

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA – PPGMEC  
MESTRADO PROFISSIONAL**

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE PROCESSO NO  
FRESAMENTO DE INCONEL 718 SOBRE O DESGASTE E A QUALIDADE  
SUPERFICIAL**

**FERNANDA FONTANIVE**

**CAXIAS DO SUL**

**2018**

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA – PPGMEC**  
**MESTRADO PROFISSIONAL**

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE PROCESSO NO**  
**FRESAMENTO DE INCONEL 718 SOBRE O DESGASTE E A QUALIDADE**  
**SUPERFICIAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul, visando à obtenção de grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Projeto e fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo P. Zeilmann

Fernanda Fontanive

**CAXIAS DO SUL**

**2018**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Universidade de Caxias do Sul  
UCS - BICE - Processamento Técnico

F681a Fontanive, Fernanda, 1991-  
Análise da influência dos parâmetros de processo no fresamento de Inconel 718 sobre o desgaste e a qualidade superficial / Fernanda Fontanive. – 2018.  
90 f. : il ; 30 cm

Apresenta bibliografia.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2018.  
Orientação: Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann.

1. Usinagem. 2. Máquinas-ferramenta - Testes. 3. Resistência de materiais. I. Zeilmann, Rodrigo Panosso, orient. II. Título.

CDU 2. ed.: 621.7

Índice para o catálogo sistemático:

1. Usinagem	621.7
2. Máquinas-ferramenta - Testes	621.7.014
3. Resistência de materiais	620.193

Catálogo na fonte elaborada pela bibliotecária  
Ana Guimarães Pereira – CRB 10/1460

**“ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE PROCESSO NO FRESAMENTO DE INCONEL 718 SOBRE O DESGASTE E A QUALIDADE SUPERFICIAL.”**

**Fernanda Fontanive**

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, Área de Concentração: Projeto e Fabricação.

Caxias do Sul, 21 de fevereiro de 2018.

Banca Examinadora:

Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann  
Orientador  
Universidade de Caxias do Sul

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Camila Baldasso  
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Dr. Carlos Roberto Altafini  
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Dr. Leandro Luis Corso  
Universidade de Caxias do Sul

## AGRADECIMENTOS

O compositor e cantor brasileiro Luiz Gonzaga dizia: “E aprendi que se depende sempre de tanta, muita, diferente gente. Toda pessoa sempre é as marcas das lições diárias de outras tantas pessoas. E é tão bonito quando a gente entende. Que a gente é tanta gente. Onde quer que a gente vá. E é tão bonito quando a gente sente, que nunca está sozinho, por mais que pense estar...”

Gratidão a minha **família** e ao meu **namorado**, pela demonstração de amor, apoio e compreensão.

Ao Professor Dr. **Rodrigo Panosso Zeilmann**, pelo apoio intelectual, paciência, profissionalismo e amizade.

Ao **Gerson Luiz Nicola** e ao **Gaston Henrique Rossa**, pela disponibilidade e apoio durante os trabalhos realizados no laboratório.

Aos amigos e colegas do **GUS**, pela assistência e companheirismo.

A **Universidade de Caxias do Sul (UCS)** e ao **Laboratório de Novas Tecnologias (LNTP)** pela disposição da infraestrutura e apoio financeiro.

Ao **Laboratório Central de Microscopia (LCMIC)** pela disposição da infraestrutura e ao **Israel Krindges** pelo apoio.

A **BTF Burzoni** pela concessão das ferramentas.

A **Secta Tools Indústria de ferramentas Ltda.** pela disposição da infraestrutura e ao **Bruno Ballardin** pelo apoio.

As amigas **Lauren, Nicole e Juliana**, que de diferentes e significativas formas apoiaram para a realização deste trabalho.

O meu sincero agradecimento.

## RESUMO

As ligas de níquel têm como principal característica a capacidade de resistir a condições extremas de aplicação, em decorrência disso, ganharam destaque em diferentes áreas industriais. No entanto, esses atributos fazem com que o fresamento das ligas de níquel seja frequentemente associado com altos custos de fabricação e baixa produtividade. A microgeometria da ferramenta é um fator chave para capacitar altas performances durante as operações de corte. Além disso, o uso de fluido lubrificante pode reduzir o atrito e a temperatura do processo. No entanto, a usinagem a seco traz benefícios econômicos e ambientais. Em vista disso, foram realizados ensaios experimentais com foco sobre a análise dos mecanismos e tipos de desgaste e vida das ferramentas e sobre a qualidade superficial do corpo de prova. Os experimentos ocorreram com o uso de ferramentas originais de metal duro revestidas e tratadas pelo método de polimento com cerdas abrasivas. Além disso, houve a avaliação da usinagem em diferentes condições, a seco e com o uso de MQL. A partir dos ensaios, foram gerados corpos de prova, no início e no final da vida das ferramentas. Em relação ao material usinado, foi analisada a textura, a rugosidade, a camada afetada e a microdureza. Quanto as ferramentas, foram estudados os mecanismos e tipos de desgaste e a vida das ferramentas. Ainda, houve a investigação qualitativa e dimensional das ferramentas polidas e originais. Os resultados apontam que a condição de usinagem e o tratamento da ferramenta influenciam significativamente no processo de usinagem. Dentre as variações, o melhor desempenho foi conferido pelas ferramentas originais com o uso de MQL.

**Palavras-chave: Preparação de gume, Qualidade superficial, Vida da ferramenta, MQL.**

## **ABSTRACT**

Nickel alloys have the ability to resist extreme conditions, as a result, they are in evidence among different industrial areas. Nickel alloys milling is often associated with high manufacturing costs and low productivity. Cutting tool micro geometry is one of the key factors in order to enable high performance cutting operations with these alloys. Besides that, the cutting fluid use can reduce friction and process temperature. On the other hand, dry machining brings environmental benefits and, in addition, it can protect the factory worker from several diseases caused by the contact with the cutting fluid. Due to this, experimental trials were realized, focusing on mechanisms and types of wear and tool life and on the workpiece surface integrity. The experiments occurred with the use of original tools and polished tools. Besides that, the milling process was evaluated in different conditions, dry milling and with the use of MQL. From the experiments, workpieces were produced, in the beginning and in the end of tool life. Texture, roughness, affected layer and microhardness were analyzed when it comes to surface integrity. Related to the tools, the mechanisms and types of wear were studied. In addition, qualitative and dimensional investigations were performed. The results show that the different machining conditions and the tool edge preparation influence significantly in this milling process. Among the tested conditions, the best performance was achieved by the original tools with the use of MQL.

**Key-words: Edge preparation, Surface integrity, Tool life, MQL.**

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração do fresamento de topo e fresamento tangencial. ....	18
Figura 2 – Gráfico do comportamento da força de corte e temperatura.....	20
Figura 3 – Velocidades de corte para o fresamento de diferentes materiais. ....	21
Figura 4 – Ilustração dos sistemas de aplicação de MQL. ....	24
Figura 5 – Processos de tratamento de gume. ....	27
Figura 6 – Representação das regiões modificadas pelo tratamento de gume. ....	28
Figura 7 – Figura esquemático do escovamento. ....	29
Figura 8 – Desenho das camadas micro superficiais.....	31
Figura 9 – Representação microscópica de um perfil de rugosidade. ....	32
Figura 10 – Superfície torneada de Inconel 718.....	33
Figura 11 – Gráfico das causas do desgaste no processo de corte. ....	36
Figura 12 – Fluxograma do desgaste na usinagem das superligas. ....	37
Figura 13 – Representação microscópica e ilustrativa do VB e VBmáx.....	37
Figura 14 – Gráfico do comportamento da curva padrão de desgaste.....	39
Figura 15 – Corpo de prova.....	42
Figura 16 – Fixação do CP e sistema MQL.....	43
Figura 17 – Fluxograma do processo experimental.....	44
Figura 18 – Ferramenta.....	48
Figura 19 – Processo de polimento. ....	49
Figura 20 – Gráfico da evolução do desgaste durante a usinagem a seco.....	52
Figura 21 – Desgaste abrasivo em decorrência da formação de BUE.....	53
Figura 22 – Ferramentas antes do fresamento. ....	55
Figura 23 – Fotografia do revestimento. ....	56
Figura 24 – Gráfico da análise da geometria das ferramentas.....	57
Figura 25 – Gráfico comparativo entre as rugosidades mensuradas. ....	57
Figura 26 – Perfil de rugosidade textura para a condição Seco – Original. ....	59
Figura 27 – Perfil de rugosidade e textura para a condição Seco – Polida.....	60
Figura 28 – Perfil de rugosidade e textura para a condição MQL – Original. ....	61
Figura 29 – Perfil de rugosidade e textura para a condição MQL – Polida. ....	61
Figura 30 – Análise química das superfícies usinadas. ....	63
Figura 31 – Análises químicas da superfície do CP usinado.....	64
Figura 32 – Gráfico do perfil de dureza ao longo da subsuperfície da peça. ....	65

Figura 33 – Gráfico da medição da camada afetada.....	66
Figura 34 – Micrografia das subsuperfícies usinadas a seco.....	67
Figura 35 – Micrografia das subsuperfícies usinadas com MQL.....	68
Figura 36 – Gráfico da vida das FO e FP testadas a seco e com o uso de MQL.....	69
Figura 37 – Relação da aplicação de MQL e o deslocamento da taxa do calor. ....	71
Figura 38 – Fotografia do desgaste das ferramentas durante o fresamento.....	72
Figura 39 – Fotografia do desgaste da ferramenta depois do processo de fresamento. ....	74
Figura 40 – Rachaduras encontradas pelo autor (a) e no CP usado nos testes (b). ....	76
Figura 41 – Análise química das FP e FO. ....	77
Figura 42 – Medição e detalhe do ângulo de folga.....	78

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Vantagens e desvantagens do óleo vegetal.....	25
Quadro 2 – Hipóteses para a realização da ANOVA. ....	45
Quadro 3 – Análises e métodos. ....	46

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades mecânicas e físicas dos corpos de prova de Inconel 718.....	42
Tabela 2 – Planejamento experimental (DOE).....	45
Tabela 3 – Parâmetros de corte.....	47
Tabela 4 – Propriedades físico-química do FLR.....	50
Tabela 5 – Variações durante os pré-testes. ....	51
Tabela 6 – ANOVA para os valores de vida da ferramenta. ....	74

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha$	ângulo de folga [graus]
$\alpha$	nível de significância [%]
$\Omega$	ângulo de cantilever [graus]
$\Omega_r$	ângulo de desprendimento do cantilever [graus]
$\Omega_c$	ângulo de contato do cantilever [graus]
$a_e$	profundidade de corte radial [mm]
$Al_a$	espessura média da camada afetada [ $\mu\text{m}$ ]
$Al_y$	máxima espessura da camada afetada [ $\mu\text{m}$ ]
$Al_z$	espessura média dos cinco maiores valores da camada afetada [ $\mu\text{m}$ ]
$a_p$	profundidade de corte axial [mm]
$D_c$	diâmetro de corte máximo [mm]
$D_m$	diâmetro da haste da ferramenta [mm]
$f$	avanço [mm]
$F$	força [N]
$F_{bs}$	força cisalhante de escovamento [N]
$F_{bn}$	força normal de escovamento [N]
$f_z$	avanço por gume [mm/gume]
$L$	comprimento [mm]
$N$	rotação [l/m]
$n$	rotação [l/m]
$R$	raio de gume
$R_a$	desvio médio aritmético da rugosidade [ $\mu\text{m}$ ]
$r_h$	raio do cantilever [mm]
$R_{m\acute{a}x}$	profundidade máxima individual de rugosidade [ $\mu\text{m}$ ]
$R_y$	profundidade máxima individual de rugosidade [ $\mu\text{m}$ ]
$R_z$	média aritmética das rugosidades singulares [ $\mu\text{m}$ ]
$S$	superfície da peça
$T$	temperatura [graus]
$t_c$	tempo de usinagem [min]
$VB$	desgaste de flanco [mm]
$VB_{m\acute{a}x}$	desgaste de flanco máximo [mm]
$v_c$	velocidade de corte [m/min]

$y_b$  profundidade de penetração [mm]  
 $Z_n$  número de gumes

## LISTA DE ABREVIATURAS

ANOVA	análise de variância
AlCrN	nitreto de cromo alumínio
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	óxido de alumínio
BUE	gume postiço
c	cavidades
CBN	nitreto de boro cúbico
CO	monóxido de carbono
CP	corpo de prova
Cr	cromo
CVD	processo químico a vapor
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i> Instituto Alemão de Normas
DLC	carbono tipo diamante
DOE	planejamento experimental
EDM	eletro erosão
Fe	ferro
FeWC <sub>26</sub>	carbonetos complexos
FESEM	microscopia eletrônica de varredura por emissão de campo
FLR	fluido lubrificante
FO	ferramentas originais
FP	ferramentas polidas
GUS	grupo de usinagem
ISO	Organização Internacional de Padronização
ma	marcas de alimentação
md	material depositado
MQL	mínima quantidade de fluido
Nb	nióbio
Ni	níquel
PCD	diamante policristalino
PVD	processo físico a vapor
rm	resíduos de metal
SiAlON	nitreto de alumínio e silício

SiC	carbeto de silício
TiAlN	nitreto de titânio e alumínio
TiCN	carbonitreto de titânio
TiN	nitreto de titânio
UCS	Universidade de Caxias do Sul
WC	carboneto de tungstênio

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1	JUSTIFICATIVA.....	16
1.2	OBJETIVOS.....	17
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo geral .....</b>	<b>17</b>
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>18</b>
2.1	PRINCÍPIOS DO FRESAMENTO.....	18
2.2	USINABILIDADE DO INCONEL 718.....	19
<b>2.2.1</b>	<b>Ferramenta de corte .....</b>	<b>21</b>
2.3	USINAGEM COM O USO DE MQL E A SECO .....	22
<b>2.3.1</b>	<b>Usinagem com o uso de MQL.....</b>	<b>22</b>
2.3.1.1	Fluídos de base vegetal.....	24
<b>2.3.2</b>	<b>Usinagem a seco .....</b>	<b>25</b>
2.4	PROCESSOS DE TRATAMENTO DE GUMES .....	26
<b>2.4.1</b>	<b>Escovamento com cerdas abrasivas .....</b>	<b>29</b>
2.5	QUALIDADE SUPERFICIAL .....	30
2.6	DESGASTE NO FRESAMENTO .....	33
<b>2.6.1</b>	<b>Mecanismos e tipos de desgaste.....</b>	<b>33</b>
<b>2.6.2</b>	<b>Comportamento de desgaste e vida da ferramenta.....</b>	<b>38</b>
2.7	ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA).....	39
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>42</b>
3.1	DETALHAMENTO EXPERIMENTAL .....	44
3.2	PARÂMETROS DE CORTE.....	47
3.3	MATERIAL .....	42
3.4	FERRAMENTAS.....	48
<b>3.4.1</b>	<b>Tratamento de gume .....</b>	<b>48</b>
3.5	EQUIPAMENTOS .....	49
<b>3.5.1</b>	<b>Fluído e sistema MQL .....</b>	<b>50</b>
3.6	PRÉ-TESTE .....	50

<b>4</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>52</b>
4.1	PRÉ-TESTE .....	52
4.2	TRATAMENTO DE SUPERFÍCIE NAS FERRAMENTAS .....	54
4.3	RUGOSIDADE E TEXTURA RESULTANTE NA SUPERFÍCIE.....	57
4.4	ANÁLISE DA CAMADA AFETADA E MICRODUREZA.....	64
4.5	DESGASTE.....	69
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>80</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>81</b>
	<b>APÊNDICE A – ANOVA PARA OS VALORES DE RUGOSIDADE .....</b>	<b>89</b>
	<b>APÊNDICE B – ANOVA PARA OS VALORES DE CAMADA AFETADA .....</b>	<b>90</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>83</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 JUSTIFICATIVA

O níquel e suas ligas vêm se destacando aos olhos das indústrias em consequência de suas capacidades de resistir a um significativo conjunto de condições extremas, como meios corrosivos, altas temperaturas e/ou altas tensões (ASM INTERNATIONAL, 2000).

A criação do Inconel 718 por Eiselstein (DECKER, 2006) no final da década de 1950 foi referência na história das superligas de níquel. Hoje em dia é amplamente utilizado em peças de motor para aeronaves, processamento químico, vasos de pressão, turbinas de vapor, veículos espaciais, aplicações médicas, aplicações marinhas, equipamentos de controle de poluição e setor automotivo, entre outros. (ARUNACHALAM; MANNAN, 2000; BYUN; FARRELL, 2003).

Trata-se de uma superliga à base de níquel que mostra alta resistência mecânica à temperatura ambiente, alta resistência à corrosão e excelente resistência à fluência e à fadiga em elevadas temperaturas, até 650 °C. Além disso, apresenta boa resistência à corrosão e ductilidade em temperaturas criogênicas, até -250 °C (BYUN; FARRELL, 2003; KUO et al., 2009).

No entanto, a baixa condutividade térmica, o encruamento, a presença de partículas de carboneto de abrasivos, a dureza e a afinidade para reagir com o material da ferramenta, mostram-se características desafiadoras quando se fala em processos de usinagem (EZUGWU; WANG; MACHADO, 1999).

Assim, o fresamento das ligas de níquel é frequentemente associado com altos custos de fabricação e baixa produtividade. Isso ocorre devido a excessiva geração de calor na zona de corte e a dificuldade em dissipar esse calor em consequência da baixa condutividade térmica apresentada por esses materiais. A alta dureza do corpo de prova (CP), combinada com as altas forças e temperaturas na zona de corte resultam em desgaste demasiado da ferramenta e baixa qualidade superficial (SUN; BRANDT; DARGUSCH, 2010).

A microgeometria da ferramenta é um fator chave para capacitar altos desempenhos durante as operações de corte das ligas de níquel. Denkena e Biermann (2014) realizaram um estudo focando nas principais tecnologias de preparação do gume, métodos de caracterização e o efeito da microgeometria durante o corte. Assim sendo, ferramentas com preparação específica são frequentemente usadas para o processo com ligas de níquel, já que, microlascamentos são observados quando ferramentas afiadas são utilizadas. Assim, visando

o aumento da estabilidade mecânica, confiabilidade do processo e vida da ferramenta, diferentes processos de preparação de gume são empregados.

O uso do fluido lubrificante (FLR) pode reduzir o atrito e a temperatura do processo (LIAO; LIN; WANG, 2008). No entanto, a usinagem a seco traz benefícios econômicos e ambientais e, além disso, pode proteger o operador de diversas doenças causadas pelo contato com o FLR. Quando se fala em processos sustentáveis, estudos indicam a necessidade de entender e desenvolver conhecimento para dominar as técnicas de usinagem sem a utilização de FLR.

Em vista disso, o trabalho apresenta o estudo do processo de fresamento de Inconel 718. Com foco na análise dos mecanismos e evolução do desgaste de ferramentas originais (FO) e polidas (FP) e na investigação da qualidade superficial do CP, após a usinagem a seco e com o uso de mínima quantidade de lubrificante (MQL). A usinagem das ligas de níquel ainda se mostra um desafio, especialmente em situações agressivas como a seco, e pouco abordadas, como com polimento do gume, ambas significativas para a indústria. A redução do consumo e dos custos com FLR faz-se necessário, além disso, tem-se o tratamento do gume como inovação. Deste modo, o estudo de forma concatenada é relevante, pois auxilia a tomada de decisão em relação à economia e qualidade. Ainda, o procedimento de tratamento da ferramenta foi aplicado visando propor uma nova opção de tratamento do gume e a melhora da ferramenta durante o processo de usinagem.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

Analisar o desgaste da ferramenta e a qualidade superficial do corpo do prova durante o fresamento de Inconel 718.

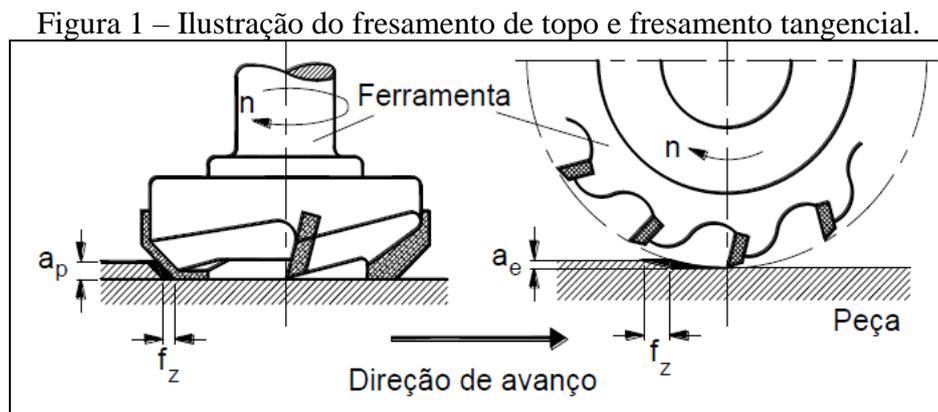
### 1.2.2 Objetivos específicos

- a) investigar métodos usuais de caracterização da integridade superficial do CP;
- b) realizar pré-teste para certificação dos parâmetros;
- c) avaliar os mecanismos e tipos de desgaste de fresas originais e polidas;
- d) avaliar diferentes condições usinagem, a seco e com o uso de MQL; e
- e) aplicar um método de polimento em fresas de metal duro revestidas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 PRINCÍPIOS DO FRESAMENTO

Na fabricação por usinagem deseja-se fabricar peças dentro de tolerâncias e acabamentos pré-estabelecidos, visando o menor custo. Fresamento é um método de usinagem que remove material em movimentos circulares, geralmente com o uso de uma ferramenta de corte com múltiplos gumes que permitem grande variedade de operações, dando as formas e dimensões pretendidas. A direção de corte é perpendicular, ou, em algumas vezes, transversal ao eixo de giro da ferramenta, conforme mostra a Figura 1 (KALPAKJIAN; SCHMID, 2009; KLOCKE, 2011; STEMMER, 2008).



Fonte: Adaptado de Klocke (2011).

As vantagens do processo mostram-se na qualidade dos acabamentos superficiais, na capacidade de atingir diferentes formas, na alta produtividade, na possibilidade de produzir superfícies complexas e na disponibilidade de diferentes tipos de ferramentas (STEMMER, 2008). No entanto, por apresentar corte interrompido, produz solicitações térmicas e mecânicas alternantes, desse modo o processo deve suportar a grande variação de cargas (PAUCKSH et al., 2008).

Durante o fresamento das ligas de níquel, a força é mantida em altos níveis, encruamento severo tende a ocorrer e a condutividade térmica é pobre, gerando fortes cargas termomecânicas no cavaco da ferramenta (EZUGWU, 2005). Essas condições causam altas forças de corte e altas temperaturas na interface peça/ferramenta. Além disso, aderências do material na ferramenta acontecem com frequência (LIAO; LIN; WANG, 2008). Em decorrência disso, a formação de gume postiço é comum. Conseqüentemente, as ferramentas

utilizadas desgastam com rapidez e a qualidade superficial da peça é afetada negativamente pelo processo (OBIKAWA et al., 2012).

## 2.2 USINABILIDADE DO INCONEL 718

O termo usinabilidade é utilizado quando se tem a necessidade de discutir o grau de dificuldade de dar forma a um determinado material. Vale lembrar que um mesmo CP pode apresentar bons resultados quando o critério avaliado é a vida da ferramenta e, em contrapartida, expor resultados pouco satisfatórios quando avalia-se a rugosidade.

Assim, entende-se que a usinabilidade não depende somente de um conjunto de propriedades de um material, mas também, das condições de usinagem, das características da ferramenta e da peça, das condições de refrigeração, do sistema de fixação e da operação empregada (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001; STEMMER, 1995). Já para Weingaertner et al. (1994), a usinabilidade de metais é geralmente analisada acerca de quatro critérios: formação de cavaco, vida da ferramenta, qualidade superficial e forças de corte.

O índice de usinabilidade pode ser encontrado por meio de testes de longa duração, onde obtém-se a velocidade de corte para uma vida determinada da ferramenta e, posteriormente, realiza-se a divisão desse resultado pelo correspondente ao material tomado como padrão (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001). Já para Stemmer (1995) há vários critérios para a análise de um material, os critérios fundamentais são: vida da ferramenta entre duas reafiações sucessivas, grandezas das forças que atuam sobre a ferramenta e da potência consumida, qualidade do acabamento superficial obtido pela usinagem e facilidade de formação do cavaco.

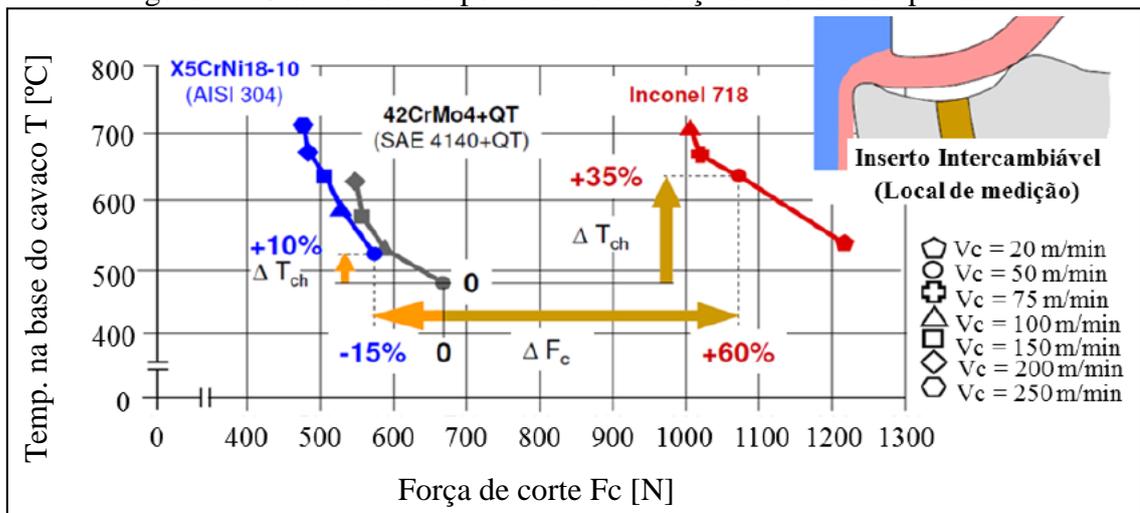
As superligas de níquel caracterizam-se por serem materiais de difícil usinagem, já que, as mesmas propriedades que enaltecem a aplicação das ligas de níquel em diversas áreas, também dificultam a usinagem. As particularidades que afetam o desempenho da usinagem são as altas taxas de encruamento em altas tensões que provocam fenômenos de desgaste e elevadas forças de corte. A alta abrasividade e tenacidade do material e a alta dureza em temperaturas elevadas, também agem aumentando os esforços, as potências e a temperatura de corte (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013; EZUGWU, BONNEY; YAMANE, 2003).

Além disso, apresentam carbonetos duros na matriz, o que incentiva o desgaste abrasivo da ferramenta. A alta ductilidade causa forte tendência ao derretimento, que leva ao gume postiço (BUE), e, por fim, a baixa condutividade térmica que acarreta em altas temperaturas na zona de corte (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013; EZUGWU,

BONNEY; YAMANE, 2003).

A Figura 2 mostra a mudança entre o aço carbono (SAE 4140), o aço inox (AISI 304) e o Inconel 718 em relação a força de corte e temperatura na base do cavaco. Esses resultados foram coletados durante o torneamento a seco com ferramenta de metal duro revestida, utilizando insertos de geometria CNMG 120412, profundidade de corte de 2 mm e avanço de 0,1 mm/rot (KLOCKE, 2011).

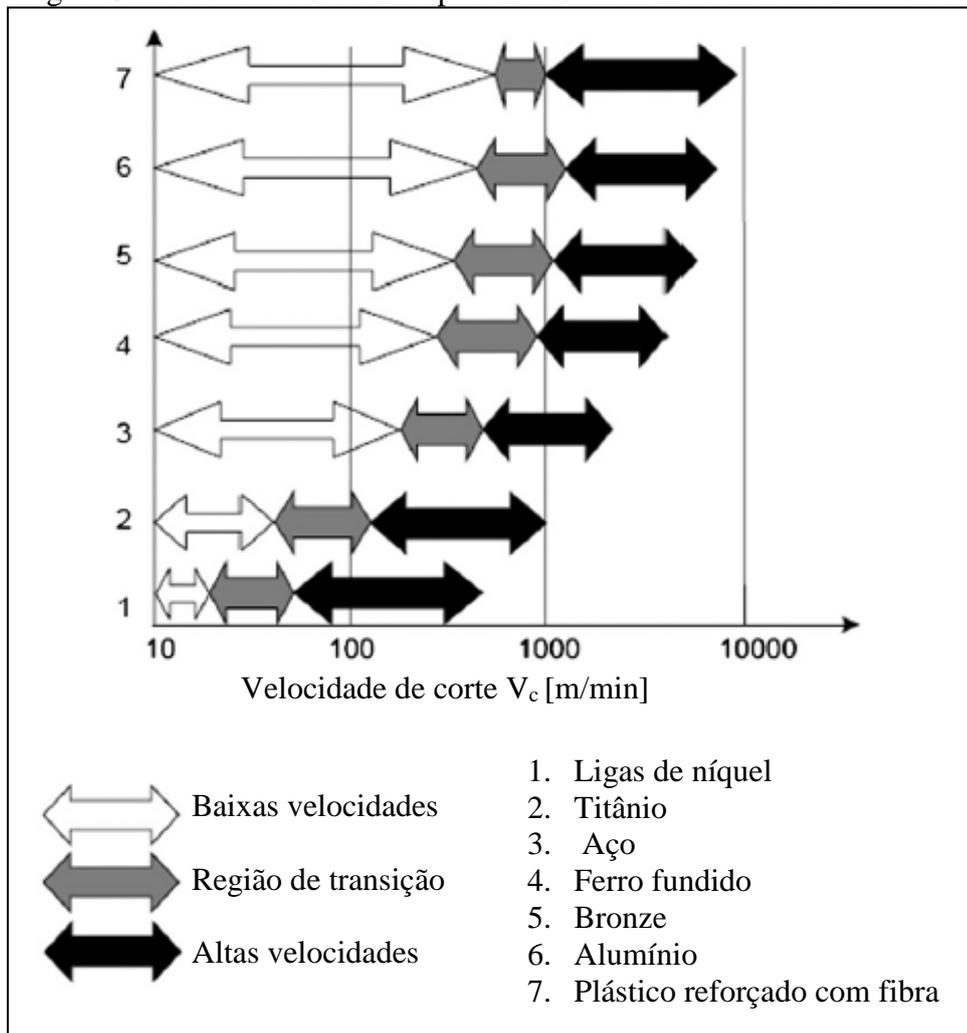
Figura 2 – Gráfico do comportamento da força de corte e temperatura.



