

DÉBORAH DE OLIVEIRA

**RETIFICAÇÃO DE INCONEL 718 COM
MULTICAMADAS DE GRAFENO DISPERSAS EM
FLUIDO DE CORTE APLICADO VIA TÉCNICA MQL**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

2017

DÉBORAH DE OLIVEIRA

**RETIFICAÇÃO DE INCONEL 718 COM MULTICAMADAS DE
GRAFENO DISPERSAS EM FLUIDO DE CORTE APLICADO VIA
TÉCNICA MQL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Rosemar Batista da Silva

Co-orientador: Prof. Dr. Rogério Valentim Gelamo

Uberlândia – MG

2017



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA



ALUNA: Déborah de Oliveira

NÚMERO DE MATRÍCULA: 11522EMC016

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Materiais e Processos de Fabricação

LINHA DE PESQUISA: Processos de Fabricação (Usinagem e Soldagem)

PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA: NÍVEL MESTRADO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:

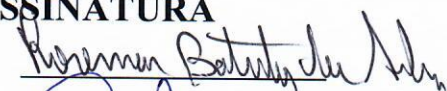
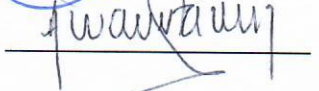
“Retificação de Inconel 718 com Multicamadas de Grafeno Dispersas em Fluido de Corte Aplicado via Técnica MQL”

ORIENTADOR: Prof. Dr. Rosemar Batista da Silva

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Rogério Valentim Gelamo

A Dissertação foi **APROVADA** em reunião privada, realizada no Anfiteatro B - Bloco 5O, Campus Santa Mônica, em 04 de abril de 2017, às 08:00 horas, com a seguinte Banca Examinadora:

NOME
Prof. Dr. Rosemar Batista da Silva
Prof. Dr. Rogério Valentim Gelamo
Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva
Prof. Dr. Amauri Hassui

ASSINATURA
UFU 
UFTM 
UFU 
UNICAMP 

Uberlândia, 04 de abril de 2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

O48r
2017

Oliveira, Déborah de, 1992-
Retificação de Inconel 718 com multicamadas de grafeno dispersas
em fluido de corte aplicado / Déborah de Oliveira. - 2017.
91 f. : il.

Orientador: Rosemar Batista da Silva.
Coorientador: Rogério Valentim Gelamo.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.1125>
Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Retificação - Teses. 3. Usinagem
- Teses. 4. Fluidos de corte - Teses. I. Silva, Rosemar Batista da, 1974-
II. Gelamo, Rogério Valentim. III. Universidade Federal de Uberlândia.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDU: 621

Maria Salete de Freitas Pinheiro – CRB6/1262

DEDICATÓRIA

Aos meus pais e à retificadora.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, dono de toda sabedoria e conhecimento.

Aos meus pais Marcos Aurélio e Márcia, e a toda minha família.

Ao Prof. Dr. Rosemar Batista da Silva pela orientação e todos os ensinamentos que foram passados nos últimos anos.

À Universidade Federal de Uberlândia (UFU), à Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) e aos Laboratórios de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) e de Usinagem Convencional (LUC) pela oportunidade concedida;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de mestrado e apoio financeiro na pesquisa.

Ao Prof. Dr. Rogério Valentim Gelamo pela preparação e doação do grafeno, como também pela sua contribuição importante na discussão dos resultados.

Ao professor Dr. Márcio Bacci da Silva por sempre se mostrar prestativo e disponível em todas as solicitações de auxílio e por todo o conhecimento passado em momentos de dúvida.

Ao técnico de laboratório e doutorando Alcione dos Reis e à aluna de iniciação científica em Engenharia Mecânica Lurian Sousa Vieira da Silva pelo suporte técnico e emocional durante todo o desenvolvimento da dissertação.

Às professoras Dra. Rosenda Valdes Rencibia e Dra. Maria da Penha Cindra Fonseca (UFF), pela instrução, tempo dedicado e pela colaboração nas medições dimensionais e de tensão residual, respectivamente.

A todos os professores, técnicos e alunos dos laboratórios LAPROSOLDA, LTM e LEST por ajudarem no desenvolvimento da pesquisa como também por permitirem a utilização de materiais e equipamentos sem os quais a conclusão desta pesquisa não teria sido possível.

Aos técnicos do Laboratório de Usinagem Convencional, Lázaro Vieira, Thiago Pereira, Thiago Menezes, por sempre terem me auxiliado.

Aos meus amigos e colegas do LEPU que de alguma forma fizeram parte desta jornada: Prof. Armando Marques, Prof. Cleudes Guimarães, Prof. Luciano Fernandes, Prof. Raphael Lima de Paiva, Victor Rubin, Maksym Ziberov, Saimon Vendrame, Ivanilson Costa, Antonio Vitor de Melo, Mariana Landim e Kenji Okada (aluno de iniciação científica).

DE OLIVEIRA, D. **Retificação de Inconel 718 com Multicamadas de Grafeno Dispersas em Fluido de Corte Aplicado via Técnica MQL**. 2017, 109 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia - MG.

Resumo

Devido às pequenas dimensões dos cavacos e à baixa condutividade térmica dos rebolos convencionais, a maior parte do calor gerado no processo de retificação é transferida para a peça. Dependendo da quantidade de calor, a peça poderá apresentar pobre acabamento, alterações dimensionais e microestruturais que podem comprometer a sua funcionalidade. Este problema é agravado ao usinar superligas, como o Inconel 718, por exemplo, que também possui baixa condutividade térmica, o que dificulta a dissipação do calor durante a usinagem. Por este motivo, a retificação desta liga com rebolos convencionais é geralmente realizada com fluido de corte aplicado com elevadas vazões visando à refrigeração da peça. Mas nos últimos anos, emprego de fluidos em grandes vazões tem sido cada vez mais questionado pelos riscos e problemas de saúde e ambientais envolvidos. Logo, torna-se necessário buscar alternativas que aliem boa refrigeração com menos riscos à saúde humana e ao ambiente. Dentre as várias possibilidades, esta pesquisa investigou a influência de partículas de multicamadas de grafeno adicionadas em fluido de corte de base vegetal na rugosidade e na integridade da sub-superfície do Inconel 718, após a retificação com rebolo de SiC, como também na potência instantânea do processo. Duas diferentes concentrações em peso de grafeno (0,05% e 0,10%) foram testadas e aplicadas via a técnica MQL. Ensaio com fluido de corte sem grafeno via técnica MQL, fluido emulsificável em abundância e na condição a seco também foram realizados para permitir comparações. Os resultados mostraram que a usinagem com a técnica MQL com a menor concentração de grafeno (MQL MG 0,05%) proporcionou os menores valores de rugosidade, a menor variação na microdureza e exigiu menos esforços de usinagem. Esta condição também promoveu menor número de trincas nas superfícies e a geração de tensão residual de compressão em condições mais brandas de usinagem. A microdureza sofreu influência da técnica de lubri-refrigeração e da penetração de trabalho. A técnica MQL MG 0,05% mostrou-se como alternativa tecnicamente viável em relação ao fluido de corte aplicado pela técnica convencional na retificação do Inconel 718 com rebolo abrasivo convencional.

Palavras Chave: Retificação, Inconel 718; Fluido de Corte, Multicamadas de grafeno, Rugosidade, Microdureza, Tensão Residual.

DE OLIVEIRA, D. *Grinding of Inconel 718 with Multilayer Graphene Platelets Dispersed In Cutting Fluid Applied by the MQL Technique*. 2017. 109 p. Master's Dissertation, Federal University of Uberlandia - MG.

Abstract

Due to the small size of the chips and the low thermal conductivity of the conventional grinding wheels, most of the heat generated in the grinding process goes to the workpiece. Depending on the amount of heat, it can adversely affect surface finish and cause microstructural changes in the workpiece material that may compromise its functionality. This problem becomes worse when machining superalloys, such as Inconel 718, which also has low thermal conductivity and consequently leads to low rate of heat dissipation during machining. For this reason, the grinding of this alloy with conventional grinding wheels is generally carried out at high coolant flow rates in order to cool the workpiece. However, in the last years, various research has been focused on restriction of the use of high volume of coolants because of health and environmental risks related to their use. Therefore, it is necessary to seek alternatives for cutting fluids that combine good refrigeration with lower risks to human health and the environment. Among the several possibilities, this research investigated the influence of multilayer graphene platelets added to a vegetable-based cutting fluid on the surface roughness, surface and subsurface changes of the Inconel 718 after grinding with SiC grinding wheel, as well as on the grinding power. Two different concentrations (%wt) (0.05% and 0.10%) of multilayer graphene were tested and applied via the MQL technique. Tests with graphene-free coolant also applied via MQL technique, flood and dry condition were also performed to allow comparisons. The results showed that grinding with the lowest graphene concentration applied via the MQL technique (MQL MG 0.05%) provided the lowest roughness values and microhardness variation, as well as required less grinding efforts. It was also able to reduce the generation of cracks in the surfaces and resulted in compressive residual stress after grinding under less severe conditions. The microhardness was influenced by the cooling-lubrication technique and the radial depth of cut. The MQL MG 0.05% condition proved to be technically viable as an alternative to the use of flood technique in the grinding of Inconel 718 with conventional abrasive wheel.

Keywords: *Grinding, Inconel 718, Coolant, Multilayer Graphene, MQL Technique, Surface Roughness, Microhardness, Residual stress.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Distribuição percentual de materiais utilizados na fabricação de motor aeronáutico, tipo <i>turbofan</i> , da fabricante GE (adaptado de CAMPBELL, 2006).	6
Figura 2.2 – Elementos de um rebolo abrasivo convencional (MACHADO et al., 2011).	8
Figura 2.3 – Formação do cavaco na retificação de material dúctil (MARINESCU et al., 2004).	9
Figura 2.4 – Divisão de custos durante o processo de produção de uma peça retificada com detalhe para os gastos com fluido de corte (adaptado de Sanchez et al., 2010).	14
Figura 2.5 – Temperatura na superfície em função do tempo de usinagem para diferentes atmosferas durante retificação de aço endurecido 100Cr6 (50 HR _C) com rebolo de alumina (HADAD, 2012).	16
Figura 2.6 – Estruturas alotrópicas do carbono a partir do grafeno e suas formas: a) <i>bulkyball</i> (forma de esfera oca formada por várias faces hexagonais ligadas entre si), b) nanotubos e c) grafite (adaptado de WONG e AKINWANDE, 2011).	22
Figura 2.7 – Esquema de uma estrutura de multicamadas de grafeno (LI et al., 2017).	22
Figura 2.8 – Redução percentual do atrito em aplicação automotiva do uso de multicamadas de grafeno adicionado em função da concentração e tipo de aditivo (adaptado de RAMON-RAYGOZA et al., 2016).	24
Figura 2.9 - Usinabilidade relativa de metais (adaptado de EZUGWU, 2005).	25
Figura 2.10 – Esquema de superfície com rugosidade e metodologia de medição a) Diferenciação dos desvios geométricos, b) Metodologia da linha média para a medição da rugosidade. (AGOSTINHO; RODRIGUES; LIRANI, 2004).	28
Figura 3.1 – Fluxograma das etapas para o desenvolvimento desta pesquisa.	35
Figura 3.2 – Microestrutura do Inconel 718 utilizado nesta pesquisa.	37
Figura 3.3 – Detalhe dos carbonetos presentes na microestrutura do Inconel 718 utilizado nesta pesquisa.	37
Figura 3.4 – Imagens da montagem da peça na morsa de precisão: a) Vista lateral direita b) Vista frontal/superior do sistema peça-morsa-mesa da retificadora.	38
Figura 3.5 – Rebolo 39C60KVK utilizado nos ensaios.	39
Figura 3.6 – Montagem e posicionamento dos bocais utilizados durante os ensaios de retificação para as técnicas: a) técnica convencional com bocal convencional – que também	

foi empregado na operação de dressagem b) MQL com bocal desenvolvido por Guimaraes (2016).	41
Figura 3.7 – Esquema do posicionamento do bocal para ambas as metodologias de aplicação de fluido (adaptado de GUIMARÃES, 2016).	42
Figura 3.8 - Bomba de seringa utilizada nos ensaios de retificação com a técnica MQL: a) desenho em perspectiva isométrica (adaptado de DE MELLO, 2015 e b) foto - vista superior	42
Figura 3.9 – Parâmetros de corte na retificação plana tangencial (Adaptada de MARINESCU, 2007), a) Retificação com avanço transversal da mesa (velocidade transversal e b) Retificação sem avanço transversal da mesa e largura da peça inferior à largura do rebolo.	46
Figura 3.10 – Regiões de medição dos parâmetros de rugosidade.	48
Figura 3.11 – Imagem de superfície de amostra de Inconel 718 antes dos ensaios de retificação da Tabela 3.4.	49
Figura 3.12 – Esquema de detalhamento para medição da microdureza.	50
Figura 3.13 – Ilustração das direções de medição de tensões residuais nas amostras.	51
Figura 3.14 – Metodologia de medição da potência elétrica da retificadora.	53
Figura 4.1 – Rugosidade R_a do Inconel 718 após retificação com diferentes condições de corte.	56
Figura 4.2 – Rugosidade R_t do Inconel 718 após retificação com diferentes condições de corte.	56
Figura 4.3 – Superfície de amostra de Inconel 718 após retificação com atmosfera lubri-refrigerante Convencional e $a_e = 40 \mu m$: a) ampliação de 1000 x, b) região selecionada de a) com ampliação de 10000 X.	60
Figura 4.4 – Imagens via MEV da superfícies de Inconel 718 após o processo de retificação plana em diferentes condições de corte (Ampliação de 10.000x).	62
Figura 4.5 – Perfil de microdureza após a retificação de Inconel 718 com rebolo de SiC com diferentes condições de corte e $a_e = 20 \mu m$	64
Figura 4.6 – Perfil de microdureza após a retificação de Inconel 718 com rebolo de SiC com diferentes condições de corte e $a_e = 40 \mu m$	67
Figura 4.7 – Microestrutura do Inconel 718 apresentando maclas e estrutura de Laves, escala de $500 \mu m$	68
Figura 4.8 – Microestrutura do Inconel 718 com detalhe para estrutura de Laves, escala de $50 \mu m$	69
Figura 4.9 -- Microestrutura do Inconel 718 com detalhe para as maclas, escala de $50 \mu m$	70
Figura 4.10 – Microestrutura da amostra de Inconel 718 retificada com $a_e = 20 \mu m$ e atmosfera lubri-refrigerante A Seco.	71

Figura 4.11 – Microestrutura das amostras após a retificação que apresentaram o maior desvio de microdureza (Figs. 4.6 e 4.7): a) $a_e = 20 \mu\text{m}$, atmosfera lubri-refrigerante A Seco, b) $a_e = 20 \mu\text{m}$, atmosfera lubri-refrigerante MQL MG 0,10% e c) $a_e = 40 \mu\text{m}$, atmosfera lubri-refrigerante Convencional.	72
Figura 4.12 – Tensão residual longitudinal na superfície da amostra de Inconel 718 após retificação com rebolo de SiC em diferentes condições de corte.	73
Figura 4.13 – Tensão residual transversal na superfície da amostra de Inconel 718 após retificação com rebolo de SiC em diferentes condições de corte.	74
Figura 4.14 – Potência durante a retificação de Inconel 718 para diferentes penetrações de trabalho para as diferentes atmosferas lubri-refrigerantes: a) a seco, b) Convencional, c) MQL MG 0,00%, d) MQL MG 0,05% e e) MQL MG 0,10%.	77
Figura 4.15 – Valores do picos de potência durante a retificação de Inconel 718 para diferentes penetrações de trabalho para as diferentes atmosferas lubri-refrigerantes	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Propriedades mecânicas do Inconel 718 e do aço inoxidável AISI 304 (Adaptado de MAHER (2016), NORTH AMERICAN STAINLESS (2016) e G-STYLE S.A. (2016)).....	7
Tabela 2.2 – Propriedades e aplicações de abrasivos para rebolos (adaptado de MACHADO et al., 2011).....	11
Tabela 2.3 – Fluidos de corte recomendados para o processo de retificação (adaptado de KALPAKJIAN e SCHMID, 2009).	13
Tabela 2.4 – Compilação de partículas sólidas para uso em fluidos de corte de retificação.	19
Tabela 2.5 – Propriedades que diferenciam os materiais formados por carbono (adaptado de WONG e AKINWANDE, 2011).	21
Tabela 2.6 – Principais parâmetros de rugosidade (MACHADO et al., 2011).	29
Tabela 3.1 – Composição química do Inconel 718 obtida através do MEV comparada com a composição teórica de acordo com Reed (2006).	36
Tabela 3.2 – Viscosidade e massa específica para as diferentes concentrações de grafeno – condições lubri-refrigerantes valores médios).....	44
Tabela 3.3 – Condutividade térmica para as diferentes concentrações de grafeno – condições lubri-refrigerantes.....	45
Tabela 3.4 – Variáveis de entrada utilizados nos ensaios de retificação.	45
Tabela 3.5 – Parâmetros de medição das tensões residuais.	52
Tabela 4.1 – Valores médios de rugosidade Ra e Rt (μm) das amostras de Inconel 718 após retificação com diferentes condições de corte.....	54

LISTA DE ABREVIACÕES E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
a_d (μm)	Penetração de dressagem
a_e (μm)	Penetração de trabalho
AISI	<i>American Iron and Steel Institute (Instituto Americano de Ferro e Aço)</i>
Al_2O_3	Alumina
a_p (mm)	Profundidade de corte
ASM	<i>American Society of Metals (Sociedade Americana de Metais)</i>
BCT	Tetragonal de corpo centrado
b_d (mm)	Largura de atuação do dressador
CBN	Nitreto de boro cúbico
CNT	<i>Carbon nanotubes</i> (nano tubos de carbono)
EDS	Sistema de energia dispersiva
d	Distância interplanar
F_t (N)	Força tangencial de retificação
h_{cu}	Espessura de cavaco não deformado
HRB	Dureza Rockwell B
HR_C	Dureza Rockwell C
H_v	<i>Dureza Vickers</i>
IT	<i>Grau de tolerância padrão</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization (Organização Internacional para Padronização)</i>
L	Direção longitudinal
MQL	Mínima Quantidade de Lubrificante
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MG	Multicamada de grafeno
MoS_2	Bissulfeto de Molibdênio
NBR	Norma Brasileira
ND	Nano diamantes
P (W)	Potência de retificação
ψ	Ângulo de inclinação
Q_w (m^3)	Unidade volumétrica de material removido
R_a (μm)	Desvio aritmético médio de rugosidade
R_{ku}	Fator de achatamento do perfil

R_p (mm)	Raio de ponta do dressador
R_q (μm)	Desvio médio quadrático
R_{sk}	Fator de assimetria do perfil (Skewness)
R_t (μm)	Altura total do perfil
R_z (μm)	Altura máxima do perfil
S_d (mm)	Passo de dressagem
SiC	Carbeto de Silício
T	Direção transversal
U (W/m^3)	Energia específica
U_d	Grau de recobrimento do rebolo
v_s (m/s)	Velocidade de corte
v_w (m/min)	Velocidade da peça
WS_2	Sulfureto de tungstênio
ZrO_2	Dióxido de Zircônia

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Inconel 718	5
2.2 Processo de retificação	7
2.3 Fluidos de corte	12
2.4 Técnica MQL em processo de retificação	15
2.5 Partículas sólidas aplicáveis em fluidos de corte.....	17
2.6 Multicamadas de Grafeno	21
2.7 Usinabilidade do Inconel 718	24
2.8 Qualidade de superfícies usinadas	27
2.8.1 Rugosidade em peças de Inconel 718 retificadas	29
2.9 Considerações sobre a Integridade Sub-superficial de ligas de níquel após a retificação	31
2.9.1 Potência em Retificação	33
CAPÍTULO III - METODOLOGIA	35
3.1 Material da peça e preparação.....	36
3.2 Ensaio de retificação	38
3.2.1 Máquina ferramenta	39
3.2.2 Rebolo	39
3.3 Fluidos de corte e técnicas de aplicação.....	39
3.4 Grafeno: obtenção e preparação	43
3.4.1 Caracterização dos fluidos de corte com e sem multicamadas de grafeno	43
3.5 Parâmetros de corte	45
3.6 Variáveis de saída monitoradas	48
3.6.1 Parâmetros de Rugosidade.....	48
3.7 Avaliação da Integridade das peças.....	49
3.7.1 Imagens da superfície retificada	49
3.7.2 Microdureza	50
3.7.3 Microestrutura	50
3.7.4 Tensão residual	51
3.8 Potência Elétrica	52
CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÕES	54
4.1 Rugosidade.....	54

4.2 Imagens das superfícies retificadas	58
4.3 Microdureza	63
4.4 Imagens da microestrutura das peças retificadas	68
4.5 Tensão residual	73
4.6 Potência Instantânea de Retificação	76
CAPÍTULO V - CONCLUSÕES	82
Sugestões para trabalhos futuros	84
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento dos materiais metálicos está intimamente associado aos avanços tecnológicos e, para a grande maioria das aplicações em engenharia, os aços são aqueles mais requisitados. Mas em algumas situações, os aços não apresentam resistência mecânica suficiente, por exemplo, para operar em eixos de turbinas em temperaturas superiores a 500 °C e ainda em aplicações criogênicas. Com isso, as ligas refratárias ou “superligas” tornam-se a única opção, por reunirem boas propriedades químicas e mecânicas. Dentre estas ligas, o destaque está para aquelas à base de níquel por apresentarem combinação de boa resistência à fadiga e à fluência mesmo em temperaturas elevadas, bem como ductilidade e rigidez (ASM Handbook Vol.2, 1990, EZUGWU et al., 1999, RESENDE et al., 2009, SUGAHARA et al., 2009 e DOS SANTOS, 2010).

Uma das principais ligas de níquel é o Inconel 718 (UNS N07718), nome comercial de uma liga de níquel cujas aplicações se estendem desde criogenia, indústria automobilística, petrolífera, naval, e, principalmente, à indústria aeroespacial. Ele é considerado um material nobre pela sua capacidade de operar em elevadas temperaturas sem grande alteração na sua resistência mecânica e inércia química, propriedades que os aços não podem conferir. Este material é empregado em motores aeronáuticos, aplicação que requer estas boas propriedades, além de elevada qualidade das peças (EZUGWU, 2002; ASPINWALL et al., 2007).

Estes componentes devem ser livres de defeitos e requerem combinação de um ótimo acabamento e tolerâncias dimensionais estreitas. A retificação é um dos processos de fabricação que permite proporcionar esta combinação (CAMPBELL, 2006, MARINESCU et al. 2007, KLOCKE et al. 2014 e KLOCKE et al. 2015)

Entretanto, para que a qualidade final de um componente, seja ela geométrica e/ou dimensional, seja atendida é preciso dedicar uma maior atenção na usinagem do Inconel 718, já que as mesmas propriedades que por um lado são desejáveis para a peça, por outro se tornam desafios durante a usinagem. Ezugwu (2002) relata que a elevada resistência

mecânica mantida em elevadas temperaturas e baixa condutividade térmica do Inconel 718 são as propriedades responsáveis pelo desenvolvimento das altas temperaturas na interface peça-ferramenta durante a usinagem, que aceleram o desgaste nas ferramentas de corte com geometria definida (EZUGWU et al., 1999).

Em termos do processo de retificação, a complexidade ao usinar o Inconel 718 torna-se maior com rebolos abrasivos convencionais. A retificação é um processo que apresenta elevada energia específica em relação aos outros processos de usinagem com ferramenta de geometria definida, além disso, os cavacos gerados que possuem pequenas sessões e os rebolos convencionais são pobres condutores de calor. E estes fatores contribuem para a elevação da temperatura da peça em regiões próximas a superfície usinada (MALKIN; GUO 2008).

Dependendo da quantidade de calor que é gerada e transferida para a peça, esta poderá apresentar alguns problemas como pobre acabamento e aqueles conhecidos como de origem térmica (irregularidades superficiais, trincas e microtrincas, alterações metalúrgicas, incluindo distorção microestrutural, transformação de fase, camadas afetadas termicamente, e geração de tensões residuais de tração) que podem levar a prejuízos econômicos (MARINESCU et al., 2007 e DEVILLEZ et al., 2010). Por esta razão, geralmente se empregam grandes volumes/vazões de fluido de corte durante o processo de retificação visando à refrigeração da peça e a prevenção de danos de origem térmica. A técnica que emprega fluido em altas vazões é conhecida como convencional ou abundância; o termo jorro também é bastante empregado.

Em alguns casos, por exemplo, no processo de retificação sem centro de aço SAE 52100 a vazão pode chegar a 18000000 mL/h (18000 L/h) (GONÇALVES NETO, 2013). Contudo, o emprego desta técnica vem sendo cada vez mais questionado pelo elevado volume de fluido de corte que é utilizado, além dos riscos e problemas que o uso e manuseio inadequado de alguns fluidos de corte podem trazer para operador e ao meio ambiente.

Além disso, o fator custo, principalmente com manutenção e descarte dos fluidos, tem sido motivo de reflexão. Estima-se que o fluido de corte seja responsável por cerca de 16% dos custos de produção de uma peça retificada (SANCHEZ et al., 2010). Desta forma, vários têm sido os esforços acadêmicos e industriais no sentido de aprimorar as técnicas de aplicação de fluido de corte, além de desenvolver técnicas que permitam eliminar e/ou minimizar o uso de fluidos de corte (SANCHEZ et al., 2010).

Uma destas técnicas já bastante difundida por ser considerada mais ecologicamente correta que a técnica convencional é a da Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL). Nesta técnica é empregada da baixa vazão de óleo (inferior a 240 mL/h), que é normalmente do tipo integral. Este óleo é transportado até a zona de corte por meio do ar comprimido e com isso

a mistura óleo + ar garante simultaneamente menor atrito na interface rebolo peça (por causa da ótima propriedade de lubrificação do óleo) e arrefecimento da peça (proporcionado pelo ar comprimido) (IRANI; BAUER; WARKENTIN; 2005).

Embora sejam vários os benefícios relatados na literatura com a aplicação da técnica MQL em processos de retificação, em alguns casos ela não se mostrou viável, gerando a necessidade de aprimoramento, principalmente, para aumentar a capacidade refrigerante que o ar comprimido não consegue suprir. O baixo volume de óleo e o ar comprimido que são aplicados nas condições convencionais de MQL ainda não proporcionaram a mesma eficiência proporcionada pela técnica convencional em termos de danos térmicos, menores forças de corte e desgaste de rebolo. Recentemente alguns estudos em usinagem tem sido desenvolvidos na tentativa de melhorar a eficiência da técnica MQL principalmente em relação a estes parâmetros

Uma nova abordagem para melhorar as características dos fluidos aplicados via técnica MQL consiste em adicionar partículas sólidas no fluido de corte tais como: Bissulfeto de Molibdênio (MoS_2) (WANG et al., 2016, KALITA et al., 2012 e ZHANG et al., 2016), Nanotubos de carbono (CNT) (ZHANG et al., 2016 e WANG et al., 2016), Nano Diamante (ND), grafite (ALBERTS et al., 2009) e grafeno (DE MELO, 2015) a fim de explorar as propriedades térmicas e lubrificantes que elas apresentam individualmente, melhorar as características tribológicas existente na interface rebolo-cavaco-peça, como também aumentar a eficiência na remoção de calor da peça.

