.463 I-14.206	N104 G00 Z5.
N44 G01 Y-25.	N106 X104.287 Y84.972
N46 G02 X19.05 I-14.206	N108 G01 Z1. F400.
N48 G01 Y72.5	N110 G02 Y79.972 Z-4. J-5.
N50 G19 G03 Y77.5 Z4. K5. F400.	N112 G01 Y72.5
N52 G00 Z5.	N114 Y-25. F571.
N54 X104.287 Y84.972	N116 G17 G02 X75.875 I-14.206
N56 G01 Z3. F400.	N118 G01 Y72.5

N120 G03 X47.463 I-14.206  
N122 G01 Y-25.  
N124 G02 X19.05 I-14.206  
N126 G01 Y72.5  
N128 G19 G03 Y77.5 Z1. K5. F400.  
N130 G00 Z5.  
N132 X104.287 Y84.972  
N134 G01 Z0. F400.  
N136 G02 Y79.972 Z-5. J-5.  
N138 G01 Y72.5  
N140 Y-25. F571.  
N142 G17 G02 X75.875 I-14.206  
N144 G01 Y72.5  
N146 G03 X47.463 I-14.206  
N148 G01 Y-25.  
N150 G02 X19.05 I-14.206  
N152 G01 Y72.5  
N154 G19 G03 Y77.5 Z0. K5. F400.  
N156 G00 Z5.  
N158 X104.287 Y84.972  
N160 G01 Z-1. F400.  
N162 G02 Y79.972 Z-6. J-5.  
N164 G01 Y72.5  
N166 Y-25. F571.  
N168 G17 G02 X75.875 I-14.206  
N170 G01 Y72.5  
N172 G03 X47.463 I-14.206  
N174 G01 Y-25.  
N176 G02 X19.05 I-14.206  
N178 G01 Y72.5  
N180 G19 G03 Y77.5 Z-1. K5. F400.  
N182 G00 Z5.  
N184 X104.287 Y84.972  
N186 G01 Z-2. F400.  
N188 G02 Y79.972 Z-7. J-5.  
N190 G01 Y72.5  
N192 Y-25. F571.  
N194 G17 G02 X75.875 I-14.206  
N196 G01 Y72.5  
N198 G03 X47.463 I-14.206  
N200 G01 Y-25.  
N202 G02 X19.05 I-14.206  
N204 G01 Y72.5  
N206 G19 G03 Y77.5 Z-2. K5. F400.  
N208 G00 Z5.  
N210 X104.287 Y84.972  
N212 G01 Z-3. F400.  
N214 G02 Y79.972 Z-8. J-5.  
N216 G01 Y72.5  
N218 Y-25. F571.  
N220 G17 G02 X75.875 I-14.206  
N222 G01 Y72.5  
N224 G03 X47.463 I-14.206  
N226 G01 Y-25.  
N228 G02 X19.05 I-14.206  
N230 G01 Y72.5  
N232 G19 G03 Y77.5 Z-3. K5. F400.  
N234 G00 Z5.  
N236 X104.287 Y84.972  
N238 G01 Z-4. F400.  
N240 G02 Y79.972 Z-9. J-5.  
N242 G01 Y72.5  
N244 Y-25. F571.  
N246 G17 G02 X75.875 I-14.206  
N248 G01 Y72.5  
N250 G03 X47.463 I-14.206  
N252 G01 Y-25.  
N254 G02 X19.05 I-14.206

N256 G01 Y72.5  
N258 G19 G03 Y77.5 Z-4. K5. F400.  
N260 G00 Z5.  
N262 X104.287 Y84.972  
N264 G01 Z-5. F400.  
N266 G02 Y79.972 Z-10. J-5.  
N268 G01 Y72.5  
N270 Y-25. F571.  
N272 G17 G02 X75.875 I-14.206  
N274 G01 Y72.5  
N276 G03 X47.463 I-14.206  
N278 G01 Y-25.  
N280 G02 X19.05 I-14.206  
N282 G01 Y72.5  
N284 G19 G03 Y77.5 Z-5. K5. F400.  
N286 G00 Z5.  
N288 X104.287 Y84.972  
N290 G01 Z-6. F400.  
N292 G02 Y79.972 Z-11. J-5.  
N294 G01 Y72.5  
N296 Y-25. F571.  
N298 G17 G02 X75.875 I-14.206  
N300 G01 Y72.5  
N302 G03 X47.463 I-14.206  
N304 G01 Y-25.  
N306 G02 X19.05 I-14.206

N308 G01 Y72.5  
N310 G19 G03 Y77.5 Z-6. K5. F400.  
N312 G00 Z5.  
N314 X104.287 Y84.972  
N316 G01 Z-7. F400.  
N318 G02 Y79.972 Z-12. J-5.  
N320 G01 Y72.5  
N322 Y-25. F571.  
N324 G17 G02 X75.875 I-14.206  
N326 G01 Y72.5  
N328 G03 X47.463 I-14.206  
N330 G01 Y-25.  
N332 G02 X19.05 I-14.206  
N334 G01 Y72.5  
N336 G19 G03 Y77.5 Z-7. K5. F400.  
N338 G00 Z15.  
N340 G17  
  
N342 G28 G91 Z0.  
N344 G90  
N346 G49  
N348 G28 G91 X0. Y0.  
N350 G90  
N352 M30  
%