Fonte: Adaptado de Klocke (2011).

Alicerçado nisso, percebe-se que em velocidades de corte menores, tem-se a presença de BUE e em altas velocidades de corte, ocorre difusão, abrasão e alta taxa de encruamento, entre outros fenômenos que levam ao desgaste. Para compreensão das faixas de velocidade de corte na usinagem, a Figura 3 traz de forma ilustrativa, as velocidades utilizadas para diferentes materiais.

Figura 3 – Velocidades de corte para o fresamento de diferentes materiais.



Fonte: Schulz (1992).

Assim, é possível afirmar que a usinagem do Inconel 718 causa alto desgaste na ferramenta e, em consequência disso, apresenta menores tempos de vida e maiores danos na superfície da peça usinada.

### 2.2.1 Ferramenta de corte

A escolha do instrumento de corte atua de forma significativa, por exemplo, no processo de corte de ligas aeroespaciais, a precisão dimensional e os efeitos sob a superfície dependem fortemente do material da ferramenta. De acordo com as características do material usinado, Zhu, Zhang e Ding (2012) corroboram que o material da ferramenta geralmente encontra grande esforço térmico e mecânico perto da aresta de corte durante a usinagem. Isso ocorre devido à baixa usinabilidade do CP, o que resulta em deformação plástica e desgaste da ferramenta. Pensando nisso, as ferramentas devem atender os seguintes critérios:

- a) boa estabilidade química, resistência a oxidação, a altas temperaturas e ao impacto;
- b) dureza e resistência ao desgaste. A dureza do material da ferramenta deve ser maior do que a dureza do CP;
- c) resistência a flexão; e
- d) bom desempenho do tratamento térmico.

Ferramentas de metal duro se mostram adequadas para usinagem desse tipo de material. Isso se dá em função da sua dureza a quente e alta resistência a compressão, além disso, a menor quantidade de cobalto presente nessas ferramentas aumentam a resistência a abrasão. A alta condutividade térmica e o baixo coeficiente de expansão térmica da classe K20, melhoram o desempenho da usinagem por reduzirem o choque térmico (ARUNACHALAM; MANNAN, 2000).

Estima-se que, de 75 a 85% das ferramentas usadas pela indústria são revestidas, mesmo que o efeito do revestimento ainda seja um mistério. Geralmente, as ferramentas revestidas apresentam um melhor desempenho, porém, vale lembrar que, a efetividade do revestimento varia de acordo com o fornecedor (ASTAKHOV, 2006).

O revestimento forma uma barreira entre o CP e a ferramenta de corte, prevenindo-a de ser exposta as severas condições do processo. Isso reduz a indução térmica e química na ferramenta. Além disso, os revestimentos podem elevar o desempenho da ferramenta, por alterar o coeficiente de fricção e aumentar a dureza a quente, resultando em uma menor taxa de abrasão (EZUGWU; BONNEY; YAMANE, 2003).

## 2.3 USINAGEM COM O USO DE MQL E A SECO

### 2.3.1 Usinagem com o uso de MQL

O uso do FLR é mais uma metodologia que visa aumentar a vida da ferramenta e garantir uma qualidade superficial adequada. A utilização de FLR iniciou há mais de 100 anos, primeiramente, jatos de água foram utilizados com o intuito de dissipar o calor gerado sobre a ferramenta durante o processo. Posteriormente, surgiram os óleos, visando mitigar o atrito do cavaco sobre a ferramenta no tempo de corte e eliminar a oxidação causada pela água (KLOCKE, 2011; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001).

Assim, pode-se perceber as duas principais funções dos FLR, a lubrificação e a refrigeração. Em consequência dessas ações, Devillez et al. (2006) e Kuram, Ozcelik e

Demirbas (2013) afirmam que o FLR é geralmente usado para extração do cavaco, melhoria da precisão de usinagem e do acabamento superficial, extensão da vida da ferramenta, especialmente em condições severas de trabalho, e também, prevenção do superaquecimento entre a ferramenta de corte e o CP.

Por outro lado, o contato prolongado do operador com o FLR pode causar problemas respiratórios e doenças na pele. A eliminação imprópria do FLR resulta em poluição do ar, da água e dos solos. Além disso, os custos de eliminação são maiores do que aqueles relacionados ao trabalho e despesas gerais (SU et al., 2006).

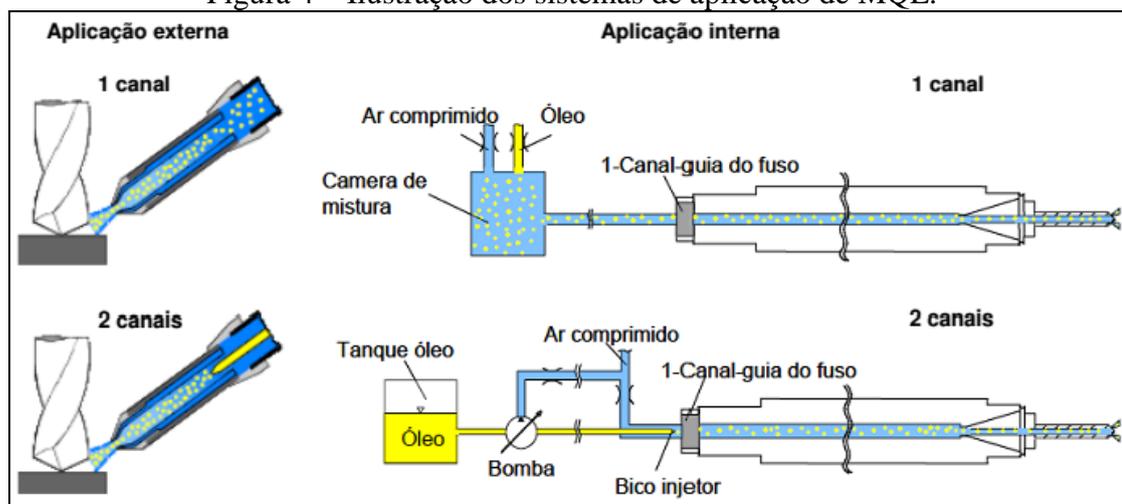
Em vista disso, o foco em lubrificantes renováveis aumentou. Por conseguinte, a indústria tem sido forçada a implementar estratégias para reduzir o uso em suas ações diárias, assim, a usinagem com MQL e a seco começa a ser praticada (DHAR; AHMED; ISLAM, 2007; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

O processo de corte com MQL caracteriza-se por utilizar a menor quantidade possível de óleo, emulsão, água ou ar durante o processo, vaporizados, com ajuste de pressão, diretamente na região do corte (EZUGWU, 2005; KLOCKE, 2011). Quando óleos são utilizados, o efeito lubrificante tem a finalidade de reduzir o atrito e a adesão entre a peça, a ferramenta e o cavaco (KLOCKE, 2011).

O sistema de aplicação de fluido na zona de corte é caracterizado de acordo com o meio transportador. Em uma situação o fluido é atomizado com a presença de ar comprimido em gotículas finas na zona de corte, de outro modo, utiliza-se somente óleo, aplicado por meio de uma bomba que manda pequenas gotas na direção do gume da ferramenta (KLOCKE, 2011). Essa aplicação pode ser feita internamente, por meio de orifícios na ferramenta, ou externamente, contando com um ou dois canais de atomização (ZEILMANN et al., 2009). A Figura 4 mostra os sistemas de aplicação de MQL, interno e externo.

A literatura tem mostrado uma variedade em termos de taxa de vazão para os sistemas de MQL, por exemplo, 50-500 ml/h (DHAR; KAMRUZZAMAN; AHMED, 2006) e 2-300 ml/h (ZHANG; LI; WANG, 2012), já em aplicações industriais a vazão varia entre 10 e 100 ml/h (KAMATA; OBIKAWA, 2007).

Figura 4 – Ilustração dos sistemas de aplicação de MQL.



Fonte: Zeilmann et al. (2009).

Zhang, Li e Wang (2012) compararam o fresamento de Inconel 718 a seco e com o uso de MQL, utilizando óleo vegetal biodegradável e ferramentas revestidas. Os autores afirmam que o uso de MQL melhorou a usinabilidade do material em termos de duração da vida da ferramenta e redução das forças de corte. Por outro lado, Su et al. (2007) afirmam que o MQL é considerado um melhor lubrificante do que refrigerante. Essa baixa capacidade de refrigeração do MQL limita a efetividade durante a usinagem de ligas de níquel, já que a excessiva geração de calor durante esse tipo de processo é o principal problema.

### 2.3.1.1 Fluidos de base vegetal

O FLR deve ser escolhido embasado em alguns fatores, como o material da peça, as condições e operações de usinagem e o material da ferramenta. Para a usinagem do níquel e suas ligas, utiliza-se, na maioria das vezes, emulsões. As ferramentas de metal duro caracterizam-se por aceitar qualquer tipo de FLR, assim é preciso embasar-se em outros critérios para a escolha (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Nesse contexto, percebe-se que um bom FLR não deve somente melhorar as condições de usinagem, mas também, preencher um grande número de requisitos, como: não ser tóxico, não ser prejudicial à saúde do operador, não ser inflamável, não causar nevoeiro e não apresentar alto custo (KURAM; OZCELIK; DEMIRBAS, 2013).

Os óleos de base vegetal, por serem renováveis, menos tóxicos e biodegradáveis, tem substituído aqueles a base de petróleo, que prejudicam a saúde do operador. Ainda assim, já representaram aproximadamente 85% dos FLR utilizados, pois aumentam a qualidade e a

produtividade do processo (SHASHIDHARA; JAYARAM, 2010). O Quadro 1 apresenta as vantagens e desvantagens da utilização do óleo de base vegetal como lubrificante.

Quadro 1 – Vantagens e desvantagens do óleo vegetal.

Vantagens	Desvantagens
Baixo custo de produção Altamente biodegradável Compatível com aditivos Amplas possibilidades de produção Baixa toxicidade Pouco poluente Alta viscosidade Alto ponto de ignição Baixa volatilidade	Baixa estabilidade térmica Estabilidade oxidativa Alto ponto de congelamento Baixa proteção contra corrosão

Fonte: Adaptado de Shashidhara e Jayaram (2010).

Vale lembrar que a utilização do FLR repetidas vezes induz as mudanças químicas. Essas mudanças ocorrem devido aos efeitos externos, como a contaminação pelo cavaco e óleo do cárter. O crescimento das bactérias e fungos se torna perigoso para o ambiente e afeta adversamente o FLR. Assim, gradualmente perde-se a qualidade e torna-se necessário sua eliminação, que impacta negativamente o meio ambiente e é onerosa (DAVIM, 2013).

### 2.3.2 Usinagem a seco

A usinagem a seco consiste em retirar o FLR do processo, desse modo pode apresentar-se como a melhor condição quando se fala em metodologias não agressivas ao meio ambiente. Além disso, o não uso do FLR pode trazer benefícios econômicos para o processo, pois o custo de aquisição do fluido, de utilização, de eliminação e de limpeza é significativo (DEVILLEZ et al., 2007). Ainda, preserva a saúde do operador.

Por outro lado, na maioria das vezes, a usinagem a seco causa altas taxas de desgaste, e conseqüentemente, causa a redução da vida da ferramenta, essa condição agrava-se durante o corte de materiais de difícil usinagem (KLOCKE et al., 2006). Possivelmente, em função disso, a maioria dos estudos focados na usinagem de Inconel 718 foram realizados com o uso de FLR, assim, tem-se uma literatura escassa quando se trata da usinagem deste material em condição a seco (DEVILLEZ et al., 2011).

Percebe-se então, que a eliminação do FLR também envolve a ausência dos seus efeitos positivos. Assim, uma análise detalhada das condições do processo e o conhecimento

da relação entre a ferramenta, a peça e a máquina se torna necessária em busca de manter os bons resultados (DUDZINSKI et al., 2004; VENKATA, 2011). Para operações em ligas de níquel, a remoção suficiente do calor e a anulação da formação de BUE em temperaturas críticas devem ser buscadas. A remoção dos cavacos da zona de corte é outro aspecto importante, ainda, o processo deve preservar a integridade da superfície da peça usinada. Assim, ferramentas com alta dureza a quente, alta refratividade e baixos coeficientes de fricção são requisitadas, para isso, o uso de revestimentos de baixa adesão pode auxiliar (DUDZINSKI et al., 2003).

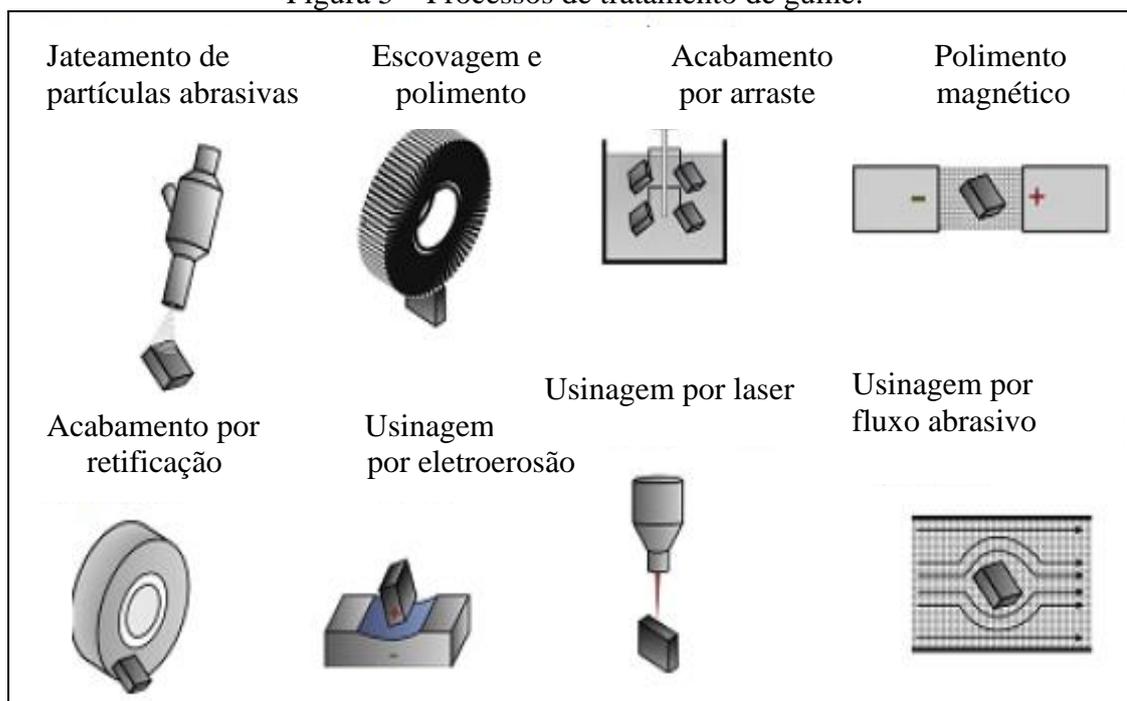
É evidente que ainda há muito para ser analisado até que se consiga ter uma boa parte dos processos de usinagem sem a utilização de FLR. Contudo, devido a grandes pressões internacionais para que a utilização de óleos e a poluição ambiental sejam reduzidas, acredita-se que o número de pesquisas nesse campo será expandido e, assim, a quantidade de FLR utilizado deverá ser diminuído substancialmente (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Assim, é possível afirmar que o objetivo do processo de corte a seco é encontrar ferramentas e revestimentos apropriados, definir melhores geometrias da ferramenta e ajustar os parâmetros e condições de corte, com o intuito de obter integridades superficiais aceitáveis, preservar a vida da ferramenta e alcançar taxas de produtividade atrativas para o meio industrial.

## 2.4 PROCESSOS DE TRATAMENTO DE GUMES

Afim de atender a demanda do mercado atual, que procura por peças de qualidade e confiabilidade, os processos de tratamento de gumes vêm sendo estudados. Rodriguez (2009) afirma que quando o gume se apresenta afiado e sem tratamento, aparecem defeitos como: baixa qualidade superficial; micro rupturas e; rebarbas e falhas que minimizam a resistência mecânica, aumentam a suscetibilidade ao lascamento e ao corte variável. A Figura 5 mostra os principais tratamentos utilizados.

Figura 5 – Processos de tratamento de gume.

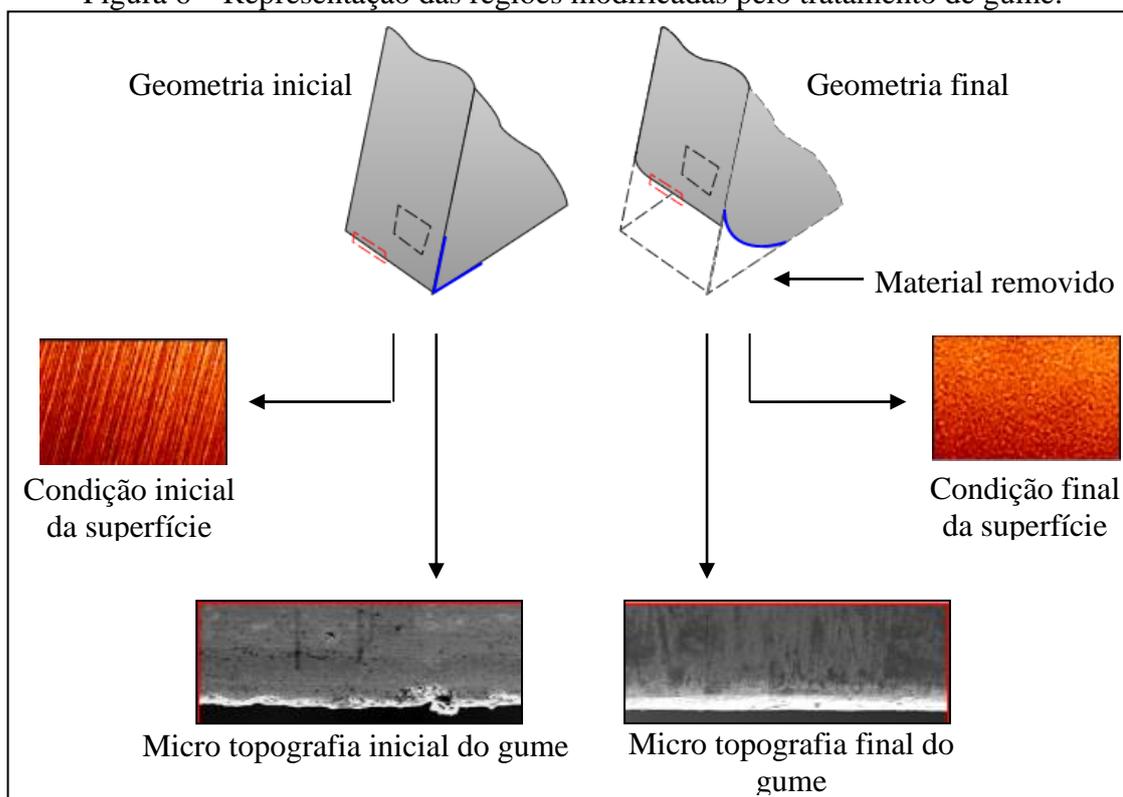


Fonte: Adaptado de Denkena e Biermann (2014).

Em vista disso, o processo de tratamento de gume age na geometria do gume e possibilita alterar a micro topografia, e ainda, a rugosidade e a textura da face e do flanco da ferramenta na cunha de corte (RODRIGUEZ, 2009). Do ponto de vista funcional, um dos propósitos do tratamento de gumes é arredondar e/ou chanfrar a cunha de corte para propiciar uma melhora de estabilidade durante o processo e reduzir possíveis lascamentos no gume (KARPUSCHEWSKI; BYELYAYEV; MAIBORODA, 2009).

Ainda, é possível obter a redução de defeitos no gume, o reforço da cunha de corte, o aumento da vida da ferramenta e a preparação da superfície da ferramenta para a aplicação de revestimentos (RODRIGUEZ, 2009). A Figura 6 mostra o gume antes e depois do processo de tratamento.

Figura 6 – Representação das regiões modificadas pelo tratamento de gume.



Fonte: Rodriguez (2009).

O estudo de Bouzakis et al. (2014) traz a análise da influência de métodos distintos de preparação de gume em diferentes materiais, como: polimento magnético; acabamento por arraste; jateamento de partículas abrasivas; acabamento por laser; usinagem por fluxo abrasivo; polimento com cerdas abrasivas; acabamento por retificação e; acabamento por eletro erosão (EDM). Ao final, os autores perceberam que os tratamentos realizados nas ferramentas impactaram nos resultados, já que apresentaram diferenças consideráveis entre eles. Quanto ao Inconel 718, todos os tratamentos resultaram em melhora significativa, com exceção do jateamento abrasivo. Os autores também indicam que com o aumento do raio do gume de corte, as cargas de corte são drasticamente diminuídas.

Este fato também foi estudado por Denkena, Koehler e Rehe (2012), que expõe o fresamento de superfícies produzidas com menores raios de gumes, e afirmam que estes geram tensões residuais inferiores em relação as ferramentas com maiores raios. Outros autores estudaram os efeitos da geometria do gume da ferramenta durante o processo de corte, como Rodriguez (2009), Zeilmann et al. (2012) e Denkena e Biermann (2014).

Nesse contexto, percebe-se que o gume da ferramenta se mostra de grande influência durante o processo de usinagem, já que a vida da ferramenta pode ser prolongada por meio do tratamento de gume e a qualidade superficial é diretamente afetada pela geometria.

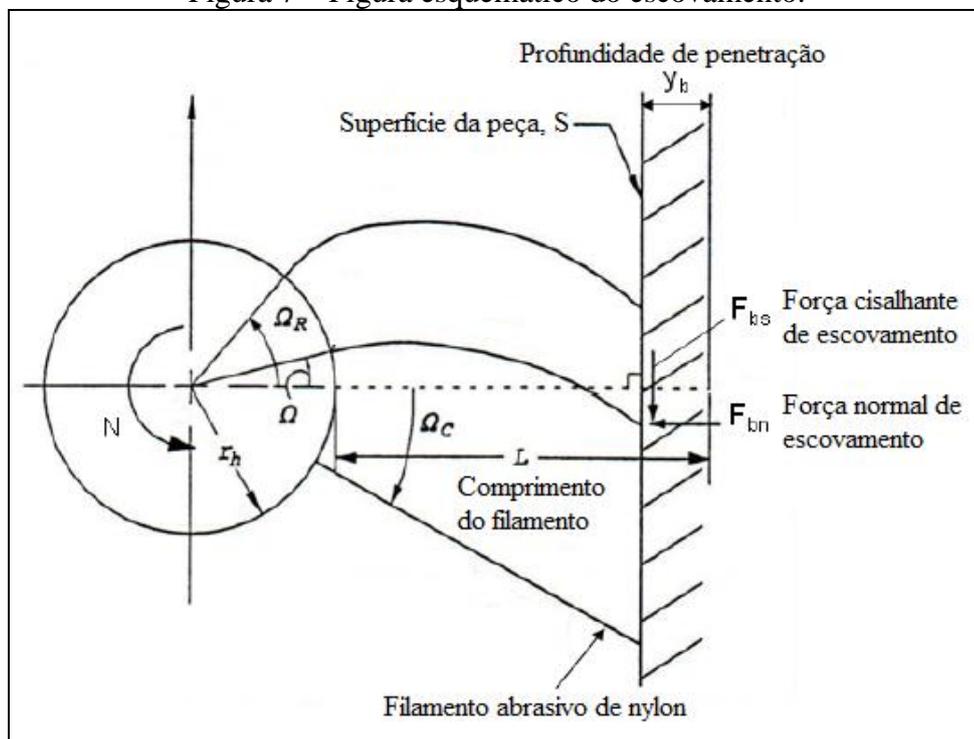
(DENKENA; KOEHLER; REHE, 2012; RODRIGUEZ, 2009). O impacto das cargas mecânicas e altas temperaturas acabam ocasionando o desgaste da ferramenta. Desse modo, a vida da ferramenta é reduzida, implicando em custos como compra e troca de ferramenta.

#### 2.4.1 Escovamento com cerdas abrasivas

O processo de tratamento de gume por escovamento é utilizado quando o foco é o raio do gume e em situações onde deseja-se a melhora do acabamento superficial. O método faz uso de filamentos de *nylon* abrasivos, assim o polimento ocorre conforme o *nylon* é desgastado causando a exposição de novos grãos abrasivos e possibilitando um processo eficiente durante toda a vida da escova que por meio da remoção de pequenas quantidades de material, melhora o acabamento superficial (RODRIGUEZ, 2009).

O autor ainda afirma que, em função da complexa interação entre a escova e a superfície, a mecânica de remoção não é totalmente compreendida. A Figura 7 expõe o princípio do processo de escovamento.

Figura 7 – Figura esquemático do escovamento.



Fonte: Adaptado de Rodriguez (2009).

Juntamente com a escova de *nylon*, Rodriguez (2009) mostra como opções de abrasivos o óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) ou carbetto de silício (SiC), ou, secundamente, o nitreto de boro cúbico (CBN) e o diamante policristalino (PCD).

## 2.5 QUALIDADE SUPERFICIAL

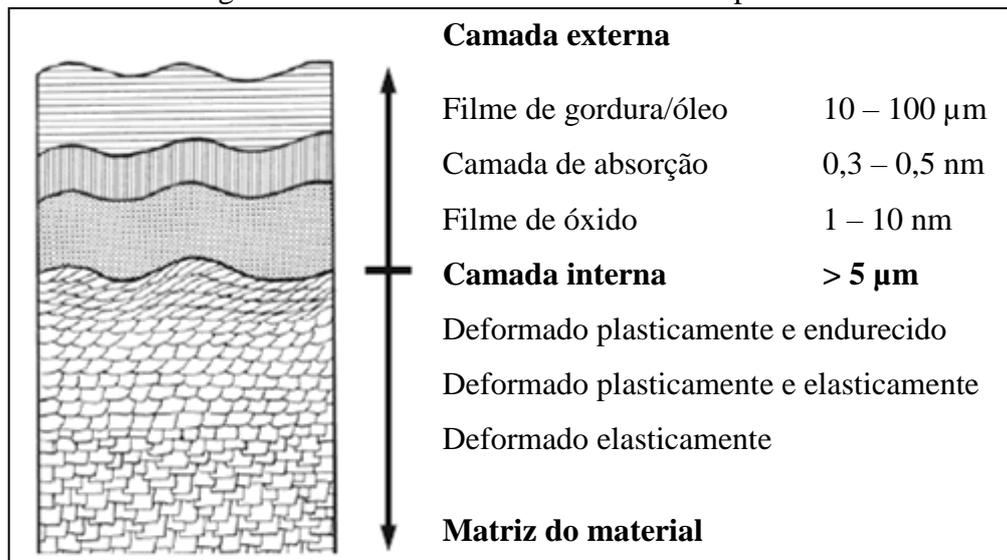
Qualidade superficial pode ser definida como a combinação de características mecânicas, metalúrgicas, topográficas, térmicas e químicas, da superfície de um componente, obtido por um processo de fabricação particular. A qualidade superficial pode estar relacionada com o desempenho durante a aplicação pretendida de um componente fabricado. As características de integridade superficial afetam o desempenho funcional, controlando fenômenos tribológicos em termos de atrito e comportamento de desgaste de corpos em contato, eficiência de lubrificação, corrosão por tensões, crescimento de fissuras por fadiga, entre outros (PERVAIZ et al., 2014).

Sabe-se que a usinagem objetiva gera componentes para o uso em áreas distintas, para isso é importante entregar produtos de qualidade e durabilidade, assim investigar o que ocorre na superfície e na subsuperfície da peça trabalhada é imprescindível. Vale lembrar que a formação da superfície usinada é de difícil compreensão, principalmente quando se fala em ligas de difícil usinagem, pois essa se constitui numa função das características físicas e propriedades mecânicas da superfície do material, e da variação desses elementos durante a usinagem (VASHISTA; PAUL, 2009).

Durante o processo, o CP sofre solicitações mecânicas e térmicas que podem alterar significativamente as características do material. Como resultado tem-se uma superfície com irregularidades geométricas, alterações microestruturais e deformações plásticas na subsuperfície que podem gerar alterações nas propriedades mecânicas do material e tensão residual (WYATT; BERRY, 2006).