Dentre as partículas que apresentaram boas propriedades na maioria dos trabalhos relatados na literatura, o grafeno, mais especificamente multicamadas de grafeno, se destacou por apresentar elevada condutividade térmica e sua ação lubrificante ao ser adicionados em fluido lubrificante, pois as camadas deste tipo de grafeno não oferecem resistência ao cisalhamento (WEI et al. 2011, SHAHIL; BALANDIN 2012, RAMON-RAYGOZA et al., 2016 e ZHAO et al. 2016), o que no processo de retificação promove a redução do atrito na interface rebolo-cavaco-peça

Seguindo esta tendência na tentativa de encontrar condições de corte que aliem eficiência em refrigeração com aspectos ecológicos e econômicos em usinagem, como também de explorar os benefícios relatados na literatura com uso destas partículas sólidas, o objetivo desta pesquisa foi verificar e avaliar a influência da utilização de multicamadas de grafeno adicionadas em fluido de corte em diferentes concentrações durante o processo de retificação plana do Inconel 718 com rebolo de carbetto de silício (SiC). Foram testadas duas concentrações em peso de grafeno (0,05% e 0,10%) adicionados a um fluido de corte de base vegetal e semi-sintético que foram aplicadas via a técnica MQL.

Para permitir comparações entre os resultados ensaios com fluido de corte sem grafeno via a técnica MQL, fluido emulsionável aplicado pela técnica convencional e na condição a seco também foram realizados. Os parâmetros de saída analisados foram: rugosidade, microdureza e tensão residual da peça. Além disso, foram analisadas as superfícies das peças após a usinagem. Por último foi monitorada a potência instantânea do processo.

Primeiramente foi apresentado o Capítulo I, que contém a introdução e contextualização do trabalho, bem como a motivação e a importância do estudo de novas formas de lubri-refrigeração na retificação de Inconel 718. Neste capítulo foram abordadas a importância da liga Inconel 718, suas particularidades que interferem no processo de usinagem e a importância dos fluidos de corte neste processo, bem como seu tipo de aplicação e a possibilidade de se utilizar partículas sólidas dispersas em fluidos de corte.

O Capítulo II compõe-se da revisão bibliográfica realizada para o trabalho, abordando os seguintes tópicos: Inconel 718, processos de retificação, fluidos de corte, técnica MQL no processo de retificação, partículas sólidas para uso em fluido de corte, multicamadas de grafeno, usinabilidade do Inconel 718, tolerâncias para componentes retificados, qualidade de superfícies usinadas, rugosidade em peças de Inconel 718 retificadas, considerações sobre a integridade sub-superficial de ligas de níquel após a retificação e potência em retificação.

No Capítulo III são apresentados os equipamentos e metodologia utilizados para a realização da pesquisa, tais como: a máquina ferramenta, o rebolo, o material da peça, os parâmetros de corte, a metodologia de dressagem do rebolo, os fluidos de corte e as suas técnicas de aplicação, bem como a técnica para obtenção do grafeno e caracterização. São apresentados ainda os procedimentos para a medição e monitoramento das variáveis de saída: rugosidade, imagens da superfície retificada, microdureza, microestrutura, tensão residual e potência elétrica.

Já o Capítulo IV contém os resultados obtidos com os ensaios e as respectivas análises e discussões realizadas.

No Capítulo V são apresentadas neste capítulo as conclusões pertinentes ao trabalho, além de sugestões para trabalhos futuros.

Finalmente, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta sessão é apresentada a revisão bibliográfica sobre os temas relevantes à esta pesquisa, como as especificidades do material de estudo, o Inconel 718, características do processo de retificação, qualidade geométrica de peças retificadas, como também os principais problemas que podem ser observados em peças após o processo de retificação. É apresentada também uma breve revisão sobre os fluidos de corte e lubrificantes sólidos em operações de usinagem.

2.1 Inconel 718

Para a grande maioria das aplicações em engenharia, os aços são os materiais mais requisitados. Contudo, a exigência por componentes para operarem em temperaturas cada vez mais elevadas, maiores potências e motores mais eficientes, impulsionou já no século XX o desenvolvimento das “superligas”, ou ligas refratárias, que neste caso são resistentes ao calor, os quatro principais tipos são: ligas de níquel, ligas de cobalto, ligas de titânio e alguns aços inoxidáveis – alto cromo (EZUGWU, 2005).

As superligas são assim chamadas por apresentarem propriedades mecânicas e químicas que são mantidas mesmo em temperaturas elevadas, normalmente difíceis de serem encontradas em outros materiais como aços, ferros fundidos e alumínio comum (EZUGWU, 2005). Na Fig. 2.1 é apresentada a distribuição percentual dos principais materiais metálicos empregados na fabricação de turbinas de aviões.

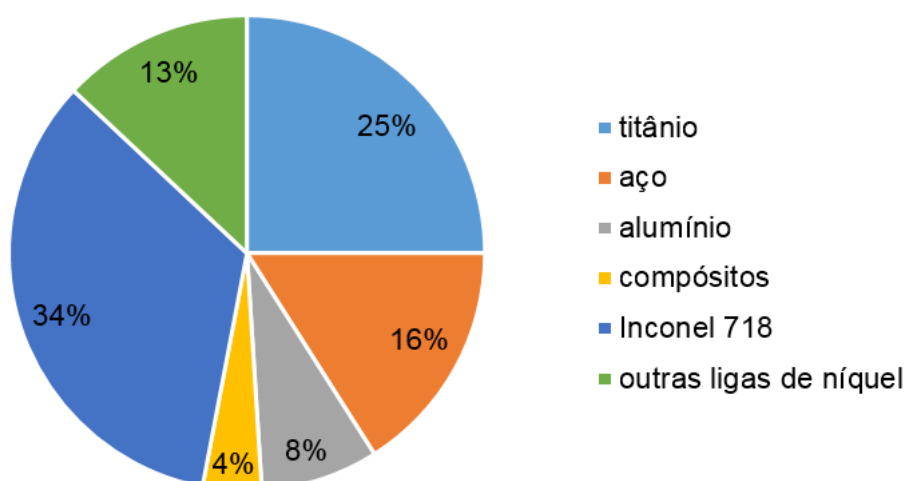


Figura 2.1 – Distribuição percentual de materiais utilizados na fabricação de motor aeronáutico, tipo *turbofan*, da fabricante GE (adaptado de CAMPBELL, 2006).

As ligas de níquel podem ser produzidas em diferentes condições. No caso do Inconel 718, ele é uma liga endurecida por precipitação, enquanto que as ligas endurecidas por solução sólida são geralmente usadas na condição recozida. Dentre elas, destacam-se o Hastelloy-X, Inconel 600, Inconel 617 e Inconel 625 por solução sólida e por precipitação. As ligas endurecidas por precipitação contêm alumínio, titânio ou nióbio, para causar a precipitação de uma segunda fase durante um tratamento térmico apropriado (SUGAHARA et al., 2009).

O Inconel 718 destaca-se entre as ligas de níquel no setor aeroespacial devido às suas propriedades peculiares tais como a elevada resistência mecânica, boa resistência à fadiga e à fluência, elevada resistência à corrosão e capacidade de operar continuamente em elevadas temperaturas (ASM Handbook Vol.2, 1990). Segundo Ezugwu; Bonney; Yamane (2002) a fase de sua matriz (gama) possui estabilidade térmica até 900 °C. Com isso, elas são apropriadas para a fabricação de eixos de compressores de turbinas, palhetas, reversores dentre outros, como também em aplicações do setor nuclear, de criogenia e petrolífera (EZUGWU et al., 1999, RESENDE et al., 2009 e SUGAHARA et al., 2009).

O Inconel 718 possui como principal elemento o níquel, com teores variando entre 45% e 50%, além de cromo (17% a 21%), nióbio mais tântalo (4,75% a 5,5%) e pequenas quantidades de titânio e de alumínio, além do ferro que completa a sua composição (EZUGWU et al., 1999 e API, 2004). Estes elementos resultam em uma matriz austenítica endurecida por precipitação – fase γ com elevadas frações volumétricas de precipitados coerentes do tipo Ni (Ti, Nb, Ta) Al – fase γ' que por sua vez são responsáveis pelas propriedades mecânicas e químicas já citadas anteriormente, com destaque para a elevada resistência mecânica e à fluência que se mantem tanto em elevadas temperaturas, superiores a 500 °C, quanto em

temperaturas criogênicas. Estas propriedades são requisitos essenciais para componentes que operam em ambientes com temperaturas elevadas (KITAGAWA et al., 1997).

Na Tabela 2.1 são apresentadas as principais propriedades físicas do Inconel 718 em comparação com aquelas de um aço inoxidável AISI 304. Este aço possui algumas propriedades que o caracterizam também como sendo de pobre usinabilidade em relação aos aços comuns, principalmente pela sua grande tendência de encruamento durante a usinagem, o que também é observado no Inconel 718.

Tabela 2.1 – Propriedades mecânicas do Inconel 718 e do aço inoxidável AISI 304 (Adaptado de MAHER (2016), NORTH AMERICAN STAINLESS (2016) e G-STYLE S.A. (2016)).

Propriedade	Material	
	Inconel 718	Aço inoxidável AISI 304
Resistência à tração (MPa)	1275	585
Limite de escoamento (MPa)	1034	35
Módulo de Elasticidade (GPa)	200	193
Dureza (HRC)	40	29
Densidade (g/cm ³)	8,22	7,90
Ponto de Fusão °C	1260 a 1336	1400 a 1450
Condutividade térmica (W/mK)	11,4	16,2

Se de um lado as propriedades peculiares do Inconel 718, tais como a capacidade de manter sua resistência mecânica a elevadas temperaturas e da grande inércia química em ambientes de corrosão, fazem deste material ideal para as aplicações em componentes da indústria aeroespacial, de outro, elas representam desafios no momento da usinagem, caracterizando-a como liga de pobre ou baixa usinabilidade em relação a outros materiais, como o aço comum ao carbono e ferro fundidos grafiticos (EZUGWU et al., 1999). Foi baseado neste desafio de usinar esta liga que esta pesquisa encontrou sua motivação.

2.2 Processo de retificação

Os processos de usinagem com ferramentas abrasivas, com destaque para o processo de retificação, têm importância para indústria metal mecânica, pois conferem às peças usinadas a combinação entre tolerâncias dimensionais e geométricas mais apertadas que aquelas proporcionadas pelos processos convencionais com ferramenta de geometria definida, como o fresamento, por exemplo.

De acordo com Malkin e Guo (2008), o processo de retificação pode ser definido como processo mecânico de fabricação em que um rebolo gira em altas velocidades de corte (normalmente igual ou superior a 30 m/s) e pequenas penetrações de trabalho são empregadas, configurando, portanto, um processo de baixa taxa de remoção de material. Os rebolos são ferramentas compostas de grãos abrasivos, ligante e poros que podem ser da classe de cerâmicos (convencionais como aqueles à base de alumina e de carbetos de silício, por exemplo) ou da classe dos superabrasivos (Nitreto de Boro Cúbico (CBN) e diamante). Os rebolos convencionais são aqueles mais comumente empregados e seus grãos abrasivos são de elevada dureza, possuem arestas afiadas, mas com forma e orientação irregulares. (Figura 2.2).

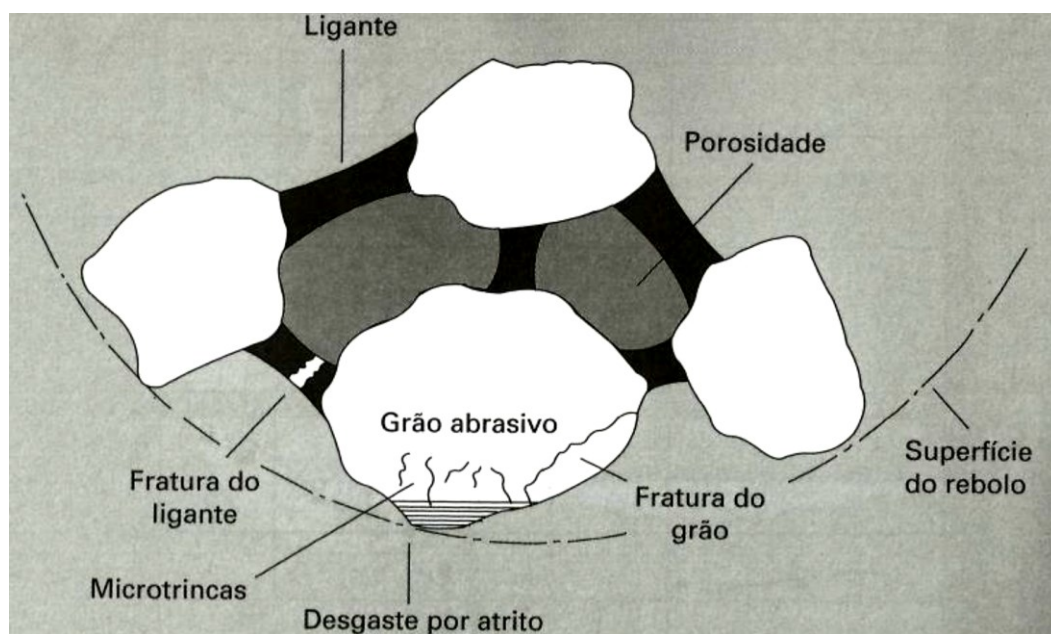


Figura 2.2 – Elementos de um rebolo abrasivo convencional (MACHADO et al., 2011).

O processo de retificação visa conferir tolerâncias geométricas, principalmente em termos de rugosidade (R_a) inferiores a $1,6 \mu\text{m}$ e dimensionais mais apertadas (qualidade de trabalho que varia na faixa IT6-IT3) sem causar prejuízos às integridades superficial e subsuperficial do componente usinado (MACHADO et al., 2013). De acordo com Marinescu et al. (2007) as principais empregabilidades do processo de retificação são: obtenção de alta precisão dimensional e tolerâncias geométricas mais estreitas, como também usinagem de materiais de elevada dureza.

Existem peculiaridades do processo de retificação, tais como elevado número de grãos abrasivos com aresta de corte de geometrias diferentes, altura e orientação aleatória dos abrasivos dentro do rebolo e altas velocidades de corte, há também um número maior de

parâmetros a serem controlados, por exemplo, a condição de dressagem do rebolo é um processo que exige maior atenção na seleção correta dos parâmetros de corte, conhecimento das grandezas físicas e das peculiaridades da interface rebolo-cavaco-peça. Por ser a retificação geralmente uma das últimas etapas na cadeia produtiva de um componente usinado, qualquer negligência nesta etapa pode levar à perda da peça e, conseqüentemente, a prejuízos econômicos. Para a melhor compreensão do processo de retificação, é preciso estudar o processo de formação de cavaco em peças retificadas.

Marinescu et al. (2007) dividiram a formação do cavaco no processo de retificação em três fases ou regiões (Figura 2.3) que serão comentadas a seguir. Além disso, alguns autores ainda fazem uma distinção entre o processo de formação de cavaco em materiais dúcteis e os materiais frágeis. No entanto, por não ser o foco deste estudo, será abordado apenas o mecanismo de formação de cavaco em materiais dúcteis, classe na qual se enquadra o Inconel 718.

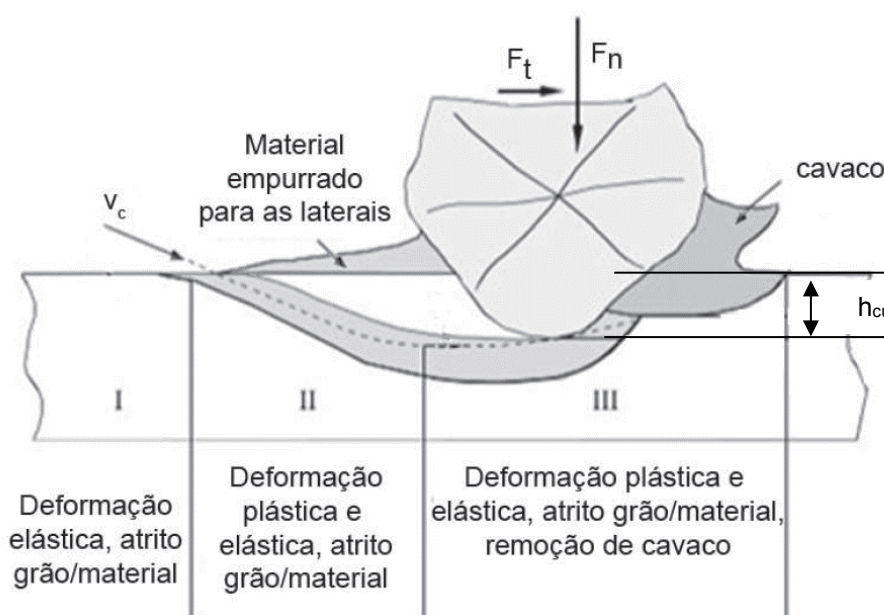


Figura 2.3 – Formação do cavaco na retificação de material dúctil (MARINESCU et al., 2004).

As fases da formação de cavaco ilustradas na Fig 2.3 são descritas a seguir (MARINESCU et al,2004):

- Região I: quando o rebolo toca a peça, no início do contato entre os primeiros abrasivos e a peça, o abrasivo promove um sulco, causando apenas deformação elástica.
- Região II: conforme o grão abrasivo penetra na peça, a espessura de cavaco não deformado (h_{cu}) também aumenta e assim causando elevação das tensões compressivas, e então o material da peça é empurrado à frente e para as laterais

do grão abrasivo, causando deformação plástica em uma porção do material. A deformação plástica é caracterizada pelo riscamento da superfície. Além disso, à medida que os grãos adentraram mais na peça, maior a área de contato e com isso maior atrito será gerado e, portanto, grande parte da energia continua sendo dissipada por deformações, atrito e calor.

- Região III: nesta região, a aresta de corte do grão atinge um valor de penetração crítico, que por consequência gera uma pressão também crítica, definida como a pressão mínima para que ocorra a ruptura do material. É neste ponto que se inicia a formação do cavaco e grande parte da energia passa a ser consumida no cisalhamento do material.

Na Tabela 2.2 são apresentados alguns dos principais materiais abrasivos para fabricação de rebolos com suas respectivas propriedades e aplicações. Os abrasivos convencionais são classificados em dois grupos, à base de alumina (Al_2O_3) e de carbetto de silício (SiC). Além destes abrasivos há ainda os chamados superabrasivos cujos principais representantes são o Nitreto de Boro Cúbico (CBN) e o diamante, que possuem dureza bem superior que a dos abrasivos convencionais. Nesta tabela é possível ainda observar que vários tipos de rebolos podem ser utilizados para a usinagem de ligas aeronáuticas, como é o caso do Inconel 718 (MACHADO, 2011 e MARINESCU et al., 2004). Observa-se ainda que, entre os abrasivos convencionais, o SiC possui maior condutividade e estabilidade térmicas que a alumina, fazendo dele a primeira escolha para a usinagem de materiais que são pobres condutores de calor, como é o caso do Inconel 718. A estabilidade térmica é propriedade dos materiais de resistir às temperaturas de corte e de manter sua integridade química (Marinescu et. al., 2004).

Tabela 2.2 – Propriedades e aplicações de abrasivos para rebolos (adaptado de MACHADO et al., 2011).

Abrasivo	Estrutura cristalina	Dureza Knoop ($\frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2}$)	Condutividade térmica relativa	Estabilidade Térmica (°C)	Possui afinidade química com	Aplicação
Al_2O_3	Hexagonal	2100	1	1750	Cerâmicas	Aços em geral (cementados ou não), afiação de ferramentas de aço rápido (HSS) ligas aeronáuticas
SiC	Hexagonal	2400	10	1500	Materiais que assimilam carbono	Materiais e ligas não metálicas como (ligas à base de níquel e à base de titânio), vidro, ferros fundidos, e afiação de ferramentas de metal duro.
CBN	Cúbica	4700	35-120	1400	Nenhuma	Aços temperados, ligas aeronáuticas e ferrosos de alta dureza
Diamante	Cúbica	8000	100-35	800	Materiais que assimilam carbono	Cerâmicas, materiais não metálicos, não ferrosos, afiação de ferramentas metal duro, dressagem e perfilamento de rebolos de Al_2O_3 e SiC

De acordo com Malkin e Guo (2008) uma forma de se avaliar o desempenho de rebolos é através do parâmetro ou razão G. Este parâmetro relaciona o volume de material removido da peça com o desgaste no rebolo, de forma que rebolos com alta razão G são usualmente desejados por promoverem maior taxa de remoção de material da peça para um menor desgaste do rebolo.

No entanto, sabe-se que em retificação, dependendo da operação e aplicação, é importante que os grãos gastos ou sem cunhas se soltem do ligante e que haja renovação das arestas de corte dos abrasivos. Esta propriedade de renovação típica dos abrasivos, por serem frágeis, é conhecida como friabilidade. Em geral, rebolos com alta resistência ao desgaste ou perda do grão abrasivo tendem a gerar maiores forças e podem prejudicar o acabamento, como também torna a peça mais susceptível a danos térmicos. Assim, uma forma melhor de avaliar a qualidade de um rebolo é avaliar não somente seu desgaste, mas também as forças de corte geradas durante o processo.

Segundo Klocke (2009), é necessário que os rebolos tenham simultaneamente elevada dureza para que possa retirar material da peça com um menor desgaste, friabilidade,

elevada tenacidade para que os grãos suportem as tensões do contato com a peça, estabilidade térmica já que a retificação está sujeita a elevadas temperaturas na interface e estabilidade química o que evita o desgaste dos grãos por difusão com a peça.

2.3 Fluidos de corte

Um dos principais fatores limitantes do processo de retificação com rebolos abrasivos convencionais são os danos térmicos que podem ser causados à peça. Os fluidos de corte possuem um papel importante para reduzir a possibilidade de queima e outras alterações na peça, pois permitem remover parte do calor que é dirigido para a peça como também, dependendo do tipo de fluido de corte, atuam na redução do atrito na interface entre rebolo e peça. Com isso, haverá redução das forças de corte o que causa menores vibrações e consequentemente, uma operação com condições tribológicas mais favoráveis (IRANI, BAUER, WARKENTIN, 2005). Tudo isso favorece um melhor acabamento e menores desvios dimensionais na peça. Marinescu et al. (2007) apresentaram as seguintes funções do fluido de corte no processo de retificação:

- i. O efeito lubrificante do fluido de retificação tende a reduzir o atrito entre o grão abrasivo e a peça;
- ii. O efeito refrigerante resfria a zona de contato entre grão e peça através de absorção e transporte do calor gerado;
- iii. Limpeza da área de retificação e transporte dos cavacos;
- iv. Resfria todo o sistema evitando dilatações;
- v. Oferece proteção do equipamento contra oxidação.

De maneira geral pode-se dividir os fluidos de corte em três categorias: óleos, emulsões e soluções aquosas, suas principais características, segundo KLOCKE, 2009; MACHADO et al., 2011, são listadas a seguir:

- i. Óleos: são os melhores fluidos de corte em termos de lubrificação (alta viscosidade) e podem ser de base mineral ou vegetal. No entanto, este tipo de fluido encontra maior dificuldade de penetrar na interface rebolo-peça devido à sua alta viscosidade. Esta classe é recomendada para operações em que há maior área de contato entre o rebolo e a peça e ainda quando são produzidos cavacos longos;
- ii. Emulsões: possuem um bom poder de refrigeração devido à sua elevada condutividade térmica e são compostas basicamente de água (cerca de 90%) e óleo mineral ou vegetal (10% restantes), com isto elas conferem menor capacidade de

lubrificação que os óleos. A composição homogênea de pequenas gotículas de óleo na água é conseguida através de agentes emulsificadores adicionados no fluido;

- iii. Soluções aquosas: assim, como as emulsões, estes fluidos também conferem uma boa refrigeração e são compostos 90% por água. Elas se diferenciam das emulsões pelo fato de conter óleo do tipo sintético o qual se dissolve completamente na água, portanto, não sendo necessária a adição de agentes emulsificantes. Contudo, este tipo de fluido possui menores propriedades lubrificantes que as emulsões.

Outros fatores exercem influência na eficiência dos fluidos de corte: a presença de aditivos e a forma de aplicação do fluido até a zona de corte.

Segundo Klocke (2009), os aditivos podem modificar tanto as propriedades físicas, por exemplo, aumentar a viscosidade, como as propriedades químicas (como inibidores de oxidação) dos fluidos de corte. Há ainda aditivos considerados tribologicamente ativos, ou seja, que alteram as condições de atrito (podem ser polares, anti-desgaste, modificadores de fricção ou de extrema pressão). Atualmente podem ser encontrados diversos tipos de fluidos de corte, com os mais variados aditivos. Kalpakjian e Schmid (2009) listam alguns tipos de fluidos de corte recomendados para o processo de retificação e suas aplicações, Tab. 2.3.

Tabela 2.3 – Fluidos de corte recomendados para o processo de retificação (adaptado de KALPAKJIAN e SCHMID, 2009).

Material da peça	Fluido de corte
Aços	E
Alumínio	E
Cobre	E, FS, OM
Magnésio	S, OM
Níquel	EP, FS
Titânio	E, FS
Metais Refratários	EP
Onde: E= Emulsão, EP = Extrema Pressão, FS= Sintético e OM= Óleo Mineral	

Quanto à forma de aplicação de fluido de corte, em retificação são empregadas apenas duas variações: a técnica convencional e a MQL.

No primeiro caso, o fluido é aplicado em abundância à baixa pressão e vazão elevada. Normalmente, esta técnica, quando o bocal é eficiente e a vazão é ajustada, é a que menos oferece risco da ocorrência de danos térmicos e problemas como distorção na peça durante

a retificação. Contudo o emprego da técnica convencional tem sido questionado por diversos fatores que são listados a seguir (Sanchez et al., 2010):

- i. As elevadas vazões de fluido, que variam entre 4 e 300 L/min (240 a 18.000 L/h exigem bombas mais potentes para garantir que o fluido chegue à zona de corte, exigem reposição periódica devido a perdas com arrasto, vazamentos e evaporação, os quais aumentam o custo do processo;
- ii. Os fluidos de corte podem causar problemas de saúde nos operadores (dermatites, alergias e câncer), quando manuseados inadequadamente;
- iii. Os fluidos exigem tratamento adequado e, se não descartados corretamente, agredem o meio ambiente.

Como já comentado, o fator custo chama bastante atenção ao selecionar o fluido e sua técnica de aplicação, pois conforme é mostrado na Fig. 2.4, a parcela dos fluidos de corte representa em média 18% do custo geral do processo de fabricação de um componente. Portanto, qualquer esforço no sentido de reduzir este percentual representa um ganho econômico. Devido a estes problemas, há esforços acadêmicos e industriais para que sejam aprimoradas as técnicas existentes ou desenvolvidas técnicas de retificação que permitam eliminar e/ou minimizar o uso de fluidos de corte, sem causar prejuízos para o processo como um todo (Sanchez et al., 2010).

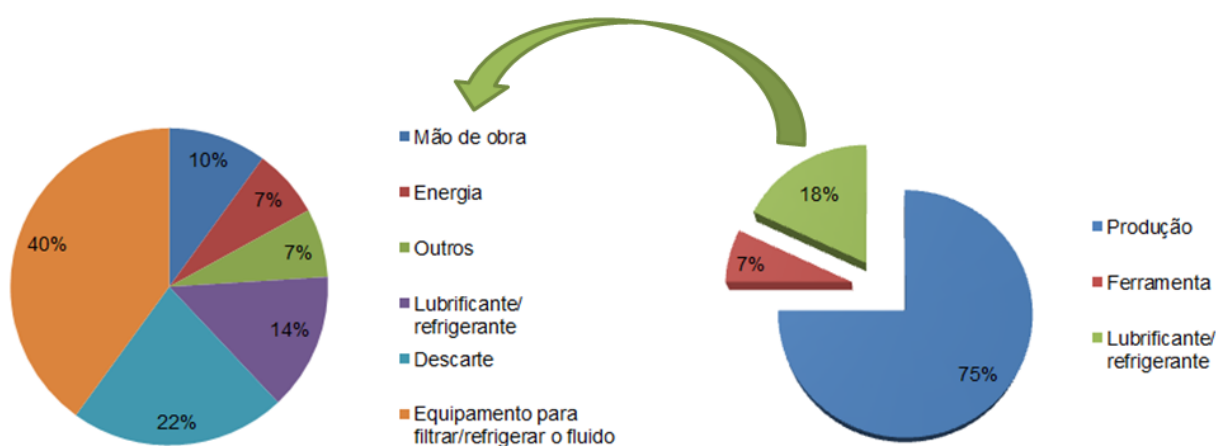


Figura 2.4 – Divisão de custos durante o processo de produção de uma peça retificada com detalhe para os gastos com fluido de corte (adaptado de Sanchez et al., 2010).

No entanto, ainda é um desafio encontrar uma forma de aplicação de fluido que permita uma elevada produção, mas com um baixo impacto ambiental (IRANI, BAUER, WARKENTIN, 2005). Nesse sentido, a técnica MQL é considerada ambientalmente adequada e, de forma que merece atenção e deve ser explorada. Os seus benefícios dependerão das peculiaridades

de cada par ferramenta-peça e do grau de exigência de projeto. O próximo tópico aborda as peculiaridades desta metodologia de aplicação de fluido de corte.

2.4 Técnica MQL em processo de retificação

A aplicação da técnica da Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) em processos de usinagem surgiu na década de 1990 com a necessidade de desenvolvimento de processos de fabricação mais sustentáveis em termos ambientais, aliado à redução no volume de fluido de corte em relação à técnica convencional de aplicação de fluido, popularmente conhecida como fluido em abundância ou ainda jorro. Na técnica da Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL) em geral o volume de óleo utilizado é muito baixo (≤ 250 mL/h) em relação aos grandes volumes utilizados pela técnica convencional de aplicação de fluido de corte (30 000 a 60 000 mL/h) (WALKER, 2013).

Na técnica MQL o óleo é transportado até a zona de corte por meio do ar comprimido a pressão em torno de 0,6 MPa, o que assegura lubrificação da zona de corte e ao mesmo tempo arrefecimento da peça, promovidos pelo óleo e ar comprimido, respectivamente. Durante a usinagem em geral é formada uma fina camada de lubrificante que irá cobrir toda a superfície periférica do rebolo antes do contato com a peça (MARINESCU et al., 2007).

Os óleos empregados nesta técnica são em geral do tipo integral de base vegetal ou de origem mineral. Contudo, mais recentemente tem sido relatado na literatura específica estudos em retificação com a técnica MQL que empregaram fluido de corte miscíveis em água (WALKER, 2013).

A fim de contribuir para a revisão bibliográfica desta pesquisa e reunir dados para auxiliar na discussão dos resultados obtidos que será apresentada no capítulo IV, são apresentados a seguir os principais trabalhos que têm relatado o bom desempenho da técnica MQL em processo de retificação.

Barczak et al. (2010) testaram várias atmosferas de usinagem durante o processo de retificação de três diferentes aços (BS970080M40 (32 HR_C), M2 (52 HR_C), 534A99 (62 HR_C) com rebolo de alumina e verificaram o comportamento das forças de retificação e acabamento das peças usinadas. Eles utilizaram o mesmo óleo, Castrol ES1, que foi aplicado via a técnica MQL e em outra condição foi diluído em água (5%) e aplicado via técnica convencional. Eles também realizaram ensaios na condição a seco. Eles observaram que o fluido aplicado via técnica MQL conseguiu competir e em algumas condições até superou a técnica convencional. Segundo eles, a técnica MQL proporcionou forças de retificação mais estáveis e o melhor acabamento.

Em outro estudo, Hadad (2012) determinou a temperatura no processo de retificação do aço endurecido 100Cr6 (50 HR_C) com rebolo de alumina e diferentes técnicas de aplicação de fluido de corte, dentre elas o MQL, e concluiu que, apesar da boa lubrificação proporcionada pela técnica MQL, a função de refrigeração não foi satisfatória. A capacidade de remoção de calor da mistura de óleo + ar desta técnica foi inferior àquela observada com fluido de corte aplicado pela técnica convencional (abundante), conforme pode ser comprovado pelos resultados do estudo deste autor apresentados na Fig. 2.5. No entanto, o autor sugere o uso de aditivos no fluido de corte para aumentar a lubrificação na interface rebolo-peça e, conseqüentemente, reduzir as forças de retificação e a geração de calor na área de contato.

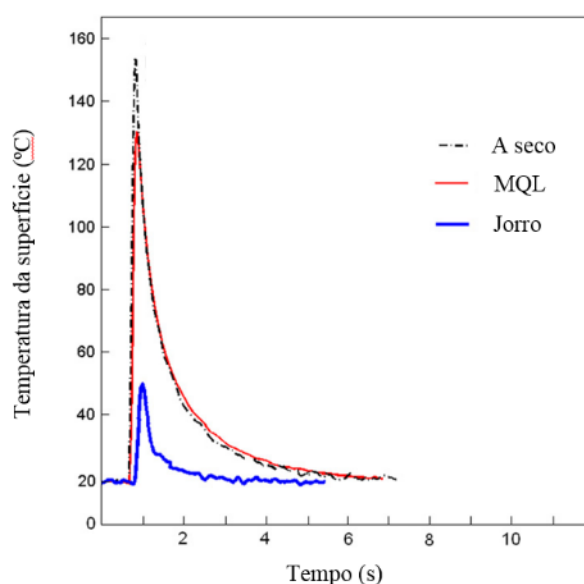


Figura 2.5 – Temperatura na superfície em função do tempo de usinagem para diferentes atmosferas durante retificação de aço endurecido 100Cr6 (50 HR_C) com rebolo de alumina (HADAD, 2012).

Castro (2015) realizou recentemente um estudo em retificação de Inconel 718 com rebolo de alumina para avaliar a eficiência da técnica MQL em relação à técnica convencional (abundância) e avaliou o acabamento e microdureza das superfícies após a retificação. O autor observou que o acabamento piorou com o aumento da penetração de trabalho e que a microdureza não sofreu grande variação quando a técnica MQL foi empregada.

Em outro trabalho, Rabiei et al. (2015) investigaram a influência da atmosfera lubri-refrigerante nas forças do processo de retificação de quatro aços, CK45 (90 HR_B), S305 (25 HR_C), 100Cr6 (58 HR_C) e HSS (62 HR_C) com rebolo de alumina. As atmosferas testadas foram: convencional, a seco e MQL. Eles variaram ainda a penetração de trabalho em 5, 20, 35 e 50

μm . Eles concluíram que a técnica MQL não apenas é vantajosa para a redução na quantidade de fluido, como também pode proporcionar melhor capacidade de lubrificação quando comparada com a técnica convencional para todos os aços. Isto ocorre, pois esta técnica favorece a penetração do fluido na zona de contato. Além disso, eles observaram uma redução na força tangencial após a usinagem com a técnica convencional.

Mais recentemente, Wang et al. (2016) também retificaram a liga de níquel GH4169 com rebolo de alumina (grana *mesh* 80) com diferentes tipos de fluidos de corte que foram aplicados pela técnica MQL. Eles testaram um único óleo mineral (parafina) e outros 7 óleos de origem vegetal (soja, amendoim, milho, colza, palma, mamona e girassol), bem como um fluido sintético solúvel (CCF-04T), na concentração de 4% em água. Este último foi aplicado pela técnica convencional para fins de comparação. Estes autores relataram que usinagem com a técnica MQL proporcionou os menores esforços de corte devido às suas propriedades lubrificantes e maior eficiência em garantir que o fluido alcance a zona de corte em relação à técnica convencional, independente do fluido de corte testado. Além disso, segundo os autores, os valores de rugosidade foram menores para as peças usinadas com óleos vegetais e que o menor valor ($R_a=0,36 \mu\text{m}$) foi registrado ao empregar o óleo de mamona. Por fim, os autores avaliaram as superfícies das amostras retificadas através de Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) e observaram sulcos mais proeminentes na amostra que foi usinada com o fluido sintético aplicado pela técnica convencional, enquanto que evidência de material aderido foi observada na amostra que foi usinada com óleo de soja aplicado via a técnica MQL.

Em todos estes trabalhos pode-se concluir que a técnica MQL é uma vertente promissora para a aplicação de fluido de corte no processo de retificação, sendo assim diferentes abordagens podem ser adotadas para sua análise, compreensão e aprimoramento. Desta forma, estas abordagens podem envolver estudos desde aspectos relacionados à sua técnica de aplicação (na pressão de aplicação, vazão, posicionamento dos bocais de saída) até na modificação das propriedades do fluido, que pode ser feita variando o fluido, sua diluição ou mesmo adicionando partículas a este fluido para conferir propriedades distintas. E este último aspecto, motivação desta pesquisa, será abordado no item a seguir.

2.5 Partículas sólidas aplicáveis em fluidos de corte

Diversos tipos de partículas podem ser adicionados ao fluido de corte, seu tamanho é reduzido e elas são micrométricas ou, mais recentemente elas são disponíveis também em escala nanométrica. Para diferenciar a terminologia dos fluidos com partículas nanométricas

dos outros convencionais, o termo nanofluido vem sendo utilizado com frequência pelos pesquisadores. Wang et al. (2016) definem nanofluido como misturas coloidais de partículas com tamanho nano em um fluido base. As partículas podem ser metálicas (ex. Fe, Cu, Ag), não metálicas (ex. diamante), óxidos (ex. Al_2O_3 , SiO_2 , ZrO_2), carboneto (ex. nanotubos de carbono), sulfetos (ex. MoS_2), cerâmicas e híbridos (composto por mais de um tipo de material).

Hadad (2012) afirma que uma forma de aprimorar as propriedades do fluido de corte é adicionando partículas sólidas que alterem suas propriedades tribológicas conforme a necessidade de cada projeto. Wang et al. 2016 complementam que, devido à grande quantidade de materiais que podem ser utilizados como partículas sólidas em fluido de corte, bem como seu formato e estrutura molecular, os fluidos e partículas sólidas podem ser combinados, gerando assim diversas propriedades, sejam elas lubrificantes ou térmicas. Na Tab. 2.4 é apresentado um resumo de alguns dos estudos científicos que empregaram partículas sólidas em fluidos de corte nos últimos anos.

Tabela 2.4 – Compilação de partículas sólidas para uso em fluidos de corte de retificação.

Partículas Sólida	Tamanho	Fluido base	Concentração (% em peso)	Rebolo	Peça	Autores
Grafite (<i>nanoplatelets</i>)	1 e 15 μm	Semi-sintético Trim SC200	0,5, 1,0 e 2,0	Al_2O_3	Aço ferramenta D-2	Alberts et al (2009)
MoS_2	3 a 5 μm	Parafina e óleo de soja	2 e 8	Al_2O_3	Aço EN 24	Kalita et al. (2012)
MG	-	ME3	0,03	SiC	Ti6Al4V	De Melo (2015)
CNT	50 nm (diâmetro) 10-30 μm (comprimento)	Óleo	2, 4, 6, 8, 10 e 12	Al_2O_3	Inconel 718	Zhang et al. (2016)
MoS_2	30 nm					
MoS_2	$(\leq 100 \text{ nm})$	Óleo de palma	6	Al_2O_3	GH4169	Wang et al. (2016)
SiO_2						
ND						
CNT						
Al_2O_3						
ZrO_2						

Onde: CNT é a sigla derivada das palavras em Inglês *carbon nanotubes*, que significa nanotubos de carbono, ND representa Nano Diamantes e MG Multicamadas de grafeno.

Alberts et al. (2009) realizaram uma pesquisa em retificação com grafite adicionado em diferentes concentrações ao fluido de corte que foi aplicado via técnica MQL. O material usinado foi o aço ferramenta D-2 e rebolo de alumina. Eles analisaram os sinais de força de corte e rugosidade da peça. Os autores constaram que a concentração de grafite igual a 1% em peso atuou de forma mais eficiente na redução do atrito entre rebolo e peça e assim permitiu reduzir as forças de corte

Kalita et al. (2010) realizaram ensaios pino sobre disco para tentar reproduzir os fenômenos tribológicos do processo de retificação de ferro fundido com rebolo de alumina e também utilizaram os mesmos fluidos e as formas de aplicação em usinagem. Eles adaptaram o sistema pino-disco para aplicar os fluidos em diferentes técnicas: convencional, MQL com óleo somente e MQL com óleo contendo nanopartículas de MoS_2 . O pino e o disco foram

respectivamente de ferro fundido e alumina respectivamente. Como resultados, os autores observaram que menores valores de coeficiente de atrito foram registrados ao empregarem a técnica MQL com adição de partículas, esta condição também resultou em redução na força tangencial. Por meio das análises microestruturais e químicas, os autores concluíram que a combinação entre as nanopartículas de MoS_2 dispersas no fluido aplicadas pela técnica MQL possibilita a criação de um tribofilme sobre a superfície sendo retificada formado pela síntese Mo-S-P, que melhora as condições tribológicas, reduz o atrito e, conseqüentemente, favorece o cisalhamento e remoção de cavaco. Com isso, obtém-se um melhor acabamento da peça assim como também menor demanda de energia do processo.

Em outro estudo recente desenvolvido por De Mello (2015) em processo de retificação de Ti6Al4V com partículas de multicamadas de grafeno dispersas em fluido sintético aplicadas via técnica MQL, o autor investigou, dentre vários parâmetros, a rugosidade e integridade sub-superficial das peças. O autor realizou ensaios com o fluido de corte sem grafeno (apenas emulsão) aplicado pela técnica MQL e pela técnica convencional (fluido em abundância). Para todos os ensaios foi utilizado o mesmo fluido de corte, sintético ME3 (Tapmatic) emulsionável na diluição de 1:19. Em relação às multicamadas de grafeno (MG), a razão foi de 60 mg de MG para 200 mL de fluido de corte. Como resultados mais expressivos, o autor observou que a presença do grafeno garantiu um melhor acabamento e menor variação na microdureza abaixo da superfície retificada em relação ao fluido sem grafeno e também em relação ao fluido aplicado em abundância, mesmo em condições mais severas de usinagem.

Recentemente, avaliando retificação de Inconel 718 com partículas sólidas dispersas em fluido de corte, Zhang et al. (2016) utilizaram o bissulfeto de molibdênio (MoS_2) e nanotubos de carbono (CNT) que foram aplicados via técnica MQL e analisaram o comportamento da rugosidade e os desvios dimensionais. Eles relataram que ao tocar a peça, o fluido com partículas sólidas se expande e, conseqüentemente, deixa pequenas áreas da peça secas durante a usinagem. Com isso, a rugosidade R_a tende a aumentar com a concentração de nanopartículas no fluido base. Este autor afirma ainda que a utilização dos nanofluidos aplicados via técnica MQL garante maior exatidão dimensional da peça e melhor acabamento que podem ser atribuídos às ótimas propriedades lubrificantes das nanopartículas.

Outro trabalho em retificação da liga de níquel, GH4169, foi conduzido por Wang et al. (2016). Eles empregaram um rebolo de alumina e utilizaram diferentes nanopartículas: nano diamante (ND), bissulfeto de molibdênio (MoS_2), nanotubos de carbono (CNT), alumina (Al_2O_3) dióxido de silício (SiO_2) e dióxido de zircônia ZrO_2) dispersas em fluido de corte (composto por óleo de palma e água). Eles relataram ainda que o fluido contendo nanopartículas de Al_2O_3 proporcionou os menores valores de coeficiente de atrito (0,348),

energia específica de retificação ($82,13 \text{ J/mm}^3$) e rugosidade da superfície R_a ($0,3 \mu\text{m}$). Além disso, os autores ranquearam as partículas sólidas em ordem de desempenho: Al_2O_3 , SiO_2 , MoS_2 , ND, CNT e ZrO_2 .

2.6 Multicamadas de Grafeno

Por grafeno entende-se “um plano atômico de carbono com ligação sp^2 ”. De acordo com Shahil e Balandin (2012), é difícil diferenciar multicamadas de grafeno, de filmes de grafite e ainda de nano partículas de grafite. Porém, pode-se considerar que flocos isolados com 1 a 20 nm de espessura (ou até aproximadamente 40 camadas de grafeno) são a multicamada de grafeno (ROUXINOL et al., 2010). Wong e Akinwande (2011), a fim de facilitar a diferenciação entre estes materiais alótropos do carbono, elaboraram uma tabela com as propriedades que são apresentadas na Tab. 2.5. Segundo estes autores, o grafeno pode servir de base para formação de outras estruturas de carbono, como mostra a Fig. 2.6.

Tabela 2.5 – Propriedades que diferenciam os materiais formados por carbono (adaptado de WONG e AKINWANDE, 2011).

Alótropo	C_{60} <i>buckyball</i>	Nanotubos de carbono	Grafeno	Grafite
Característica				
Dimensão	0D	1D	2D	3D
Estrutura	Esférica	Cilíndrica	Plana	Planar empilhada
Hibridação	sp^2	sp^2	sp^2	sp^2
Propriedades eletrônicas	Semi-condutor	Metal ou semi-condutor	Semi-metal	Metal

Onde D entende-se por dimensão e sp é o orbital atômico.

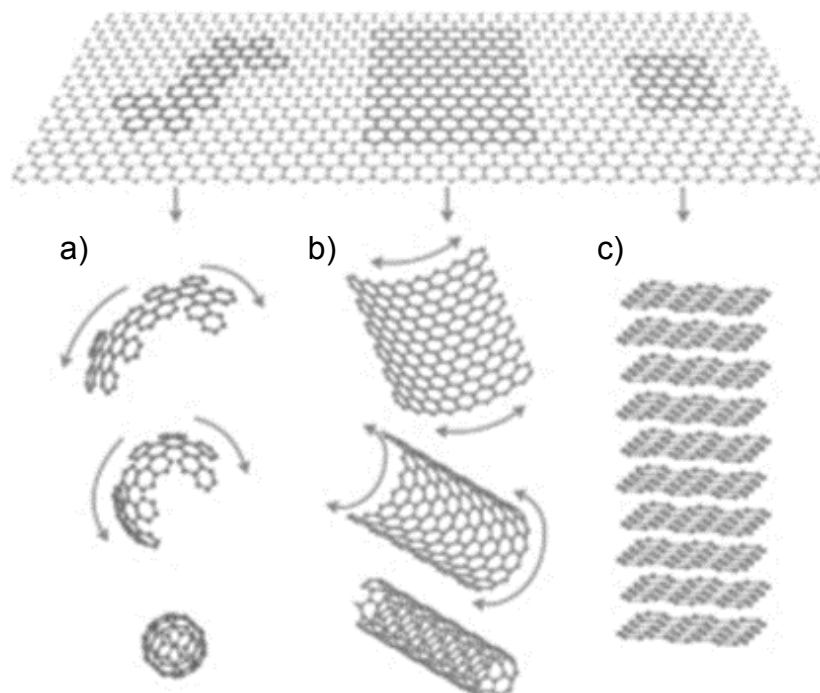


Figura 2.6 – Estruturas alotrópicas do carbono a partir do grafeno e suas formas: a) *bulckeyball* (forma de esfera oca formada por várias faces hexagonais ligadas entre si), b) nanotubos e c) grafite (adaptado de WONG e AKINWANDE, 2011).

A fim de facilitar a visualização da estrutura de multicamadas de grafeno, Li et al. (2017) elaboraram o esquema que é mostrado na Fig. 2.7.

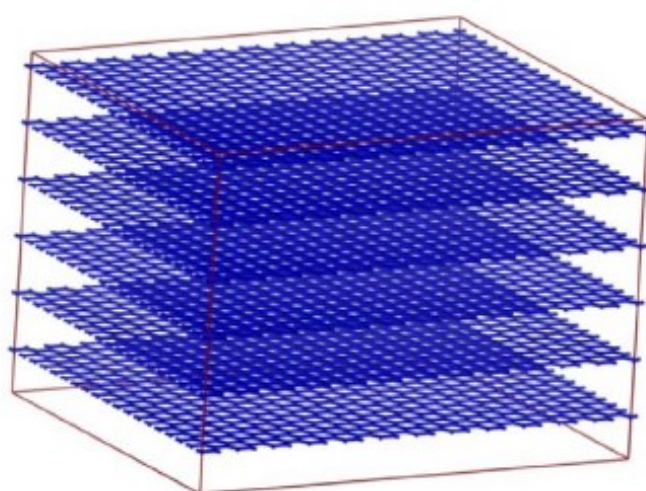


Figura 2.7 – Esquema de uma estrutura de multicamadas de grafeno (LI et al., 2017).

Em meio aos vários trabalhos que vem empregando grafite, grafeno e nanotubos de carbono, um dos grandes desafios tem sido determinar as propriedades térmicas e tribológicas destes materiais dispersos em fluido de corte em condições que sejam próximas daquelas do processo de usinagem, por exemplo, nas temperaturas atingidas entre a interface ferramenta-peça durante a usinagem. A literatura específica ainda é escassa quanto a estas informações. A seguir serão apresentados alguns dos principais trabalhos em caracterização e determinação de propriedades destes materiais disponíveis na literatura até o momento.

Shahil e Balandin (2012) investigaram as propriedades térmicas de mistura de monocamada com multicamadas de grafeno e relataram que a condutividade térmica da mistura determinada no estudo foi 1400 W/mK, valor próximo ao do diamante que é considerado um excelente condutor térmico, que varia de 600 a 2000 W/mK (Marinescu et al. 2004). Além disso, os autores constaram que a mistura apresentava baixa expansão térmica e alta resistência mecânica.

Em relação ao número de camadas de grafeno, Wei et al. (2011) realizaram ensaios para determinar a condutividade térmica de grafeno com diferentes multicamadas em diferentes temperaturas. Eles informam que a resistência térmica interfacial (entre as camadas) das multicamadas de grafeno é fortemente dependente do número de camadas, este valor está relacionado à 'dificuldade' de ele transferir calor. Ela irá diminuir com o aumento do número de camadas podendo chegar a um limite se este número for elevado o bastante. Os autores constataram ainda que a condutividade térmica também foi afetada pela quantidade de camadas do grafeno e que até 18 camadas há uma tendência de aumento na condutividade térmica com a temperatura. Já para valores de camadas superiores a este, a condutividade térmica também aumenta até a temperatura em torno de 227 °C, em seguida a condutividade térmica tende a cair com tendência a se estabilizar quando a temperatura ultrapassa 727 °C.

Ramon-Raygoza et al. (2016) realizaram ensaios tribológicos para verificar a influência de partículas sólidas (multicamadas de grafeno, multicamadas de grafeno com nano cobre esférico (denominado Cu) e multicamadas de grafeno com nano polímeros em formato de tubos (denominado PANI)), adicionadas em óleo lubrificante para motor de combustão interna (SAE 25 W-50) no coeficiente de atrito em aplicações automotivas. Os autores testaram 6 condições diferentes utilizando os três lubrificantes sólidos em duas concentrações diferentes, 0,5 % e 2%, em peso. Eles verificaram que, para o caso do óleo com multicamadas de grafeno (Figura 2.8), houve redução no coeficiente de atrito para a concentração 2,0% em peso, em torno de 5%, enquanto que um aumento de 2,8% no coeficiente de atrito foi obtido para a concentração de 0,5%. Os autores afirmam que o aumento no coeficiente de atrito com a baixa concentração de multicamadas de grafeno foi devido à pequena dimensão (10

nanômetros) destas camadas. Eles apontam que não foi possível formar uma tribo-camada na interface para que o atrito fosse reduzido. Já para a concentração de 2,0% em peso, esta camada teria sido formada e o deslizamento das camadas de grafeno (uma sobre a outra) seria o motivo da redução do coeficiente de atrito. Os autores descreveram alguns números: a redução no atrito foi de 33% e 43% para a mistura multicamadas de grafeno e Cu com concentrações de 0,5% e 2,0% em peso, respectivamente. Eles informaram que esta redução ocorreu porque as nanopartículas de cobre permitem a formação de tribo-camadas mais espessas do que as formadas apenas por grafeno. Já o grafeno PANI teve o mesmo efeito de aumento da camada, ela foi menos espessa devido à sua menor dureza e resistência quando comparado ao cobre, fazendo ligações mais fracas.

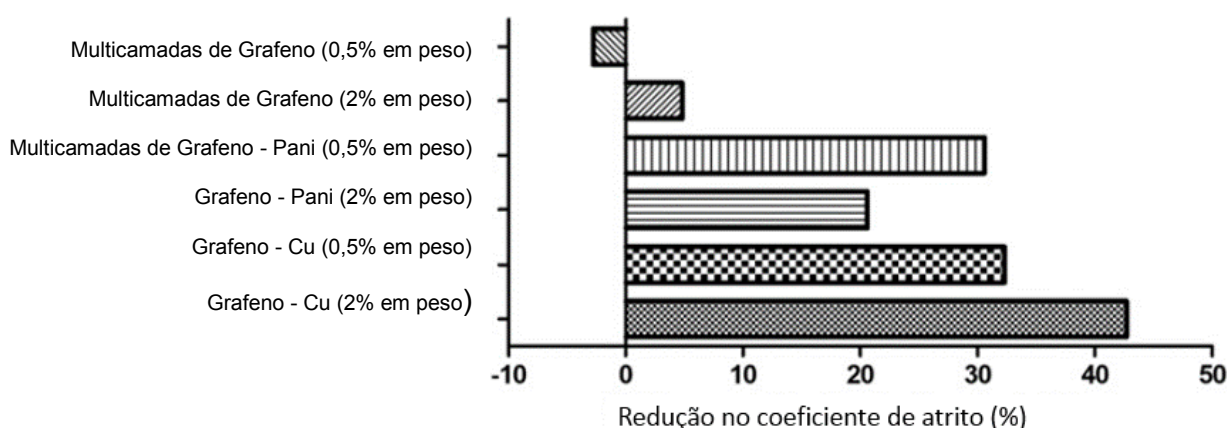


Figura 2.8 – Redução percentual do atrito em aplicação automotiva do uso de multicamadas de grafeno adicionado em função da concentração e tipo de aditivo (adaptado de RAMON-RAYGOZA et al., 2016).

2.7 Usinabilidade do Inconel 718

Conforme já mencionado previamente na sessão 2.1 são várias as propriedades peculiares do Inconel 718 que representam desafios no momento da usinagem, tornando-o conhecido como uma liga de baixa usinabilidade. Bonney (2004), Ezugwu (2005) e DUDZINSKI et al. (2004) relataram as principais razões da baixa usinabilidade do Inconel 718 com a maioria das ferramentas de corte:

- i. É muito suscetível ao encruamento, diminuindo a vida útil da ferramenta;
- ii. As partículas de carbonetos abrasivos contidos em sua microestrutura causam desgaste abrasivo;

- iii. A sua baixa condutividade térmica ($11 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ contra $50 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ do aço ABNT 1045, segundo Ezugwu (2015) eleva a temperatura na interface cavaco-ferramenta chegando a 1200°C ;
- iv. Ele possui grande afinidade química com o material da maioria das ferramentas de corte, o que aumenta a probabilidade de desgaste por difusão na ferramenta de corte;
- v. Devido à sua elevada resistência mecânica, as forças de corte que se mantêm elevadas, o que excita a máquina gerando vibrações que, por sua vez podem comprometer a qualidade superficial.

Na Figura 2.10 é apresentada a usinabilidade relativa para vários materiais de engenharia (Ezugwu, 2005). Quanto mais próximo do valor 5, melhor é usinabilidade do material. Observa-se que o Inconel 718 possui a mais baixa usinabilidade em relação aos outros materiais, representando em torno de 75% e 94% pior de ser usinado que o aço inoxidável e alumínio, respectivamente.