Nesse sentido, a Figura 8 mostra as camadas micro superficiais que são modificadas por causa dos fatores externos, incluindo o processo fabril, a ação da temperatura e a formação de óxidos (KLOCKE, 2011).

Figura 8 – Desenho das camadas micro superficiais.



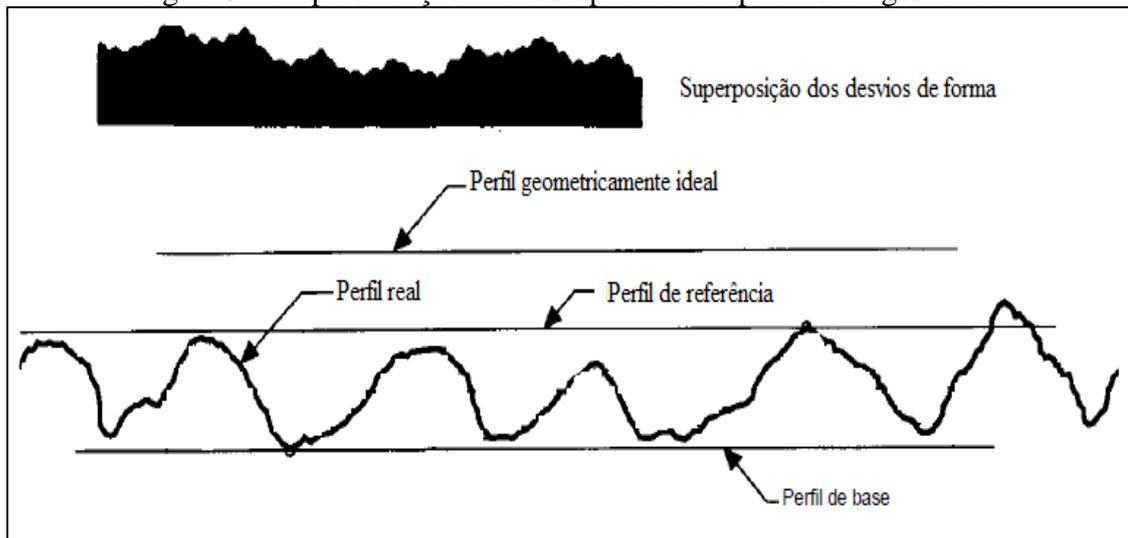
Fonte: Adaptado de Klocke (2011).

Durante a avaliação das deformações plásticas, leva-se em consideração a profundidade de material deformado dessas camadas, a partir da camada limite interna. Essas alterações são avaliadas por meio de seções lixadas e polidas que expõe a microestrutura da subsuperfície, e assim possibilita a avaliação das transformações cristalinas (TOENSHOFF; DENKENA, 2013).

A rugosidade da superfície refere-se a irregularidades de alta frequência na superfície causadas pela interação da microestrutura do material e da ação da ferramenta de corte, juntamente com a natureza repetitiva dos defeitos de superfície (VELDHUIS; DOSBAEVA; YAMAMOTO, 2009).

Desse modo, ao contrário da visão macroscópica que mostra uma superfície mais lisa e próxima do ideal, a visão microscópica revela irregularidades, que são quantificadas com o uso de um rugosímetro. A Figura 9 é uma representação microscópica da rugosidade.

Figura 9 – Representação microscópica de um perfil de rugosidade.



Fonte: Adaptado de Norma DIN 4760.

O perfil geometricamente ideal condiz com a superfície geometricamente ideal. O perfil real é a reprodução mais próxima da superfície real, que é a rugosidade mensurada em uma superfície. A superposição dos desvios de forma, representa em uma única imagem os desvios de forma geralmente encontrados nas superfícies, como: desnivelamento, ondas, ranhuras, estrias (DIN 4760).

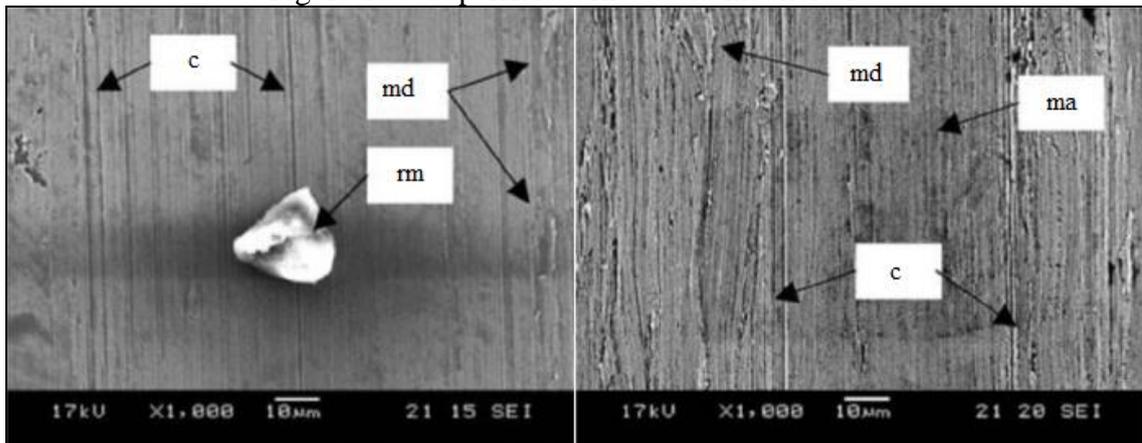
Três fatores principais são observados para afetar a rugosidade da superfície. Esses fatores incluem a formação de BUE, o início do escoamento do cavaco e o equilíbrio do desgaste da ferramenta. Além dos parâmetros de corte, a fricção que ocorre na interface cavaco/ferramenta e ferramenta/peça, também desempenha um papel importante na modificação da rugosidade da superfície. Portanto, as propriedades dos materiais da ferramenta e do CP, juntamente com a possibilidade do uso de FLR, devem ser levadas em consideração. A eficiência do FLR pode ser avaliada para diferentes operações de usinagem, considerando a rugosidade da superfície como uma das principais medidas de saída (THAKUR; GANGOPADHYAY, 2015).

A textura, avaliada de forma qualitativa, geralmente apresenta algumas deformações. As irregularidades apresentadas pelas ligas de níquel são: cavidades (c), resíduos de metal (rm), arranchamentos, manchas, material depositado (md), partículas de carboneto rachadas, marcas de alimentação (ma) e ranhuras. Essas características indesejáveis da superfície usinada são as consequências de altas cargas mecânicas e térmicas e estão expostas na Figura 10 (SHARMAN; HUGHES; RIDGWAY, 2004).

Além das marcas de alimentação, que são defeitos superficiais naturais, cavidades também podem ser formadas, em função do cavaco arrastado durante o processo. Os resíduos

de metal apresentam aproximadamente 1 a 2 mm em altas condições de corte e são deixados na superfície do material, principalmente devido ao cavaco fragmentado. O material depositado na superfície da peça usinada, ocorre em resultado da severa deformação plástica, proveniente do processo de usinagem (SHARMAN; HUGHES; RIDGWAY, 2004).

Figura 10 – Superfície torneada de Inconel 718.



Fonte: Arunachalam, Mannan e Spowage (2004).

O fenômeno de endurecimento pode ser facilmente mensurado por meio de medições progressivas de microdureza em várias profundidades abaixo da superfície usinada. As altas temperaturas de corte, altas tensões e pressão gerada durante o trabalho realizado com ligas de níquel em busca de um componente, resultam em encruamento da superfície, devido a este fenômeno, valores de dureza maiores do que os do material base podem ser encontrados (THAKUR; GANGOPADHYAY, 2015).

## 2.6 DESGASTE NO FRESAMENTO

### 2.6.1 Mecanismos e tipos de desgaste

Desgaste é o desprendimento de partículas da ferramenta por ação do processo de corte (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013). Geralmente a literatura aborda os mecanismos de desgaste dividindo-os em:

- a) abrasão: É um dano na superfície que aparece devido ao atrito de qualquer aspereza ou inclusões duras presas na interface com a superfície, este fenômeno causa o desgaste de flanco (VB) e o de cratera. Stemmer (2008) corrobora que este tipo de desgaste é o arrancamento de finas partículas de material que ocorre

devido à fricção entre a peça e a ferramenta submetidas a altas temperaturas, assim, o desgaste aumenta de acordo com o número de inclusões e partículas duras no material. Entende-se então, que a resistência a abrasão depende da dureza do material da ferramenta, assim, quanto maior a dureza a quente da ferramenta, maior sua resistência ao desgaste abrasivo. As partículas arrancadas do substrato da ferramenta e partículas duras de carboneto abrasivo que contém nas ligas de níquel são consideradas responsáveis pelo desgaste por abrasão. Além disso, a rebarba encruada na superfície também foi considerada agente causador desse tipo de desgaste, que gera sulcos paralelos na face e no flanco e entalhe na profundidade de corte (AKHTAR et al., 2014).

- b) adesão: A aderência entre o material da peça e a aridez da ferramenta ocorre não somente por efeito da ação das elevadas temperaturas e pressões existentes próximo ao gume, mas também, se deve ao fato de que a superfície inferior do cavaco, recém arrancada, é limpa, sem camadas protetoras de óxidos, e assim, quimicamente muito ativa (STEMMER, 2008; KLOCKE, 2011). O BUE que ocorre em baixas velocidades de corte, comprova a formação das aderências, constituído por partículas que se unem a face da ferramenta e apresentam um elevado grau de deformação a frio, ou seja, estão encruadas, duras e resistentes. Elas impedem o deslizamento do cavaco e agem como aresta de corte. O aumento do atrito causa um aumento progressivo da força de deslizamento do cavaco, até que as partículas soldadas sejam arrancadas (STEMMER, 2008; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013; KLOCKE, 2011). O arrancamento ocorre por separação da solda ou por cisalhamento, e, em geral, causa desgaste por abrasão na ferramenta. A aresta postiça que se rompe, escoia juntamente com o cavaco, e parte dela adere a peça, prejudicando assim, o acabamento superficial (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013; KLOCKE, 2011).
- c) difusão: É a transferência dos átomos de um material para o outro, decorrente das temperaturas de corte muito altas, devido ao contato ferramenta/cavaco e ferramenta/peça, providenciando um ambiente específico para isso. Diniz, Marcondes e Coppini (2013) explicam que este fenômeno ocorre devido a temperatura, a duração do contato e a afinidade físico/química dos metais envolvidos na zona de fluxo, e acrescentam que em função da difusão ocorrer em níveis atômicos o local desgastado é liso. O Carbono (C) presente nas ferramentas de metal duro pode determinar a ocorrência de desgaste por difusão. Klocke

(2011) mostra que, no caso do metal duro, as reações químicas desencadeiam a formação de carbonetos complexos ( $\text{FeWC}_{26}$ ) que são pouco resistentes e assim removidos por abrasão.

Esse tipo de desgaste é responsável por grande parte das falhas nas ferramentas de corte durante a usinagem das ligas de níquel. Contudo, o desgaste por difusão é dominante somente em temperaturas de corte muito altas. Ferramentas de metal duro tem afinidade por elementos como níquel (Ni) e cromo (Cr), presentes no CP, no entanto, quando submetidas a baixas velocidades de corte, as temperaturas geradas são insuficientes para que ocorra a difusão (AKHTAR et al., 2014).

- d) oxidação: É causada pela presença de ar e água juntamente com as altas temperaturas na maioria dos metais. Assim, a maioria dos fluídos contém agentes anti-oxidantes, no entanto, Diniz, Marcondes e Coppini (2013) lembram que quando o fluído não é conservado corretamente na máquina, ele pode se tornar ácido e provocar corrosão e/ou oxidação na ferramenta. Os autores acrescentam que este tipo de desgaste ocorre principalmente nas extremidades do contato cavaco/ferramenta, local com passagem de ar. Contudo, esse tipo de desgaste não é amplamente apontado pela literatura que aborda a usinagem das ligas de níquel, por não ser o principal responsável pelo fim da vida das ferramentas utilizadas nesse processo.

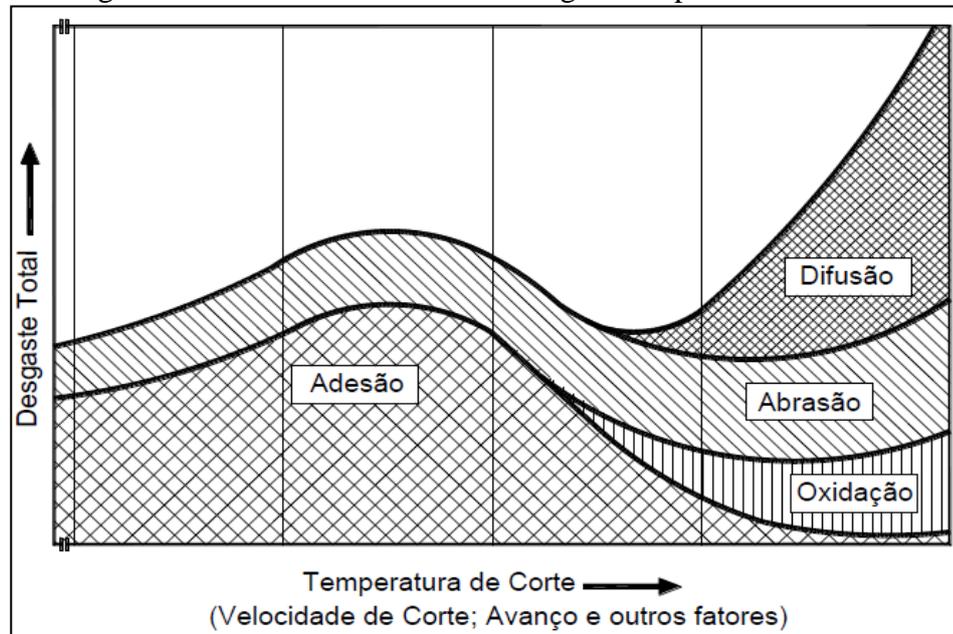
Sabe-se que é viável identificar e analisar os mecanismos de desgaste, contudo, por ocorrerem concomitantemente, a diferenciação e a quantificação de cada um desses fenômenos aproxima-se do impossível (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013; KLOCKE, 2011).

Com o intuito de obter o máximo desempenho da ferramenta, um aspecto importante é reduzir o desgaste e, conseqüentemente, prolongar a vida da ferramenta. Desse modo, é necessário avaliar diversos fatores, como: revestimento da ferramenta, composição da ferramenta, geometria da ferramenta, otimização dos parâmetros de corte e resfriamento e lubrificação do processo. A Figura 11 relaciona os mecanismos de desgaste com a temperatura de corte.

Mecanismos de desgaste ativados mecanicamente, como a abrasão e a adesão, são os mecanismos de desgaste mais citados durante a usinagem das ligas de níquel. Eles ocorrem em baixas e altas temperaturas de corte e dependem, principalmente, das condições de lubrificação, da carga de contato e da afinidade química entre a ferramenta e a peça. Nas velocidades de corte mais baixas, somente esses mecanismos ocorrem, no entanto, se a

velocidade de corte e, por conseguinte, a temperatura elevarem, os desgastes ativados termicamente tornam-se significativos também, desse modo, a taxa de desgaste aumenta.

Figura 11 – Gráfico das causas do desgaste no processo de corte.



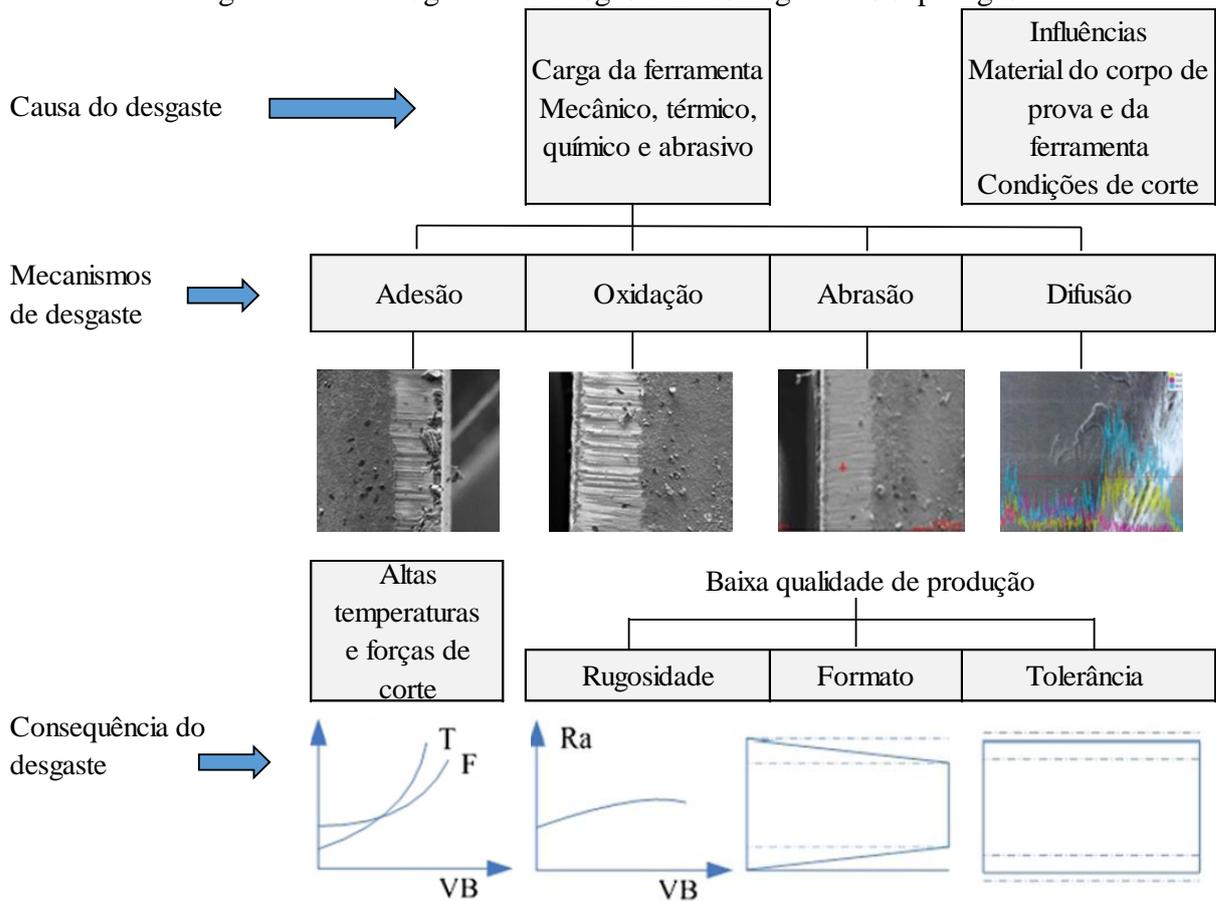
Fonte: Klocke (2011).

Geralmente é complexo identificar um único mecanismo responsável pelo desgaste total da ferramenta, na maioria das vezes esses quatro mecanismos de desgaste agem concomitantemente, embora a adesão seja o mecanismo mais reportado durante a usinagem das ligas de níquel (LI; ZENG; CHEN, 2006). A adesão do material do CP na ferramenta causa BUE, que produz o arranchamento de pequenas partículas da ferramenta, prejudicando a vida da ferramenta e o acabamento superficial (KRAIN; SHARMAN; RIDGWAY, 2007).

Entre todos os parâmetros de corte, a velocidade de corte é o que mais influência no desgaste durante a usinagem das ligas de níquel. Cada tipo de ferramenta apresenta uma faixa de velocidade indicada. As ferramentas de metal duro não revestidas, geralmente alcançam o melhor desempenho quando utilizadas na faixa de 20 a 50 m/min, já as ferramentas revestidas apresentaram melhor desempenho na faixa de 40 a 90 m/min (AKHTAR, 2014).

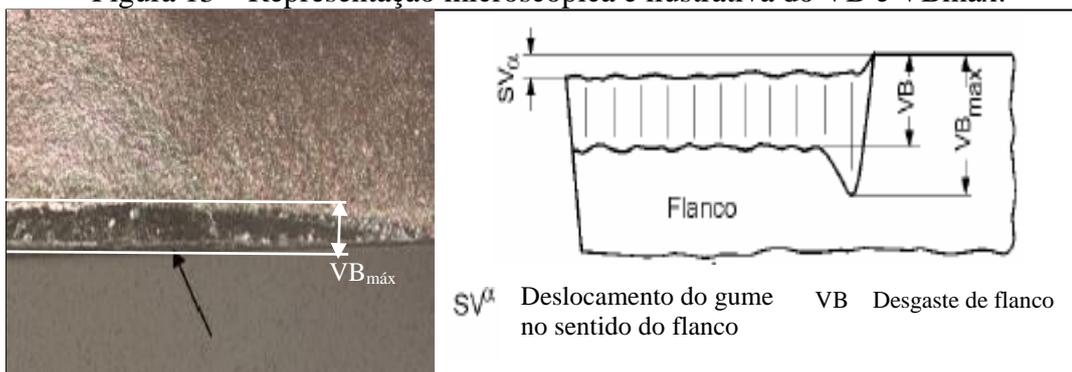
A Figura 12 sumariza as causas, os tipos e as consequências do desgaste durante a usinagem das ligas de níquel. De forma ilustrativa é possível perceber qual tipo de falha cada mecanismo de desgaste ocasiona na ferramenta, e também, expõe as consequências do desgaste para o processo como um todo.

Figura 12 – Fluxograma do desgaste na usinagem das superligas.



Fonte: Adaptado de Grzesik (2001).

Entre as grandezas medidas no desgaste, a mais comum é o valor médio do VB e o seu valor máximo ( $VB_{máx}$ ). Esse tipo de desgaste ocorre devido a abrasão, causada por carbonetos presentes nas ligas de níquel e pelo aumento da velocidade de corte. A Figura 13 mostra o VB causado por abrasão, durante o fresamento de uma peça de Inconel 718 e uma ilustração desse tipo de desgaste.

Figura 13 – Representação microscópica e ilustrativa do VB e  $VB_{máx}$ .

Fonte: Kasim et al. (2013); Adaptado de Klocke (2011).

Por modificar o gume de corte, o VB frequentemente compromete os valores dimensionais e prejudica a qualidade superficial da peça usinada (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001).

### **2.6.2 Comportamento de desgaste e vida da ferramenta**

A vida da ferramenta é o tempo de trabalho efetivo (produzindo cavaco) até perder sua capacidade de corte, dentro de um preceito antecipadamente definido. Esta é medida pelo tempo de corte executado pela ferramenta, inicia-se no primeiro corte até o momento no qual o utensílio não é mais útil em função de um critério de vida especificado ou do colapso da ferramenta.

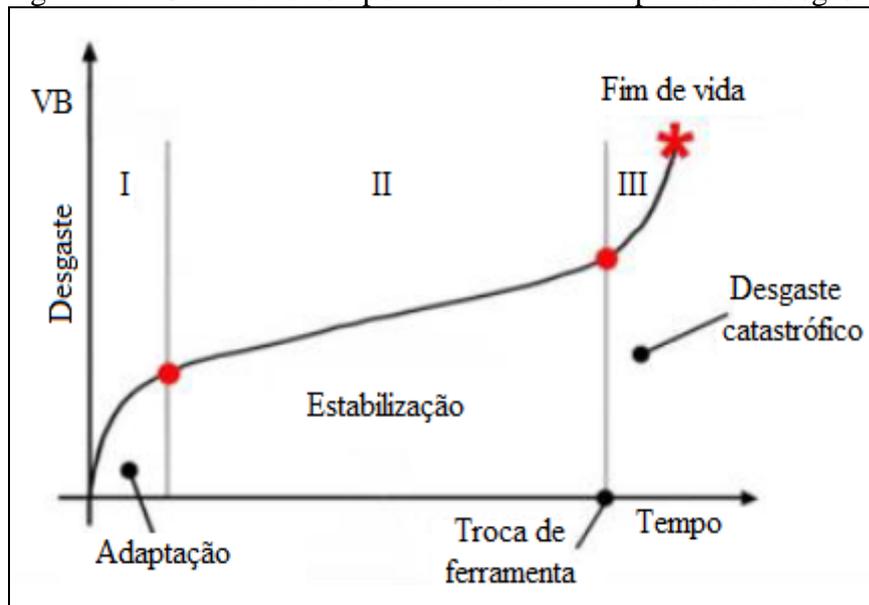
Segundo a norma DIN6583, o comportamento da vida da ferramenta é a habilidade, da peça e da ferramenta, de resistir ao processo de corte. Isto é influenciado pela durabilidade da aresta de corte da ferramenta, pela usinabilidade do CP e por condições de vida da ferramenta.

As altas solicitações térmicas e mecânicas acontecidas na ferramenta proporcionam a ação de mecanismos de desgaste e assim, danificam a ferramenta (TEIXEIRA, 2001). Os mecanismos de desgaste, em geral, agem concomitantemente de modo que, tanto sua causa como seu efeito improvavelmente pode ser diferenciada entre si (KÖNIG; KLOCKE, 2002).

Para determinar o fim de vida de uma ferramenta, alguns critérios são considerados, como: especificação de valores de término para os desgastes de VB e  $VB_{m\acute{a}x}$ , tempo efetivo de trabalho, número de peças produzidas, percurso de corte e rugosidade da peça (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001).

Em condições apropriadas de corte, as ferramentas geralmente seguem um comportamento de desgaste semelhante, como mostrado na Figura 14, onde o desgaste inicia de forma acelerada, durante a adaptação do gume ao processo, em seguida, o desgaste aumenta de maneira progressiva, até alcançar o final da vida da ferramenta e apresentar novamente um aumento brusco (MACHADO et al., 2009).

Figura 14 – Gráfico do comportamento da curva padrão de desgaste.



Fonte: Adaptado de Machado et al. (2009).

Uma característica do processo de fresamento que influencia no aumento da taxa de desgaste das ferramentas é o corte intermitente, pois causa variação de carga térmica e mecânica. Isso torna as ferramentas mais propensas a apresentar trincas térmicas, em função das tensões causadas pela variação de temperatura, já a variação das cargas mecânicas pode acarretar trincas devido a fadiga (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2011).

Ezugwu, Wang e Machado (1999) listaram as principais causas que levam ao desgaste e reduzem a vida das ferramentas durante a usinagem das ligas de níquel, são elas:

- a) presença de carbonetos na composição das ligas que causam alto desgaste abrasivo nas ferramentas de corte;
- b) ocorrência de reações químicas em altas temperaturas de corte que levam ao desgaste químico;
- c) presença de altas temperaturas que ocasionam a difusão entre o material da peça e a ferramenta de corte;
- d) formação de BUE;
- e) produção de cavaco contínuo e endurecido, de difícil controle, contribuindo para a degradação da ferramenta de corte e para desgaste de cratera; e
- f) baixa difusão térmica, causando altas temperaturas que resulta em elevadas tensões térmicas tanto na ferramenta quanto no CP.

Deste modo, para aumentar a vida da ferramenta de corte, as condições e os parâmetros de usinagem são ajustados, visando aproximar-se do ponto ótimo, já que afetam

diretamente a ferramenta e a peça. Como discutido anteriormente, o Inconel 718 é um material de baixíssima usinabilidade, assim apresenta particularidades e exige atenção em torno da escolha dos parâmetros e condições que envolvem todo o processo de usinagem para que resultados satisfatórios sejam alcançados.

Arumugam, Malshe e Batzer (2006) investigaram o desempenho de ferramentas polidas de metal duro revestidas em comparação com as ferramentas revestidas em estado original durante o torneamento a seco de uma liga de alumínio. Os autores afirmam que o polimento reduziu três componentes das forças de corte, tangencial, radial e axial e assim mitigou o desgaste da ferramenta significativamente ( $\sim 150 \mu\text{m}$ ). Por outro lado, em maiores taxas de avanço, o desgaste se mostrou mais aparente nas ferramentas polidas, devido ao aumento das forças de corte e ao enfraquecimento da integridade do revestimento.

Malshe et al. (1998) mostram em seu estudo que ferramentas revestidas por processo químico a vapor (CVD) podem atingir mais de 3,5 minutos de vida durante a usinagem de ligas de alumínio quando utilizadas de forma original ou polida. Em contrapartida, ambas mostraram falha precoce em função do desprendimento do revestimento. As razões para essas falhas foram atribuídas principalmente a ocorrência de BUE e a baixa adesão do revestimento ao substrato da ferramenta. Assim, entende-se que as ferramentas revestidas necessitam de uma forte aderência entre o revestimento e a ferramenta para suportar as altas forças de corte geradas por processos de ligas de baixa usinabilidade.

Li et al. (2007) usou diferentes insertos de metal duro revestidos (PVD e CVD) e insertos cerâmicos nitreto de alumínio e silício (SiAlON) para usinar Inconel 718. Eles relatam que o principal tipo de desgaste das ferramentas revestidas de metal duro foi adesão. Ocorreu também a descamação do revestimento e a quebra do inserto. Por fim, os autores mostram desgaste de entalhe, que não foi severo durante os testes.

## 2.7 ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA)

A ANOVA é a metodologia que analisa a diferença entre as médias e, assim, avalia a relação e a significância de diferentes fatores (RIBEIRO; CATEN, 2011). Ou seja, é uma análise estatística que produz interações entre diferentes níveis e fatores, para aproximar-se de um ponto ótimo em um experimento.