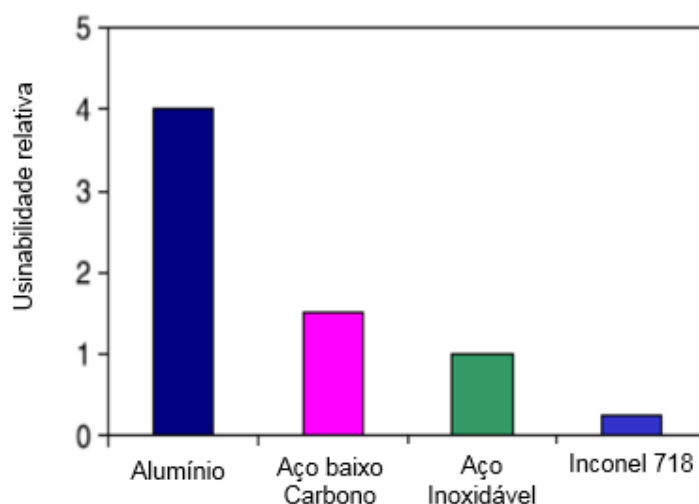


Figura 2.9 - Usinabilidade relativa de metais (adaptado de EZUGWU, 2005).

Além dos desafios já citados, a baixa condutividade térmica que dificulta a dissipação do calor gerado no processo, a tendência de encruamento durante a usinagem do Inconel 718 e os cavacos segmentados fazem com que altas temperaturas sejam desenvolvidas na interface cavaco-ferramenta (EZUGWU, 2002), de forma que é necessário reduzir as velocidades de corte a fim de evitar o desgaste acelerado das ferramentas de corte. Com isso, a usinabilidade do Inconel 718 torna-se reduzida. No caso da retificação, o que piora a usinabilidade do Inconel 718 são os baixos valores de condutividade térmica tanto dele (11 W/mK) quanto dos rebolos abrasivos convencionais, como é o caso do rebole de óxido de

alumínio branco (17W/mK) para temperaturas superiores a 527 °C (Ohbuchi e Obikawa, 2005,).

Aliado a isso, a natureza do processo de retificação (baixos valores de penetração de trabalho que resultam em cavacos com sessões menores que aqueles gerados pelos processos convencionais com ferramentas de geometria definida, como é o caso do processo de fresamento, por exemplo) faz com que pouco calor seja absorvido pelo cavaco. Com isso, a maior parte do calor gerado será direcionada para a peça, o que pode afetar as suas propriedades como dureza e resistência mecânica e assim comprometer a funcionalidade do componente.

Segundo EZUGWU; TANG (1995), a elevada geração de calor e a deformação plástica induzida durante o processo de usinagem afetam negativamente a superfície e sub-superfície da peça usinada. As alterações mais comuns em peças retificadas provenientes da elevação do calor e temperatura de usinagem são a perda da microdureza, deformação plástica próxima à superfície usinada, tensões residuais de tração, distorções e trincas. Dependendo da severidade e da aplicação do componente, ele poderá ter sua utilização comprometida se uma ou mais combinações destas alterações forem observadas.

Outro desafio na usinagem do Inconel 718 está relacionado com a garantia de pontas afiadas dos grãos abrasivos durante a retificação, pois esta liga apresenta partículas duras que podem arredondar as arestas cortantes dos grãos. A manutenção da aresta de corte depende do abrasivo, ligante e estrutura de rebolo e das condições de corte empregadas. Com a progressão da usinagem, os grãos abrasivos perdem a sua capacidade de corte e, com isso, tem-se a elevação das forças de retificação que por sua vez reflete no acabamento da peça. Neste caso é preciso realizar a dressagem do rebolo. Em outros casos, o aumento da carga sobre o rebolo pode provocar a auto-fratura e afiação do abrasivo ou até mesmo sua extração completa (MACHADO et al., 2011, e JACKSON e DAVIM, 2011).

No caso da retificação das ligas de níquel, a grande afinidade química entre os materiais da peça e do rebolo dificulta ainda mais a permanência de arestas de corte afiadas dos grãos abrasivos. Portanto, é preciso atentar-se para a correta seleção de parâmetros de corte.

Ao realizar o estudo de qualquer processo de usinagem, é preciso conhecer a influência das principais grandezas físicas que regem o processo sobre as principais variáveis de saída que são analisadas e assim selecionar as condições adequadas que priorizem um balanço entre as tolerâncias de projeto e os fatores econômicos. Os principais parâmetros de corte em retificação são: velocidade de corte (v_s), velocidade da peça (v_w), penetração de trabalho (a_e), profundidade de corte (a_p) e penetração de trabalho.

- Velocidade de corte, que é a velocidade tangencial instantânea resultante da rotação da ferramenta em torno da peça (MACHADO, 2013), varia entre 10m/s e 45 m/s para rebolos com abrasivos convencionais, mas pode chegar a 90 m/s ou 120 m/s no caso de rebolos superabrasivos, o que pode implicar valores de rotação do eixo-árvore superiores a 10.000 rpm. O emprego de velocidades de corte baixas reduz o aquecimento e a probabilidade de trincas na peça. Mesas alternativas são preferíveis às rotativas por diminuir o contato da peça com o rebolo causando também um menor aquecimento da peça (CAMPBELL, 2006).
- Velocidade da peça, que para retificação plana tangencial é o deslocamento da peça em relação ao rebolo no sentido longitudinal. Os valores de velocidade da peça em geral variam entre 0,1 em 12 m/min e irá depender do material do rebolo, da peça e das condições de lubri-refrigeração empregadas.
- Penetração de trabalho, penetração da ferramenta na peça no sentido perpendicular à direção do avanço (MACHADO, 2013): baixos valores de penetração de trabalho do rebolo, por exemplo, inferiores a 30 μm reduzem os riscos de distorções na peça durante a retificação, principalmente para materiais recozidos. Em um estudo recente sobre retificação de Inconel 718 com rebolo de alumina, De Oliveira (2015) empregou diferentes penetrações de trabalho que variaram entre 10 μm e 30 μm e observou que menores valores de penetração de trabalho proporcionam menores valores de rugosidade e não provocaram alteração microestrutural na peça.

Em outro trabalho, MARINESCU; ROWE; DIMITROV (2004) conduziram ensaios de retificação do Inconel 718 com rebolo de CBN e relataram que a rugosidade em geral cai à medida que se empregam maiores velocidades de corte. Ao aumentar a velocidade de corte, o rebolo se torna mais duro, de forma que há maior dificuldade de desprendimento dos grãos. Em vários casos esta é uma condição que aumenta a vida do rebolo e reduz as forças de corte.

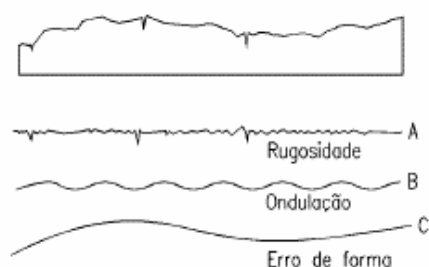
Osterle e Li (1997), por meio da retificação CREEP-FEED do Inconel 738LC com rebolo de alumina com tamanho do grão igual a 245 μm , relataram que o Inconel 738 irá manter sua resistência até próximo de 950 °C e que os danos mais severos na peça só seriam observados em caso de incapacidade do fluido de corte de alcançar a zona de retificação.

2.8 Qualidade de superfícies usinadas

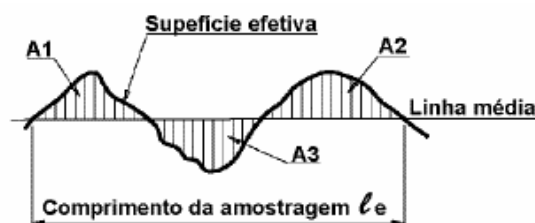
De acordo com Malkin e Guo (2008), a qualidade superficial de peças usinadas consiste de dois aspectos: integridade superficial (relacionada a alterações mecânica) e textura superficial (relacionada à topografia, e consequentemente rugosidade).

A importância do estudo do acabamento superficial de peças usinadas aumenta à medida que cresce a precisão de ajuste entre as peças, é essencial para peças submetidas a atrito, desgaste, corrosão, resistência a fadiga, transmissão de calor, propriedades ópticas, escoamento de fluidos (AGOSTINHO, RODRIGUES E LIRANI, 2004).

Segundo a norma NBR ISO 4287/2002, por rugosidade entende-se o conjunto de desvios microgeométricos caracterizado pelas pequenas saliências e reentrâncias presentes em uma superfície (Figura 2.10 a)). São vários os parâmetros de rugosidade que podem ser avaliados em uma superfície e a utilização de um ou de outro dependerá da aplicação da peça. O sistema básico de medida mais utilizado no Brasil, segundo as Normas ABNT NBR6405/1988 e NBR 8404/1984, é baseado na linha média ou sistema M. Neste sistema, ilustrado na Fig. 2.10 (b), todas as grandezas da medição da rugosidade são definidas a partir do seguinte conceito de linha média. Por linha média entende-se como sendo a linha paralela à direção geral do perfil, no comprimento da amostragem, de tal modo que a soma das áreas superiores, compreendidas entre ela e o perfil efetivo, seja igual à soma das áreas inferiores, no comprimento da amostragem (l_e) ($A_1 + A_2 = A_3$) (AGOSTINHO; RODRIGUES; LIRANI, 2004).



a) Diferenciação dos desvios geométricos.



b) Metodologia da linha média para a medição da rugosidade.

Figura 2.10 – Esquema de superfície com rugosidade e metodologia de medição a) Diferenciação dos desvios geométricos, b) Metodologia da linha média para a medição da rugosidade. (AGOSTINHO; RODRIGUES; LIRANI, 2004).

Machado et al. (2011) resumiram os principais parâmetros de rugosidade na forma de tabela que é apresentada na Tab. 2.6.

Tabela 2.6 – Principais parâmetros de rugosidade (MACHADO et al., 2011).

Símbolo	Nome	Definição
Ra	Desvio aritmético médio	Média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de amostragem.
Rq	Desvio médio quadrático	Raiz quadrática da média dos valores das ordenadas no comprimento de amostragem.
Rt	Altura total do perfil	Soma da maior altura de pico do perfil e da maior profundidade de vale do perfil no comprimento de avaliação
Rz	Altura máxima do perfil	Soma da altura máxima dos picos e a maior das profundidades dos vales no comprimento de amostragem.
Rsk	Fator de assimetria do perfil (skewness)	Quociente entre o valor médio dos valores das ordenadas e Rq ao cubo, no comprimento de amostragem.
Rku	Fator de achatamento do perfil	Quociente entre o valor médio dos valores das ordenadas à quarta potência e o valor de Rq à quarta potência no comprimento de amostragem

2.8.1 Rugosidade em peças de Inconel 718 retificadas

O processo de retificação é bastante empregado na indústria metal-mecânica com a finalidade de conferir uma combinação de ótimo acabamento com tolerâncias dimensionais e/ou macrogeométricas mais estreitas (Malkin e Guo, 2008). Como já comentado no início desta sessão, a retificação é um processo que requer muita energia por unidade de volume removido e devido às suas peculiaridades, grande parte desta energia é convertida em calor na região de corte, que por sua vez eleva a temperatura na interface entre rebolo-peça-cavaco. Essa elevada temperatura pode causar vários tipos de danos térmicos na peça tais como a queima da superfície, mudança de fase, tensões residuais, trincas na superfície ou sub-superfície (MANDAL et al., 2014).

Estruturas em aplicações aeroespaciais são submetidas a condições severas de tensão e temperatura e a ambientes hostis. A análise dinâmica de componentes mostra que diversas falhas por fadiga e fratura, além de fratura por corrosão, sempre se iniciam, ou são nucleadas, principalmente na superfície e próximas da superfície, o que é influenciado diretamente pela qualidade superficial, o que justifica a necessidade de bom acabamento (DEVILLEZ et al., 2010).

A rugosidade da superfície de peças fabricadas em Inconel 718 em geral segue a mesma tendência da rugosidade obtida para outros materiais como o aço, por exemplo.

Embora a rugosidade aumente com a diminuição da velocidade de corte, ou com o aumento da velocidade da peça, ela está é fortemente influenciada pela penetração de trabalho. Marinescu et al, (2004) informaram que a relação entre o parâmetro de rugosidade R_t e a penetração de trabalho (a_e) no processo de retificação plana é dado pela Eq. 2.1.

$$R_t = \sqrt{a_e} \text{ (}\mu\text{m)} \quad (2.1)$$

Os parâmetros de rugosidade na retificação de ligas de níquel também sofrem influência da técnica de aplicação de fluido de corte e da atmosfera empregada.

Da Silva et al. (2016) investigaram o comportamento da rugosidade do Inconel 718 após retificação com rebolo de alumina e em diferentes condições de corte (testaram duas técnicas de aplicação de fluido de corte, convencional e MQL, três valores de penetrações de trabalho (10 μm , 20 μm e 30 μm) e verificaram que valores de rugosidade (R_a) situaram-se abaixo de 0,45 μm . Estes resultados reforçam novamente que a técnica MQL é uma alternativa viável em relação a técnica convencional, quanto ao quesito acabamento, em processo de retificação. No entanto, devido a constatação de queda na dureza ao usar com o maior valor de penetração de trabalho, os autores não recomendam que para estas condições sejam usados valores de penetração de trabalho superiores a 20 μm .

Aspinwall et al. (2007) relataram que a rugosidade (R_a) deve ser inferior a 2 μm para pás de turbina. Já Klocke (2015) afirma que esses componentes devem ter elevada qualidade superficial, com valores de rugosidades (R_a) inferiores a 0,5 μm , além de apresentarem ótima integridade da peça.

Mandal et al (2014) conduziram um trabalho em retificação de Inconel 600 para avaliar vários parâmetros de rugosidade. Eles empregaram rebolo de alumina (AA 46/54K5V8) com velocidade de corte de 30 m/s, velocidade da mesa de 7 m/min, penetração de trabalho de 10 μm e testaram diferentes atmosferas de usinagem (a seco, técnica convencional e técnica convencional assistida com barreira pneumática). Como resultados, os autores relataram que houve pouca variação para o parâmetro R_a em função da atmosfera empregada. No entanto, os autores constataram uma variação significativa nos valores dos parâmetros R_z e R_{max} , demonstrando que estes parâmetros foram capazes de detectar a influência das atmosferas de usinagem nas condições investigadas. Eles informaram ainda que a condição a seco foi a pior dentre aquelas testadas, enquanto que a técnica convencional de aplicação de fluido com barreira pneumática se mostrou ser mais eficiente por permitir que o fluido tivesse melhor acesso à interface rebolo-peça. Com base nestes resultados, é importante atentar-se para o monitoramento de mais de um parâmetro de rugosidade durante a retificação do Inconel 718 ao variar o sistema de lubri-refrigeração, como é o caso a ser investigado nesta pesquisa.

Ainda em relação à influência da atmosfera de usinagem, recentemente Paturi et al. (2016) realizaram um estudo para avaliar a rugosidade da superfície do Inconel 718 durante o torneamento com fluido de corte contendo partículas sólidas de WS_2 em 5% de concentração em peso. O fluido de corte foi aplicado via técnica MQL à vazão de 200 mL/h. Eles realizaram ensaios também com o fluido sem partículas para fins de comparação e relataram que a usinagem com fluido contendo partículas de WS_2 proporcionou uma melhor condição tribológica que refletiu na melhor qualidade da peça, em geral 35% superior em termos de rugosidade (R_a), quando comparado com a técnica MQL sem partículas de WS_2 .

2.9 Considerações sobre a Integridade Sub-superficial de ligas de níquel após a retificação

Superaquecimento ou queima da peça, irregularidades superficiais, trincas e microtrincas, microdefeitos, alterações metalúrgicas incluindo distorção microestrutural, transformação de fase, camadas afetadas termicamente, tensões residuais são os principais problemas identificados. Essas mudanças ocorrem devido a cargas mecânicas e térmicas durante o processo de retificação (DEVILLEZ et al., 2010).

A microestrutura do Inconel 718 tem uma organização diferenciada chamada de fase γ' . Ela está presente em superligas de níquel-ferro, como Inconel 718 e Inconel 706, que contêm quantidades de nióbio, o precipitado primário reforçador não é γ' mas sim um tetragonal de corpo centrado (BCT). As suas excelentes propriedades já comentadas previamente, são devido às tensões de coerência e o pequeno número de planos de escorregamento (REED, 2006).

Segundo Osterle e Li (1997), em condições normais de usinagem do Inconel 738, este irá manter sua resistência até próximo de 1225 °C, de forma que poderá haver queda na dureza local, em alguns casos benéfica no sentido de manter as forças de retificação estáveis. Estes autores relataram que as tensões residuais e as microtrincas não ultrapassaram uma espessura superior a 10 μ m abaixo da superfície retificada se o fluido de corte for empregado para resfriar a superfície da peça. Além disso, os autores informaram que danos mais severos só seriam observados em caso de incapacidade do fluido de corte de alcançar a zona de retificação. Ressalta-se que no trabalho destes autores foram empregadas profundidades de corte de 0,5 e 1,0 mm, valores bem superiores que resultam em condições de corte mais severas que àquelas que serão adotadas neste trabalho e que serão comentadas na sessão metodologia.

Xu; Yu; Xu (2002) realizaram um estudo sobre o efeito da temperatura na integridade da superfície da liga de níquel K417 (material utilizado para fabricação de palhetas de turbinas) após a retificação com rebolo de óxido de alumínio vitrificado com uma velocidade de corte igual a 25 m/s. Estes autores observaram que o acabamento piorou com o aumento da temperatura da peça. Além disso, eles detectaram a presença de microtrincas na maior parte das superfícies usinadas e atribuíram este problema ao grande gradiente de temperatura entre a superfície da peça e do rebolo durante a usinagem. Em alguns casos, os autores detectaram presença de queima de aspecto visível na superfície.

Toda peça retificada estará sujeita a tensão residual que pode afetar significativamente o comportamento mecânico do material, seja ele para aumentar ou para reduzir a vida útil de um componente. As tensões residuais podem ser compressivas ou trativas. As tensões compressivas são tensões residuais que são induzidas por deformações plásticas não uniformes na superfície da peça como resultado de interações mecânicas entre os grãos e a peça durante a usinagem. Já as tensões residuais trativas são causadas principalmente por tensões e deformações de origem térmicas associadas às temperaturas de retificação e seus gradientes (MALKIN E GUO, 2008). Ainda segundo estes autores, na zona de corte, o material da peça próximo à superfície que está mais quente se expande, mas sofre restrição de materiais nas camadas inferiores, o que gera uma tensão de compressão na superfície, que se for suficientemente grande pode fazer com que o material “escoe” plasticamente. No entanto, quando o contato termina e a peça resfria, o material se contrai, assim forma-se a tensão residual de tração, usualmente maior que a de compressão.

Doremus et al. (2015) realizaram recentemente um estudo para compreender a influência de defeitos causados durante a fabricação sobre a vida de fadiga de peças aeronáuticas fabricadas em Inconel 718. Eles estudaram diferentes geometrias com pontos de concentração de tensões e verificaram que a tensão residual interfere diretamente na vida da peça e na formação e propagação de trincas. Em geral, tensões residuais de compressão são benéficas, enquanto que as tensões de tração são prejudiciais. Os autores também verificaram presença de camada branca próxima à superfície o que reduz a vida útil da peça.

Malkin e Guo (2008) concluem ainda que condições de retificação severas causam tensões de tração tanto em aços de alta resistência quanto em ligas aeronáuticas o que leva a uma redução na vida em fadiga das peças e ao surgimento de trincas. Além disso, os autores relatam que existe uma tendência de geração de microtrincas para ligas à base de níquel devido às tensões residuais que podem ser iniciadas pela fusão de material devido às altas temperaturas de retificação.

2.9.1 Potência em Retificação

A importância da potência para o processo de retificação é evidenciada, através de um paralelo com a força de corte, por Machado et al. (2011), que relatam que as forças de corte influenciam a qualidade dimensional e geométrica da peça, principalmente da sua rugosidade. A força de retificação é um vetor resultante, formado pela força normal e pela força tangencial, geralmente o valor da força tangencial varia entre 25 e 40 % da força normal, e ela pode ser obtida através da potência da retificadora, além das velocidades da peça e do rebolo, como mostra a Eq. (2.2) (MACHADO et al., 2011):

$$F_t = \frac{P}{v_s \pm v_w} \text{ (N)} \quad (2.2)$$

Onde:

F_t = Força tangencial de retificação

P = Potência de retificação

v_s = velocidade de corte

v_w = velocidade da peça

O sinal positivo no denominador da Eq. (2.2) é empregado para o processo de retificação no sentido discordante, enquanto que o sinal negativo refere-se ao processo de retificação no sentido concordante (Machado et al., 2011). Um parâmetro fundamental que pode ser obtido com a potência é a energia específica (u), que é definida como energia por unidade volumétrica de material removido (Q_w), e é equivalente à potência específica (MALKIN E GUO, 2008), Eq. 2.3:

$$u = \frac{P}{Q_w} \text{ (W/m}^3\text{)} \quad (2.3)$$

Machado et al. (2011) complementam que, devido à força de usinagem, quando o rebolo toca a peça, o conjunto máquina-rebolo-peça se deforma elasticamente e, portanto, quando o rebolo passa sobre a peça pela primeira vez, ele não atinge a penetração de trabalho especificada assim quando o rebolo passar novamente sobre a peça, ele vai continuar retirando material e ocorrerá um alívio das deformações elásticas.

O alívio das deformações ocorre até que se atinja o valor de penetração de trabalho estabelecido e este processo é chamado de faiscamento (se ocorre no início da operação é

chamado de *spark in*, ao final da operação é chamado de *spark-out*). Este faiscamento auxiliar na eliminação de erros dimensionais nas peças retificadas (MACHADO et al., 2011).

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentadas todas as informações sobre os procedimentos experimentais, além do material da peça e sua preparação, da máquina-ferramenta, rebolo, dos instrumentos de medição e metodologia empregados nesta pesquisa. São também apresentados os parâmetros de entrada e de saída. Estas informações estão apresentadas de forma resumida no fluxograma da Fig. 3.1.

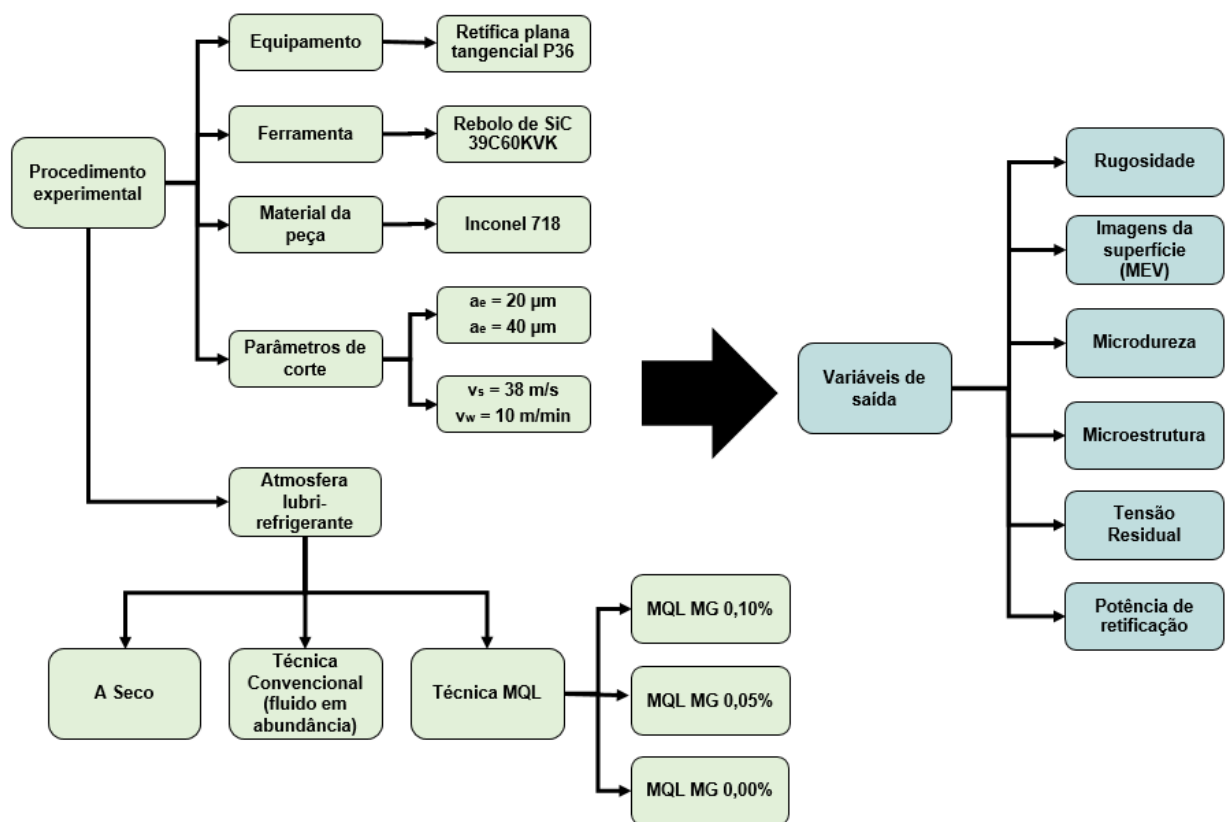


Figura 3.1 – Fluxograma das etapas para o desenvolvimento desta pesquisa.

Onde:

a_e : penetração de trabalho na direção radial do rebolo;

v_s : velocidade de corte

v_w : velocidade da peça;

MQL: Mínima Quantidade de Lubrificante;

MG: Multicamadas de grafeno;

0,00%, 0,05% e 0,10%: porcentagens em peso de multicamadas de grafeno dispersas no fluido de corte.

3.1 Material da peça e preparação

O material da peça dessa pesquisa é o Inconel 718 na forma envelhecida, com dureza média de 40 HR_C (MARQUES, 2015), que foi preparado por serramento e fresamento até conferir às amostras com as seguintes dimensões: 15 mm de largura x 20 mm de comprimento x 15 mm de altura. Duas faces (inferior e superior) foram utilizadas para ensaios de retificação. A composição química das amostras é apresentada na Tabela 3.1 e foi verificada através do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), modelo TM3000, pelo método EDS (Espectroscopia de Energia Dispersiva), com tempo de aquisição de 29,7 s, tempo de processamento 5 s e “*Accelerating Voltage*” igual a 15 kV. Este aparelho pertence ao Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem da FEMEC.

Tabela 3.1 – Composição química do Inconel 718 obtida através do MEV comparada com a composição teórica de acordo com Reed (2006).

Elemento	% em peso dos elementos, obtida via MEV – TM3000	% do elemento de liga de acordo com Reed (2006)	% do elemento de liga de acordo com Villares Metals (2017)
Carbono	5,588	0,04	0,3
Alumínio	0,497	0,50	0,5
Titânio	0,860	0,90	1,0
Cromo	16,899	19,00	18,5
Ferro	19,079	18,50	18,6
Níquel	49,000	50,66	53,0
Níóbio	4,582	5,10	5,1
Molibdênio	3,495	5,30	3,0

O Inconel 718 possui matriz austenítica endurecida por precipitação – fase γ com elevadas frações volumétricas de precipitados coerentes do tipo Ni (Ti, Nb, Ta) Al – fase γ' . Além disso, ele apresenta estruturas do tipo ‘Laves’ que são correntes de precipitados além de maclas bem definidas. Na Figura 3.2 é possível observar a microestrutura do Inconel 718 com destaque para as maclas e as laves, enquanto que na Fig 3.3 as setas indicam os carbonetos bem definidos.