Ribeiro e Caten (2011) estabelecem algumas inferências para que se possa aplicar esta técnica, como os fatores controláveis que nos experimentos podem ser de caráter quantitativos ou qualitativos, contudo a variável resposta deve ser de quantitativa, e ainda:

- a) os dados devem estar em uma distribuição normal;
- b) aleatoriedade dos erros;
- c) atributo dos efeitos; e
- d) os valores observados não podem ter correlação.

Para elaboração da ANOVA, adotam-se diferentes hipóteses, a hipótese zero ( $H_0$ ) é o objetivo do experimento, ou seja, aceita-se que não há variação entre as médias dos valores medidos, em contraposição, a hipótese ( $H_1$ ) assume que há variância entre as médias, ou seja, esta é o oposto de  $H_0$  (RIBEIRO; CATEN, 2011).

Após a manipulação dos dados e a aplicação da modelagem matemática, que pode ocorrer manualmente e/ou com o uso do *Software SPSS*, avalia-se os resultados com a utilização da tabela de *Fisher*, a partir do teste F. Dessa forma, se o F calculado for maior que o F tabelado rejeita-se  $H_0$ , ou seja, aceita-se  $H_1$ . Ainda, é possível considerar que quando o valor encontrado para P for menor que o valor de  $\alpha$ , há variância entre as médias do experimento, isto é, aceita-se  $H_1$  (RIBEIRO; CATEN, 2011).

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 MATERIAL

Tendo em vista a ampla aplicação das superligas, a escolha do material ocorreu devido a necessidade de aprimorar o processo caracterizado por ser de difícil usinagem. O CP é uma peça cilíndrica de Inconel 718 endurecida por precipitação, com propriedades físicas e mecânicas mostradas na Tabela 3. As informações aqui mencionadas são provenientes do certificado do material, fornecido pela empresa *Weatherford*.

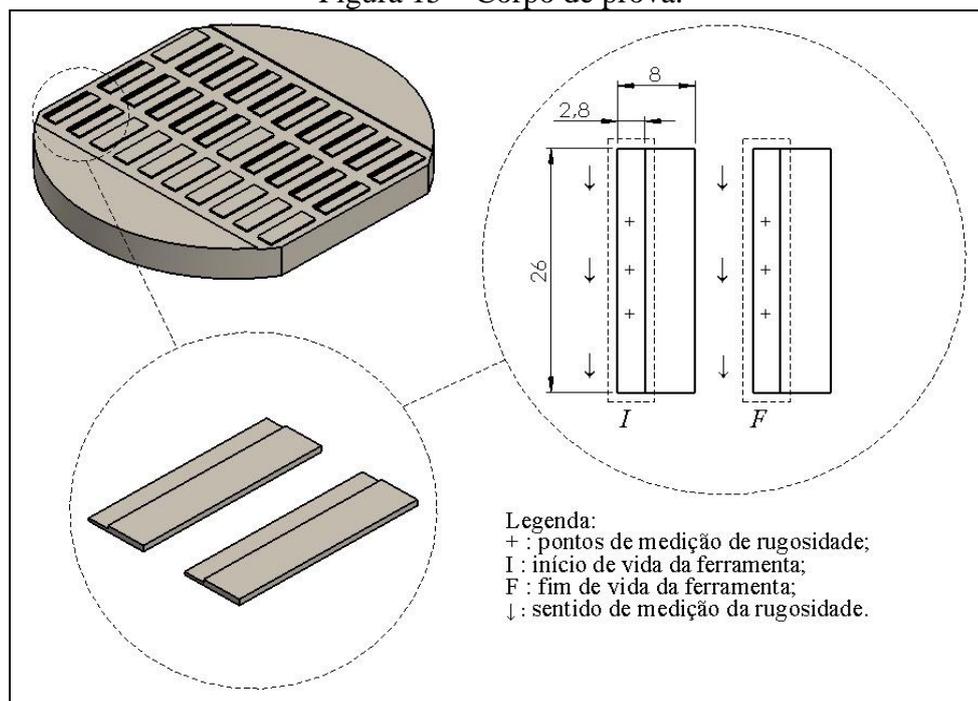
Tabela 1 – Propriedades mecânicas e físicas dos corpos de prova de Inconel 718.

Massa específica	Tensão de ruptura	Tensão de escoamento	Dureza	Alogamento	Condutividade térmica
8,19 g/cm <sup>3</sup>	1264 MPa	959 MPa	437 HV	35%	11,4 W/mK

Fonte: Weatherford Ind. e Com. Ltda.

Visando o maior aproveitamento do material e a manutenção do contato de corte, o CP foi dividido em dois cilindros de Inconel 718. Uma parte utilizada para o desgaste da ferramenta, e a outra para avaliação da qualidade superficial. A Figura 15 ilustra o layout dos CP.

Figura 15 – Corpo de prova.

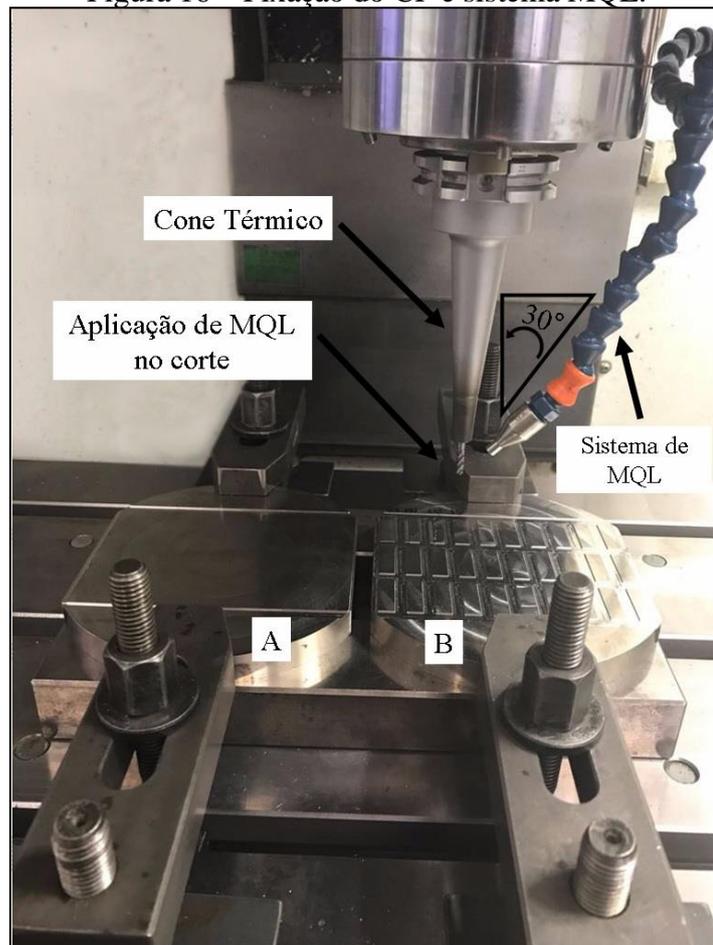


Fonte: O autor (2017).

O CP para desbaste consiste em uma peça planejada para a usinagem de trilhas de 90 mm de comprimento e 0,4 mm de largura, com o intuito de promover o desgaste da ferramenta até o final de vida.

No CP para avaliação da qualidade superficial foram usinados 30 ressaltos em formato de retângulo que atuam como CP reduzidos, com 26 mm de comprimento e 8 mm de largura. Foi estipulado um espaçamento de 6 mm entre eles para permitir a entrada da ferramenta e preservar o contato de corte. Os retângulos são usinados de modo a permitir a avaliação da qualidade superficial no início e no final da vida de cada ferramenta. Assim, foram usinadas sete trilhas, totalizando 182 mm de comprimento usinado em um retângulo antes de iniciar o processo de desgaste da ferramenta, e, após o final da vida da ferramenta, repete-se o processo no retângulo seguinte. A Figura 16 mostra a fixação dos CP.

Figura 16 – Fixação do CP e sistema MQL.

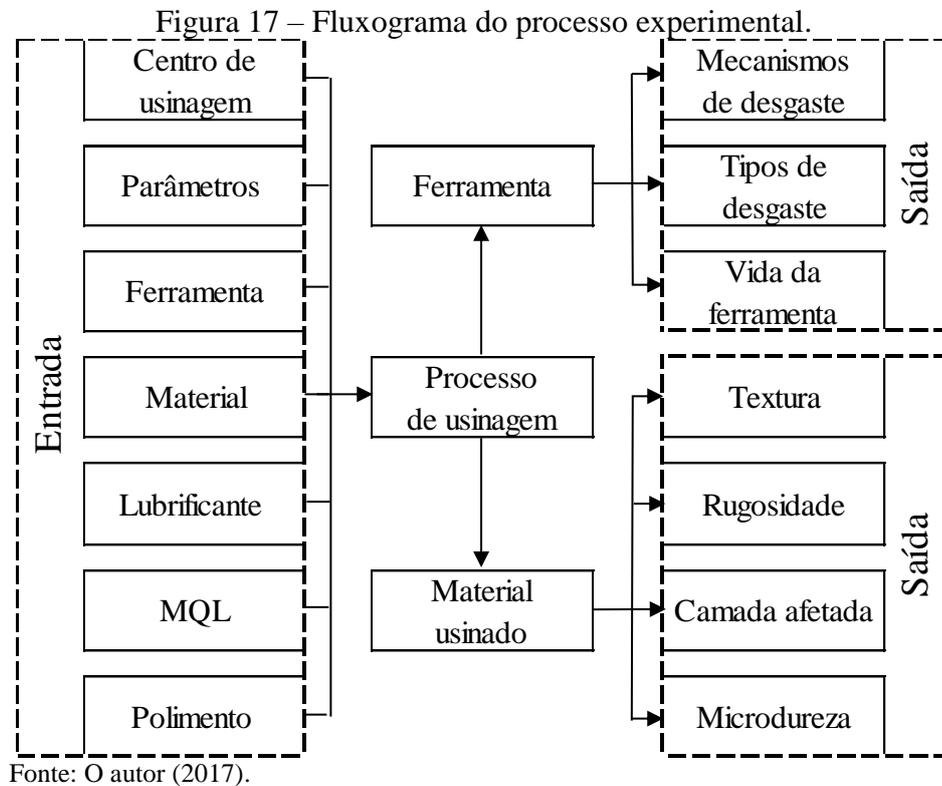


Fonte: O autor (2017).

Os CP foram fixados paralelamente na máquina utilizada com o uso de uma morsa, com o intuito de garantir a posição durante todo o fresamento e reduzir as vibrações do processo.

### 3.2 DETALHAMENTO EXPERIMENTAL

O plano desenvolvido e mostrado pela Figura 17, compreende a avaliação da qualidade superficial do CP, dos mecanismos e tipos de desgaste e da vida da ferramenta, após o fresamento de Inconel 718.



Em busca de aumentar a confiabilidade dos experimentos, foram realizados pré-testes, e para os testes, uma réplica e uma tréplica em cada condição. A fim de obter a melhor configuração e otimizar o processo, realizou-se o Planejamento Experimental (DOE), conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Planejamento experimental (DOE).

Nº Teste	Ferramenta	Condição	Tratamento
1	11	Seco	Original
2	3	Seco	Original
3	4	Seco	Original
4	1	MQL	Original
5	5	MQL	Original
6	6	MQL	Original
7	8	Seco	Polida
8	9	Seco	Polida
9	10	Seco	Polida
10	13	MQL	Polida
11	14	MQL	Polida
12	15	MQL	Polida

Fonte: O autor (2017).

A ANOVA com um nível de confiança de 95% para expressar a análise dos resultados contou com o uso do *software IBM® SPSS* para elaboração dos gráficos e cálculo dos resultados. A análise estatística apurou a significância dos fatores em relação a vida da ferramenta, a rugosidade do CP e camada afetada do CP. As hipóteses estipuladas são apresentadas no Quadro 2.

Quadro 2 – Hipóteses para a realização da ANOVA.

Hipóteses para os valores de vida da ferramenta
H <sub>0</sub> O tratamento do gume não influencia na vida da ferramenta.
H <sub>1</sub> O tratamento do gume influencia na vida da ferramenta.
H <sub>0</sub> A condição de usinagem não influencia na vida da ferramenta.
H <sub>1</sub> A condição de usinagem influencia na vida da ferramenta.
H <sub>0</sub> A interação entre o tratamento e a condição não influenciam na vida da ferramenta.
H <sub>1</sub> A interação entre o tratamento e a condição influenciam na vida da ferramenta.
Hipóteses para os valores de rugosidade
H <sub>0</sub> A posição de usinagem (inicial e final) não influencia na rugosidade do CP.
H <sub>1</sub> A posição de usinagem (inicial e final) influencia na rugosidade do CP.
H <sub>0</sub> A condição de usinagem não influencia na rugosidade do CP.
H <sub>1</sub> A condição de usinagem influencia na rugosidade do CP.
H <sub>0</sub> O tratamento do gume não influencia na rugosidade do CP.
H <sub>1</sub> O tratamento do gume influencia na rugosidade do CP.
H <sub>0</sub> A interação entre a posição e a condição não influenciam na rugosidade do CP.
H <sub>1</sub> A interação entre a posição e a condição influenciam na rugosidade do CP.
H <sub>0</sub> A interação entre a posição e o tratamento não influenciam na rugosidade do CP.
H <sub>1</sub> A interação entre a posição e o tratamento influenciam na rugosidade do CP.
H <sub>0</sub> A interação entre o tratamento e a condição não influenciam na rugosidade do CP.
H <sub>1</sub> A interação entre o tratamento e a condição influenciam na rugosidade do CP.
H <sub>0</sub> A interação entre o tratamento, a condição e a posição não influenciam na rugosidade do CP.

(continua)

(conclusão)

H <sub>1</sub>	A interação entre o tratamento, a condição e a posição influenciam na rugosidade do CP.
Hipóteses para os valores de camada afetada	
H <sub>0</sub>	O tratamento do gume não influencia na dureza do CP.
H <sub>1</sub>	O tratamento do gume influencia na dureza do CP.
H <sub>0</sub>	A condição de usinagem não influencia na dureza do CP.
H <sub>1</sub>	A condição de usinagem influencia na dureza do CP.
H <sub>0</sub>	A interação entre o tratamento e a condição não influenciam na dureza do CP.
H <sub>1</sub>	A interação entre o tratamento e a condição influenciam na dureza do CP.

Fonte: O autor (2017).

A qualidade superficial, que compreende os dados de saída em relação ao material usinado, foi avaliada de acordo com o mostrado no Quadro 3. Os dados de saída em relação a ferramenta, que são os mecanismos e tipos de desgaste e o tempo de vida da ferramenta em cada condição de usinagem, foram avaliados em estereoscópio trinocular a cada 180 mm usinados. Esse procedimento foi embasado no critério de final de vida adotado ( $VB_{máx}$  de 0,1 mm e/ou formação de lascamentos).

Quadro 3 – Análises e métodos.

Análises	Métodos de análise
Textura	Observação qualitativa em estereoscópio trinocular
Rugosidade	Medição da rugosidade em rugosímetro ( $R_a$ , $R_z$ e $R_{máx}$ )
Camada afetada	Observação metalográfica da deformação plástica ( $Al_a$ , $Al_z$ e $Al_y$ )
Microdureza	Medição da microdureza por microindentação

Fonte: O autor (2017).

A investigação da textura do CP realizou-se com o objetivo de analisar as marcas de passagem da ferramenta, verificar a existência de material aderido, em suma, perceber possíveis modificações na estrutura da superfície da peça.

As medidas de rugosidade ocorreram de forma longitudinal ao avanço, na parte central dos corpos de prova após o final da vida da ferramenta em todas as condições. Foi utilizado um apalpador mecânico que percorre a superfície de amostragem, e assim, registra o perfil da superfície. Para aumentar a confiabilidade dos resultados, todas as medidas foram repetidas três vezes. Os parâmetros medidos foram  $R_z$ , que corresponde à média aritmética dos cinco valores de rugosidade parcial,  $R_y$  ou  $R_{máx}$ , que corresponde à distância vertical entre o pico mais alto e vale mais profundo e  $R_a$ , que é a média aritmética dos valores absolutos dos afastamentos entre o perfil real e o perfil médio, dentro da faixa de medição de rugosidade.

A avaliação das deformações plásticas do material ocorreu conforme as posições definidas anteriormente para a rugosidade. Os corpos de prova foram seccionados transversalmente ao sentido de avanço, por eletro erosão a fio, e após, foram aplicadas as técnicas metalográficas. A amostra de cada seção foi embutida, recebeu polimento e um posterior ataque eletrolítico com solução de Nital 2% para revelar a sua microestrutura. Foram então capturadas imagens da estrutura do material, com aumento de 200x, 500x e 1000x para posterior medição das deformações plásticas, por meio do *software Imagine*. Os parâmetros medidos foram,  $Al_a$ , que consiste em uma profundidade média de deformação,  $Al_z$ , que é uma média dos cinco maiores picos de profundidade, e  $Al_y$ , que é o maior pico de profundidade.

Em conjunto com a avaliação metalográfica, foi medida a dureza por microindentação. A dureza foi verificada conforme a norma NBR NM ISO 6507-1, respeitando a distância de 20  $\mu\text{m}$  da borda para a primeira medição, as demais medições foram realizadas com distância de 10  $\mu\text{m}$  entre si, até obter-se um perfil homogêneo e de acordo com a dureza do material base. A carga utilizada na indentação foi de 0,1 kgf.

### 3.3 PARÂMETROS DE CORTE

Os parâmetros de corte mostrados pela Tabela 3 foram fixados para todo o experimento, definidos com base no catálogo do fabricante e em uma revisão bibliográfica que uniu dados provenientes de publicações como: Klocke (2011), Zhang, Li e Wang (2012), Jawaid, Koksai e Sharif (2011) e Diniz, Marcondes e Coppini (2013).

Tabela 3 – Parâmetros de corte.

Profundidade axial ( $a_p$ )	0,4 mm
Profundidade lateral ( $a_e$ )	0,4 mm
Avanço por gume ( $f_z$ )	0,009 mm/dente

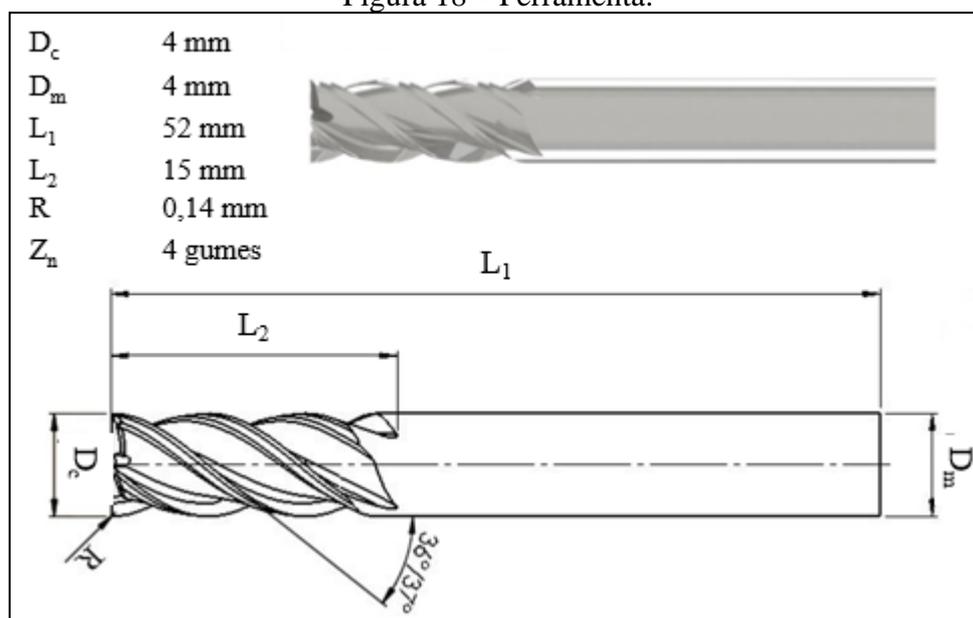
Fonte: O autor (2017).

A determinação da velocidade de corte contou também com os dados extraídos dos pré-testes, apresentados no item 3.6, assim foi definido para esse parâmetro o valor de 40 m/min no decorrer de todo o procedimento experimental.

### 3.4 FERRAMENTAS

As fresas utilizadas para os testes são inteiriças de metal duro, devido sua grande aplicação industrial. A Figura 18 mostra a ferramenta em estado inicial.

Figura 18 – Ferramenta.



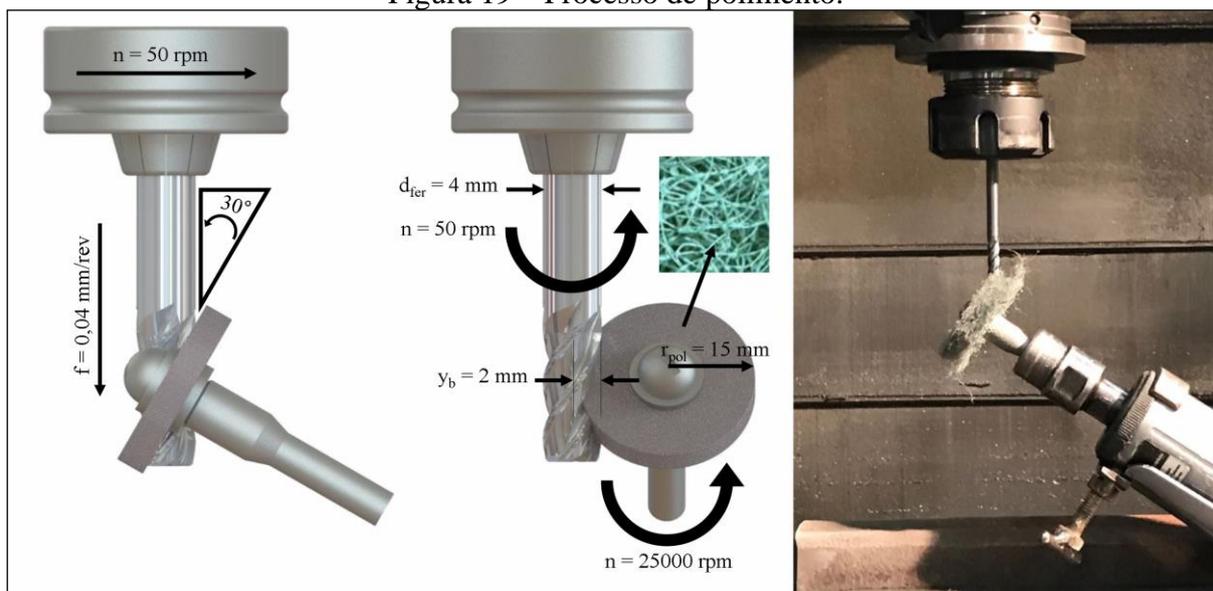
Fonte: O autor (2017).

O metal duro submicron com classe K44UF possui uma dureza de 1680 HV30 e 12% de monóxido de carbono (Co). O revestimento *Alnova* à base de nitreto de cromo alumínio (AlCrN) é do fornecedor *Balzars*. As ferramentas utilizadas têm 4 mm de diâmetro e 4 gumes. A geometria *BFT Andraf* é específica para materiais endurecidos resistentes ao calor, com divisão desigual e ângulo da hélice entre 36° e 37°.

#### 3.4.1 Tratamento de gume

O polimento foi realizado embasado em uma técnica anteriormente desenvolvida pelo Grupo de Usinagem (GUS) da Universidade de Caxias do Sul (UCS). O processo utiliza uma esponja circular de 15 mm de raio e cerdas abrasivas de *nylon*. Fixada a uma mini retífica manual e pneumática, da marca *Campbell Hausfeld*, rotaciona a uma velocidade de 25000 rpm e opera com pressão de 4 bar. A mini retífica foi fixada à mesa de uma fresadora mecânica Romi, modelo F-20, com a ajuda de um suporte e de uma morsa, como mostra a Figura 19.

Figura 19 – Processo de polimento.



Fonte: O autor (2017).

A ferramenta foi fixada a pinça da fresadora, com velocidade de rotação de 50 rpm, no sentido contrário ao corte da ferramenta e avanço ( $f$ ) de 0,04 mm. A profundidade de contato foi de aproximadamente 3 mm. A posição da esponja foi estabelecida considerando o ângulo de hélice da ferramenta,  $36^\circ$  e 5 mm no eixo Z. O processo de polimento ocorreu por aproximadamente um minuto.

### 3.5 EQUIPAMENTOS

Os ensaios de usinagem ocorreram no bloco D da UCS, no centro de usinagem LG-500 da marca *Hartford*, com potência de 10 kW e rotação máxima de 10.000 rpm.

Para as análises de desgaste, fim de vida e textura foi utilizado um estereoscópio trinocular de medição universal, da marca *Entex*, modelo TNE-10B. As análises de rugosidade foram executadas com o auxílio de um rugosímetro portátil da marca *Mitutoyo*, modelo SJ-301 com ponta do apalpador de diamante e resolução de  $0,01 \mu\text{m}$ . As medidas de dureza por microidentação foram feitas no microdurômetro da marca *Shimadzu Mitutoyo*, modelo HMV-2, com carga de 0,1 kgf.

O microscópio ótico, da marca *Nikon*, modelo *Epiphot 200* foi utilizado para obter imagens metalográficas da camada afetada e das deformações plásticas, e para as medições, o *software Imagine*. Ainda, teve-se à disposição um microscópio eletrônico de varredura por

emissão de campo (FESEM) modelo *Mira3* da marca *Tescan* para demais avaliações de imagem.

### 3.5.1 Fluido e sistema MQL

O FLR insolúvel em água a base de ésteres vegetais utilizado foi cedido pela empresa *Blaser Swissslube*, é nomeado *Vascomill MKS 22*. Sua base vegetal possui elevado ponto de inflamação e rápida precipitação da névoa nos processos MQL, reduzindo a dispersão da névoa e o risco de incêndio. É produzido a partir de matérias-primas renováveis, assim, não irrita a pele e é biodegradável. As propriedades físico-químicas do FLR estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Propriedades físico-química do FLR.

Viscosidade	Densidade	Ponto de inflamação	Éster	Cloro	Zinco	Enxofre
22 mm <sup>2</sup> /s	0,9 g/cm <sup>3</sup>	218 °C	95%	0%	0%	1,80%

Fonte: *Blaser Swissslube*.

O sistema de aplicação de MQL utilizado possui um canal que funciona por princípio pneumático e possibilita a regulação da vazão do ar e do fluido. A vazão foi ajustada para aproximadamente 30 ml/h e a pressão na rede pneumática foi de 5 bar. O bocal foi posicionado com um ângulo de 30°, com seu jato direcionado para a ponta da ferramenta como mostra a Figura 15.

### 3.6 PRÉ-TESTE

O procedimento de pré-teste foi realizado conforme ISO 3685, com o objetivo de adquirir conhecimento sobre o comportamento do material, e, além disso, determinar a velocidade de corte e a estratégia definitiva dos experimentos. Foram testadas diferentes velocidades e condições, sendo analisados os mecanismos de desgaste e medidos os valores de  $VB_{máx}$ .

Os parâmetros de corte para iniciar o processo experimental foram definidos de acordo com o detalhamento experimental exposto no item 3.2, a partir disso, houve variação na velocidade de corte e nas condições de usinagem, conforme exposto pela Tabela 5. As fresas e os equipamentos utilizados nessa etapa foram os pré-estabelecidos para os testes

finais, desse modo foi possível aproximar os pré-testes dos experimentos planejados e identificar possíveis alterações necessárias.

Tabela 5 – Variações durante os pré-testes.

Número de testes	$v_c$ [m/min]	Condição de usinagem
1	30	Seco
1	40	Seco
1	40	MQL

Fonte: O autor (2017).

Durante os três testes o comportamento do desgaste da ferramenta foi avaliado, inicialmente de 90 mm em 90 mm e posteriormente a cada 180 mm. Ao longo do processo também ocorreu a observação da superfície e das rebarbas geradas no CP. Os ensaios foram interrompidos no momento em que a medição do desgaste de flanco da ferramenta já ultrapassava o  $VB_{máx}$  de 0,2 mm.

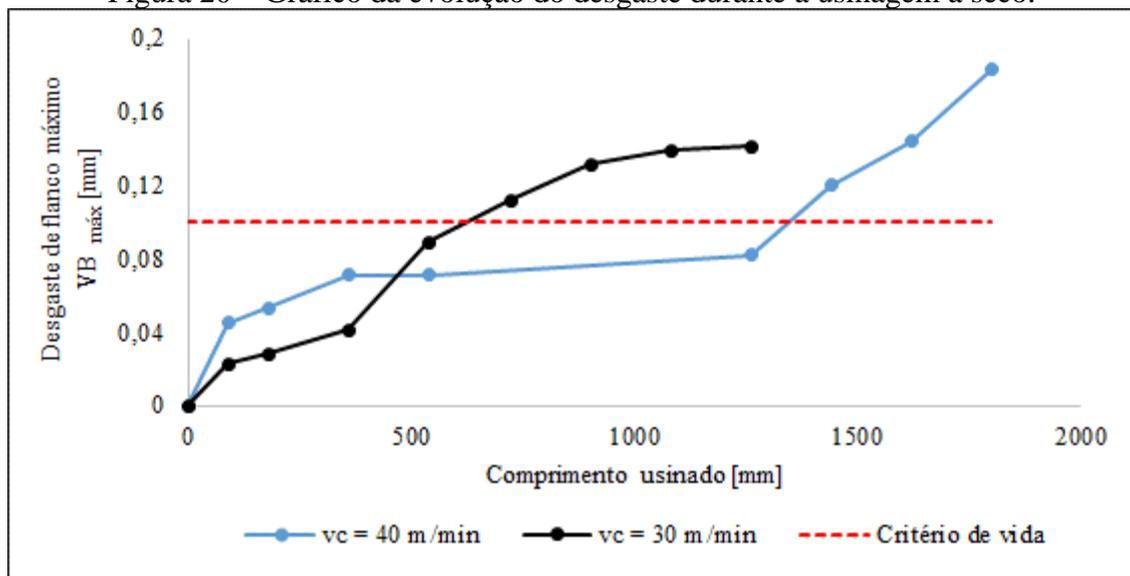
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos após o polimento das ferramentas e os resultados experimentais obtidos após o fresamento, a seco e com o uso de MQL, em relação a qualidade superficial e a vida da ferramenta.

### 4.1 PRÉ-TESTE

Os dois testes a seco foram realizados com o intuito de determinar a velocidade de corte procurando utilizar o máximo das ferramentas. Ao longo da usinagem houve uma série de pausas para medição do  $VB_{\text{máx}}$  e observação da ocorrência de adesão e microlascamentos. Os ensaios foram interrompidos no momento em que o desgaste da ferramenta já ultrapassava o  $VB_{\text{máx}}$  de 0,2 mm. O comportamento do desgaste está exposto na Figura 20.

Figura 20 – Gráfico da evolução do desgaste durante a usinagem a seco.



Fonte: O autor (2017).

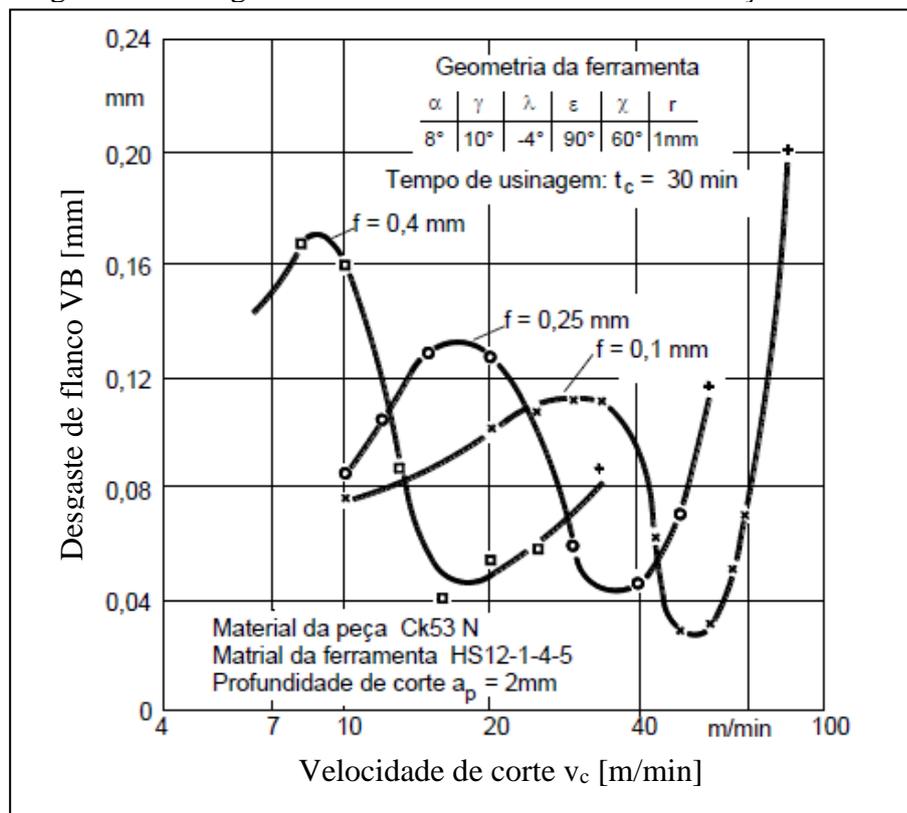
Os resultados encontrados, em relação ao comportamento de desgaste durante a usinagem a seco, foram considerados para realização dos testes posteriores. Assim, o próximo experimento ocorreu com velocidade de 40 m/min, condição que conferiu um menor grau de desgaste da ferramenta. Essa velocidade de corte se encontra na região de transição para ligas de níquel, conforme mostrado na Figura 3.

Desse modo, o menor desgaste conferido ocorreu com o uso da maior velocidade de corte, isso possivelmente aconteceu em decorrência do BUE que ocorre em baixas

velocidades de corte, prejudicando o desempenho da ferramenta e a qualidade superficial da peça.

BUE são camadas do material do CP no gume da ferramenta que assumem a função de corte da ferramenta. Gradativamente, o BUE desliza entre o flanco e a superfície de corte, levando a um desgaste abrasivo intenso do flanco e perda da qualidade superficial da peça (KLOCKE, 2011). A curva do desgaste em relação à velocidade de corte (curva VB x  $v_c$ ), mostrada na Figura 21, exemplifica a ocorrência relatada anteriormente.

Figura 21 – Desgaste abrasivo em decorrência da formação de BUE.



Fonte: Klocke (2011).

Após o VB ultrapassar um valor máximo, mesmo com o aumento da velocidade de corte, percebe-se uma diminuição da ocorrência do VB. O processo de recristalização e mudança de fase levam a um enfraquecimento sucessivo do BUE. Assim, o pico de desgaste mostrado na Figura 21, ocorre na velocidade onde há intensa formação de BUE, e o oposto acontece onde não se tem mais formação do BUE. Posteriormente, o VB aumenta com o aumento da velocidade de corte (KLOCKE, 2011).

A posição dos valores máximos e mínimos das curvas apresentadas varia de acordo com a temperatura. Com o aumento da temperatura durante o processo, os valores de

máximos e mínimos movem-se para velocidades de corte menores. O aumento do avanço, diminuição do ângulo de saída e o aumento da resistência do material são exemplos de ocorrências que elevam a temperatura. Já a diminuição da temperatura, por refrigeração, desloca os picos para velocidades de corte mais altas (KLOCKE, 2011).

A Figura 20 apresenta um comportamento de desgaste que cresce rapidamente durante todo o processo para a velocidade de 30 m/min, sugerindo um vale representativo para a formação de BUE durante a usinagem com esta velocidade. Já o comportamento de desgaste para a velocidade 40 m/min ocorre conforme o esperado e exposto na Figura 13. Onde o desgaste ocorre de forma acentuada no início do processo, depois estabiliza e, posterior a isso, apresenta um crescimento acelerado novamente.

O uso do MQL no teste subsequente mostrou a ocorrência de abrasão e adesão, ou seja, um comportamento de desgaste semelhante ao observado na usinagem a seco, no entanto, menos severo. Dessa forma, percebe-se um aumento no tempo de vida da ferramenta. Medidas como a refrigeração, diminuem a temperatura de corte, e medidas como a lubrificação, auxiliam na disposição do cavaco (KLOCKE, 2011). Essa afirmação corrobora a menor intensidade no VB com o uso de MQL.

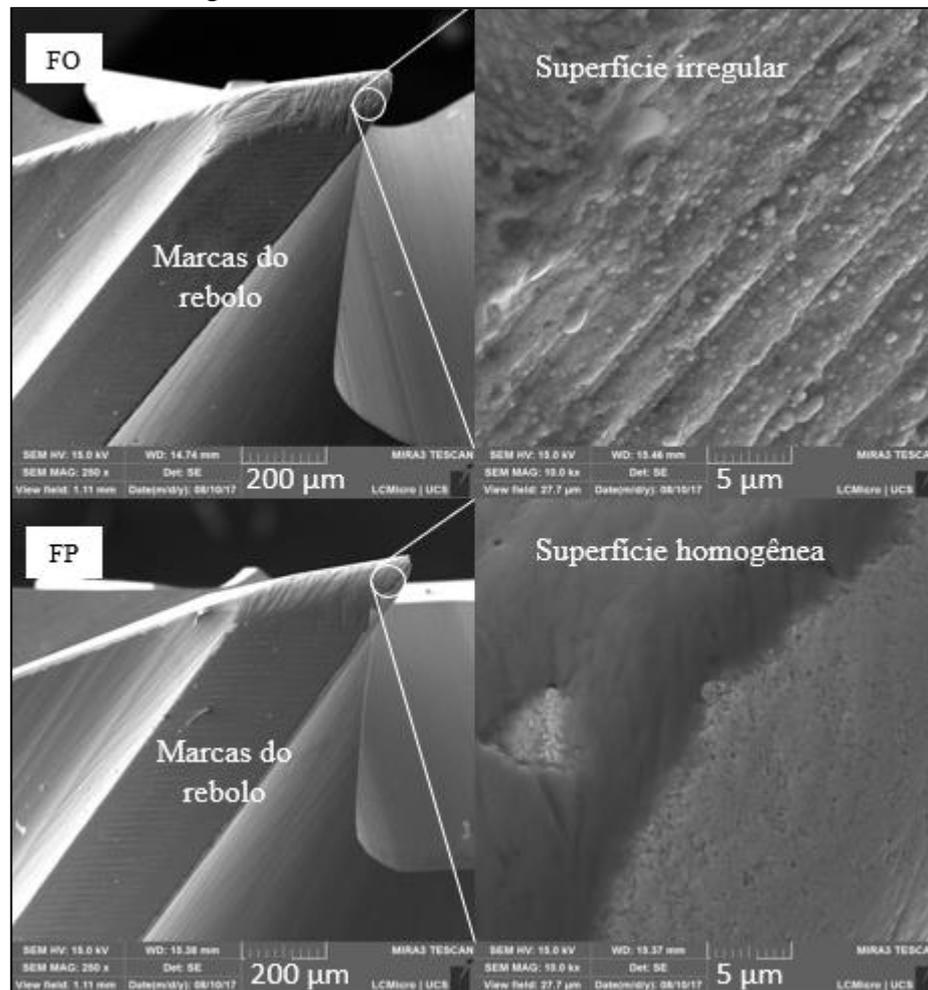
Visto que os mecanismos e tipos de desgaste durante a usinagem de Inconel 718 ocorreram de maneira semelhante ao exposto na literatura encontrada, embora esta apresente diferente delineamento, (ZHU; ZHANG; DING, 2012; ARUNACHALAM; MANNAN, 2000; ZHANG; LI.; WANG, 2012), optou-se por manter os parâmetros de corte determinados e ajustar o critério de fim de vida para  $VB_{máx}$  de 0,1 mm. Com o propósito de preservar a integridade da ferramenta para possíveis reafiações, diminuir a danificação causada na superfície da peça pelo desgaste da ferramenta, e também, diminuir o tempo de ensaio.

Por fim, além do estabelecimento do critério de fim de vida e das condições e parâmetros de corte, com a realização dos pré-testes foi possível determinar o intervalo para medição do desgaste e avaliar o tempo de vida, conseqüentemente, o tempo médio de duração dos ensaios. Ainda, possibilitou a definição do *layout* do CP para avaliação da qualidade superficial, evitando consumo total do CP antes do final da investigação.

## 4.2 TRATAMENTO DE SUPERFÍCIE NAS FERRAMENTAS

Com o intuito de compreender como o tratamento do gume modificou a superfície das ferramentas, a Figura 22 mostra o flanco e a ampliação na quina, região relevante em relação ao desgaste e a qualidade superficial gerada pelas ferramentas.

Figura 22 – Ferramentas antes do fresamento.



Fonte: O autor (2017).

Em relação a textura, as FO mostram alguns defeitos de fabricação, marcas da passagem do rebolo e superfície irregular. O tratamento da ferramenta é notável no flanco das FP, a remoção do material ocorreu pelo atrito das partículas abrasivas no gume, flanco e face e assim exibem uma superfície mais homogênea. Ainda, as FP mostram a estrutura granular do metal duro, que provém da metalurgia do pó, e indica que o processo de polimento removeu uma pequena quantidade de revestimento.

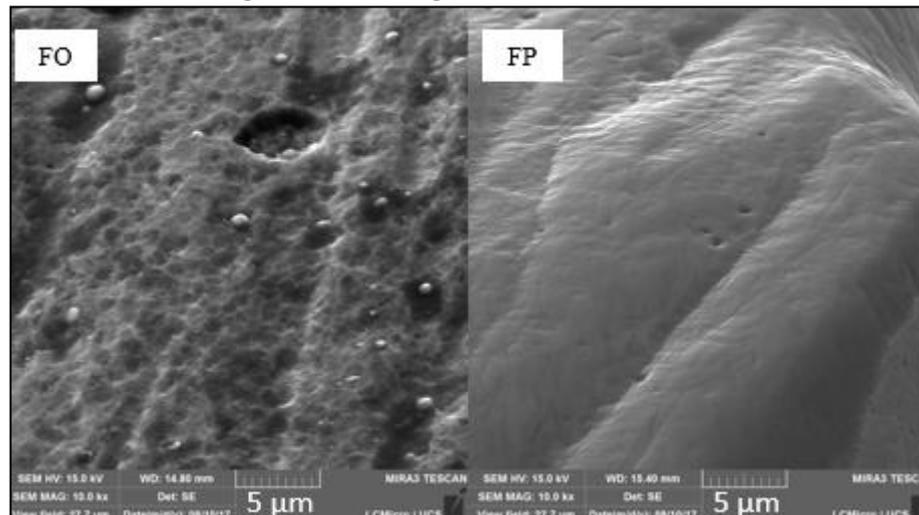
Bordin (2013) realizou o mesmo tratamento de gume utilizado neste trabalho, em brocas revestidas por nitreto de titânio e alumínio (TiAlN), as imagens obtidas a partir da FESEM mostram uma superfície mais homogênea, no entanto, não há evidências da estrutura granular do metal duro. Os testes mostraram melhores resultados de rugosidade com o uso de ferramentas polidas, o desgaste das ferramentas não foi avaliado pelo autor.

Arumugam, Malshe e Batzer (2006) investigaram ferramentas revestidas de diamante, antes e depois do processo de polimento, para o torneamento de uma liga de

alumínio. Os resultados afirmam que o polimento aumentou a vida da ferramenta e diminuiu as forças de corte. As imagens obtidas por FESEM mostram uma superfície lisa no flanco das ferramentas polidas e a estrutura granular do metal duro não é perceptível.

Para auxiliar a observação deste comportamento, a Figura 23 ilustra o revestimento do flanco das ferramentas, obtidas por FESEM.

Figura 23 – Fotografia do revestimento.

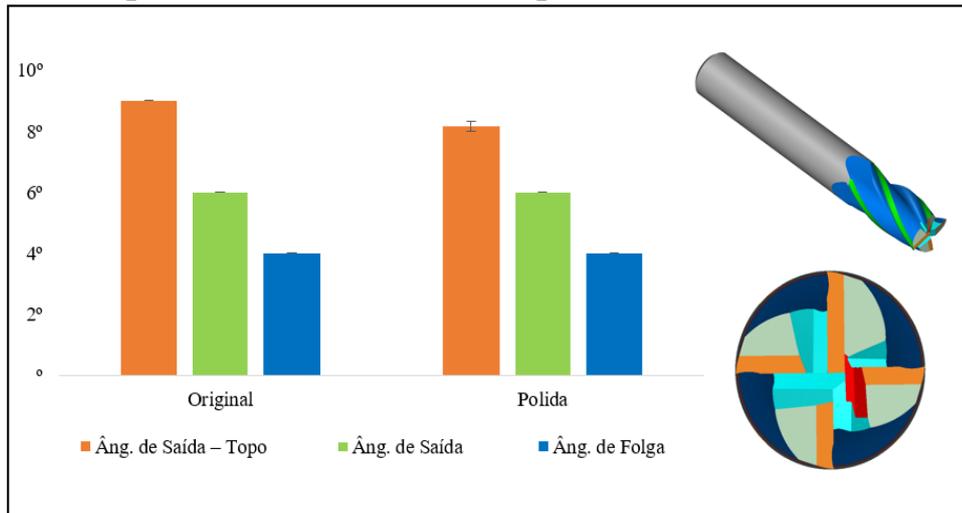


Fonte: O autor (2017).

Na imagem é possível observar que as FO apresentaram grandes concentrações de partículas de revestimento, ao contrário das FP que apresentaram uma superfície com menor incidência de aglomeração de partículas de revestimento, e assim, um aspecto mais liso. Porém, observa-se sulcos diagonais na direção do polimento, ocasionados pelo contato dos filamentos abrasivos de SiC com a superfície.

Com o intuito de verificar o grau de influência do tratamento de gume na geometria das ferramentas, duas ferramentas em cada condição foram submetidas a uma medida e duas réplicas. A máquina de medida universal para ferramentas de corte, *Zoller Genius 3* foi utilizada. A Figura 24 mostra o gráfico comparativo entre as medidas dos ângulos das FO e das FP e ainda, relaciona por meio ilustrativo, como uso do conjunto de cores, o local da medição na ferramenta de corte.

Figura 24 – Gráfico da análise da geometria das ferramentas.



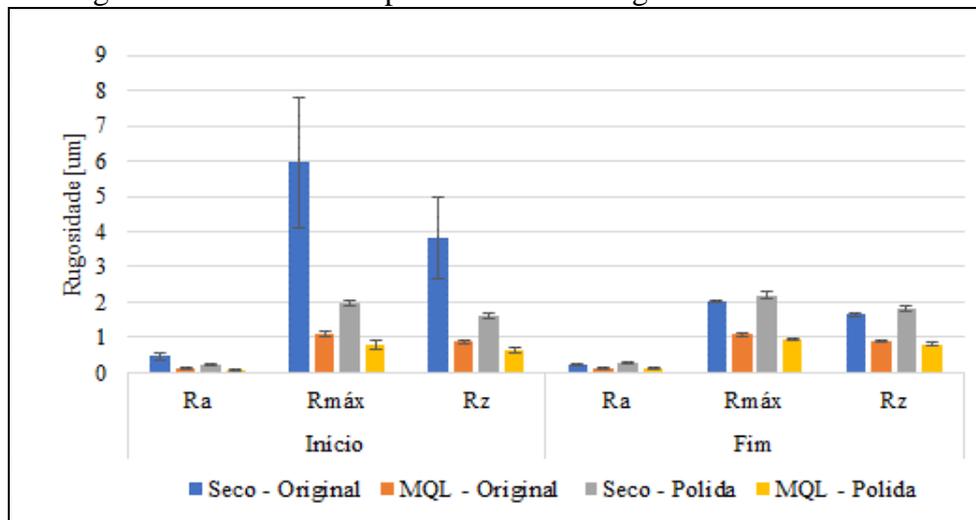
Fonte: O autor (2017).

A partir da Figura 24, é possível afirmar que as ferramentas não apresentam diferença significativa quanto aos ângulos. Desse modo, o tratamento do gume, em relação a geometria das ferramentas, não interfere significativamente no processo de usinagem.

#### 4.3 RUGOSIDADE E TEXTURA RESULTANTE NA SUPERFÍCIE

A avaliação da qualidade superficial se mostra significativa para assegurar produtos finais adequados. A rugosidade resultante da remoção de material é um importante fator para avaliar as superfícies geradas. Em vista disso, a Figura 25 compara graficamente os valores de rugosidade obtidos a partir dos testes realizados.

Figura 25 – Gráfico comparativo entre as rugosidades mensuradas.



Fonte: O autor (2017).

Para o início da vida da ferramenta, os maiores valores mensurados, foram apresentados pela condição a Seco - Original, seguido da condição a Seco - Polida, ao passo que os menores valores foram apresentados pelas condições com o uso de MQL. Vale lembrar que a condição a Seco - Original apresentou as maiores dispersões nos dados. O mesmo comportamento ocorre para o final da vida das ferramentas.

A condição a Seco - Original, apresenta valores maiores no início da vida da ferramenta e menores no final. Este comportamento não ocorre com as condições a Seco - Polida e MQL - Polida, que mostram valores de rugosidade crescentes. Já para o corte realizado com MQL - Original a rugosidade se mostra constante no início e no final da vida da ferramenta.

Dentre os principais fatores que podem afetar a rugosidade, observa-se a formação de BUE, o escoamento do cavaco, o desgaste da ferramenta e o atrito cavaco/ferramenta e ferramenta/peça (FAN et al., 2013). Além disso, os parâmetros de corte podem modificar a rugosidade superficial (KAMATA; OBIKAWA, 2007).

A partir do gráfico percebe-se pequena diferença nos valores de rugosidade mensurados para Ra. Atribuindo menores valores para as condições com o uso de MQL, que colabora com a diminuição da temperatura e do atrito durante o processo. Já a maior diferença resultante entre os valores de  $R_z$  e  $R_{máx}$  pode ter ocorrido devido a aderência de material na superfície do CP, que causa picos acentuados no perfil de rugosidade.

Cantero et al. (2013) estudaram o efeito do uso do FLR e seus tipos de aplicação, sobre a rugosidade superficial após o torneamento de Inconel 718. Ferramentas de metal duro, de cerâmica e de CBN foram utilizadas, além das ferramentas de metal duro revestidas e as revestidas por multicamadas. As superfícies usinadas com o uso de FLR apresentaram melhores resultados, que são atribuídos a capacidade do óleo de prevenir o desgaste por adesão, e, conseqüentemente, levar a redução de BUE. Além disso, Ucin, Aslantas e Bedir (2015) atribuem as diferentes ondulações encontradas à vibração existente durante o processo.

Arunachalam, Mannan e Spowage (2004) usaram ferramentas de metal duro e de CBN para usinar Inconel 718 endurecido. Eles estudaram a influência dos parâmetros de corte, do uso de FLR, da geometria do inserto, da preparação do gume e dos tipos de revestimento, na qualidade superficial. A geometria dos insertos, arredondada e quadrada, mostraram ter efeito significativo sobre a rugosidade superficial, assim como o uso de FLR. De modo geral, as investigações indicam o uso de ferramentas de metal duro revestidas de gume arredondado e aplicação de FLR para gerar menores valores de rugosidade superficial.

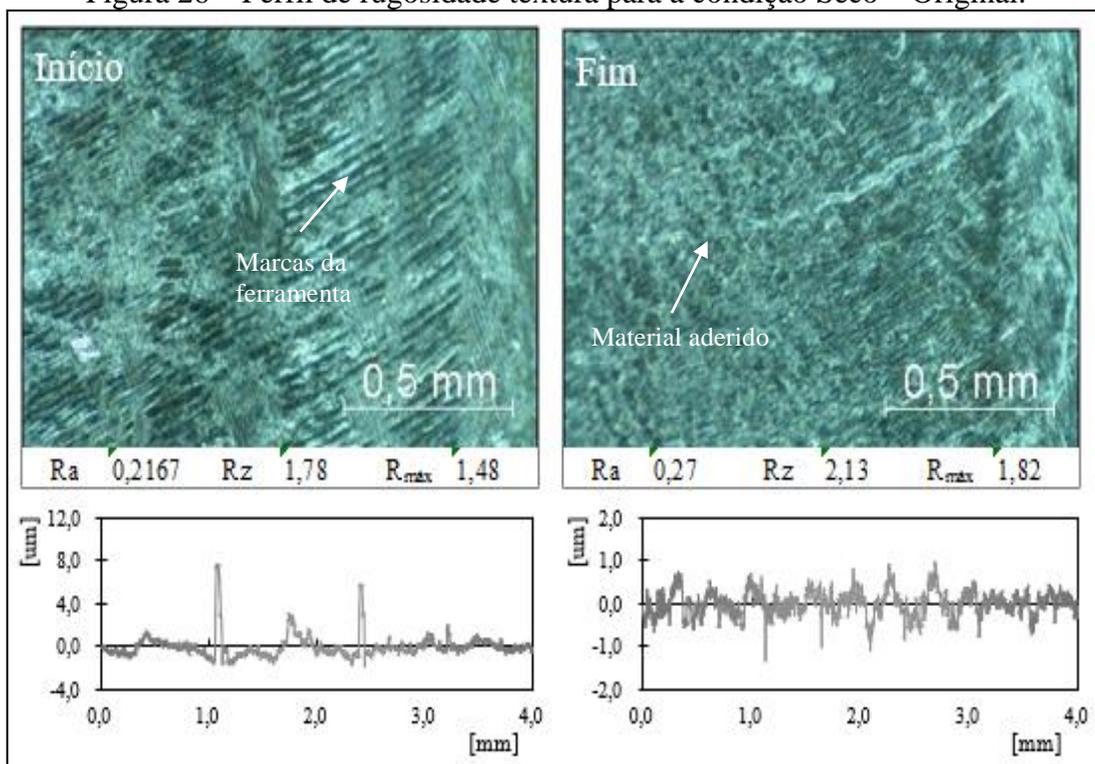
Arumugam, Malshe e Batzer (2006) investigaram o desempenho de insertos de metal duro diamantados e polidos em comparação com os insertos originais do fabricante no torneamento a seco de alumínio-silicone hipereutético A390. Os autores afirmam que o polimento reduziu a rugosidade do CP em aproximadamente 2,6  $\mu\text{m}$ .

A ANOVA apresentada no Apêndice A mostra a influência de cada fator do processo sobre os valores de rugosidade analisados, a partir dos valores encontrados para P. Os fatores analisados são: posição (Início e fim), condição (MQL e seco) e tratamento (polida e original) para os parâmetros  $R_a$ ,  $R_z$  e  $R_{\text{máx}}$ .

A ANOVA com significância  $\alpha$  de 5% indica que para os valores de  $R_z$ , aceita-se  $H_1$ , isto é, todos os fatores e suas interações são significativos, já para  $R_a$  e  $R_{\text{máx}}$ , aceita-se  $H_0$ , para a posição e a interação entre condição e tratamento, deste modo, não são significativos. Assim, entende-se que não há diferença estatística em relação a posição (início e fim), porém, o tratamento da ferramenta e a condição de usinagem são fatores relevantes para os valores de rugosidade encontrados.

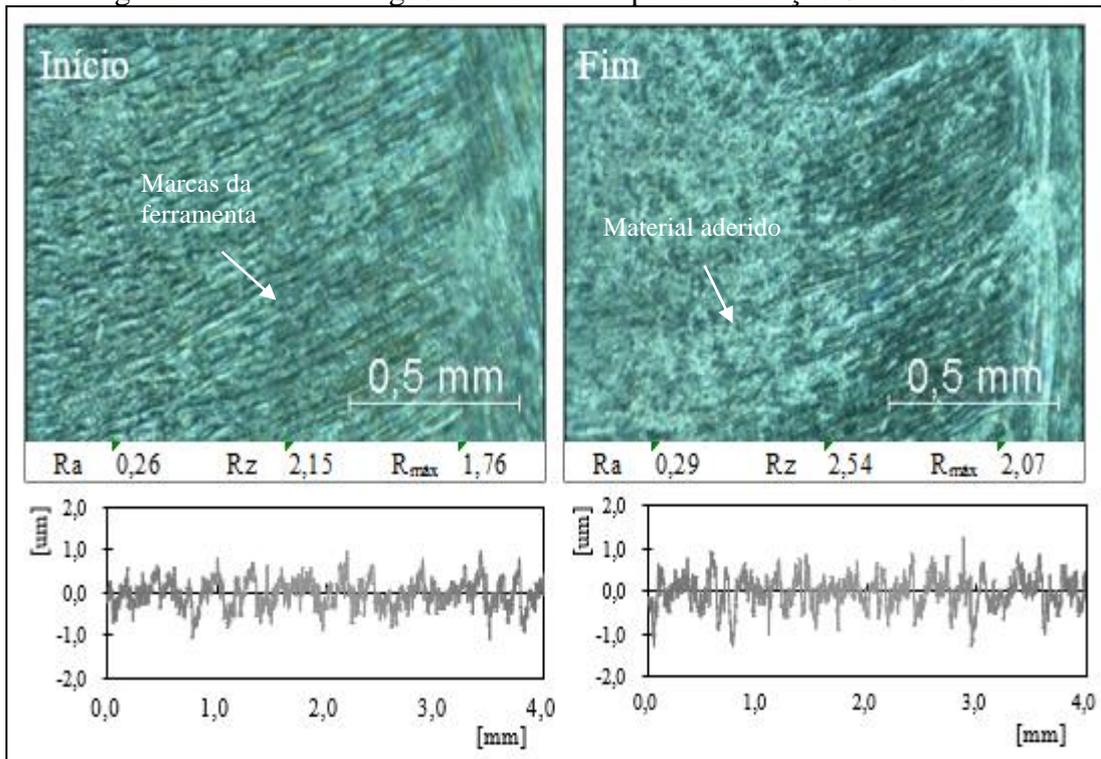
De modo a observar a interação dos elementos sobre a qualidade superficial, são ilustrados os resultados de textura e perfis de rugosidade. Os dados são representativos de todas as amostras, entretanto é exposta somente uma para cada condição. As Figuras 26 e 27 mostram a textura e o perfil de rugosidade no início e no final da usinagem a seco.

Figura 26 – Perfil de rugosidade textura para a condição Seco – Original.



Fonte: O autor (2017).

Figura 27 – Perfil de rugosidade e textura para a condição Seco – Polida.



Fonte: O autor (2017).

A textura para o início do fresamento com as FO aponta a presença de material de forma irregular em relação a passagem da ferramenta. Tais marcas apresentam-se como picos e vales acentuados na observação do perfil de rugosidade. Isto pode estar relacionado com a presença de material aderido na superfície usinada. O final do fresamento com a ferramenta original apresentou um comportamento similar, com marcas irregulares de material aderido e ausência de marcas de passagem da ferramenta. Os picos no perfil de rugosidade corroboram esse comportamento.