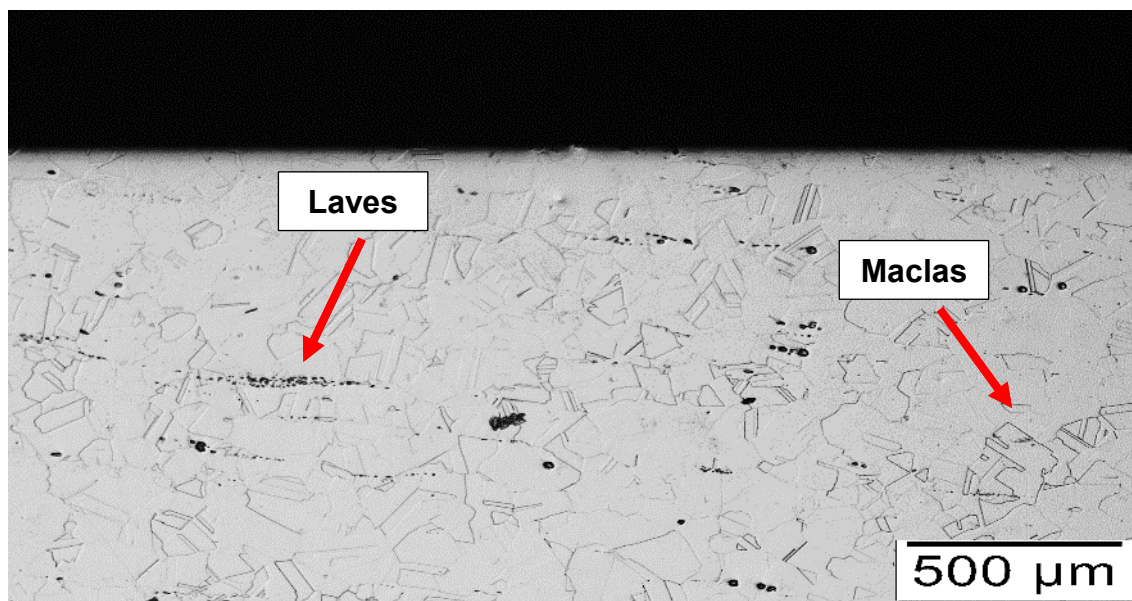


Figura 3.2 – Microestrutura do Inconel 718 utilizado nesta pesquisa.

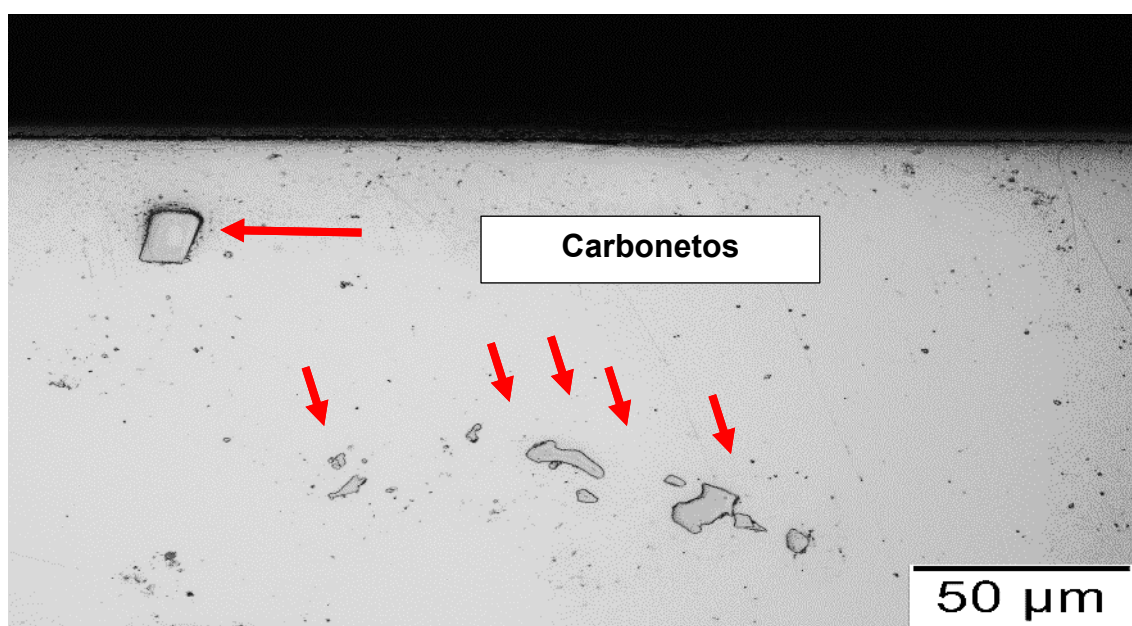
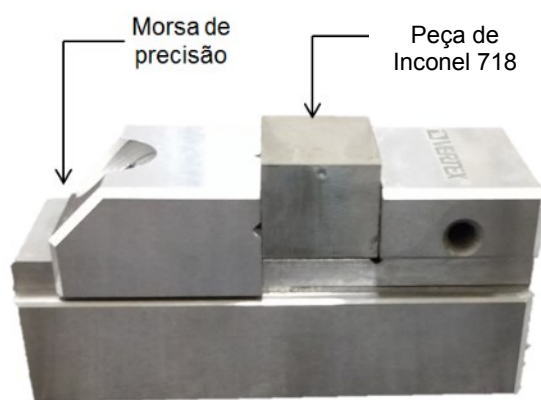


Figura 3.3 – Detalhe dos carbonetos presentes na microestrutura do Inconel 718 utilizado nesta pesquisa.

Antes dos ensaios de retificação, as amostras de Inconel 718 foram devidamente preparadas com o auxílio de diversas máquinas-ferramenta dos laboratórios de usinagem da FEMEC-UFU, tais como a serra fita semi-automática Franho (modelo FM 20) para seccionamento, a fresadora CNC ROMI (modelo Interact 4, 22 CV) e o Centro de Usinagem Vertical CNC (modelo Discovery 760). No total, foram preparadas 20 amostras.

Para garantir o menor desvio de paralelismo entre as faces inferior e superior das amostras de Inconel 718, cada amostra foi devidamente usinada pelo processo de retificação com rebolo de SiC. Tanto durante a preparação da amostra quanto nos ensaios de retificação definitivos a amostra foi fixada em uma morsa de precisão (Figura 3.4 a)) que por sua vez foi montada na mesa ferromagnética da retificadora Fig. 3.4 b), já que o Inconel 718 não possui propriedades ferromagnéticas. Esta amostra ficou presa à morsa até que fossem concluídas todas as medições de rugosidade, após os ensaios definitivos. Também é possível observar na Fig. 3.4 b) o sentido de corte utilizado para os ensaios, a amostra montada na morsa e dois apoios de ferro fundido cinzento utilizados para garantir que a morsa não se deslocasse, já que por seu tamanho reduzido a área de contato com a mesa ferromagnética da retificadora também era reduzida.



a) Vista lateral direita



b) Vista frontal/superior do sistema
peça-morsa-mesa da retificadora

Figura 3.4 – Imagens da montagem da peça na morsa de precisão: a) Vista lateral direita b) Vista frontal/superior do sistema peça-morsa-mesa da retificadora.

3.2 Ensaios de retificação

A seguir serão apresentados os equipamentos, rebolo, fluido de corte, partículas sólidas que foram adicionadas ao fluido de corte, acessórios e os parâmetros de corte empregados nesta pesquisa.

3.2.1 Máquina ferramenta

Para realização dos ensaios de retificação foi utilizada uma retificadora plana tangencial do fabricante MELLO, modelo P-36, semi-automática, com potência nominal do motor que aciona o eixo-arvore de 2,25 kW e rotação constante em 2400 rpm. Ela possui resolução de 5 μ m no eixo Z (vertical) e está instalada no Laboratório de Usinagem Convencional – LUC da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia.

3.2.2 Rebolo

Nos experimentos foi empregado um rebolo de carbeto de silício (SiC) com a especificação 39C60KVK, do fabricante NORTON – SAINT GOBAIN ABRASIVES (Figura 3.5). Pela Federação Europeia de Produtos Abrasivos (FEPA) o tamanho de grão abrasivo correspondente à grana mesh 60 é igual a 0,250 mm. Este rebolo possui ligante vitrificado com dimensões 305 mm de diâmetro externo x 25 mm de espessura x 76 mm de diâmetro interno. Ele foi devidamente balanceado antes da realização dos ensaios de retificação desta pesquisa.



Figura 3.5 – Rebolo 39C60KVK utilizado nos ensaios.

3.3 Fluidos de corte e técnicas de aplicação

Nesta pesquisa foram testadas duas técnicas de aplicação de fluido de corte: Convencional e a Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL). Para a técnica MQL foram testadas três condições: MQL convencional, sem adição de multicamadas de grafeno (MQL MG 0,00%) e MQL contendo multicamadas grafeno em duas diferentes concentrações em

peso, 0,05 % (MQL MG 0,05%) e 0,10 % (MQL MG 0,10%). Ensaios de retificação também foram realizados na condição a seco para comparação. Logo, foram testadas cinco atmosferas lubri-refrigerantes de usinagem.

O mesmo fluido de corte foi empregado na usinagem tanto com a técnica convencional (também conhecida como abundância ou jorro) quanto com a MQL. Ele é um fluido semi-sintético emulsionável, Vasco 7000, da empresa Blaser Swissslube. Algumas de suas características são: possui 0 % de óleo mineral e 25% de ésteres, densidade igual a 0,98 g/cm³ a 20°C, apresenta ponto de centelhamento em torno de 134 °C (Blaser Swissslube, 2017). As suas aplicações abrangem desde usinagem de materiais ferrosos e de ligas de alumínio até materiais de pobre usinabilidade, tais como as ligas a base de titânio e de níquel.

Para a técnica convencional, o fluido de corte foi utilizado na zona de corte na proporção de 1:9 (partes de óleo em água) à vazão de 522 L/h (ou 522000 mL/h) com pressão de descarga próxima à pressão atmosférica. Esta condição também foi utilizada para a dressagem do rebolo. A concentração do fluido de corte era controlada após cada ensaio por meio de um refratômetro N1, ATAGO, para o BRIX $\approx$ 4% correspondente à proporção (concentração) empregada.

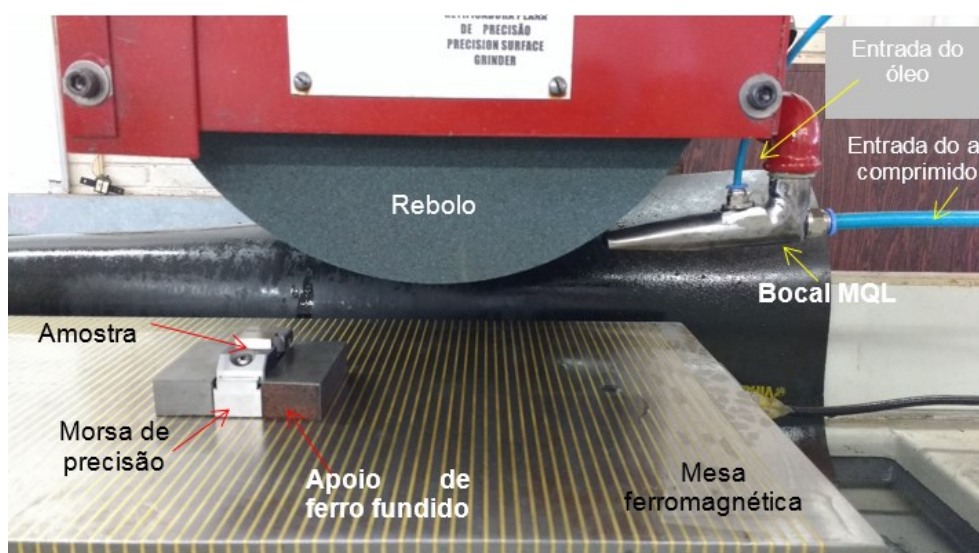
Para os ensaios com a técnica MQL o fluido de corte foi aplicado à vazão de 240 mL/h sem adição de água. Esta vazão foi adotada com base em experimentos realizados por Guimarães (2016), que realizou um estudo sobre a influência das várias vazões de aplicação de fluido pela técnica MQL na integridade da superfície de vários aços para fabricação de moldes e matrizes (N2711, VP Atlas e VP100) com rebolos de Al₂O₃ e SiC. Este autor relatou que em geral os melhores resultados de acabamento, microdureza e textura superficial das peças em aço VP 100 (considerado aquele de pior usinabilidade dentre os materiais testados em sua pesquisa) foram obtidos com a vazão de 240 mL/h, independente do rebolo empregado. Além disso, esta vazão resultou em tensões residuais de compressão para o aço VP100 (o que é desejado), independente da direção.

Dois tipos de bocais foram empregados nesta pesquisa. Para a técnica convencional foi utilizado o bocal convencional do tipo sapata com orifício de saída do tipo chato, que acompanha a máquina-ferramenta, chamado de bocal convencional (Fig. 3.6 a)), enquanto que para a técnica MQL foi utilizado um bocal semelhante ao convencional (Fig. 3.6 b)). Este bocal foi desenvolvido por Guimarães (2016) e visa facilitar o acoplamento das mangueiras que transportam o fluido de corte e o ar comprimido. Este novo bocal possui dois furos: um na parte superior do bocal, e outro na região anterior que recebem as mangueiras para transporte do fluido de corte e do ar comprimido, respectivamente. O esquema de montagem e posicionamento dos bocais empregados na usinagem com as técnicas convencional e MQL

são mostrados nas Fig. 3.6 (a) e 3.6 (b), respectivamente. Observa-se que bocal foi posicionado admitindo como referência o eixo árvore da retificadora, Fig.3.7.



a) Técnica convencional com bocal convencional



b) MQL com bocal desenvolvido por Guimaraes (2016).

Figura 3.6 – Montagem e posicionamento dos bocais utilizados durante os ensaios de retificação para as técnicas: a) técnica convencional com bocal convencional – que também foi empregado na operação de dressagem b) MQL com bocal desenvolvido por Guimaraes (2016).

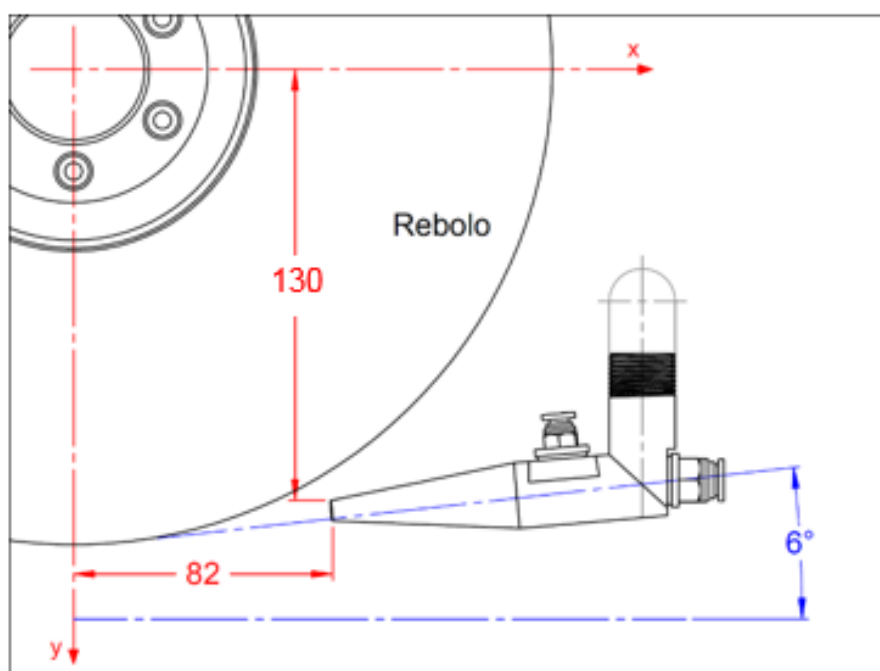
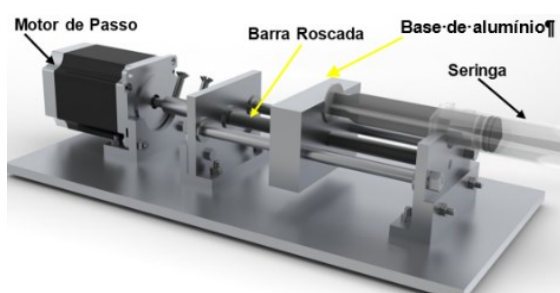


Figura 3.7 – Esquema do posicionamento do bocal para ambas as metodologias de aplicação de fluido (adaptado de GUIMARÃES, 2016).

Além do bocal, foi também utilizado um dispositivo para bombear o fluido de corte pela técnica MQL. Este dispositivo é conhecido como bomba de seringa (Fig. 3.8 a) e b)) que foi projetado e construído por técnicos e pesquisadores dos Laboratórios de Usinagem Convencional (LUC) e de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) da FEMEC-UFU e utilizado nas pesquisas De Mello (2015) e Guimarães (2016). O controle da vazão de óleo é feito por meio de placa arduino. Com o auxílio de um potenciômetro e programação adequados, é possível controlar a velocidade do motor de passo que movimenta um eixo no qual está acoplada uma base de alumínio, que por sua vez empurra o êmbolo da seringa.



a) Desenho em perspectiva isométrica



b) Foto - vista superior

Figura 3.8 - Bomba de seringa utilizada nos ensaios de retificação com a técnica MQL: a) desenho em perspectiva isométrica (adaptado de DE MELLO, 2015 e b) foto - vista superior

3.4 Grafeno: obtenção e preparação

As amostras de multicamadas de grafeno - MLGs (do Inglês *Multilayer Graphene*) foram preparadas e dispersas no fluido de corte no Laboratório de Filmes Finos e Processos de Plasma, Departamento de Física Aplicada, Instituto de Ciências Tecnológicas e Exatas da Universidade Federal do Triângulo Mineiro. A preparação de grafeno se dá por esfoliação da grafita que é descrita a seguir. A grafita natural é pré-tratada com ácidos a 1000 °C, por alguns segundos visando sua pré-esfoliação. E seguida ele passar por secagem e por fim é tratado em aparelho ultrassom com dispersantes para completar o processo de esfoliamento até que os flocos tenham da ordem de 1 a 20 micrometros de tamanho e espessura da ordem de 1 nm a 30 nm. O dispersante é secado e o fluido de corte é colocado nos recipientes com multicamadas de grafeno em pó e novamente são dispersos em ultrassom de modo que a dispersão mantenha-se homogênea.

O fluido de corte sem adição de água e multicamadas de grafeno que, para facilitar a referência neste trabalho, foi chamado de MQL MG 0,00%, que significa fluido de corte aplicado pela técnica MQL com fluido sem grafeno, ou zero por cento de grafeno. Analogamente, as siglas MQL MG 0,05% e MQL MG 0,10% foram utilizadas para denominar os fluidos de corte contendo concentrações (em peso) de multicamadas de grafeno de 0,05% e 0,10%, respectivamente.

3.4.1 Caracterização dos fluidos de corte com e sem multicamadas de grafeno

A fim de auxiliar na análise e discussão dos resultados desta pesquisa, foi realizada a caracterização dos fluidos de corte com e sem adição de multicamadas de grafeno. Como o fluido de corte empregado na usinagem com a técnica convencional foi preparado com adição de água, tornando-se uma emulsão, diferentemente da condição que foi utilizado o fluido aplicado pela técnica MQL, em que se empregou o fluido sem adição de água, foram selecionadas quatro amostras de fluidos para caracterização das propriedades térmicas (Tabela 3.2).

Todos os procedimentos de caracterização foram realizados no Laboratório de Energia e Sistemas Térmicos (LEST) da FEMEC – UFU. Inicialmente foram determinadas as viscosidades dinâmica e cinemática, como também a massa específica, em duas temperaturas, 25 °C e 50 °C, através de um viscosímetro Anton Paar, Stabinger, modelo SVM 3000. Este experimento sofreu duas réplicas, portanto três medições foram feitas para cada parâmetro. Ao final foi calculada a média aritmética dos valores obtidos. Os resultados de viscosidade (dinâmica e cinemática) e massa específica são apresentados na Tabela 3.2. Estas propriedades são importantes para fluidos utilizados no processo de retificação pelo

fato de fluidos com alta viscosidade terem mais chances de permanecer na região de corte por mais tempo. Além disso, devido às características da película adsorvida, que se torna mais espessa e resistente, haverá uma melhor lubrificação entre a interface rebolo-peça, consequentemente, melhorando as condições tribológicas durante a retificação (WANG et al., 2016).

Tabela 3.2 – Viscosidade e massa específica para as diferentes concentrações de grafeno – condições lubri-refrigerantes valores médios)

Propriedade: Técnica de aplicação/concentração de grafeno	Viscosidade Dinâmica μ (mPa.s)		Viscosidade Cinemática ν (mm ² .s ⁻¹)		Massa específica ρ (g.cm ⁻³)	
	Temperatura (°C)					
	25,00	50,00	25,00	50,00	25,00	50,00
Convencional (Sem grafeno - Emulsão na diluição 1:9)	1,38 ± 0,01	0,86 ± 0,00	1,39 ± 0,01	0,87 ± 0,00	1,00 ± 0,00	0,99 ± 0,00
MQL MG 0,00%	145,27 ± 0,41	44,82 ± 0,03	147,96 ± 0,42	46,38 ± 0,07	0,98 ± 0,00	0,97 ± 0,01
MQL MG 0,05%	157,18 ± 2,05	48,53 ± 0,54	160,70 ± 2,58	50,29 ± 0,56	0,98 ± 0,00	0,97 ± 0,00
MQL MG 0,10%	159,42 ± 0.74	48,97 ± 0.08	162,59 ± 0.76	50,71 ± 0.08	0,98 ± 0.00	0,97 ± 0.00

Da Tabela 3.2 é possível notar que todos os fluidos apresentaram redução nas viscosidades dinâmica e cinemática com o aumento da temperatura. Pelo fato de o fluido (emulsão) aplicado via técnica de aplicação convencional ser aquele o único no qual se adicionou água, era de se esperar que sua viscosidade fosse a menor entre todos os fluidos testados, fato que foi constatado nas medições.

Nesta pesquisa também foi determinada a condutividade térmica dos diferentes compostos. Para isso foi utilizado um condutivímetro Linseis THB-1. De forma semelhante à medição da viscosidade e massa específica, foram realizadas três medições para a condutividade térmica e calculada a média dos valores obtidos, que estão apresentados na Tabela 3.3. Para o fluido diluído, observa-se que as suas propriedades térmicas estão próximas àquelas da água que foi utilizada nos ensaios (água de torneira que é fornecida à população de Uberlândia), cuja condutividade térmica é de 6,238 (W/mK) *e-001. Esta característica está associada a uma capacidade maior de 'remoção' de calor durante o processo de usinagem. Em relação aos fluidos sem adição de água, utilizados nos ensaios

de retificação com a técnica MQL, com exceção do fluido MQL MG 0,05%, todos os demais apresentaram redução na condutividade térmica com o aumento da temperatura (Tabela 3.3).

Tabela 3.3 – Condutividade térmica para as diferentes concentrações de grafeno – condições lubri-refrigerantes.

Condutividade térmica (W/mK) *e-001		
Técnica de aplicação/concentração de grafeno	Temperatura (°C)	
	25,00	40,00
Convencional (Sem grafeno - Emulsão na diluição 1:9)	5,41 ± 0,08	5,00 ± 0,22
MQL MG 0,00%	2,65 ± 0,04	2,64 ± 0,05
MQL MG 0,05%	2,83 ± 0,13	2,85 ± 0,21
MQL MG 0,10%	2,81 ± 0,31	2,65 ± 0,21

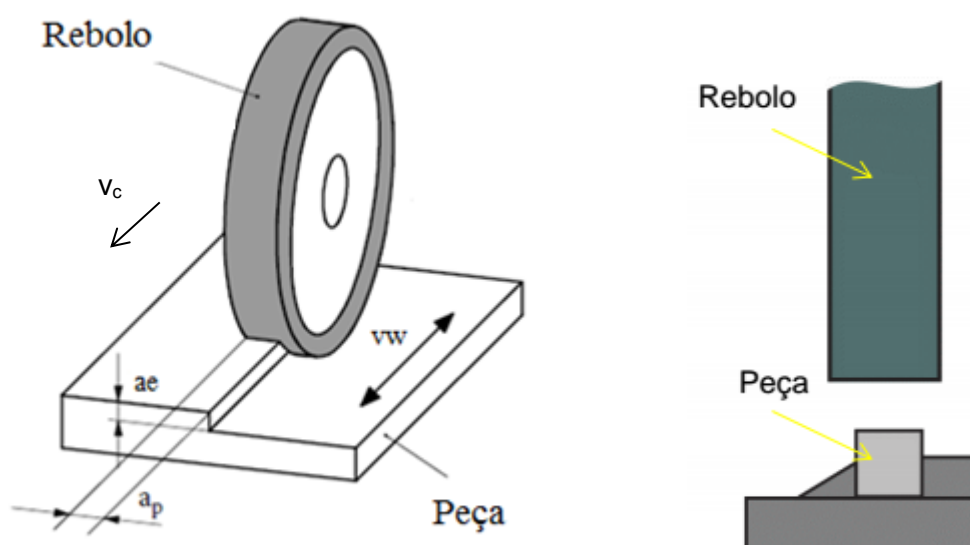
3.5 Parâmetros de corte

Com exceção da penetração de trabalho (a_e), todos os outros parâmetros de corte, tais como a velocidade de corte e velocidade da mesa, foram mantidos constantes. Na Tabela 3.4 é apresentado o resumo das condições utilizadas para o desenvolvimento desta pesquisa em processo de retificação plana do Inconel 718.

Tabela 3.4 – Variáveis de entrada utilizados nos ensaios de retificação.

Parâmetro	Valor/especificação	
Penetração de trabalho a_e (μm)	20	
	40	
Velocidade da peça v_w (m/min)	10	
Velocidade de corte v_s (m/s)	38	
Profundidade de corte a_p (mm)	15	
Fluido de corte/ diluição	Semi-sintético de base vegetal - Vasco 7000 / 1:9	
Técnica de aplicação de fluido de corte (vazão)	Convencional (522.000 mL/h) Diluição 1:9	MQL (240 mL/h) Sem adição de água
Concentração de grafeno (% em peso) considerando 196 g de fluido (equivalente a 200 mL)	0 (MQL MG 0,00%)	
	0,05 (MQL MG 0,05%)	
	0,1 (MQL MG 0,10%)	

Nesta pesquisa, foi adotado como critério de parada dos ensaios de retificação apenas um ciclo de retificação com um valor de penetração previamente ajustado no nônio do eixo Z e de forma que a largura da peça a ser retificada (15 mm) fosse inferior à largura do rebolo (25,4 mm) (Fig.3.9). Com isso, haveria a garantia de que rebolo cobrisse toda a superfície da peça durante uma única passagem dele, sem avanço transversal da mesa. Vale ressaltar que o mecanismo de funcionamento da retificadora plana faz com que haja um movimento de ida e de volta da mesa (avanço longitudinal) que contém a peça. Isso faz com que o rebolo remova material tanto no movimento de ida quanto de volta da mesa. Desta forma, para o valor de penetração de trabalho, foram consideradas as passagens de ida e de volta do rebolo sobre a peça, havendo apenas o avanço longitudinal. Portanto, foram calculados e removidos teoricamente 6 mm³ e 12 mm³ de material das peças ao empregar as penetrações de trabalho iguais a 20 µm e 40 µm, respectivamente. Nas Figuras 3.10 a) e b) são mostrados os esquemas exemplificando os principais parâmetros de corte de um processo de retificação plana tangencial em que há avanço transversal da mesa e onde o avanço transversal é nulo, respectivamente. Nesta pesquisa foi empregada a condição ilustrada na Fig. 3.10 b).



a) Retificação com avanço transversal da mesa (velocidade transversal) b) Retificação sem avanço transversal da mesa e largura da peça inferior à largura do rebolo

Figura 3.9 – Parâmetros de corte na retificação plana tangencial (Adaptada de MARINESCU, 2007), a) Retificação com avanço transversal da mesa (velocidade transversal e b) Retificação sem avanço transversal da mesa e largura da peça inferior à largura do rebolo.

Todos os ensaios de retificação (incluindo uma réplica por amostra) foram realizados com a prévia dressagem do rebolo. Para isso, foi utilizado um dressador de ponta única de diamante (fabricante Winter) com raio de ponta de 0,3 mm. A dressagem foi realizada nas mesmas condições empregadas para a usinagem com a técnica convencional de aplicação de fluido de corte. Foi adotado um grau de recobrimento do rebolo (U_d) = 3. O grau de recobrimento do rebolo, U_d , pode ser selecionado com os demais parâmetros de dressagem segundo a Eq. (3.1):

$$U_d = \frac{b_d}{s_d} \quad (3.1)$$

Onde b_d : é largura de dressagem ou de atuação do dressador; e s_d o passo de dressagem.

O valor de U_d desta pesquisa foi selecionado por em geral ele variar entre 3 e 4 para processos de retificação de semi-precisão ou mediana (MARINESCU et al., 2007), condição em que se enquadra esta pesquisa devido às condições de corte empregadas, principalmente pela características grão abrasivo, já que o rebolo possui grana mesh 60, que resulta em um tamanho médio de grão abrasivo igual 0,250 mm, conforme já informado previamente.

Para $U_d = 3$ o valor de penetração de dressagem (a_d) inicialmente calculado foi de 10 μm . Este valor de a_d foi ajustado conforme variação na ponta do diamante do dressador, que foi mantida sempre na mesma posição, (Equação 3.2), considerando que o valor de b_d deve-se manter constante a fim de garantir $U_d=3$. Assim, quando o dressador tocava a superfície do rebolo, eram realizados dois passes completos para garantir uma dressagem uniforme. A cada operação de dressagem, a ponta do dressador era levada a um Estero microscópio SZ6145TR – OLYMPUS do LEPU para medição do seu desgaste. O parâmetro b_d pode ser determinado pela Eq 3.2.

$$b_d = \sqrt{8 \cdot r_p \cdot a_d} \quad (3.2)$$

Onde:

r_p é o raio de ponta do diamante do dressador.

a_d penetração de dressagem

3.6 Variáveis de saída monitoradas

As variáveis de saída empregadas nesta pesquisa são: rugosidade, imagens da superfície retificada (MEV), microdureza da sub-superfície, análise microestrutural, tensão residual e potência instantânea de retificação.

3.6.1 Parâmetros de Rugosidade

Nesta pesquisa foram avaliados os seguintes parâmetros de rugosidade R_a , R_z , R_q e R_t que foram medidos na peça. Para isso, foi utilizado um rugosímetro portátil do fabricante *MITUTOYO* modelo SJ201 P/M. Ele possui uma resolução de $0,01\ \mu\text{m}$. A agulha do apalpador é de diamante e possui um raio de ponta de $5\ \mu\text{m}$. Foram adotados um *cut-off* de $0,8\ \text{mm}$ e comprimento de amostragem $4\ \text{mm}$, de acordo com a norma NBR ISO 4287 (2002) para todas as medições.

Ao final de cada ensaio de retificação, cada amostra foi devidamente posicionada em uma mesa de desempenho, antes da medição, todas as amostras foram limpas com hastes flexíveis embebidas em álcool, foram realizadas nove medições, perpendiculares ao sentido de retificação, ou sentido dos sulcos deixados pelo rebolo. As nove medições foram realizadas ao longo de linhas imaginárias com o espaçamento de $2\ \text{mm}$ entre elas, tentando cobrir toda a superfície da amostra conforme ilustrado na Fig. 3.11.

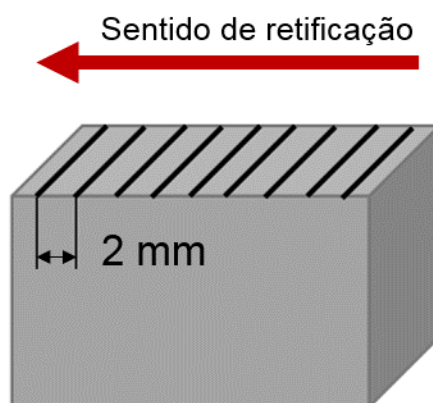


Figura 3.10 – Regiões de medição dos parâmetros de rugosidade

3.7 Avaliação da Integridade das peças

A integridade da superfície e sub-superfície das amostras foram avaliadas com base nas imagens das superfícies, microdureza, microestrutura e tensões residuais após os ensaios de retificação. O procedimento adotado para a avaliação de cada um dos parâmetros será apresentado a seguir.

3.7.1 Imagens da superfície retificada

A avaliação da superfície da peça após a usinagem permite identificar se houve problemas como queima de retificação, trinca ou presença de material da peça aderido ou ainda irregularidades na superfície. Nesta pesquisa a superfície retificada das amostras foi avaliada com o auxílio de um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), do fabricante ZEISS, modelo EVO MA10, do Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura da Faculdade de Engenharia Química da UFU. As imagens foram obtidas com ampliações de 1000, 5000 e 10000 vezes mas apenas algumas das imagens foram selecionadas para a sessão de resultados.

A fim de estabelecer comparações entre as superfícies que foram retificadas nas condições estabelecidas nesta sessão, imagens de uma amostra de Inconel 718 que foi apenas preparada (não foi submetida aos ensaios definitivos) foram também obtidas. Após observar toda a superfície da amostra, nenhuma trinca ou material aderido foi encontrado (Figura 3.12).

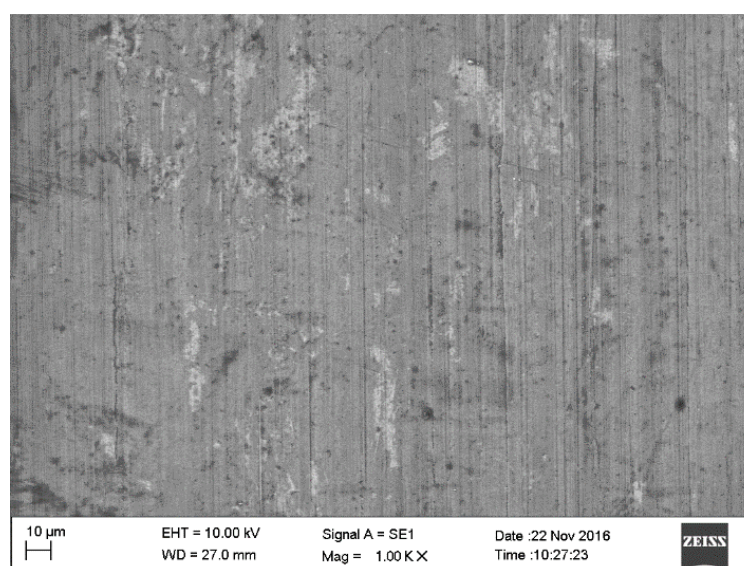


Figura 3.11 – Imagem de superfície de amostra de Inconel 718 antes dos ensaios de retificação da Tabela 3.4.

3.7.2 Microdureza

Para a medição da microdureza das peças após a retificação nas diferentes condições de corte e atmosferas de lubrificação (Tabela 3.6) foi utilizado um microdurômetro da marca SHIMADZU - série HMV-2 com penetrador Vickers, de diamante. Os dados dos ensaios são: carga de 490,03 mN ($H_v 0,05$), tempo de endentação de 15 s. As medições foram realizadas a 20 μm a partir da superfície retificada e, a partir desta, com intervalos de 20 μm , realizados de maneira escalonada para respeitar uma distância mínima de duas vezes o comprimento da endentação, até que a distância à superfície retificada atingisse o valor de 400 μm (Figura 3.13), foram realizadas três medições para cada distância à superfície retificada.

Antes da medição todas as amostras foram lixadas com lixas de granulometria mesh, do fabricante 3M, na sequência: 180, 240, 320, 400, 600 e 1200. A fim de ter parâmetro para comparação com os valores de microdureza obtidos após o processo de retificação, medições também foram realizadas medições cerca de 7,5 mm abaixo da superfície retificada (região em que se admite não haver influência das condições de corte empregadas nesta pesquisa), pois o material da peça não é homogêneo e a dureza pode variar entre amostras retiradas de partes diferentes de um mesmo tarugo. Além disso, a não homogeneidade do material pode causar grande dispersão das medições dentro de uma mesma amostra como consequência de carbonetos presentes na superfície ou sub-superfície da peça. Com isso, regiões na matriz do Inconel 718 com diferentes durezas são indentadas pelo penetrador.

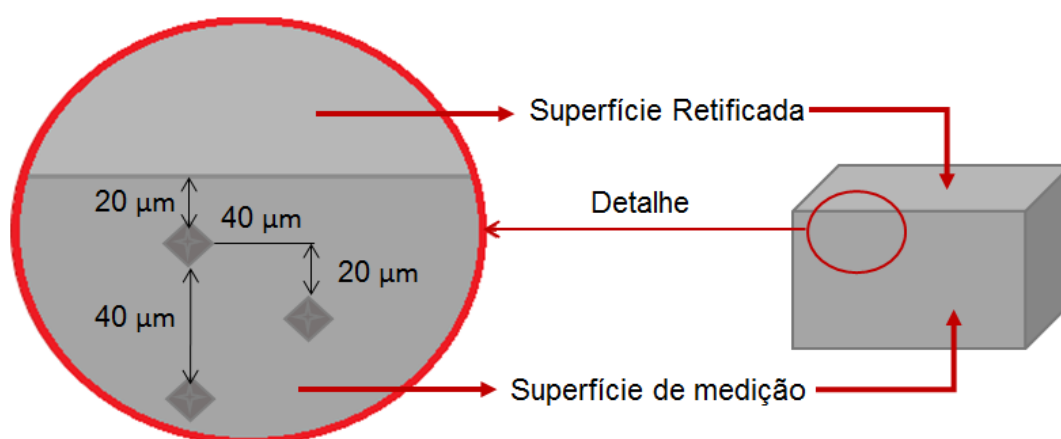


Figura 3.12 – Esquema de detalhamento para medição da microdureza.

3.7.3 Microestrutura

Para a observação e análise da microestrutura dos materiais usinados, as amostras foram novamente lixadas para remoção da camada de óxido, seguindo a mesma metodologia adotada para a medição da microdureza. Em seguida elas foram polidas com pasta de diamante de 1 μm e sílica coloidal de 0,2 μm e, por fim, foram atacadas quimicamente por

imersão por 15 segundos. Nesta etapa foi utilizado o composto Kalling no. 2, cuja composição é 100 mL etanol + 100 mL HCl + 5 g CuCl_2 . Após o ataque, todas as amostras foram observadas em um microscópio ótico BX51M, do Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM) da Faculdade de Engenharia Mecânica da UFU, tanto próximo às superfícies retificadas quanto em seu centro nas ampliações 50 e 500 vezes.

3.7.4 Tensão residual

As tensões residuais foram medidas pela técnica da difração por raios-X utilizando o método $\sin^2\Psi$, com o auxílio de um analisador Xstress3000, do fabricante Stresstech com radiação ($\lambda_{\text{CrK}\beta} = 2,0848 \text{ \AA}$) para difratar o plano (311) do níquel com ângulo de $2\theta = 157,8^\circ$. Este equipamento pertence ao Laboratório de Análises de Tensões - LAT, do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal Fluminense (UFF) e foi adquirido através da Rede de Materiais da Petrobras (TMEC).

Foram realizadas leituras sob cinco ângulos de inclinação (ψ) em cada ponto. O software apresenta, para cada ponto medido, um gráfico com 5 leituras que relacionam a distância interplanar (d) com ângulo de inclinação (ψ). A tensão residual no ponto é a média das cinco leituras e as margens de erro são calculadas em relação à linha de tendência. Quando as leituras mostram-se dispersas em relação à linha de tendência, é possível descartar até 3 leituras, restando nesse caso apenas 2 leituras (dupla exposição), condição mínima para traçar a reta.

As medições foram realizadas sobre a superfície da peça após a retificação, no centro de cada amostra, na direção longitudinal (L) e transversal (T) à direção de retificação (Figura 3.14). Os parâmetros utilizados para as medições das tensões residuais estão apresentados na Tab. 3.5.

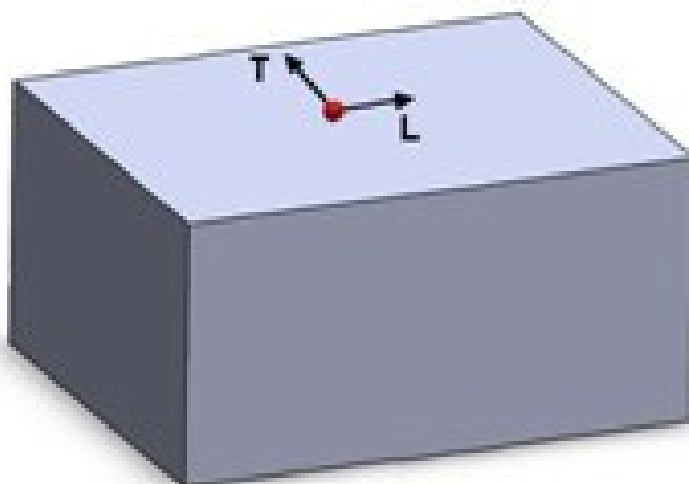


Figura 3.13 – Ilustração das direções de medição de tensões residuais nas amostras.

Tabela 3.5 – Parâmetros de medição das tensões residuais.

Parâmetro	Valor Padrão
Diâmetro do colimador (mm)	2
Ângulo de incidência 2θ (grau)	157,8
Plano de difração {hkl}	(311)
Radiação	CrKβ
Comprimento de onda $\lambda_{CrK\beta}$ (Å)	2,0848
Corrente do tubo de raios-X (mA)	6,7
Tensão do tubo de raios-X (kV)	30
Ângulo de inclinação Ψ (grau)	0°, 18°, 27°, 33°, 45°
Tempo de exposição (s)	20

O software do analisador de tensões determina o valor da tensão, bem como a incerteza subjacente em cada ponto e direção analisados.

3.8 Potência Elétrica

A potência elétrica da retificadora foi obtida em tempo real durante os ensaios de retificação. A potência foi adquirida através dos valores de tensão e corrente elétrica, que representam a potência consumida para o acionamento do motor que move o eixo árvore da retificadora. O motor possui as seguintes características: é de indução, trifásico e com potência nominal de 2,5 kW.

Foram utilizados dois sensores de efeito *hall* em cada fase para o monitoramento. Para a medição da corrente elétrica foi empregado um sensor HAS 50-600S que atua através do campo magnético e converte a informação do campo em tensão elétrica. Já para a medição da tensão elétrica utilizou-se o sensor LV-20p, que foi colocado em paralelo à diferença de potencial (ddp) que necessitava ser feita a medição. Após aquisição foi utilizado um conversor analógico digital (A/D), uma placa NI 6001, da NATIONAL INSTRUMENTS, com taxa de aquisição de 20 kS/s, dividido em 6 canais e 12 bits, e um circuito próprio do sistema foi utilizado para amplificar o sinal e reduzir ruídos.

Para o tratamento dos sinais foi utilizado o Software LABVIEW, posteriormente para análise de resultados e geração de gráficos foi utilizado o Software MATLAB. Na Fig. 3.15

está o fluxograma que resume as etapas da metodologia empregada para a medição da potência elétrica instantânea nesta pesquisa.

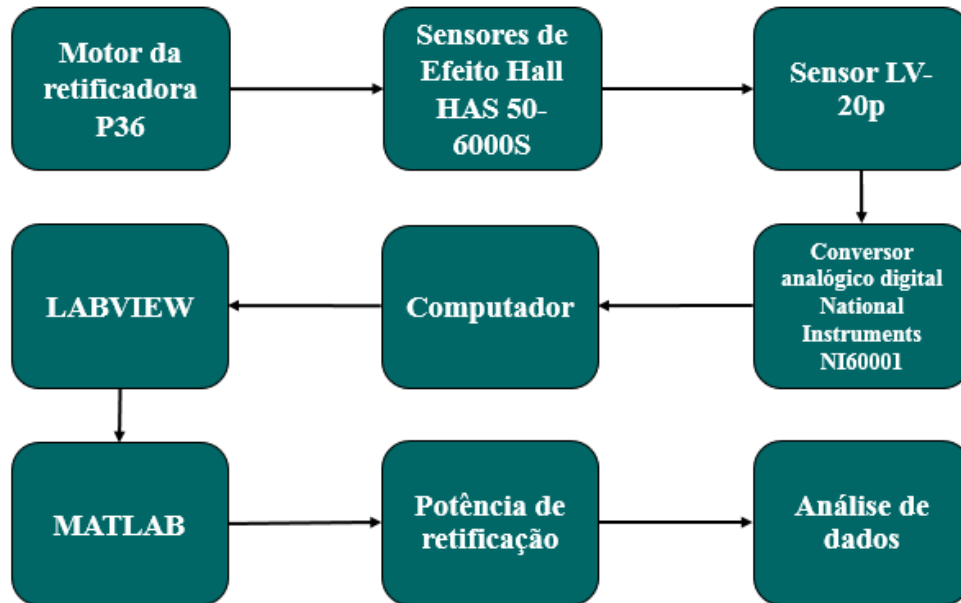


Figura 3.14 – Metodologia de medição da potência elétrica da retificadora.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo contém os resultados obtidos após a retificação plana tangencial do Inconel 718 com rebolo de SiC em diferentes condições de corte. Na sequência são apresentados e discutidos os resultados de rugosidade, imagens das superfícies retificadas, como também dos parâmetros que permitem acessar e avaliar a integridade da sub-superfície das peças após retificação (microdureza, microestrutura e tensões residuais). Por fim são apresentados e discutidos os resultados da potência instantânea do processo de retificação.

4.1 Rugosidade

Para avaliar a rugosidade das amostras de Inconel 718 retificadas com diferentes condições de corte, foram utilizados valores médios de rugosidade, conforme comentado no Capítulo 3, obtidos através da média entre 9 medições dos parâmetros de Rugosidade Ra (rugosidade média aritmética) e Rt (soma entre a maior altura de pico e profundidade de vale). Os valores de rugosidade Ra e Rt são apresentados na Tab. 4.1 e graficamente nas Figuras 4.1 e 4.2, respectivamente.

Tabela 4.1 – Valores médios de rugosidade Ra e Rt (μm) das amostras de Inconel 718 após retificação com diferentes condições de corte.

Parâmetro de rugosidade	a_e (μm)	Condição lubri-refrigerante				
		A Seco	Convencional	MQL MG 0,00%	MQL MG 0,05 %	MQL MG 0,10 %
Ra	20	0,42 $\pm$ 0,13	0,31 $\pm$ 0,03	0,43 $\pm$ 0,01	0,29 $\pm$ 0,02	0,31 $\pm$ 0,01
	40	0,35 $\pm$ 0,04	0,31 $\pm$ 0,02	0,34 $\pm$ 0,02	0,25 $\pm$ 0,02	0,38 $\pm$ 0,03
Rt	20	2,46 $\pm$ 0,48	2,25 $\pm$ 0,36	2,62 $\pm$ 0,09	1,72 $\pm$ 0,09	2,00 $\pm$ 0,08
	40	2,26 $\pm$ 0,32	2,25 $\pm$ 0,39	2,31 $\pm$ 0,30	1,52 $\pm$ 0,11	2,69 $\pm$ 0,36

Das Figuras 4.1 e 4.2 observa-se que os parâmetros de rugosidade Ra e Rt não aumentaram com a penetração de trabalho, principalmente quando foram realizados ensaios de retificação nas condições: a Seco, Convencional, MQL MG 0,00% e MQL MG 0,05%. Estes resultados contrariam a tendência que é geralmente relatada na literatura, em que a rugosidade aumenta com a penetração de trabalho (Machado et al., 2011). A única condição que seguiu a tendência esperada foi aquela em que o fluido de corte foi aplicado pela técnica MQL com a maior concentração de grafeno MQL MG 0,10%. Além disso, praticamente não houve alteração nos valores de rugosidade para ambos os parâmetros Ra e Rt após a usinagem com a técnica Convencional.

Segundo Marinescu et al. (2004), quando no caso do processo de retificação a tendência natural de aumento da rugosidade com a penetração de trabalho é contrariada, são vários os fatores de influência. Dentre eles o espaçamento irregular dos grãos, diferentes profundidades dos grãos, efeito da dressagem do rebolo na densidade dos grãos, efeito do desgaste do rebolo na densidade do grão, efeito da carga do rebolo, efeito do sulcamento, deflexão do conjunto grãos-ligante, tempo de centelhamento (spark-out) do rebolo, adesão entre a peça e o rebolo. No caso do Inconel 718, deve ser considerada ainda a sua grande afinidade química com as cerâmicas, mesmo material do rebolo, tornando imprevisível o comportamento de formação de cavaco.

A rugosidade obtida após a usinagem A Seco e MQL 0,00% foi relativamente alta e uma diminuição é percebida ao se comparar com a técnica Convencional, relacionada com as propriedades lubri-refrigerantes do fluido, que previne a ocorrência de danos térmicos na peça retificada, sejam eles metalúrgicos ou distorções geométricas (Malkin e Guo, 2008).

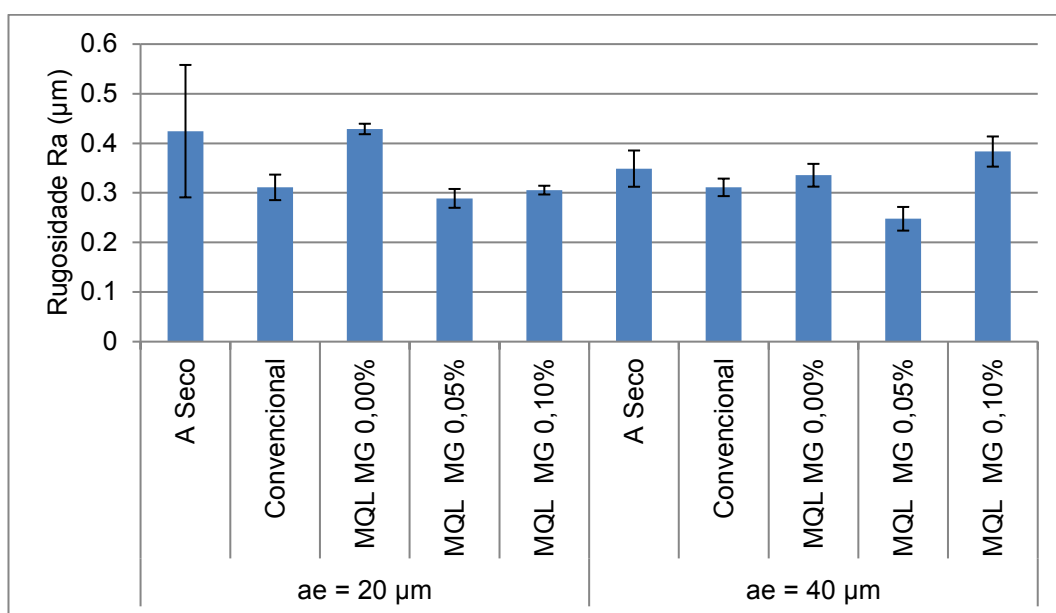


Figura 4.1 – Rugosidade Ra do Inconel 718 após retificação com diferentes condições de corte.

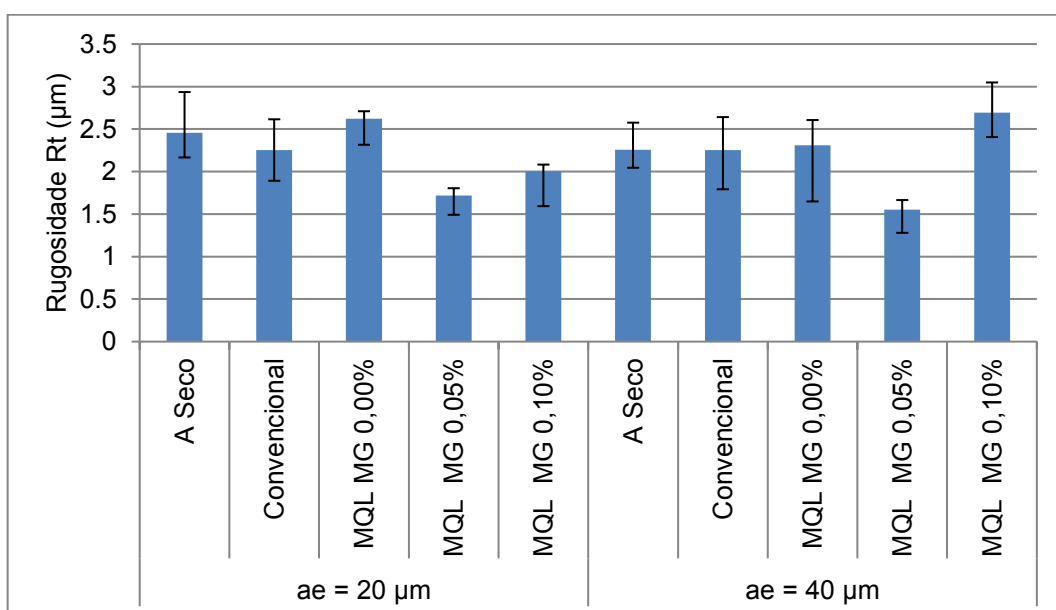


Figura 4.2 – Rugosidade Rt do Inconel 718 após retificação com diferentes condições de corte.

Ao realizar comparação entre os valores de rugosidade (Ra e Rt) obtidos entre para as técnicas Convencional e MQL MG 0,00%, é possível observar que o fluido aplicado em abundância foi benéfico para o acabamento, independente da penetração de trabalho. Segundo Marinescu et al. (2007) é esperado, pois a presença da água na emulsão aumentou a condutividade térmica do fluido aplicado na técnica Convencional. Da Tabela 3.3 observa-

se que a condutividade térmica para o fluido emulsionável é cerca de duas vezes maior que aquela do fluido aplicado na técnica MQL MG 0,00%, ressaltando que para esta última condição, não foi adicionada água.

Castro (2015) também usinou o Inconel 718 com rebolo de alumina com duas diferentes técnicas de aplicação de fluido de corte (convencional e MQL) e analisou a influência destas técnicas no acabamento. O autor observou que houve um pequeno aumento nos valores de rugosidade após a usinagem com a técnica MQL, mas ainda assim dentro dos padrões esperados para o valor Ra. Com isso, o autor concluiu que a técnica MQL pode ser alternativa à técnica convencional em termos do parâmetro Ra de rugosidade. Este mesmo benefício da MQL (que é considerada uma técnica mais ecológica que a técnica convencional), foi também observado nesta pesquisa já que foram detectadas pequenas variações nos valores da rugosidade média.

Comparando os resultados de rugosidade obtidos pelas técnicas MQL sem e com adição de multicamadas de grafeno na menor concentração, MQL MG 0,00% e MQL MG 0,05%, observa-se que há uma redução na rugosidade, essa redução pode ser atribuída às boas características lubrificantes que as partículas de multicamadas de grafeno proporcionam ao fluido (ZHAO et al. 2016). Esta adição faz com que a viscosidade aumente de 145,27 para 157,18 mPa.s (Tabela 3.4), o que foi benéfico para o processo de retificação do Inconel 718 nas condições investigadas.

Segundo Machado et al. (2011), viscosidades elevadas auxiliam na capacidade de lubrificação do fluido, pois o fluido tem maior possibilidade de se manter na interface de corte. Machado et al. (2011) ressaltam ainda que: “a viscosidade deve ser suficientemente baixa para permitir uma fácil circulação do fluido e suficientemente alta de modo a permitir uma boa aderência do fluido às superfícies da ferramenta”, assim, existe a possibilidade de que o aumento da viscosidade do fluido o tenha tornado melhor para o processo estudado.