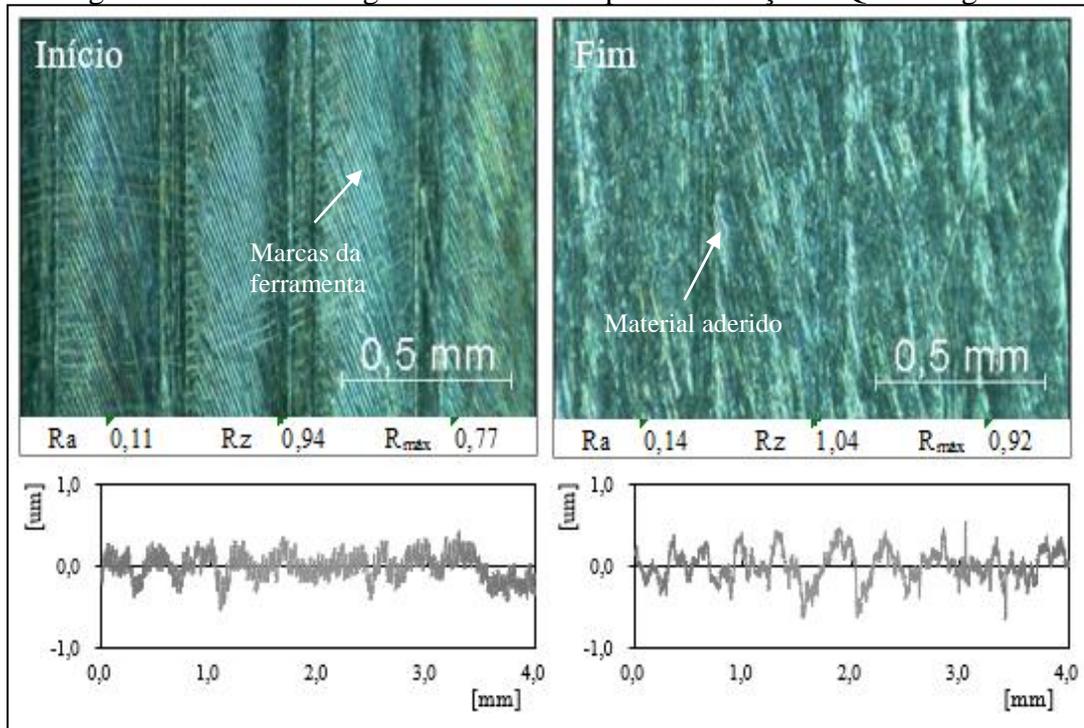
A textura, o perfil e os valores de rugosidade para as FP mostram-se bastante semelhantes entre o início e o final da vida da ferramenta. Observa-se em ambos a ausência de marcas definidas decorrentes do processo de corte, há também, material aderido nas superfícies, representado pelos picos no perfil de rugosidade.

Não houve variação significativa da textura e dos perfis de rugosidade entre os tratamentos para a condição a seco. Esse comportamento que gera marcas irregulares na superfície fresada e picos de rugosidade pode ser associado ao material aderido na peça, correspondente ao processo de formação do cavaco (STEMMER, 2008).

Para as ferramentas com o uso de MQL o comportamento observado é diferenciado, há marcas de avanço mais visíveis e perfis de rugosidade homogêneos para o início da vida

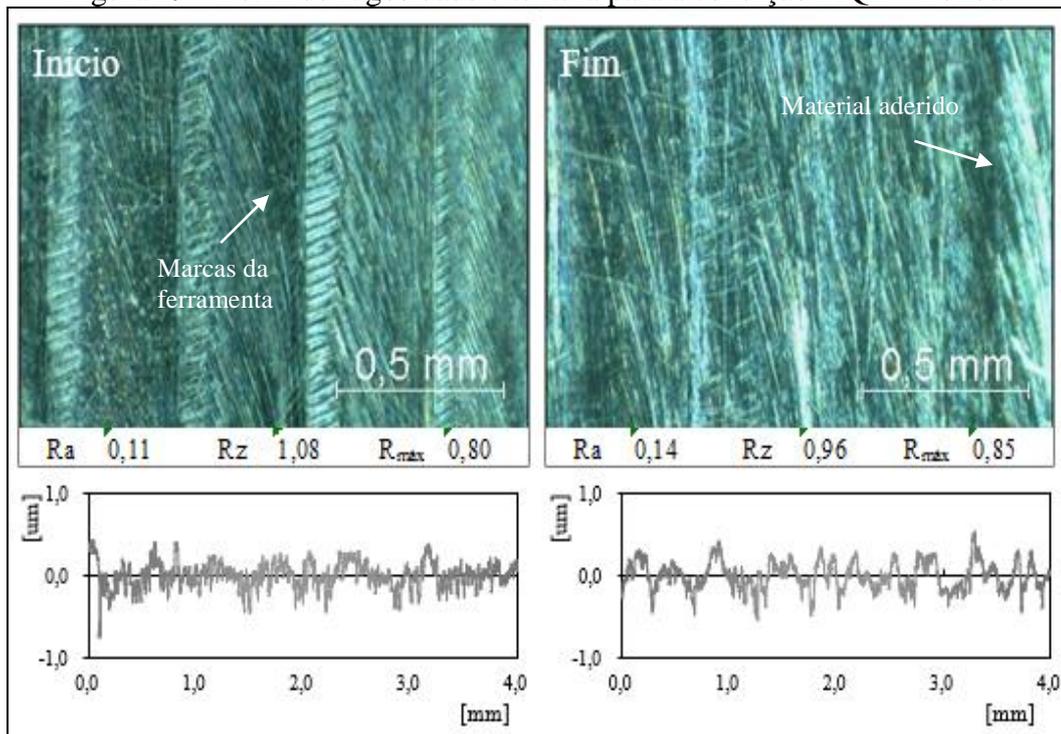
das ferramentas. As Figuras 28 e 29 mostram a textura e o perfil de rugosidade no início e no final da usinagem com MQL.

Figura 28 – Perfil de rugosidade e textura para a condição MQL – Original.



Fonte: O autor (2017).

Figura 29 – Perfil de rugosidade e textura para a condição MQL – Polida.



Fonte: O autor (2017).

Com a inserção da aplicação de MQL, as alterações na textura são bem aparentes. Para o início da vida de ambas ferramentas, original e polida, há um padrão que se repete linearmente. Os perfis de rugosidade são regulares e a superfície mostra-se mais homogênea, com marcas do caminho da ferramenta uniformes, o que caracteriza uma passagem adequada da ferramenta. Não há evidências de adesão e tal comportamento pode ser relacionado com a presença de MQL, que auxilia no escoamento do cavaco e reduz o efeito do atrito do mesmo com o CP, levando a menor incidência de adesões sob a superfície.

O estudo de Li e Chou (2010) corrobora que o uso de MQL no fresamento garante valores de rugosidade mais estáveis ao longo da vida da ferramenta, em comparação com a condição a seco. Kaynak (2014) e Cantero et al. (2013) explicam que a temperatura na zona de corte implica consideravelmente na rugosidade das superfícies de ligas de níquel usinadas. Desse modo, o uso de MQL no processo deve ser estudado. Os autores avaliaram os efeitos dos refrigerantes, com diferentes métodos de aplicação, sobre a rugosidade. Os melhores resultados foram obtidos pelas superfícies usinadas com o uso de MQL, cujo acontecimento foi atribuído a habilidade do FLR em reduzir o desgaste por adesão e a formação de BUE.

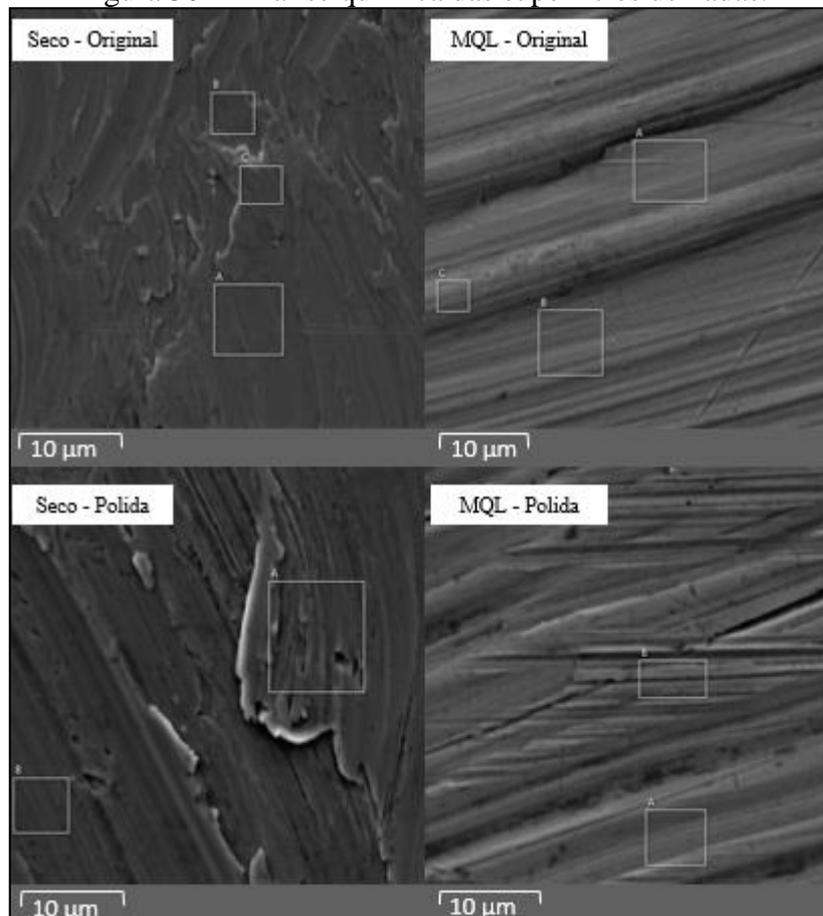
Já para o final da vida das ferramentas, o perfil de rugosidade é irregular, mostrando picos acentuados. Este comportamento vai ao encontro das imagens de textura, que apresentam adesão de material na superfície. Apesar da visível irregularidade, ainda é possível distinguir as marcas horizontais da passagem da ferramenta na textura no fim de vida.

Essa deposição de material na superfície usinada de Inconel 718, ocorre, pois, o material trabalhado adere nos gumes da ferramenta formando o BUE, com a alta temperatura e pressão na zona de corte, o BUE é deformado plasticamente, escoar na direção do cavaco e da peça, causando aderência na superfície do CP.

Devillez et al. (2011) usinaram Inconel 718, com o uso de ferramentas de metal duro, a seco e com o uso de FLR, em diversas velocidades de corte. Os autores observaram irregularidades entre as marcas de avanço nos corpos de prova usinados a seco, que são decorrentes de material trabalhado aderido na superfície. Já o processo com o uso de FLR expõe menor, ou nenhuma, aderência de resíduos, dessa forma encontram-se melhores condições de qualidade superficial para peças usinadas nessa condição de corte. Efeitos similares, durante a usinagem de Inconel 718 com ferramentas de metal duro, foram reportados por Arunachalam, Mannan e Spowage (2004) e Pawade, Joshi e Brahmankar (2008).

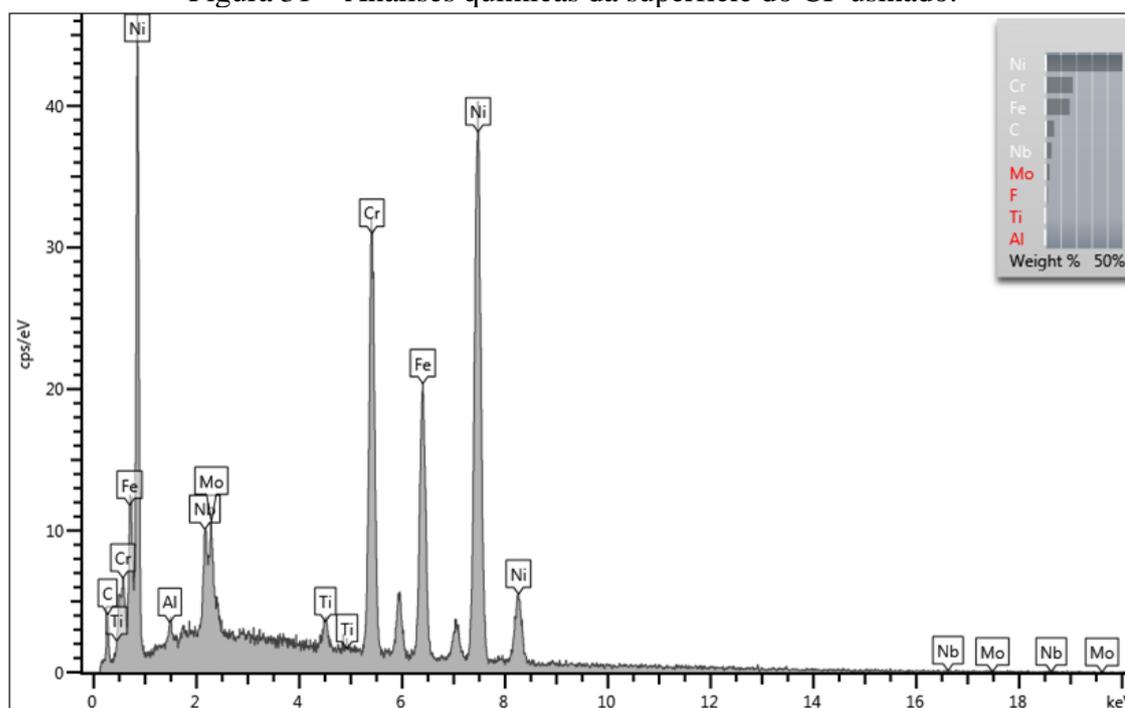
Para validar as afirmações apresentadas sobre a aderência na superfície do CP usinado, uma análise química das amostras foi realizada. A Figura 30 mostra as imagens, obtidas por FESEM, das superfícies dos corpos de prova após a usinagem nas quatro condições estudadas. As análises químicas, expostas na Figura 31, foram realizadas dentro de cada quadro apresentado e mostram que o material é o mesmo para todas investigações, Ni, Cr, Ferro (Fe), C e Nióbio (Nb), ou seja, Inconel 718. Esse comportamento corrobora o exposto anteriormente, ou seja, há adesão do material usinado em todas as superfícies inspecionadas, em especial nas usinadas a seco.

Figura 30 – Análise química das superfícies usinadas.



Fonte: O autor (2017).

Figura 31 – Análises químicas da superfície do CP usinado.



Fonte: O autor (2017).

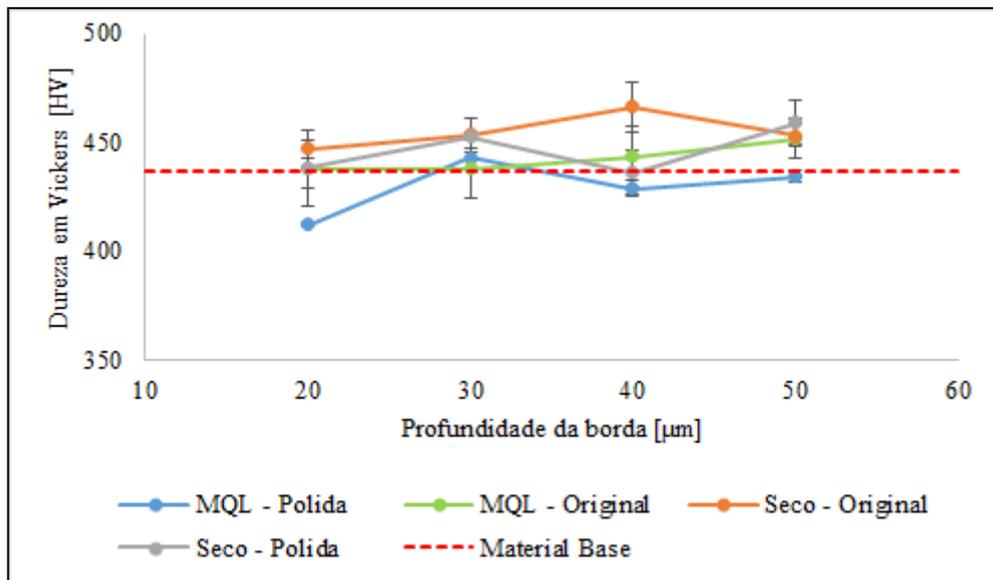
Por fim, a aplicação de MQL pode melhorar o acabamento da peça em relação a textura e a rugosidade obtidas pela usinagem a seco. Já que o uso de MQL refrigera e lubrifica a interface da ferramenta/peça e do cavaco/ferramenta e assim, reduz o desgaste por adesão e a formação de BUE. Além disso, o aumento da vazão no bico de MQL pode trazer resultados ainda melhores, já que está associado com a redução do desgaste da ferramenta. A geometria e a condição do gume de corte também influenciam na textura e rugosidade superficial, pois o gume de corte afiado produz maior rugosidade superficial.

#### 4.4 ANÁLISE DA CAMADA AFETADA E MICRODUREZA

As medidas de camada afetada e dureza foram analisadas para todas as condições e geometrias testadas, no início e no final da vida das ferramentas. No entanto, devido à baixa variabilidade dos dados, somente os resultados obtidos a partir das amostras usinadas após atingir o  $VB_{máx}$  estipulado foram utilizadas.

De forma abrangente, os esforços causados pelo processo de corte, tendem a induzir o aumento dos valores de dureza medidos, já as temperaturas geradas reduzem a dureza da superfície usinada (GRIFFITHS, 2001). O perfil de dureza foi medido para as amostras nas quatro condições testadas e está exposto na Figura 32.

Figura 32 – Gráfico do perfil de dureza ao longo da subsuperfície da peça.



Fonte: O autor (2017).

Os valores tabulados apresentam valores aproximados da dureza do material base (437 HV), isso ocorreu devido ao fato da medição iniciar na profundidade de 20 μm, por limitação da norma. Desse modo, não foram captadas alterações significativas no CP a partir da profundidade avaliada. As deformações plásticas mensuradas corroboram esta afirmação, pois são da ordem de 7 μm, sinalizando que o efeito do fresamento originou deformações plásticas na superfície do Inconel 718, entretanto, por serem pouco expressivas, não modificaram significativamente a dureza do material.

A dureza do material usinado é fortemente influenciada pela condição de usinagem. Uma comparação feita entre a usinagem a seco e com o uso de MQL foi realizada com o propósito de investigar o efeito da condição de usinagem sob a dureza do CP. A usinagem a seco mostrou valores de dureza maiores do que com o uso de MQL. O FLR reduz a fricção entre a ferramenta e o material usinado, e assim, reduz também, a deformação plástica e a temperatura (YAZID et al., 2011).

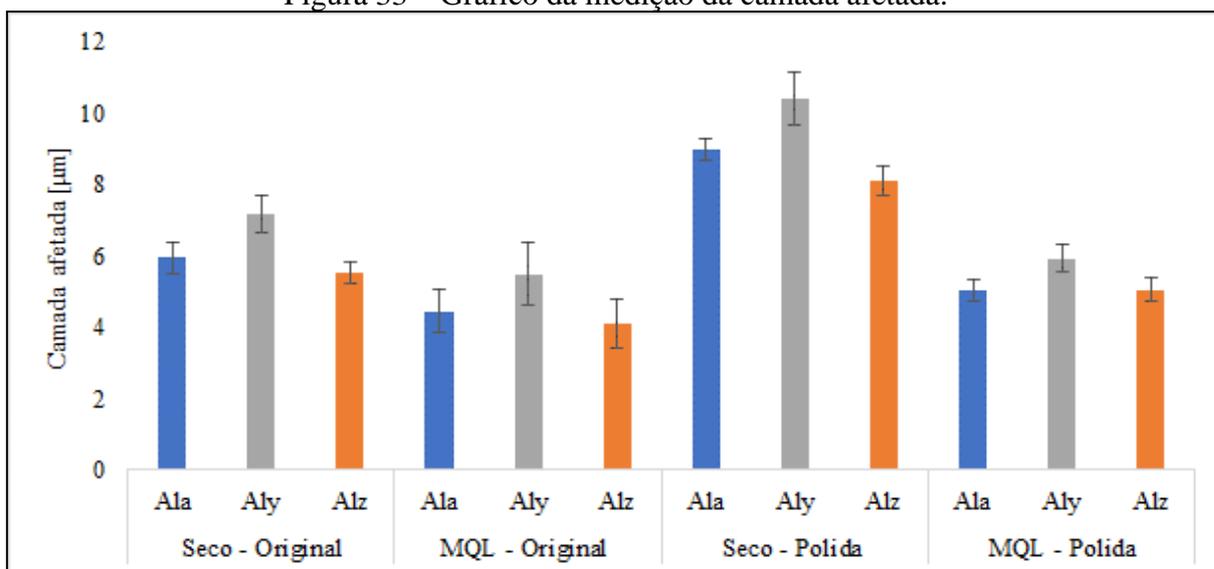
Devillez et al. (2011), usinaram uma liga de Inconel 718 a seco e com emulsão, com velocidade de corte de 60 m/min. Os autores afirmam que o perfil de dureza, mensurado por microindentação, foi superior para a condição a seco, que também apresentou maiores deformações. As profundidades de deformações mostradas concordam com a região onde a dureza medida se aproximava do material base. Pawade, Joshi e Brahmankar (2008) também apresentaram resultados de dureza similares.

Por outro lado, Umbrello (2013) analisou a usinagem de Inconel 718 com o uso de ferramentas revestidas e emulsão. O autor afirma que para todos os casos investigados, a dureza é maior do que a do material base. O autor atribuiu este acontecimento e a variação dos valores de dureza, ao aumento da taxa de alimentação e a velocidade de corte.

Para a compreensão das alterações causadas pelo processo de fresamento, a micrografia da superfície usinada foi exposta. A partir disso, uma análise da camada afetada foi realizada para estimar a profundidade das deformações plásticas do material.

Deformações plásticas acontecem quando tensões cisalhantes originadas pelo processo de usinagem ultrapassam as tensões de escoamento do material (GRIFFITHS, 2001). A Figura 33 apresenta o comportamento da subsuperfície após o fresamento, considerando as diferentes geometrias e condições.

Figura 33 – Gráfico da medição da camada afetada.



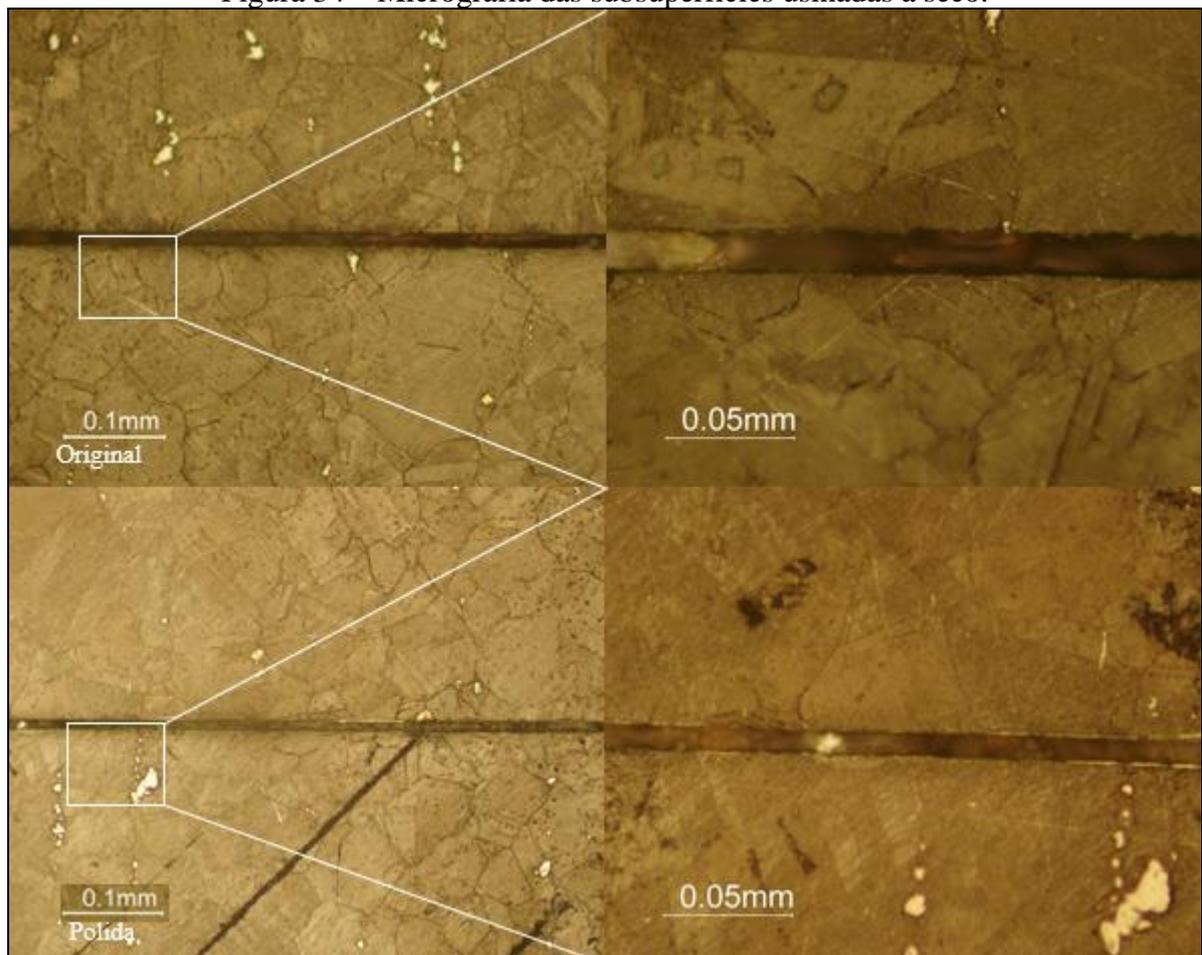
Fonte: O autor (2017).

A deformação plástica também causa o endurecimento do CP. Os resultados corroboram os valores de dureza mensurados anteriormente, já que, mostram maiores valores de camada afetada para as ferramentas usinadas a seco, embora não estejam significativamente afastados do valor do material base.

O tratamento da ferramenta não mostra influência significativa quando usinado com MQL, em contrapartida, exibem maiores deformações para as ferramentas com geometria polida e a seco. É importante observar a dispersão dos resultados e considerar a incerteza para medições abaixo de  $10 \mu\text{m}$  com o uso do *Software Imagine*. As análises estatísticas mostradas no Apêndice B, mostram que os valores encontrados para P são menores que  $\alpha$ , deste modo,

aceita-se  $H_1$  em todas as hipóteses. A partir disso, é possível afirmar que, o tratamento da ferramenta, a condição de usinagem e a interação entre eles influenciam na deformação plástica do material. A observação das regiões afetadas, é mostrada pela Figura 34 que apresenta a micrografia das superfícies usinadas a seco, paralela à superfície de corte.

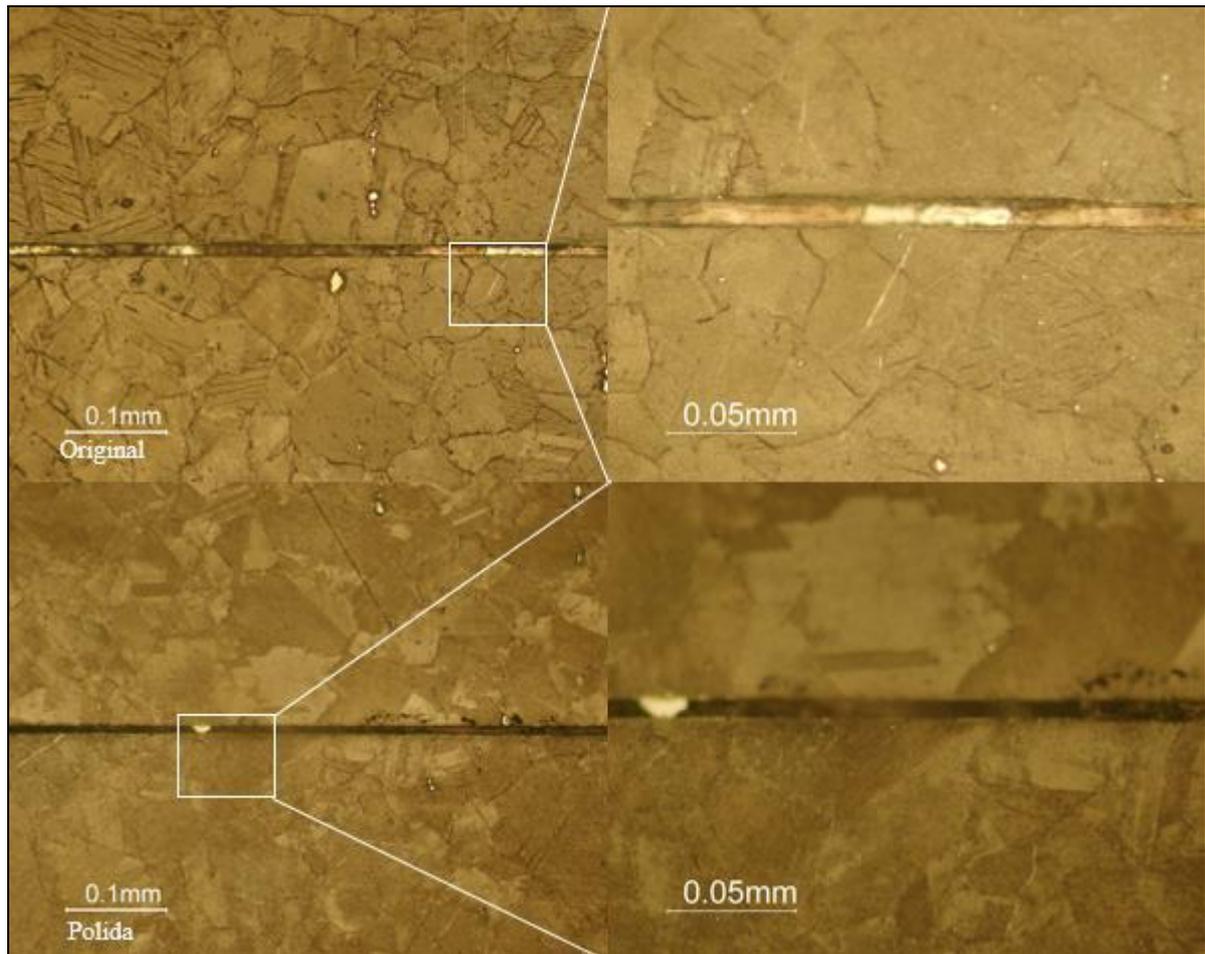
Figura 34 – Micrografia das subsuperfícies usinadas a seco.