A condutividade térmica também sofreu influência das partículas de grafeno conforme pode ser observado na Tabela 3.5, sem grafeno (MQL MG 0,00%) o valor foi 2,64 W/mK *e-001, enquanto que com a presença de grafeno na condição MQL MG 0,05% o valor foi 2,85 W/mK *e-001, representando um aumento de 8%, que pode ser considerado significativo em operação de retificação com rebolo abrasivo convencional. Conforme já comentado previamente, um dos maiores desafios em retificação com rebolos de abrasivos convencionais é encontrar uma técnica de aplicação com baixo consumo de fluido de corte que reduza e/ou elimine a ocorrência de danos de origem térmica nas peças que são retificadas. Portanto, a presença do grafeno.

Já os resultados obtidos após a usinagem com a técnica MQL MG 0,10% são coerentes com o que é relatado na literatura específica, a rugosidade aumenta com a penetração de

trabalho. Embora os valores de rugosidade nesta condição sejam ligeiramente superiores aqueles obtidos pelas MQL MG 0,05%, ainda assim, proporcionou valores de rugosidade dentro dos padrões esperados.

Zhang et al. (2016) realizaram um estudo sobre a retificação do Inconel 718 com rebolo de alumina *mesh* 80, penetração de trabalho igual a 10 μm e com diferentes lubrificantes sólidos dispersos em fluido de corte (nano partículas a base de carbono (CNT ou nanotubos de carbono), MoS_2 e uma mistura destes dois que foram dispersos em fluido de corte e aplicados na zona de corte via técnica MQL. Os autores verificaram variações na rugosidade (R_a) com a concentração das partículas, para os três tipos de fluido. As maiores concentrações resultaram em piores valores de rugosidade, fato que eles atribuíram a uma possível aglomeração de partículas, que é tanto maior quanto maior a concentração. Eles informaram ainda que, apesar de suas boas propriedades (lubrificantes e refrigerantes), quando as partículas sólidas se aglomeram, elas impedem que o fluido atinja a região de corte. Este efeito pode ter ocorrido também neste estudo, já que a menor concentração de multicamadas de grafeno foi a que resultou menores valores de rugosidade.

Com estas informações, é possível concluir que a atmosfera lubri-refrigerante MQL MG 0,05% apresentou bom desempenho em termos de acabamento. Há evidências que a concentração de multicamadas de grafeno igual a 0,05% seja ideal por não ter permitido aglomeração das partículas, com isso facilitando a chegada do fluido na zona de corte e reunindo boas propriedades tribológicas responsáveis pela manutenção de baixos valores de rugosidade.

Observa-se ainda da Fig. 4.1 que todos os valores de rugosidade R_a situaram-se abaixo do valor limite estabelecido de 0,63 μm para processos de retificação de semi-acabamento (Kalpakjian e Schmid, 2009).

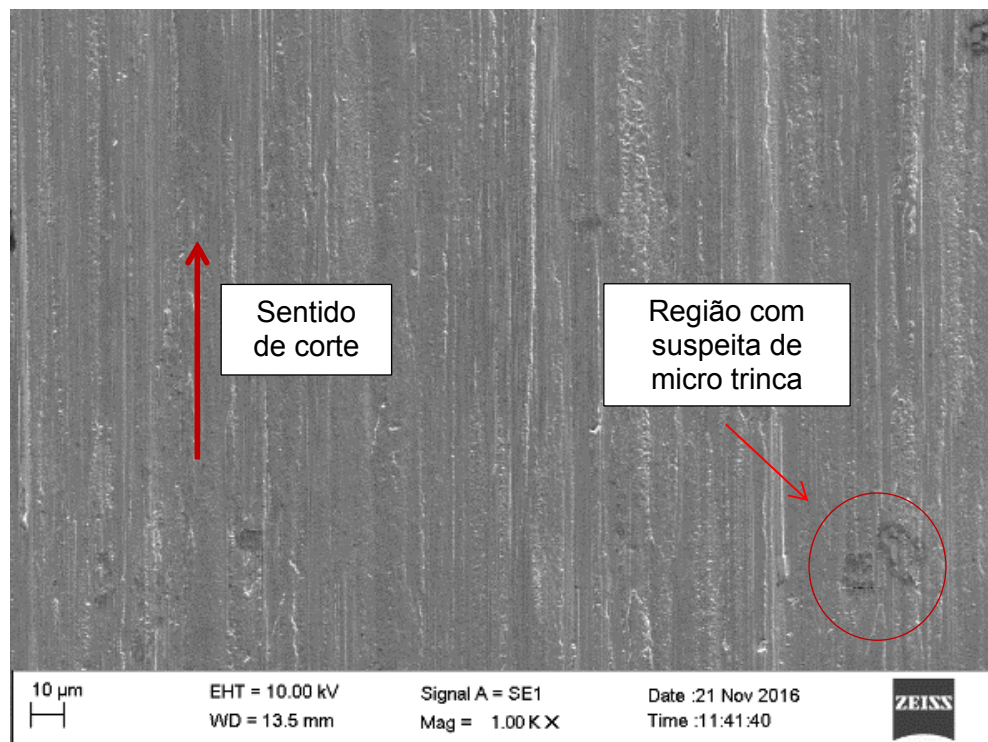
4.2 Imagens das superfícies retificadas

Nesta sessão são apresentadas as imagens das superfícies das amostras de Inconel 718 após a retificação com rebolo de SiC em diferentes condições de corte. Nas Figs. 4.3 a) e b), e 4.4 de a) a j) são apresentadas as imagens destas superfícies para uma ampliação, no momento da obtenção, de 1000 X (Fig 4.3 a)) e 10000 X (Figs. 4.3 b) e 4.4), com a escala presente nas imagens equivalendo a 10 μm e 2 μm , respectivamente.

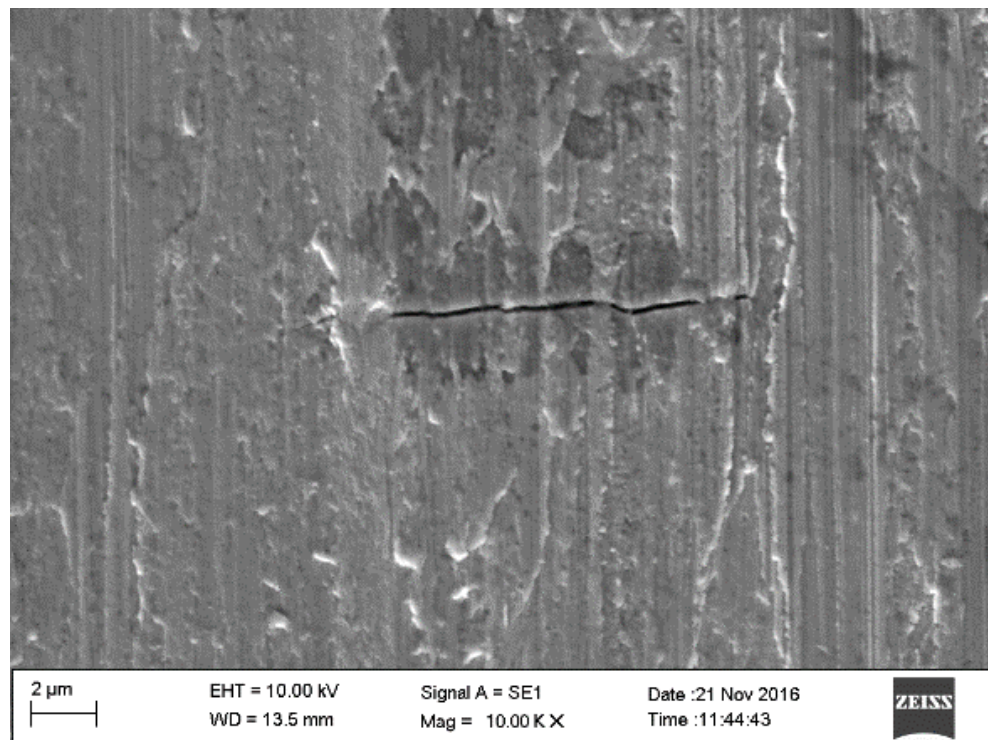
Na Figura 4.4 é possível observar que a superfície apresenta as marcas de riscamento e sulcamento paralelas, causadas pela passagem dos grãos abrasivos, característica inerentes ao processo de retificação. As superfícies de todas as amostras (incluindo aquelas

dos ensaios iniciais e suas réplicas) foram observadas nessa ampliação e que na maior parte de suas superfícies havia evidência de material deformado plasticamente que foi arrancado e empurrado para o lado do grão abrasivo durante a sua passagem pela peça (Fig. 4.4). Malkin e Guo (2008) deram o nome de *plowing* para descrever este fenômeno, um mecanismo de deformação plástica sem remoção de material, em que o material escoia pelas laterais dos grãos sem ser removido.

Uma característica importante também está presente na Fig. 4.3, mesmo com a escala dessa imagem, que foi obtida com uma ampliação de mil vezes, durante a análise suspeitou-se da presença de micro trincas. Ressalta-se que trincas na superfície reduzem a resistência à fadiga da peça. Ela é um parâmetro crítico para componentes aeronáuticos (DOREMUS et al. 2015), podendo levar à uma fratura parcial ou completa do componente quando em operação. Para elucidar esta dúvida, realizou-se uma ampliação na região da Figura 4.3 (a) que é apresentada na Figura 4.3 (b) (10000X), onde é possível observar que suspeita foi confirmada, há presença de aproximadamente 12 μm de extensão e na direção perpendicular à direção de corte.



a) Ampliação de 1000 x



b) Região selecionada de a) com ampliação de 10000 X.

Figura 4.3 – Superfície de amostra de Inconel 718 após retificação com atmosfera lubri-refrigerante Convencional e $a_e = 40 \mu\text{m}$: a) ampliação de 1000 x, b) região selecionada de a) com ampliação de 10000 X.

Zeng et al. (2015) durante o estudo em retificação da liga de níquel GH4169 com rebolo de alumina e diferentes valores de penetração de trabalho, 5 μm e 40 μm também observaram trincas perpendiculares ao sentido de retificação nas amostras que foram usinadas com maior valor de penetração de trabalho, além de material re-aderido na superfície retificada. Os autores atribuíram a formação de trincas às tensões residuais trativas na superfície como consequência da elevada temperatura de retificação. Nas Figs. 4.4 de a) a j) são apresentadas Imagens via MEV das superfícies de Inconel 718 após o processo de retificação plana em diferentes condições de corte (Ampliação de 10.000x).

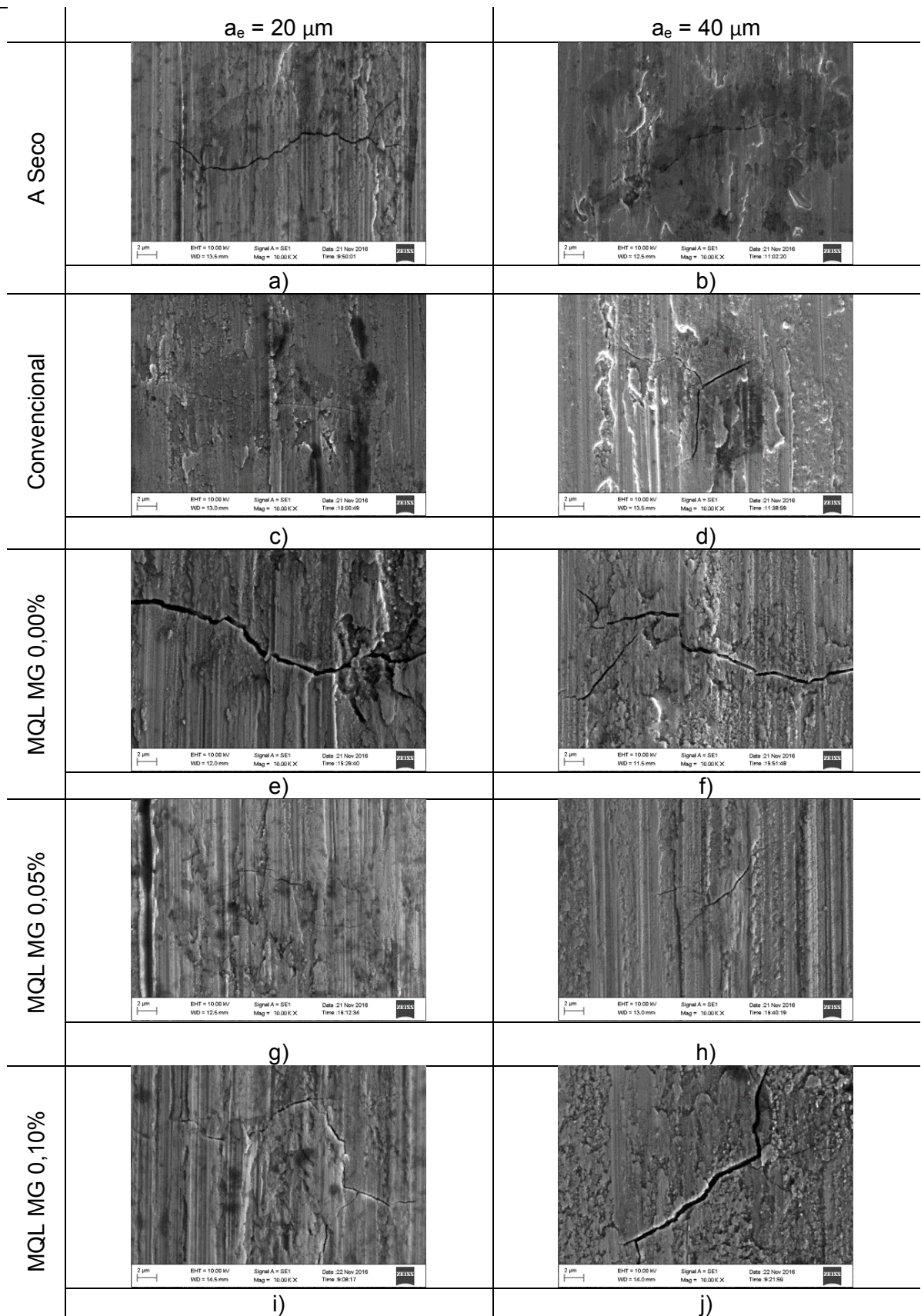


Figura 4.4 – Imagens via MEV da superfícies de Inconel 718 após o processo de retificação plana em diferentes condições de corte (Ampliação de 10.000x).

É importante ressaltar para a ampliação da Fig. 4.4, que embora as superfícies retificadas não tenham sido observadas em sua totalidade, as imagens obtidas são representativas de toda a sua superfície. Ainda da Figura 4.4 observa-se que ao empregar a técnica convencional houve foram geradas menor número de trincas (Figs. 4.4 c) e d)), principalmente na condição mais branda ($a_e = 20 \mu\text{m}$) de usinagem, em relação as outras condições de lubri-refrigeração testadas. Com exceção da condição de usinagem com a técnica MQL MG 0,05%, todas as outras condições testadas resultaram em superfícies com trincas que não seguiram uma orientação perpendicular ao sentido de corte. Estes resultados evidenciam que a presença de grafeno em menor concentração (MQL MG 0,05%) favoreceu as condições tribológicas possibilitando a prevenção de trincas no Inconel 718 (Figs. 4.4 g) e h)), portanto proporcionando um melhor acabamento (para ambos parâmetros de rugosidade R_a e R_t – Figuras 4.1 e 4.2. Já o maior número de trincas foi observado nas superfícies usinadas com técnica MQL MG 0,00% (Figs. 4.4 e) e f)).

Xu; Yu; Xu (2002), após realizarem a retificação da liga a base de níquel K417, com composição próxima à do Inconel 718, com rebolo de alumina em várias condições de corte, detectaram a presença de microtrincas na maior parte das superfícies usinadas e atribuíram este problema ao grande gradiente de temperatura entre a superfície da peça e do rebolo durante a usinagem.

Além da observação da superfície usinada, é importante ter acesso às regiões abaixo da superfície usinada para avaliar se houve alteração microestrutural e confirmar a presença de danos térmicos. Uma das formas de acesso às alterações é realizando a medição da microdureza, cujos resultados serão apresentados no tópico a seguir.

4.3 Microdureza

Nas Figuras 4.5 e 4.6 são apresentados os resultados os perfis de microdureza obtidos após a retificação com as diferentes condições de lubri-refrigeração para as penetrações de trabalho de $20 \mu\text{m}$ e $40 \mu\text{m}$, respectivamente (Tabela 3.4). Nestas figuras, eixo x indica a distância abaixo da superfície retificada, o eixo y indica a microdureza na escala Vickers, e a linha pontilhada a microdureza média da amostra, ou seja, sem influência do ensaio de retificação.

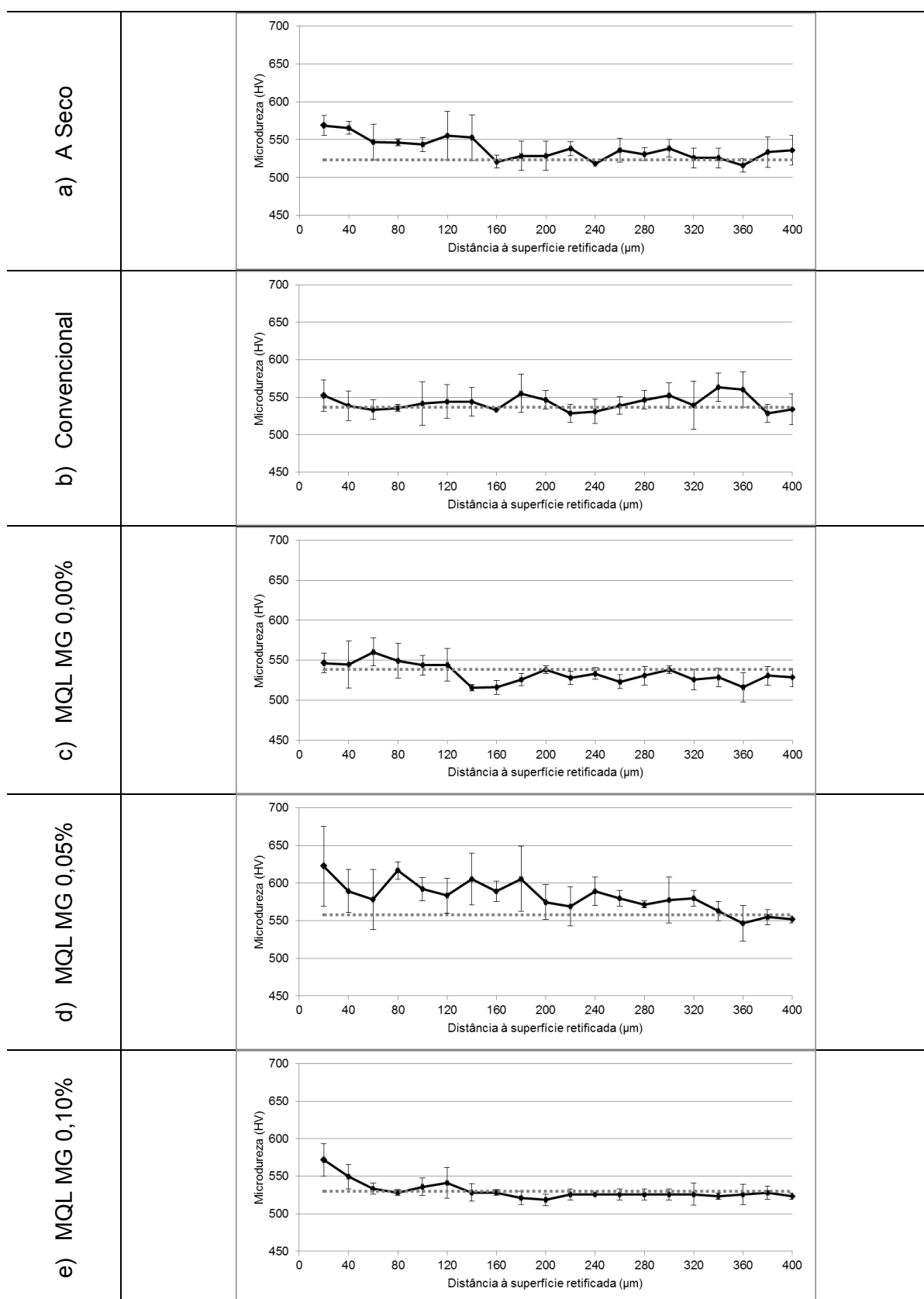


Figura 4.5 – Perfil de microdureza após a retificação de Inconel 718 com rebolo de SiC com diferentes condições de corte e $a_e = 20 \mu\text{m}$.

Da Fig. 4.5 é possível observar os resultados de microdureza após a retificação a seco (Fig. 4.6 (a) evidenciam que houve aumento de dureza da peça até cerca de 140 μm abaixo da superfície retificada e após este valor, a dureza retornou a valores que situaram em torno da média. Com exceção dos valores de microdureza medidos após a utilização da técnica MQL com as diferentes concentrações de grafeno (Figura 4.5 d) e e)), para todas as outras condições os valores permaneceram em torno da média, portanto não se pode inferir que houve influência significativa. Seria possível inferir que houve ligeira variação nos valores de microdureza até 120 μm abaixo da superfície retificada com a técnica MQL MG 0,05%, mas devido aos elevados valores de desvio padrão, nenhuma relação consistente poderá ser retirada sobre esta condição. A microdureza obtida após os ensaios com a técnica MQL MG 0,10% foi aquela com comportamento mais estável, comparada aquelas obtidas para as outras técnicas MQL e convencional.

Quanto aos valores elevados de desvio padrão para as microdurezas analisadas, isto ocorre devido às diferentes fases do material, tanto na superfície onde foi medida a microdureza quanto em sua sub-superfície, causando esta variação. Na Fig. 4.6 são apresentados os resultados de microdureza após a retificação com $a_e = 40 \mu\text{m}$.

Diferentemente dos resultados obtidos para as superfícies usinadas na condição mais branda (Fig. 4.5), a usinagem nas condições com maior, $a_e 40 \mu\text{m}$, em geral proporcionou queda de microdureza após a usinagem na condição a seco e com emprego da técnica MQL sem grafeno (MQL MG 0,00%), Figs. 4.6 a) e c), respectivamente. A maior queda nos valores foi observada após a usinagem com a técnica MQL MG 0,00% (Fig. 4.6 c)), ou seja, sem a presença de grafeno, que permaneceu até cerca de 180 μm abaixo da superfície retificada, enquanto que para a condição a seco os valores permaneceram abaixo da média até 60 μm (Fig. 4.6 a)).

O melhor desempenho em termos de menor variação na microdureza em relação a referência foi observado após a usinagem com a técnica convencional (Fig. 4.6 b)) seguida pela técnica MQL com a menor concentração de grafeno (MQL MG 0,05%), Fig. 4.6 d). Pode-se inferir, portanto que a condição cujo fluido de corte apresentou o maior poder refrigerante, técnica convencional, garantiu a manutenção da integridade da superficial da peça retificada mesmo após a usinagem em condições mais severas.

Já para a técnica MQL MG 0,05%, a explicação está no fato de as partículas de grafeno em combinação com o óleo e jato de ar reduziram o atrito na interface rebolo-peça, com isso reduzindo as forças de corte e fazendo com que menor quantidade de calor seja gerado durante o processo de usinagem e transferido para o Inconel 718. Com isso, as camadas abaixo da superfície da peça estarão menos propensas às variações microestruturais, como é o caso da microdureza. Por outro lado, a usinagem com a técnica

MQL MG 0,10% proporcionou ligeiro aumento da microdureza em relação as outras condições testadas, contrariando portanto a expectativa da mesma relação que foi observada para o fluido com menor concentração de grafeno.

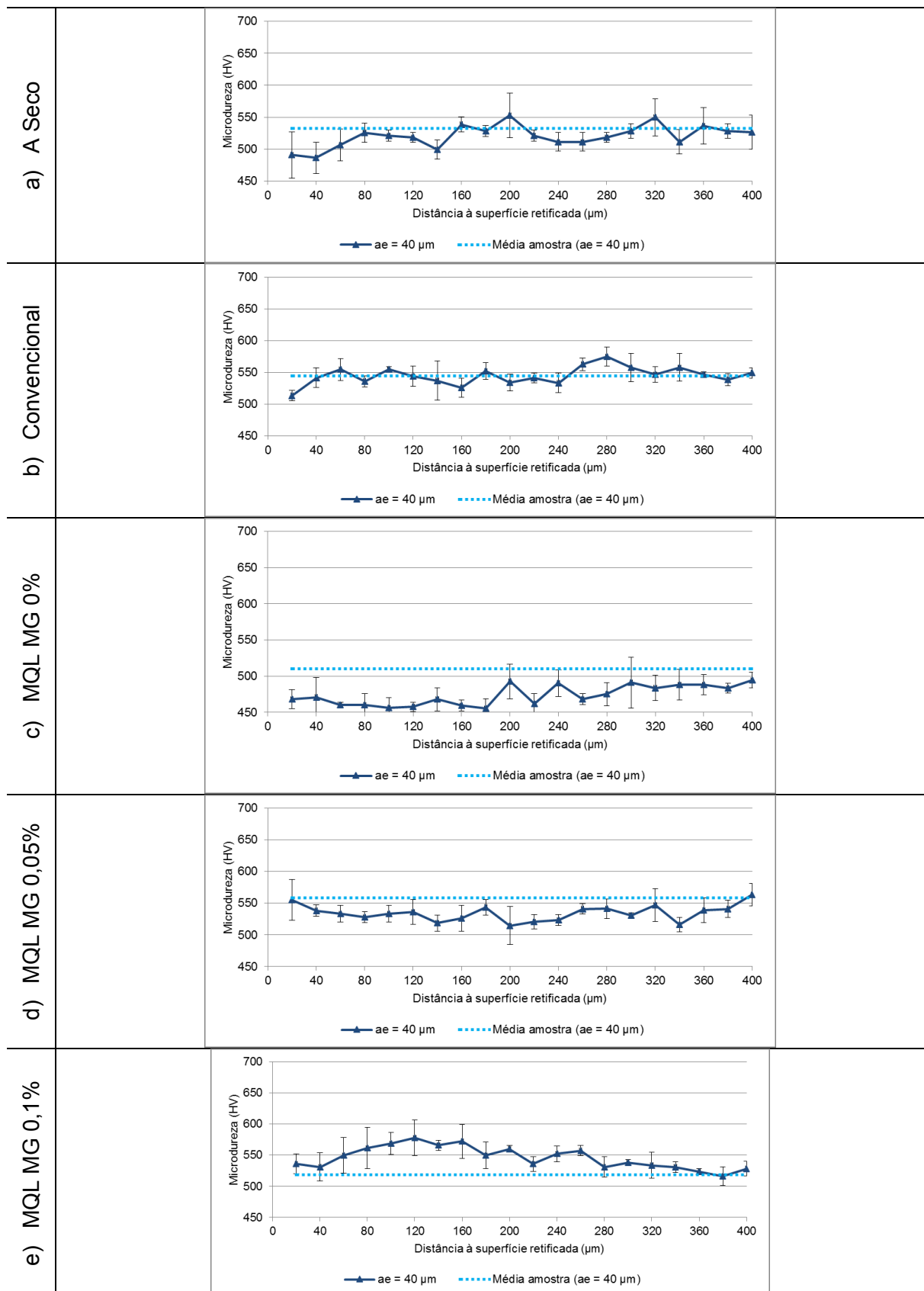


Figura 4.6 – Perfil de microdureza após a retificação de Inconel 718 com rebolo de SiC com diferentes condições de corte e $a_e = 40 \mu\text{m}$.