Fonte: O autor (2017).

A partir da Figura 34 é possível observar as deformações rentes a superfície, tornando a medida complexa, e assim, aumentando a variabilidade dos dados. A deformação plástica, segundo Griffiths (2001), pode ser relacionada à distribuição de tensões do material. A resistência ao cisalhamento do material reduz, ao passo que a temperatura do processo aumenta, desse modo, a ocorrência de deformações plásticas é mais propensa. Os esforços mecânicos também aparecem como motivadores das deformações, desse modo as variações medidas podem vir em decorrência das alterações de temperatura e esforços. Para demais avaliações, a Figura 35 mostra a micrografia das superfícies usinadas com MQL, paralela à superfície de corte.

Figura 35 – Micrografia das subsuperfícies usinadas com MQL.



Fonte: O autor (2017).

A Figura 35 mostra contornos de grão similares aos usinados a seco e também, deformações muito próximas da superfície. Outros tipos de alterações, como, transformações de fase e tamanhos de grão não foram evidenciadas em nenhuma das amostras.

Devillez et al. (2011) observaram que a microestrutura de Inconel 718 revela uma estrutura não homogênea quanto ao tamanho dos grãos. Além disso, afirma que somente uma pequena deformação plástica do grão ocorreu próximo da superfície usinada, e não houve danos ou defeitos significativos. O autor descreve uma pequena alongação orientada dos grãos, aproximadamente 15  $\mu\text{m}$ , abaixo da superfície usinada a seco que é mais visível em comparação com a superfície usinada com o uso de MQL.

Umbrello (2013) afirma que a estrutura de cada superfície usinada foi medida por meio de um microscópio ótico, o autor percebeu que para todas as condições um pequeno refinamento de grão foi encontrado próximo a superfície e a subsuperfície, no entanto, não pode ser mensurado por meio do mesmo instrumento por ser de baixa dimensão.

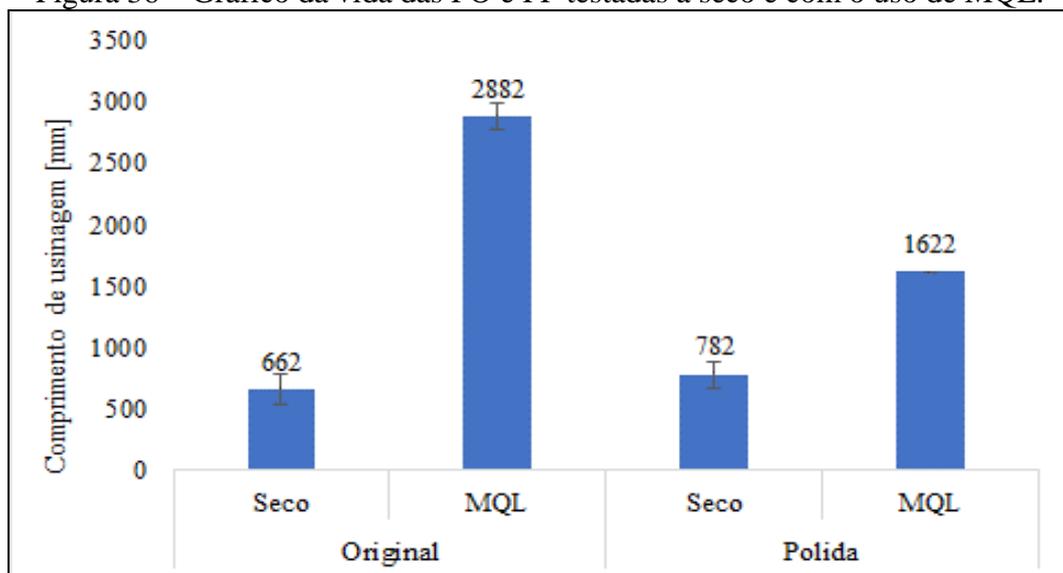
Segundo Denkena, Koehler e Rehe (2012), o material deformado e as tensões residuais são diretamente influenciadas pelas forças existentes no processo de corte. Os autores lembram também, que a microgeometria do gume está relacionada com as forças existentes durante a usinagem. Deste modo, pode ser esclarecido o aumento da camada afetada nas superfícies fresadas com ferramentas polidas.

#### 4.5 DESGASTE

A dureza das ligas de Ni é bastante alta, além disso, o Inconel 718 tem a presença de C em sua estrutura. Isso pode aumentar as vibrações e a temperatura na zona de corte durante o processo e, conseqüentemente, o desgaste da ferramenta. Zhu, Zhang e Ding (2012) estudaram as características do comportamento do desgaste para a usinagem com ligas de níquel e afirmam que o desgaste por abrasão, adesão e difusão, foram os principais mecanismos encontrados para ferramentas cerâmicas e de metal duro com e sem revestimento.

Durante os testes, a melhor condição testada foi com as FO e com o uso MQL, em seguida, as FP com o uso de MQL. A usinagem a seco não apresentou resultados adequados em nenhuma das situações testadas. A Figura 36 mostra o resultado dos experimentos em relação a vida das ferramentas.

Figura 36 – Gráfico da vida das FO e FP testadas a seco e com o uso de MQL.



Fonte: O autor (2017).

A lubrificação durante o processo de usinagem tem impacto significativo em termos de melhora no desgaste da ferramenta. As partículas de FLR formam uma camada protetora entre o gume da ferramenta e o CP, isso reduz consideravelmente a fricção que ocorre na interface, devido a interação mecânica. Ainda, esse efeito lubrificante e refrigerante entre a ferramenta e a peça, previne a formação de BUE (UCUN; ASLANTAS; BEDIR, 2013).

O ambiente severo durante a usinagem a seco intensifica o desgaste da ferramenta quando comparado com a condição junto do uso de MQL. Altas temperaturas de corte aumentam os mecanismos de desgaste e assim, diminuem a vida da ferramenta. O tratamento de gume muda a geometria da ferramenta e assim pode melhorar seu desempenho, a partir da redução das forças de corte. Por outro lado, como relatado anteriormente, uma pequena quantidade de revestimento foi removida pelo processo de polimento, e isso pode ter causado resultados menos satisfatórios para as ferramentas tratadas.

Para as ferramentas polidas, a diferença no comprimento usinado, entre a condição a seco e com o uso de MQL, é significativa. Ainda assim, é possível dizer que o uso de MQL traz avanços no que diz respeito a prevenção de BUE e a redução do desgaste da ferramenta.

A explicação identificada para essa dispersão, encontra-se no uso de MQL. Conforme mostra a Figura 22, quanto maior a seção de corte, maior o calor durante o processo. Com o aumento da temperatura durante o processo, os valores de máximos e mínimos para o VB movem-se para velocidades de corte menores. Já a diminuição da temperatura, desloca os picos para velocidades de corte mais altas (KLOCKE, 2011).

Desse modo, a queda no desempenho da ferramenta polida com o uso de MQL, informa que a aplicação de MQL pode ter deslocado a taxa de calor durante o fresamento, conferindo uma diferença de calor, assim como os diferentes avanços apresentados por Klocke (2011).

Com o intuito de relacionar o deslocamento da taxa de calor com a aplicação de MQL, o fluxograma exposto na Figura 37 foi desenvolvido. Assim, é possível perceber que a aplicação de MQL trouxe um efeito lubrificante e refrigerante e, em consequência disso, a redução de BUE e do desgaste da ferramenta. Essas ocorrências aumentaram a vida da ferramenta em comparação com as ferramentas usinadas a seco. Além disso, a aplicação de MQL pode ter desencadeado um deslocamento na taxa de calor, em consequência de uma possível diferença de vazão no bico de aplicação de MQL e/ou o efeito de capilaridade.

Uma vez que a superfície das FO é mais rugosa, o contato do fluido com o processo de corte pode ter sido mais intenso do que com a superfície mais lisa apresentada pelas FP. Essa

diferença de rugosidade foi promovida pelo processo de polimento, que também acarretou na remoção prematura do revestimento.

Figura 37 – Relação da aplicação de MQL e o deslocamento da taxa do calor.

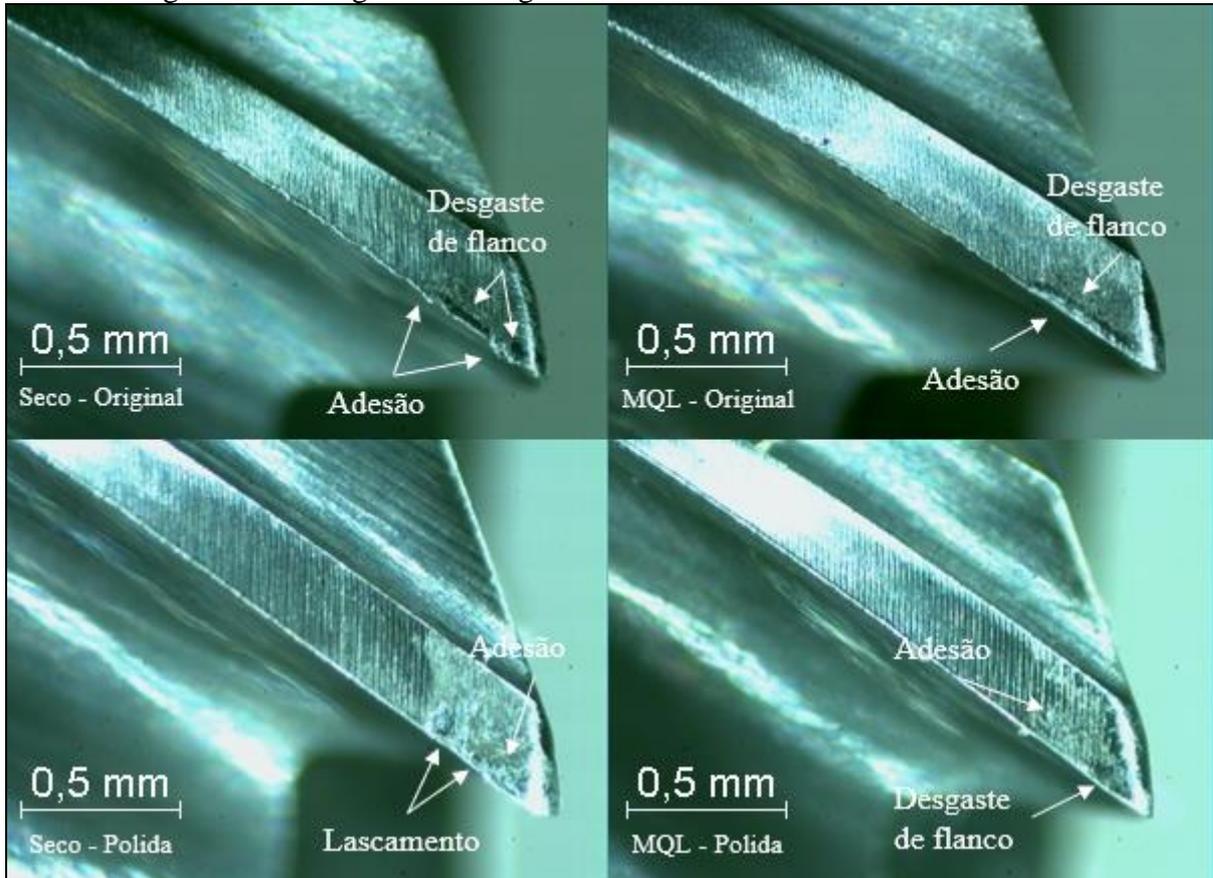


Fonte: O autor (2017).

Li, Zeng e Chen (2006) estudaram o fresamento a seco em altas velocidades com o uso de ferramentas de metal duro multicamadas (nitreto de titânio (TiN)/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/carbonitrato de titânio (TiCN)). Eles evidenciam o VB e o lascamento como os principais tipos de desgaste, enquanto o desgaste de cratera foi bastante limitado. Eles atribuem esse desgaste ao desprendimento do revestimento em altas temperaturas geradas por velocidade de corte da ordem de 600 m/min e 900 m/min.

O desgaste observado na investigação do fresamento de Inconel 718 é severo com ferramentas somente revestidas e revestidas e polidas, nas condições a seco e com MQL. De acordo com a observação microscópica do comportamento de desgaste no flanco das ferramentas, mostrado na Figura 38, é possível estabelecer dois tipos principais de desgaste que ocorreram em todas as amostras: VB e lascamentos, ocasionados por abrasão e adesão.

Figura 38 – Fotografia do desgaste das ferramentas durante o fresamento.



Fonte: O autor (2017).

Durante o processo de corte, a velocidade de corte moderada e o tempo de contato da ferramenta com o CP, promoveu a adesão do material da peça na ferramenta de corte. Essas circunstâncias causam o fenômeno chamado BUE, que leva a ocorrência de lascamentos no flanco da ferramenta. Devillez et al. (2006) também observaram este comportamento durante a usinagem de Inconel 718 com ferramentas de metal duro, e afirma que o BUE não é estável, pois os fragmentos do material aderido são frequentemente desprendidos da ferramenta. Este comportamento pode arrancar partículas da ferramenta, levando ao surgimento de crateras no flanco e desgaste na face das ferramentas.

Krain, Sharman e Ridgway (2007) usaram insertos revestidos ( $\text{TiN}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiCN}$ ) para analisar o efeito dos parâmetros de corte no desgaste da ferramenta durante o fresamento de Inconel 718. Eles concluíram que a adesão do material do CP na ferramenta forma BUE e o atrito do BUE recém-formado na região de corte foi o principal mecanismo de desgaste que levou ao final da vida da ferramenta.

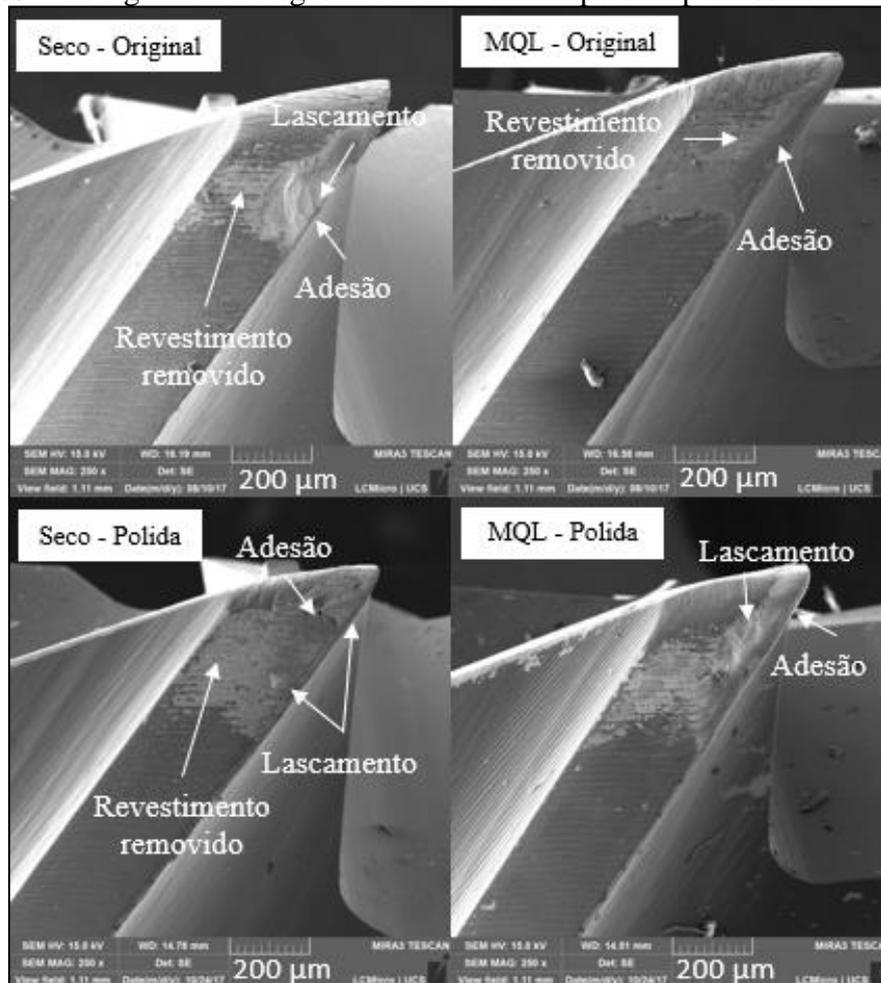
A formação do BUE no fresamento de Inconel 718 com ferramentas revestidas de AlCrN pode ocorrer devido a fase CrN na composição, pois o estudo de Sharman, Dewes e Aspinwall (2001) revela boa interação química do CrN com esta liga de níquel. O BUE formado aderiu no gume da ferramenta e algumas áreas da ferramenta de corte apresentaram uma ligação mais forte do que a do revestimento do material, a remoção repetitiva do revestimento levou a exposição do material base e, conseqüentemente, ao desgaste acentuado da ferramenta. Essa afirmação foi identificada por Krain, Sharman and Ridgway (2007), depois dos testes de fresamento, os autores afirmam que o BUE foi formado pelas altas pressões e afinidade química na zona de corte.

O cavaco recém arrancando é quimicamente ativo e atrelado a alta temperatura de corte gerada pelo processo, ocorre a aderência do material da peça na ferramenta (KLOCKE, 2011). Em seguida, esse material aderido é extraído e causa lascamentos e a remoção parcial do revestimento. Depois disso, o substrato da ferramenta fica exposto e entra em contato total com o processo de corte, assim a resistência ao calor decresce consideravelmente. Além disso, durante o processo de corte, o cavaco atrita com o flanco da ferramenta e resulta em um aumento do desgaste por abrasão. Desse modo, é possível afirmar que a remoção do revestimento no gume da ferramenta é prejudicial para a usinagem.

Os autores Uzun, Aslantas e Bedir (2013) afirmam que entre os revestimentos testados, uma formação significativa de BUE foi observada em TiAlN + AlCrN e AlCrN. O comportamento contrário foi percebido pelas ferramentas revestidas por DLC e TiAlN + WC/C.

A Figura 39 mostra o estado das ferramentas, em todas as condições testadas, após atingirem o  $VB_{máx}$  estipulado. É possível analisar que ambas ferramentas na condição a seco apresentaram intensa remoção do revestimento e adesão, em seguida as FP e as FO com o uso de MQL mostram o mesmo comportamento de forma menos acentuada. Assim, o estudo das imagens microscópicas mostra que os mecanismos de desgaste, abrasão e adesão, ocorreram em todas as ferramentas para as quatro situações testadas, no entanto, a intensidade variou consideravelmente. O desgaste por abrasão está diretamente conectado com o VB e o desgaste por adesão explica a formação de BUE. A extração do material do CP aderido no flanco da ferramenta causa a formação de lascamentos.

Figura 39 – Fotografia do desgaste da ferramenta depois do processo de fresamento.



Fonte: O autor (2017).

Com o objetivo de confirmar a significância dos resultados encontrados para o processo de fresamento realizado, uma ANOVA com nível de significância 0,05 foi calculada e está exposta na Tabela 6. A análise comparou a importância entre os grupos de interesse e determinou se algum se há diferença significativa entre eles.

Tabela 6 – ANOVA para os valores de vida da ferramenta.

	Soma dos quadrados	GL	Média Quadrática	F	P
Tratamento	810190,50	1	810190,51	29,84	0,001
Condição	5786991,51	1	5786991,50	213,17	0,000
Tratamento*Condição	1230529,30	1	1230529,30	45,33	0,000
Erro	190023,77	7	27146,25		
Total	8980143,30	10			

Fonte: O autor (2017).

A análise mostra que todos os valores de P são inferiores a 0,05 e, com tal característica, rejeita  $H_0$ . Com isso, confirma que ambos, o tratamento da ferramenta e a condição de usinagem, influenciaram o fresamento estudado. Ou seja, durante a usinagem de Inconel 718 com ferramentas de metal duro revestidas, a condição de usinagem, nesse caso, MQL e seco, e o tratamento da ferramenta, têm diferença significativa na vida da ferramenta, assim como, a interação entre eles.

Em relação ao tratamento da ferramenta, a remoção do revestimento é mais evidente para as FP do que para as FO. Vale lembrar que a geometria da ferramenta não modificou a ponto de interferir no processo de corte, assim, o desempenho limitado das FP é resultante da remoção prematura do revestimento, da formação acentuada de BUE e do deslocamento da taxa de calor com o uso de MQL.

De acordo com Bouzakis et al. (2014) os picos de rugosidade colaboram para a melhor adesão do revestimento no substrato, devido a melhor adesão mecânica entre os componentes. Denkena, Koehler e Rehe (2012) afirmam que a adesão do revestimento depende da rugosidade na superfície da ferramenta e na diferença entre a tensão residual no revestimento e no substrato próximo ao gume da ferramenta. Os testes realizados pelos autores, com ferramentas de metal duro, mostram que todos os insertos exibiram principalmente desgaste abrasivo no flanco e, em seguida, danificou o revestimento dos insertos. Ainda, Vidakis, Antoniadis e Bilalis (2003) mostraram que a intensa remoção do revestimento, estendida em direção a cunha da ferramenta, ocorreu devido a rachaduras radiais e uma baixa adesão do revestimento na ferramenta. Quando a remoção é menos severa, indica um revestimento frágil, porém melhor aderido.

Com o intuito de corroborar a baixa aderência do revestimento na fresa, foram medidos os grãos do substrato do metal duro. A média encontrada para as 25 amostras foi de  $0,5 \mu\text{m}$ . As ferramentas de metal duro podem ser classificadas de acordo com o tamanho do grão de sua estrutura, fino ( $0,8$  a  $1,3 \mu\text{m}$ ), sub-micrométrico ( $0,5$  a  $0,8 \mu\text{m}$ ), ultrafino ( $0,2$  a  $0,5 \mu\text{m}$ ) e nanométrico (menor de  $0,2 \mu\text{m}$ ). Devido ao maior fator de empacotamento que grãos muito pequenos propiciam, à medida que se diminui o tamanho de grão do metal duro, aumenta-se a dureza, resistência ao desgaste e tenacidade do material (DINIZ et al., 2008).

Em contrapartida, a deposição do revestimento em grãos de metal duro ultrafinos é mais espessa e as propriedades mecânicas esperadas são inferiores em comparação com os substratos com maiores tamanhos de grão (BOUZAKIS et al., 2013).

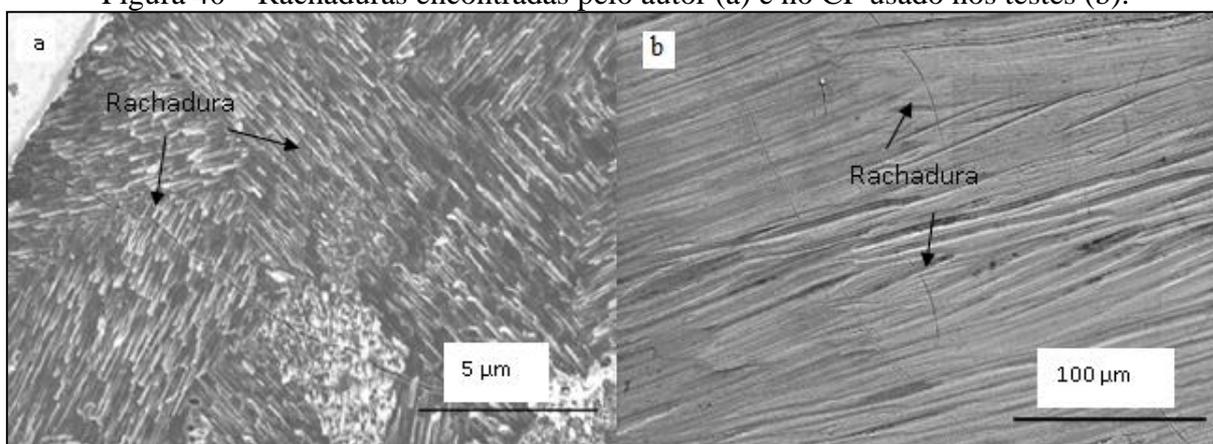
O estudo realizado por Heinke et al. (1995) investigou as propriedades de adesão de três revestimentos diferentes, TiN, CrN e Cr<sub>2</sub>N, depositados em aço SAE 52100 polido. A

espessura do revestimento variou entre 2 e 20  $\mu\text{m}$ . Todos os testes mostraram um comportamento dúctil e baixo desprendimento do revestimento de TiN. O revestimento de CrN e Cr<sub>2</sub>N demonstraram-se frágeis e mais facilmente removidos, assim os testes apresentam falha relativamente prematura do revestimento. Ward et al. (1996) utilizaram diversos revestimentos em ferramentas de aço rápido e concluíram que, de modo geral, os revestimentos que espalharam e mostraram baixa adesão e rachaduras foram *TiN*, *TiAlN* e *CrN*.

Fox-Rabinovich et al. (2011) testaram AlCrN, PFPE, HDLC, carbono tipo diamante (DLC) e diamante em ferramentas de carboneto de tungstênio (WC). Durante os testes, com exceção da ferramenta sem revestimento, a ferramenta revestida com AlCrN apresentou os maiores valores de força. Ainda, o autor afirma que o uso de AlCrN como revestimento apresenta significativa adesão do material do CP (liga B319) na ferramenta, ao contrário das ferramentas revestidas com HDLC e DLC, que obtiveram baixa aderência, e as revestidas por diamante, que mostram um desempenho ainda melhor. Vale lembrar que, a aderência do material na ferramenta causa desgaste e remoção do revestimento.

Cr como um componente intercalar no revestimento, foi utilizado para melhorar a adesão de PCD em ferramentas de metal duro. Xiao et al. (2009) afirmam que o Cr não mostrou o desempenho esperado e que houve desprendimento do revestimento durante os testes. A avaliação das morfologias, composição e componentes de fase das amostras falhadas mostrou que os carbonetos de cromo formados durante a deposição continham microfissuras, o que ocasionou rachaduras na camada de revestimento, e, em decorrência, propiciou um fácil caminho de deslocamento do revestimento. A Figura 40 expõe as rachaduras na camada de revestimento com a presença de Cr.

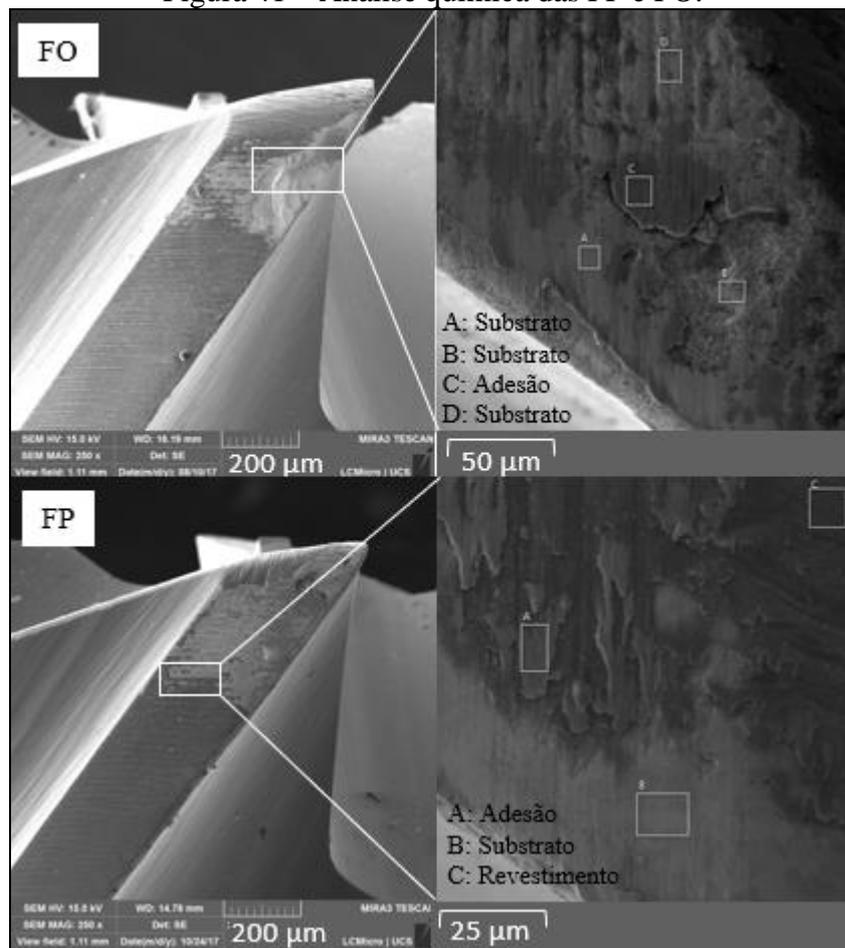
Figura 40 – Rachaduras encontradas pelo autor (a) e no CP usado nos testes (b).



Fonte: Xiao et al. (2009); O autor (2017).

Em relação à condição de usinagem, a usinagem a seco aumentou a temperatura na zona de corte, o que complicou o desempenho da ferramenta e causou um aumento no desgaste. Já o uso de MQL, lubrifica e refrigera o processo (KLOCKE, 2011). Esse comportamento corrobora os melhores resultados para as ferramentas usinadas com MQL. Com o intuito de validar as afirmações anteriores, uma análise química foi realizada e está exposta na Figura 41.

Figura 41 – Análise química das FP e FO.

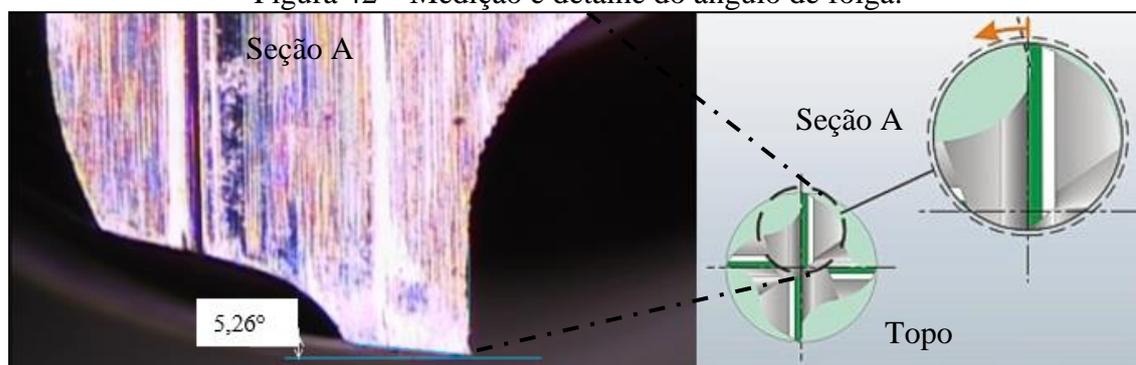


Fonte: O autor (2017).

Essas imagens corroboram o desprendimento do revestimento e a ocorrência de adesão e lascamentos. Como esperado, há maior incidência nas FP do que nas FO. A análise revelou adesão, substrato e revestimento nos pontos indicados, o que caracteriza o desprendimento do revestimento, não somente na zona de corte, mas também, na parte inferior do flanco. Vale lembrar que, a manifestação de adesão e lascamentos na superfície que não integra a zona de corte não é usual.

Com o objetivo de compreender o acontecimento desses fatores distanciados da zona de corte, o ângulo de folga  $\alpha$  das ferramentas, exposto na Figura 42, foi mensurado. O VB é modificado consideravelmente de acordo com o tamanho do ângulo de folga  $\alpha$ . Quando grande, enfraquece a cunha da ferramenta, e assim, pode-se ter acúmulo de calor e maior perigo de lascamento. Quando o ângulo de incidência  $\alpha$  tende a  $0^\circ$ , o VB aumenta devido aos aquecimentos e o atrito entre a ferramenta e a peça na região de contato (KLOCKE, 2011; ZHU; ZHANG; DING, 2012).

Figura 42 – Medição e detalhe do ângulo de folga.



Fonte: O autor (2017).

Para as ferramentas de metal duro em geral, o ângulo de folga  $\alpha$  indicado é entre  $6^\circ$  e  $12^\circ$ . Para a usinagem das ligas de níquel, que possuem uma forte tendência a ocorrência de aderência, formação de BUE e deformação plástica, o ângulo de saída deve ser relativamente grande e o de folga  $\alpha$  deve permanecer em torno de  $6^\circ$  e  $10^\circ$  (KLOCKE, 2011).

A partir do valor mensurado, é possível afirmar que o ângulo de folga  $\alpha$  está abaixo do proposto pela literatura, assim, pode ter dificultado o escoamento do cavaco e influenciado a aderência do material da peça na ferramenta e a remoção do revestimento em áreas afastadas do gume da ferramenta.

Ezugwu, Wang e Machado (1999) após usinarem diversos tipos de ligas de níquel, afirmam que a geometria da ferramenta tem influência no processo de corte, e o aumento do ângulo de posição, conseqüentemente a redução do ângulo de folga  $\alpha$ , aumenta a resistência da ferramenta. Entretanto, isso também aumenta a área de contato entre a ferramenta e o cavaco, aumentando assim, o calor na região de corte. Bouzakis et al. (2014) usinaram Inconel 718 com o intuito de avaliar diferentes tratamentos de gume e afirmam que com o aumento do raio do gume de corte, as cargas de corte são drasticamente diminuídas.

Por fim, a situação testada que gerou o menor grau de desgaste foram as FO com o uso de MQL, pois não houve a remoção prematura de revestimento e deslocamento da taxa de

calor, o uso de MQL minimizou os obstáculos do processo a seco. A presença de desgaste afastado da área de corte foi identificada, e foi motivada pelo ângulo de folga  $\alpha$  reduzido.

## 5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos a partir da realização deste trabalho permitiram avaliar e compreender os efeitos do polimento em ferramentas de metal duro, o impacto das FO e FP no fresamento de Inconel 718 e a interação com diferentes condições de usinagem.

Na avaliação da aplicação do tratamento das ferramentas o polimento mostrou-se inadequado para este tipo de ferramenta, já que revelou um revestimento de baixa adesão, e assim, motivou a remoção prematura do revestimento. Ainda, não alterou a geometria da ferramenta de forma significativa para diminuir as forças de corte. No entanto, se aprimorado, variando o tempo de contato e/ou o tipo de abrasivo, por exemplo, pode trazer resultados satisfatórios.

Na avaliação das condições de usinagem, a aplicação de MQL, quando comparada com a usinagem a seco, trouxe melhores resultados, em relação a ferramenta e ao material usinado, para as FP e as FO. É possível afirmar que a usinagem a seco não pode ser considerada a melhor opção técnica durante a usinagem de Inconel 718, no entanto, o estudo se faz relevante com o propósito de atender questões econômicas, ambientais e trabalhistas.

Na avaliação qualitativa da textura das ferramentas, a principal variação observada ocorreu entre as superfícies usinadas a seco e com o uso de MQL, que gerou superfícies com menor adesão perceptível de material trabalhado e marcas visíveis de passagem da ferramenta.

Na avaliação da rugosidade, as medições após a vida da ferramenta também mostraram que a principal variação ocorreu entre as superfícies usinadas a seco e com o uso de MQL. Contudo, vale lembrar que a ANOVA afirma a influência do tratamento da ferramenta sobre a rugosidade, que pode ter ocorrido pois ferramentas afiadas aumentam a rugosidade na superfície. Os perfis de rugosidade mostram picos e vales acentuados em todas as situações testadas, ocasionados pelo material aderido, principalmente nas superfícies usinadas a seco.

A análise da camada afetada mostrou que as FP na condição a seco mostraram as maiores deformações. As menores deformações foram obtidas pelas FO com a aplicação de MQL. As medições de dureza não expõem variação significativa, visto a limitação do procedimento de medição para mínimas profundidades de 20  $\mu\text{m}$  da superfície.

Quanto ao desgaste, todas as ferramentas tiveram um comportamento semelhante. Os principais mecanismos de desgaste presentes foram abrasão e adesão, motivadores do VB e

dos lascamentos encontrados. A maior intensidade dos mecanismos e tipos de desgaste foi manifestada pela usinagem a seco. As FP também se mostraram mais suscetíveis ao desgaste.

Os melhores resultados de vida da ferramenta em termos de comprimento usinado foram obtidos pelas FO com aplicação de MQL. Este comportamento pode ter ligação com o resfriamento e a lubrificação gerada pelo uso do MQL e a não remoção prematura do revestimento, causada pelo polimento.

## **6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Avaliar os parâmetros do polimento por cerdas abrasivas e seu desgaste, utilizando outros materiais para realizar o polimento.

Avaliar a aplicação de outros revestimentos adequados para a usinagem de Inconel 718.

Avaliar a aplicação de velocidades de corte depois da zona de transição.

## REFERÊNCIAS

- AKHTAR, W.; SUN, J.; SUN, P.; CHEN, W.; SALEEM, Z. **Tool wear mechanisms in the machining of Nickel based super-alloys: A review**. Berlin Heidelberg, 2014.
- ARUMUGAM, U. P.; MALSHE, P. A.; BATZER, A. S. **Dry machining of aluminum–silicon alloy using polished CVD diamond coated cutting tools inserts**. Materials and Manufacturing Research Laboratories (MRL). The United States, 2006.
- ARUNACHALAM, R.; MANNAN, M.A. **Machinability of nickel-based high temperature alloys**. Machining Science Technology, 2000.
- ARUNACHALAM, R. M.; MANNAN, M. A.; SPOWAGE, A. C. **Residual stress and surface roughness when facing age hardened Inconel 718 with CBN and ceramic cutting tools**. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2004.
- ASM Specialty Handbook. **Nickel, Cobalt, and Their Alloys**. First Edition. ASM International. New York, USA, 2000.
- ASTAKHOV, V.P. **Tribology of Metal Cutting**. Elsevier Science, 2006.
- BORDIN, M. F. **Efeito do tratamento da microgeometria de brocas helicoidais de metal-duro sobre a integridade superficial dos furos**. Dissertação. Mestrado profissional em Engenharia Mecânica. Caxias do Sul, 2013.
- BOUZAKIS K. D., BOUZAKIS E., KOMBOGIANNIS S., et al. **Effect of cutting edge preparation of coated tools on their performance in milling various materials**. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 7:264–273, 2014.
- BYUN, T.S.; FARRELL, K. **Tensile properties of Inconel 718 after low temperature neutron irradiation**. Journal of Nuclear Materials, 2003.
- CANTERO, J. L.; DÍAZ-ALVAREZ, J.; MIGUELEZ, M. H.; MARIN N. C. **Analysis of tool wear patterns in finishing turning of Inconel 718**. Wear 297-885–894. 2013.
- DAVIM, J. P. **Green Manufacturing Processes and Systems**. Springer, London, UK, 2013.
- DECKER, R., F. **The Evolution of Wrought Age-Hardenable Superalloys - Nickel: a century of Innovation: Overview**. JOM. Volume 58. pp 32–36. 2006.
- DENKENA, B.; BIERMANN, D. **Cutting edge geometries**. CIRP Annals – Manufacturing Technology, 2014.
- DENKENA, B.; KOEHLER, J.; REHE, M. **Influence of the Honed Cutting Edge on Tool Wear and Surface Integrity in Slot Milling of 42CrMo4 Steel**. Procedia CIRP, 1:190–195, 2012.

DEVILLEZ, A.; SCHNEIDER, F.; DOMINIAK, S.; DUDZINSKI, D.; LARROUQUERE, D. **Cutting forces and wear in dry machining of Inconel 718 with coated carbide tools.** Laboratoire de Physique et Mécanique des Matériaux. Wear. France, 2006.

DEVILLEZ, A.; LE COZ, G.; DOMINIAK, S.; DUDZINSKI, D. **Dry machining of Inconel 718, workpiece surface integrity.** Journal of Materials Processing Technology, n. 211, 1590-1598, 2011.

DHAR, N. R.; AHMED, M. T.; ISLAM, S. **An experimental investigation on effect of minimum quantity lubrication in machining AISI 1040 steel.** International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2007.

DHAR, N. R.; KAMRUZZAMAN, M.; AHMED, M. **Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear and surface roughness in turning AISI-4340 steel.** Journal of Materials Processing Technology. 2006.

DIN 6583: **Begriffe der Zerspantechnik: Standbegriffe.** Deutsches Institut für Normung (ed.). Beuth, Berlin. 1981.

DINIZ A. E.; MARCONDES F. C.; COPPINI N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais.** Artliber Editora. 2001.

DINIZ A. E.; MARCONDES F. C.; COPPINI N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais.** Artliber Editora. 2013.

DUDZINSKI, D., DEVILLEZ, A., MOUFKI, A., LARROUQUERE, D., ZERROUKI, V., VIGNEAU, J. **A review of developments towards dry and high speed machining of Inconel 718 alloy.** International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 44, pp.439–456, 2004.

EZUGWU, E.O. **Key improvements in the machining of difficult-to-cut aero- space superalloys,** International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005.

EZUGWU, E. O.; BONNEY, J.; YAMANE, Y. **An overview of the machinability of aero-engine alloys.** Journal of Materials Processing Technology, v.134, pp. 233-253, 2003.

EZUGWU, E. O.; WANG, Z. M.; MACHADO, A. R. **The machinability of nickel-based alloys: a review.** Journal of Materials Processing Technology. 1999.

FAN, Y.; HAO, Z.; ZHENG, M.; SUN, F.; YANG, S. **Study of surface quality in machining nickel-based alloy Inconel 718.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 69 (9-12) 2659–2667. 2013.

FOX-RABINOVICH, G.; DASCH, J. M.; WAGG, T.; YAMAMOTO, K.; VELDHUIS, S.; DOSBAEVA, G. K.; TAUHIDUZZAMAN, M. **Cutting performance of different coatings during minimum quantity lubrication drilling of aluminum silicon B319 cast alloy.** Surface & Coatings Technology 205 4107–4116. Canada, 2011.

GRZESIK, W. **An investigation of the thermal effects in orthogonal cutting associated with multilayer coatings.** Annals of the CIRP 50 53–56. 2001.

GRIFFITHS, B. **Manufacturing Surface Technology**. London: Penton Press, 2001.

HEINKE, W.; LEYLAND, A.; MATTHEWS, A.; BERG, G.; FRIEDRICH, C.; BROSZEIT, E. **Evaluation of PVD nitride coatings, using impact, scratch and Rockwell-C adhesion tests**. Thin Solid Films 270 431-438. Germany, 1995.

JAWAID, A.; KOKSAL, S.; SHARIF, S. **Cutting performance and wear characteristics of PVD coated and uncoated carbide tools in face milling Inconel 718 aerospace alloy**. Journal of Materials Processing Technology, 2001.

KAYNAK, Y. **Evaluation of machining performance in cryogenic machining of Inconel 718 and comparison with dry and MQL machining**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 72/919–933. 2014.

KALPAKJIAN S.; SCHMID S. R. **Manufacturing Engineering and Technology**. Sixth edition. Pearson. 2009.

KAMATA, Y; OBIKAWA, T. **High speed MQL finish-turning of Inconel 718 with different coated tools**. Journal of Materials Processing Technology. 2007.

KARPUSCHEWSKI, B.; BYELYAYEV, O.; MAIBORODA, V.S. **Magneto-abrasive machining for the mechanical preparation of high-speed steel twist drills**. CIRP Annals - Manufacturing Technology, n. 58, 295-298, 2009.

KASIM, M. S.; CHE HARON, C. H.; GHANI, J. A.; SULAIMAN, M.A.; YAZID, M. Z. A. **Wear mechanism and notch wear location prediction model in ball nose end milling of Inconel 718**. Wear. 302/1171–1179. 2013.

KLOCKE, F. **Manufacturing Processes 1 – Cutting**. Springer. 2011.

KLOCKE, F.; GERSCHWILER, K.; FRITSCH, R.; LUNG, D. **PVD-coated tools and native ester-an advanced system for environmently friendly machining**. Surface and Coatings Technology. 2006.

KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren - Drehen, Fräsen, Bohren. 7<sup>a</sup> Auflage**. Ed. Springer-Verlag. Berlin, 2002.

KRAIN, H. R.; SHARMAN, A. R. C.; RIDGWAY, K. **Optimization of tool life and productivity when end milling Inconel 718**. Journal of Materials Processing Technology 189 153–161. 2007.

KUO, C. M.; YANG, Y. T.; BOR, H. Y.; WEI, C. N.; TAI, C. C. **Aging effects on the microstructure and creep behavior of Inconel 718 superalloy**. Materials Science and Engineering, v.510-511, pp.289-294, 2009.

KURAM, E.; OZCELIK, B.; DEMIRBAS, E. **Environmentally Friendly Machining: Vegetable Based Cutting Fluids, Green Manufacturing Processes and Systems**. Springer, 2013.

LI K., CHOU S. **Experimental evaluation of minimum quantity lubrication in near micro-milling.** Journal of Materials Processing Technology. 210:2163–2170. 2010.

LI, L.; HE, N.; WANG, M.; WANG, Z. G. **High speed cutting of Inconel 718 with coated carbide and ceramic inserts.** 2007.

LI, H. Z.; ZENG, H.; CHEN, X. Q. **An experimental study of tool wear and cutting force variation in the end milling of Inconel 718 with coated carbide inserts.** Journal of Materials Processing Technology, 2006.

LIAO, Y. S.; LIN, H. M.; WANG, J. H. **Behaviors of end milling Inconel 718 superalloy by cemented carbide tools.** Journal of Materials Processing Technology, 2008.

MACHADO A. R.; COELHO R. T.; ABRÃO A. M.; SILVA M. B. **Teoria da usinagem dos materiais.** 9. ed. São Paulo: Blucher, 384 p. 2009.

MALSHE, A. P.; TAHER, M. A.; MUYSHONDT, A.; SCHMIDT, W. F.; MOHAMMED, H.; MOHAMMED, H. **A comparative study of dry machining of A390 alloy using PCD and CVD diamond tools.** Trans, NAMRI/SME XXVI, 1998.

OBIKAWA, T.; YAMAGUCHI, M.; FUNAI, K.; KAMATA, Y.; YAMADA, S. **Air jet assisted machining of nickel-base superalloy.** International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012.

PAWADE, R. S.; JOSHI, S. S.; BRAHMANKAR, P. K. **Effect of machining parameters and cutting edge geometry on surface of high speed turned Inconel 718.** International Journal of Machine tools and Manufacture 48, 15–28. 2008.

PAUCKSH, E.; HOLSTEN, S.; LINß, M.; TIKAL, F. **Zerspantechnik: Prozesse, Werkzeuge, Technologien, 12.** Vieweg-Teubner, 2008.

PERVAIZ, S.; RASHID, A.; DEIAB, I.; NICOLESCU, M. **Influence of tool materials on machinability of titanium and nickel-based alloys: a review.** Materials and Manufacturing Processes. 2014.

RIBEIRO, J.; CATEN, C. S. T. **Série monográfica qualidade: Projeto de experimentos.** Porto Alegre: Eletrônica, 2011.

RODRIGUEZ, C. J. C. **Cutting edge preparation of precision cutting tools by applying micro-abrasive jet machining and brushing.** Alemanha, 2009.

SCHULZ, H. **High speed machining.** Annals of the CIRP 41 637–643. 1992.

SHARMAN, A.; DEWES, R. C.; ASPINWALL, D. K. **Tool life when high speed ball nose end milling Inconel 718.** Journal of Materials Processing Technology 118 29–35. 2001.

SHARMAN, A. R. C.; HUGHES, J. J.; RIDGWAY, K. **Workpiece surface integrity and tool life issues when turning Inconel 718 nickel-based superalloy.** Machining Science and Technology. Volume 8. 2004.

SHASHIDHARA, Y. M.; JAYARAM, S. R. **Vegetable oils as a potential cutting fluid - An evolution.** Tribology International, 43:1073–1081. 2010.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte I.** Editora da UFSC. Florianópolis, 1995.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte II.** Editora da UFSC. Florianópolis, 2008.

SU, Y.; HE, N.; LI, L.; LI, X. L. **An experimental investigation of effects of cooling/lubrication conditions on tool wear in high speed end milling of Ti-6Al-4 V.** Wear, 2006.

SU, Y.; HE, N.; LI, L.; IQBAL, A.; XIAO, M.; XU, S.; QIU, B. **Refrigerated cooling air cutting of difficult-to-cut materials.** International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007.

SUN, S.; BRANDT, M.; DARGUSCH, M. S. **Machining Ti-6Al-4V alloy with cryogenic compressed air cooling.** International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2010.

TEIXEIRA, C.R. **Benefícios ecológicos da redução e eliminação de fluidos de corte nos processos de usinagem com ferramentas de geometria definida.** Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 255 p., 2001.

THAKUR, A.; GANGOPADHYAY, S. **State-of-the-art in surface integrity in machining of nickel-based super alloys.** International Journal of Machine Tools and Manufacture. India, 2015.

TOENSHOFF H. K.; DENKENA B. **Basics of Cutting and Abrasive Processes.** Springer, 2013.

UCUN, I.; ASLANTAS, K.; BEDIR, F. **The performance Of DLC-coated and uncoated ultra-fine carbide tools in micromilling of Inconel 718.** Precision Engineering. Turkey, 2015.

UCUN, I.; ASLANTAS, K.; BEDIR, F. **An experimental investigation of the effect of coating material on tool wear in micromilling of Inconel 718 superalloy.** Wear. Turkey, 2013.

UMBRELLO, D. **Investigation of surface integrity in dry machining of Inconel 718.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 69:2183–2190. DOI 10.1007/s00170-013-5198-0. London, 2013.

VASHISTA, M.; PAUL, S. **Correlation between surface integrity of ground medium carbon steel with Barkhausen Noise parameters and magnetic hysteresis loop characteristics.** Materials and Design, n. 30:5, p. 1595-1603, 2009.

VELDHUIS, S. C.; DOSBAEVA, G. K.; YAMAMOTO, K. **Tribological compatibility and improvement of machining productivity and surface integrity.** Tribology International. 2009.

VENKATA, R. **Advanced modeling and optimization of manufacturing processes.** London Limited: Springer-Verlag, 2011.

VIDAKIS, N.; ANTONIADIS, A.; BILALIS, N. **The VDI 3198 indentation test evaluation of a reliable qualitative control for layered compounds.** Journal of Materials Processing Technology. 143–144 481–485. Greece, 2003.

WARD, L. P.; STRATFORD, K. N.; SUBRAMANIAN, C.; WILKS, T. P. **Observations on the structure, hardness and adhesion properties of a selection of multicomponent refractory element nitride coatings.** Journal of Materials Processing Technology 56 375–384. Australia, 1996.

WEINGAERTNER, W. L.; SCHROETER, R. B.; BARBA JUNIOR, D. J.; KISH, M. **Qualidade superficial e formação de cavacos na usinagem de Al e Cu.** Máquinas e Metais, p.82-89, 1994.

WEATHERFORD. **Safety Valves (Catalogo).** Disponível em: <<http://www.weatherford.com/ECMWEB/groups/web/documents/weatherfordcorp/WFT003619.pdf>>. Acessado em 30 de mar. 2017.

WYATT, J.E.; BERRY, J.T. **A new technique for the determination of superficial residual stresses associated with machining and other manufacturing processes.** Journal of Materials Processing Technology, n. 171, p.132–140, 2006.

XIAO, X.; SHELDON, B. W.; KONCA, E.; LEV, L. C.; LUKITSCH, M. J. **The failure mechanism of chromium as the interlayer to enhance the adhesion of nanocrystalline diamond coatings on cemented carbide.** Diamond & Related Materials 18 1114–1117. The United States, 2009.

YAZID, M. Z. A.; CHEHARON, C. H.; GHANI, J.A.; IBRAHIM, G. A.; SAID, A. Y. M. **Surface integrity of Inconel 718 when finish turning with PVD coated carbide tool under MQL.** Procedia Engineering.19 396–401. 2011.

ZEILMANN R. P.; VACARO T.; BORDIN F. M.; COMIN G. S. **Integridade no fresamento com ferramentas submetidas a tratamento superficial.** 7º Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. Maranhão, 2012.

ZEILMANN, R. P.; VACARO, T.; BORDIN, F. M.; SONDA, V. **Processos de usinagem e responsabilidade ambiental através da redução da utilização de fluidos de corte.** Anais do XVII Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva, São Paulo, 2009.

ZHANG, S.; LI, J., F.; WANG, Y. W. **Tool life and cutting forces in end milling Inconel 718 under dry and minimum quantity cooling lubrication cutting conditions.** Journal of Cleaner Production. China, 2012.

ZHU, D.; ZHANG, X.; DING, H. **Tool wear characteristics in machining of nickel-based superalloys.** International Journal of Machine Tool and Manufacture. China, 2012.

## APÊNDICE A – ANOVA PARA OS VALORES DE RUGOSIDADE

## ANOVA dos valores de Ra

Fonte	Soma dos quadrados	GL	Média Quadrática	F	P
Posição	0,022	1	0,022	2,71	0,106
Condição	0,439	1	0,439	53,47	0
Tratamento	0,054	1	0,054	6,58	0,013
Posição*Condição	0,060	1	0,060	7,31	0,009
Posição*Tratamento	0,080	1	0,080	9,75	0,003
Condição*Tratamento	0,026	1	0,026	3,10	0,084
Posição*Condição*Tratamento	0,049	1	0,049	5,94	0,018
Erro	0,427	52	0,008		
Total	1,079	59			

ANOVA dos valores de R<sub>máx</sub>

Fonte	Soma dos quadrados	GL	Média Quadrática	F	P
Posição	2,992	1	2,992	3,72	0,059
Condição	29,013	1	29,013	36,09	0
Tratamento	5,107	1	5,107	6,35	0,015
Posição*Condição	4,260	1	4,260	5,29	0,025
Posição*Tratamento	5,857	1	5,857	7,28	0,009
Condição*Tratamento	2,632	1	2,632	3,27	0,076
Posição*Condição*Tratamento	4,422	1	4,422	5,50	0,023
Erro	41,799	52	0,804		
Total	89,566	59			

## ANOVA dos valores de Rz

Fonte	Soma dos quadrados	GL	Média Quadrática	F	P
Posição	11,460	1	11,460	5,68	0,021
Condição	60,721	1	60,721	30,09	0
Tratamento	16,303	1	16,303	8,08	0,006
Posição*Condição	13,329	1	13,329	6,60	0,013
Posição*Tratamento	16,913	1	16,913	8,38	0,006
Condição*Tratamento	10,340	1	10,340	5,12	0,028
Posição*Condição*Tratamento	14,799	1	14,799	7,33	0,009
Erro	104,910	52	2,180		
Total	229,546	59			

## APÊNDICE B – ANOVA PARA OS VALORES DE CAMADA AFETADA

	Soma Quadrática	GL	Média Quadrática	F	P	
Tratamento	9,901	1	9,901	17,39	0,003	
Condição	22,032	1	22,032	38,70	0	
Tratamento*Condição	4,465	1	4,465	7,84	0,023	Ala
Erro	4,554	8	0,569			
Total	40,952	11				
Tratamento	10,065	1	10,065	7,85	0,023	
Condição	28,244	1	28,44	22,04	0,002	
Tratamento*Condição	5,922	1	5,922	4,62	0,064	Aly
Erro	10,249	8	1,281			
Total	54,480	11				
Tratamento	9,416	1	9,416	15,01	0,005	
Condição	14,986	1	14,986	23,90	0,001	
Tratamento*Condição	1,993	1	1,993	3,17	0,112	Alz
Erro	5,016	8	0,627			
Total	31,411	11				

## ANOVA com valores de usinagem com MQL

	Soma Quadrática	GL	Média Quadrática	F	P	
Tratamento	0,534	1	0,534	0,78	0,425	
Erro	2,712	4	0,678			Ala
Total	3,246	5				
Tratamento	0,273	1	0,273	0,19	0,682	
Erro	5,623	4	1,406			Aly
Total	5,896	5				
Tratamento	1,373	1	1,373	1,60	0,274	
Erro	3,419	4	0,855			Alz
Total	4,792	5				

## ANOVA com valores de usinagem a seco

	Soma Quadrática	GL	Média Quadrática	F	P	
Tratamento	13,832	1	13,832	30,03	0,005	
Erro	1,842	4	0,461			Ala
Total	15,674	5				
Tratamento	15,714	1	15,714	13,58	0,021	
Erro	4,626	4	1,157			Aly
Total	20,340	5				
Tratamento	10,036	1	10,036	25,14	0,007	
Erro	1,597	4	0,399			Alz
Total	289,890	5				

## ANOVA com valores de usinagem com o uso de ferramentas polidas

	Soma Quadrática	GL	Média Quadrática	F	P	
Condição	23,167	1	23,167	81,73	0,001	
Erro	1,134	4	0,283			Ala
Total	24,301	5				
Condição	30,016	1	30,016	30,14	0,005	
Erro	3,984	4	0,996			Aly
Total	34,000	5				
Condição	13,954	1	13,954	32,74	0,005	
Erro	1,705	4	0,426			Alz
Total	15,658	5				

## ANOVA com valores de usinagem com o uso de ferramentas originais

	Soma Quadrática	GL	Média Quadrática	F	P	
Condição	3,330	1	3,33	3,89	0,12	
Erro	3,420	4	0,885			Ala
Total	6,750	5				
Condição	4,150	1	4,15	2,65	0,179	
Erro	6,265	4	1,566			Aly
Total	10,415	5				
Condição	3,025	1	3,025	3,65	0,129	
Erro	3,311	4	0,828			Alz
Total	6,336	5				