4.4 Imagens da microestrutura das peças retificadas

Antes de proceder com a análise da microestrutura das amostras de Inconel após o processo de retificação nas condições empregadas neste trabalho, torna-se necessário apresentar algumas considerações sobre a estrutura do Inconel 718. Segundo ASM (1972), a característica principal na estrutura do Inconel 718 que é tratado termicamente é a presença da estrutura 'Laves' em sua matriz gama. Esta estrutura é tipo corrente e é formada por precipitados, ela pode ser observada nas Figs. 4.7 e 4.8, obtidas antes da retificação. Além disso, também é possível observar a presença de maclas em sua microestrutura (Figuras 4.7 e 4.9).

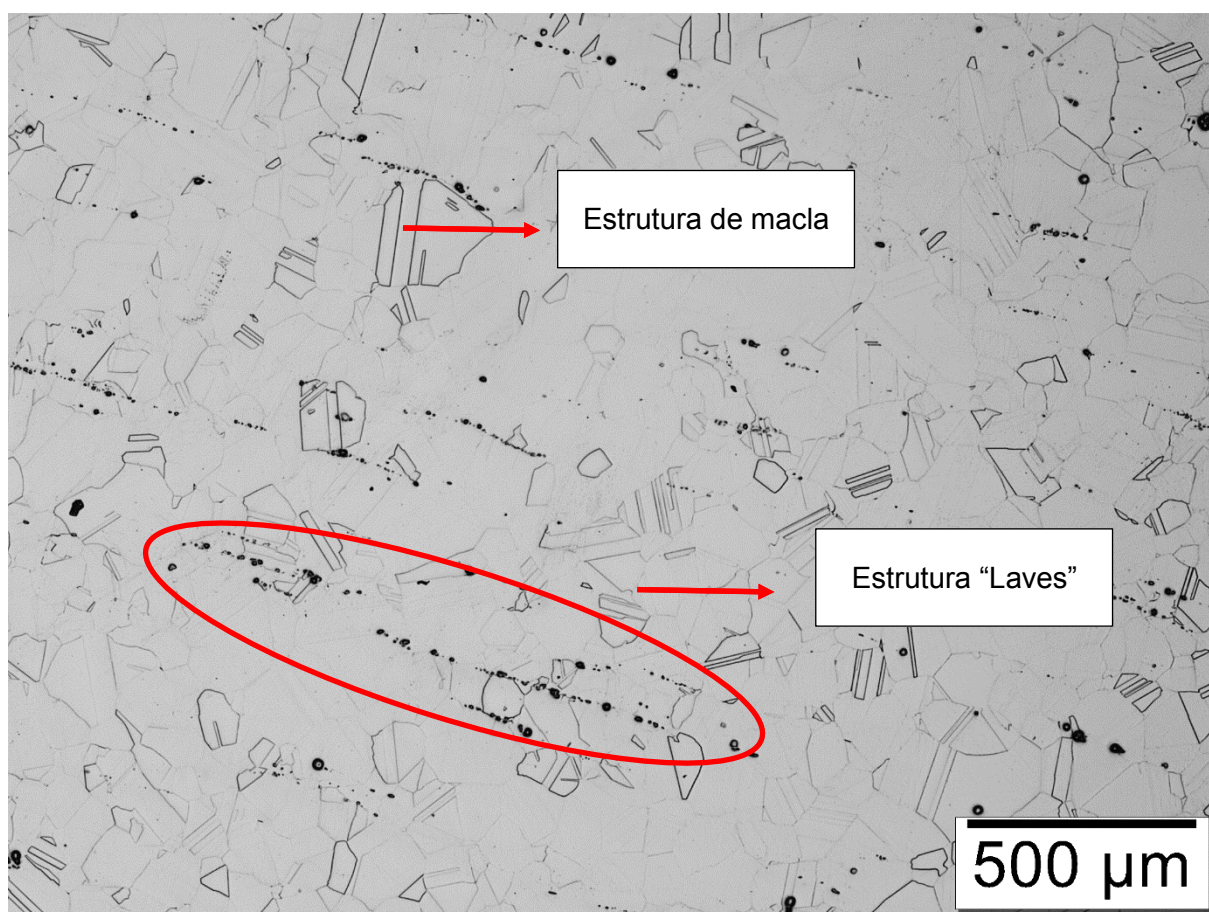


Figura 4.7 – Microestrutura do Inconel 718 apresentando maclas e estrutura de Laves, escala de 500 μm

O contorno de macla é um tipo especial de contorno de grão através do qual existe uma simetria específica em espelho da rede cristalina; isto é, os átomos em um dos lados do

contorno estão distribuídos de forma paralela, a região de material entre estes contornos é chamada apropriadamente de macla. As maclas são formadas por deslocamentos atômicos e podem ser produzidos por forças mecânicas de cisalhamento aplicadas (maclas de deformação) ou por tratamentos térmicos de recozimento realizado após deformações (maclas de recozimento). Elas correspondem àquelas regiões que possuem laterais relativamente retas e paralelas, bem como um contraste visual diferente daquele apresentado pelas regiões não macladas no interior dos quais eles se encontram (CALLISTER, 2002).

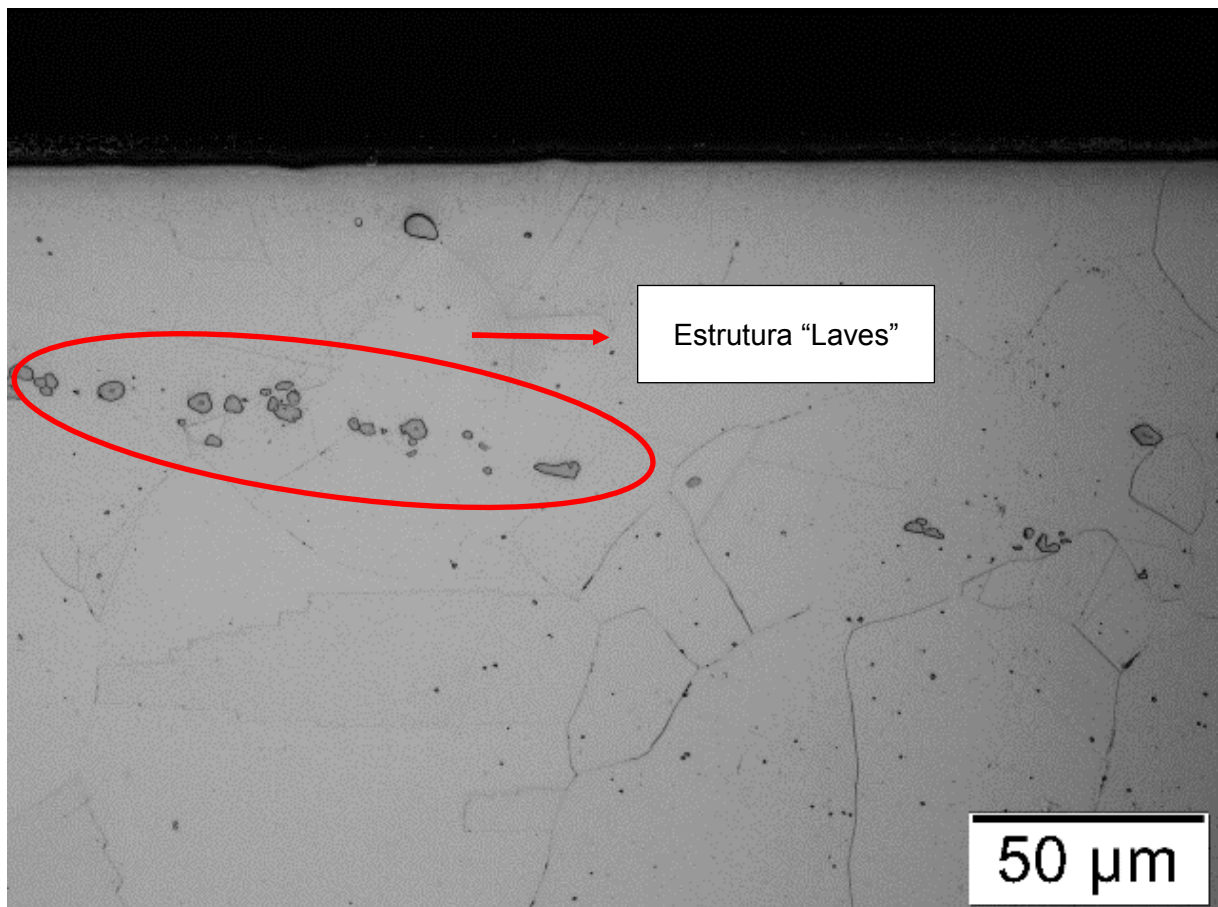


Figura 4.8 – Microestrutura do Inconel 718 com detalhe para estrutura de Laves, escala de 50 μm

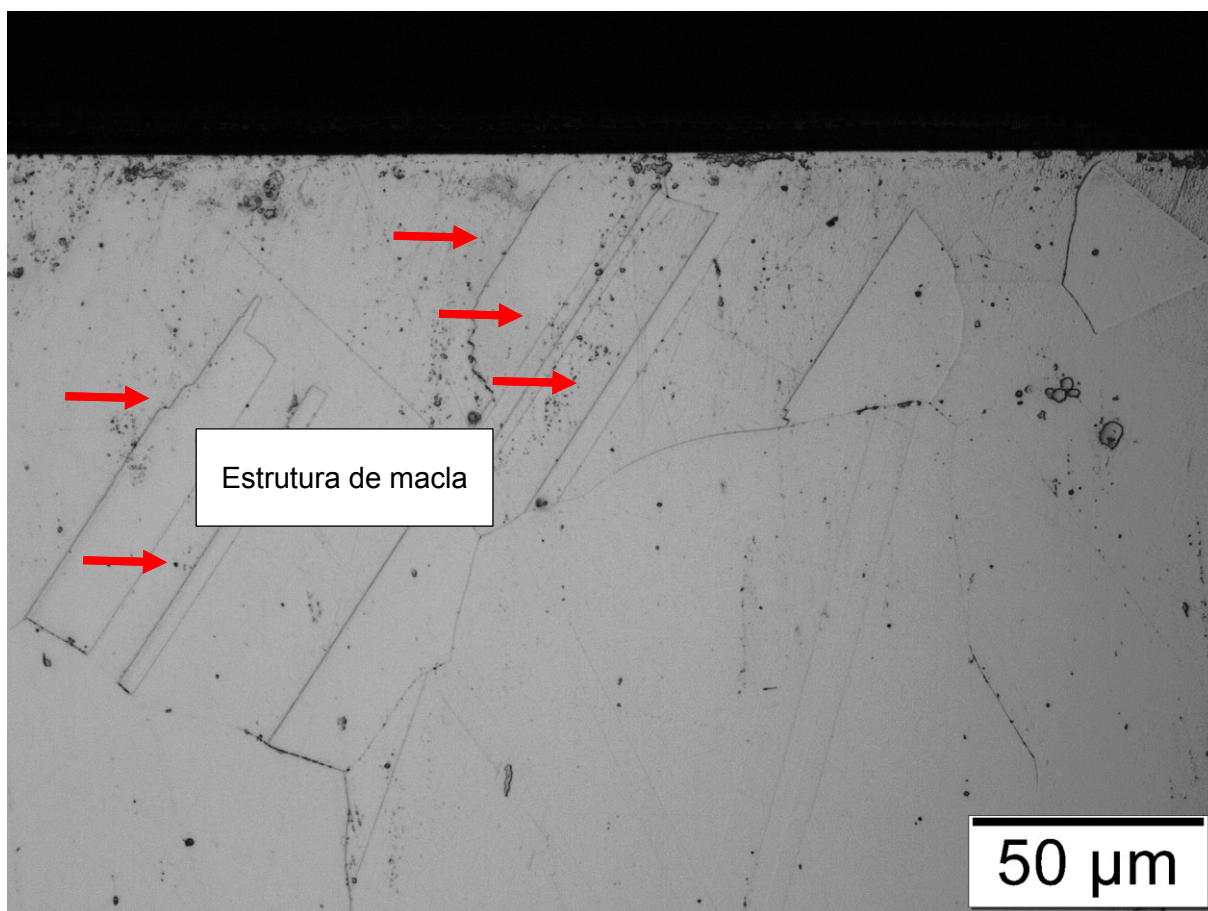


Figura 4.9 -- Microestrutura do Inconel 718 com detalhe para as maclas, escala de 50 μm

Todas as amostras e suas réplicas foram observadas em toda a extensão da superfície atacada e serão apresentadas as microestruturas das condições que apresentaram maiores variações na microdureza: $a_e = 20\ \mu\text{m}$, condição A Seco (9% de aumento) e MQL MG 0,10% (8% de aumento) e $a_e = 40\ \mu\text{m}$ Convencional (6% de queda) na microdureza.

Na Fig. 4.10 é apresentada a microestrutura obtida após a usinagem com a atmosfera A Seco e $a_e = 20\ \mu\text{m}$, a mesma na qual foi detectado aumento na microdureza (Fig. 4.5 a)). Observa-se da Fig. 4.10 que, mesmo com a variação de microdureza, não é possível observar variação na microestrutura, para esta escala.

Nas Figs. 4.11 a), b) e c) são apresentadas as microestruturas das amostras com maior variação de microdureza, (Fig 4.11 a) $a_e = 20\ \mu\text{m}$, atmosfera lubri-refrigerante A Seco, b) $a_e = 20\ \mu\text{m}$, atmosfera lubri-refrigerante MQL MG 0,1% e c) $a_e = 40\ \mu\text{m}$, atmosfera lubri-refrigerante Convencional). Vale ressaltar que, neste caso, as sombras que podem ser observadas nas Figs 4.14 b) e c) são devido ao posicionamento da peça (superfície retificada perpendicular à observada) em relação à lente do microscópio e não à uma possível camada branca ou camada de óxido.

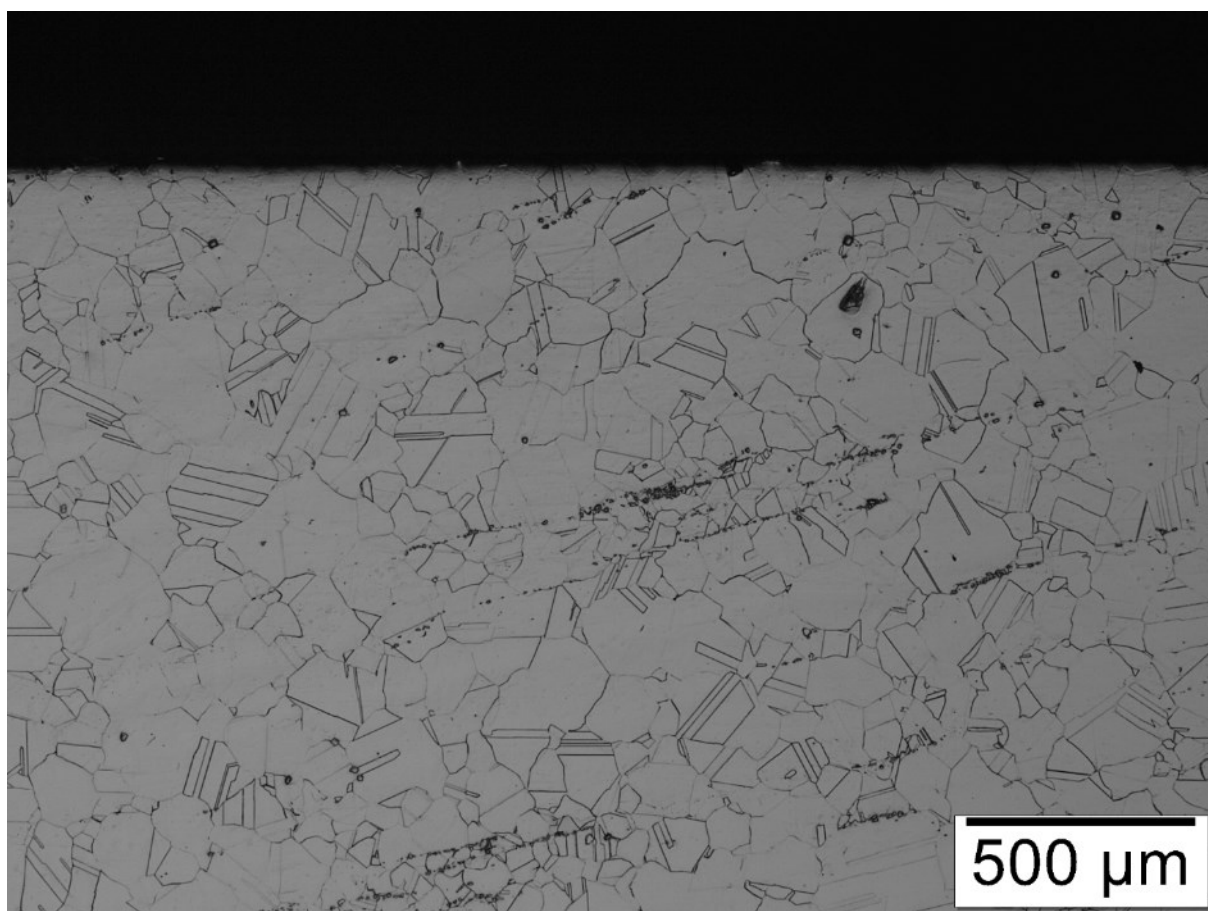
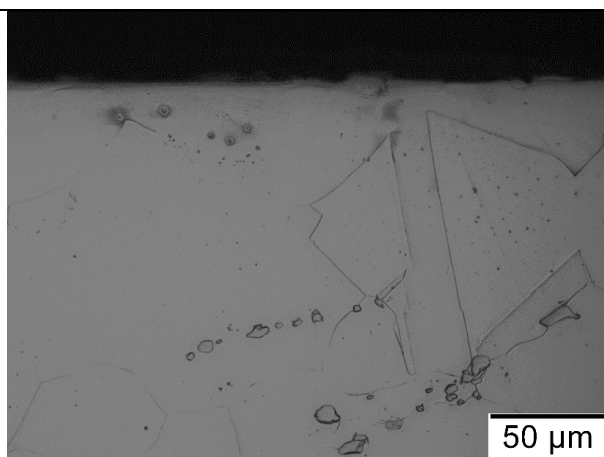
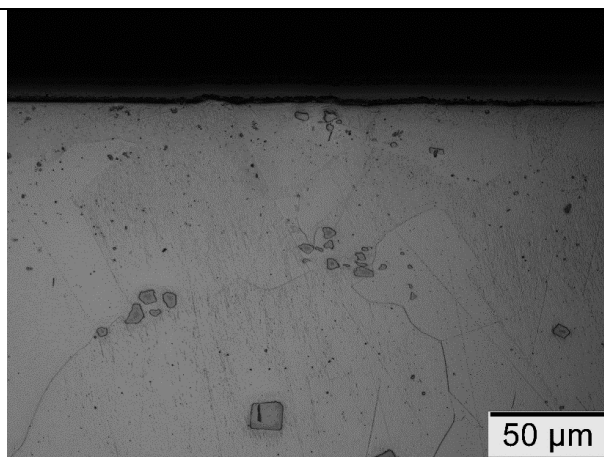


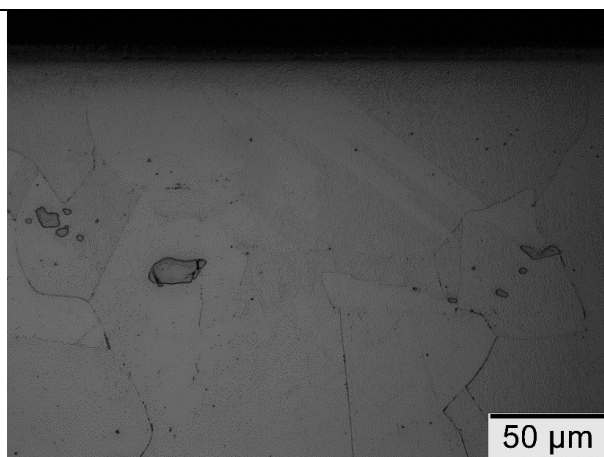
Figura 4.10 – Microestrutura da amostra de Inconel 718 retificada com $a_e = 20\ \mu\text{m}$ e atmosfera lubri-refrigerante A Seco.



a) $a_e = 20 \mu\text{m}$, atmosfera lubri-refrigerante A Seco



b) $a_e = 20 \mu\text{m}$, atmosfera lubri-refrigerante MQL MG 0,10%



c) $a_e = 40 \mu\text{m}$, atmosfera lubri-refrigerante Convencional

Figura 4.11 – Microestrutura das amostras após a retificação que apresentaram o maior desvio de microdureza (Figs. 4.6 e 4.7): a) $a_e = 20 \mu\text{m}$, atmosfera lubri-refrigerante A Seco, b) $a_e = 20 \mu\text{m}$, atmosfera lubri-refrigerante MQL MG 0,10% e c) $a_e = 40 \mu\text{m}$, atmosfera lubri-refrigerante Convencional.

As microestruturas mostradas na Fig. 4.13 a), b) e c) possuem bastante semelhança, todas apresentam contorno de grão (macla) e precipitados, não sendo possível afirmar, portanto, que houve alteração microestrutural que pudesse ser detectada com a ampliação utilizada. Em todas as amostras retificadas para as outras condições de corte, que não apresentaram variação significativa na microdureza, também não foi possível perceber mudança na microestrutura.

4.5 Tensão residual

Neste tópico serão apresentados os resultados de tensão residual para as amostras de Inconel 718 retificadas com diferentes valores de penetração de trabalho e atmosferas lubri-refrigerantes. Nas Figs. 4.12 e 4.13 são apresentados os valores de tensão residual longitudinal (medida no sentido do avanço da peça) e transversal (perpendicular ao sentido de avanço da peça), respectivamente. Os valores positivos representam as tensões residuais tratativas e os negativos as tensões residuais compressivas.

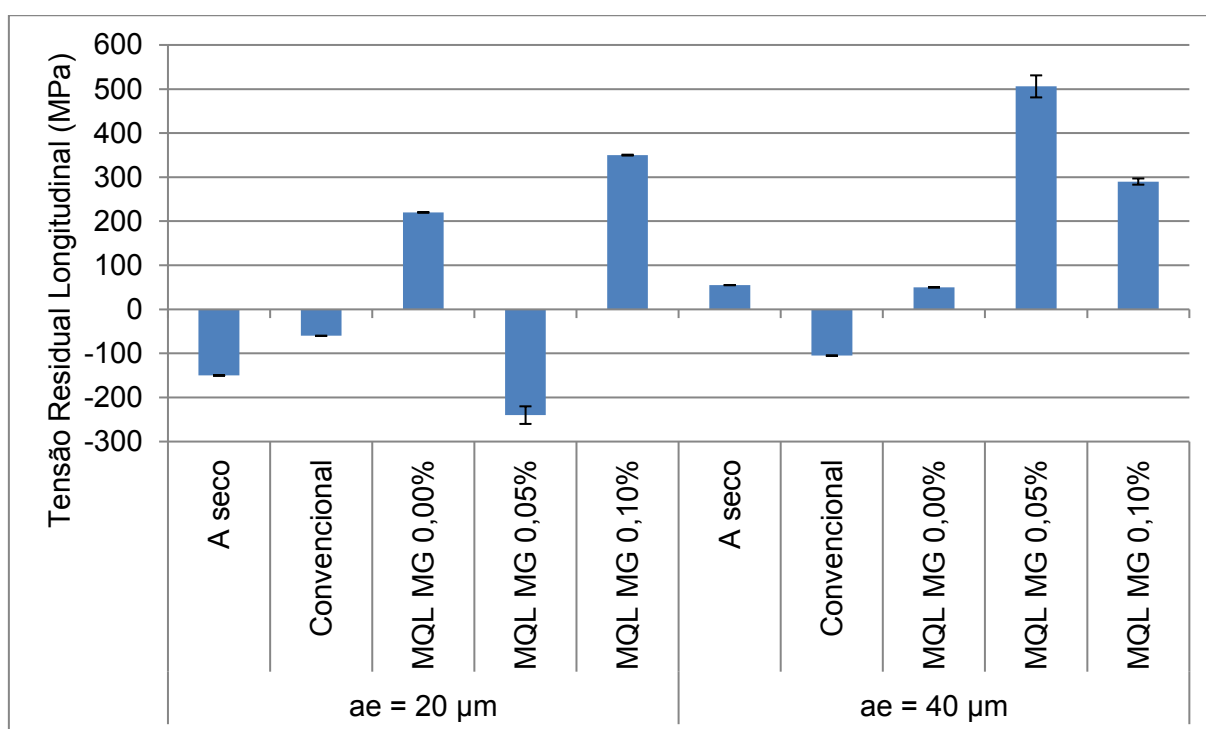


Figura 4.12 – Tensão residual longitudinal na superfície da amostra de Inconel 718 após retificação com rebolo de SiC em diferentes condições de corte.

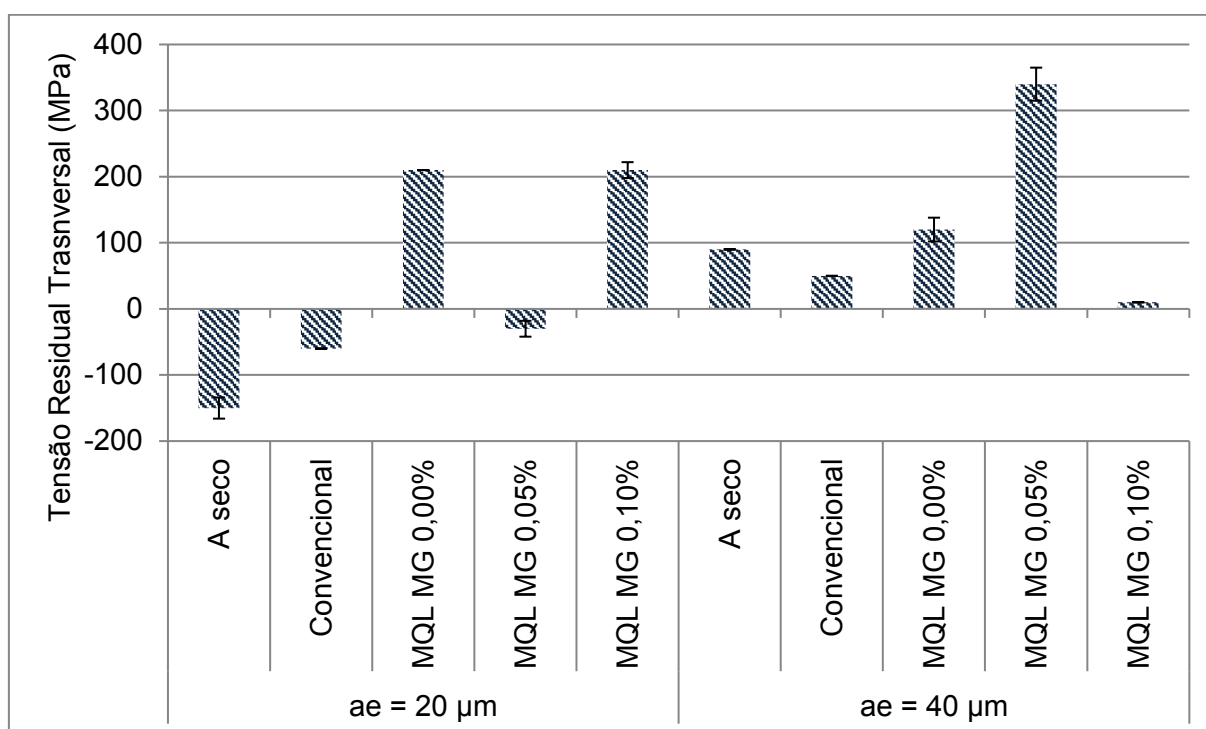


Figura 4.13 – Tensão residual transversal na superfície da amostra de Inconel 718 após retificação com rebolo de SiC em diferentes condições de corte.

Analisando inicialmente apenas os resultados obtidos pelo menor valor de penetração de trabalho $a_e = 20 \mu m$, é possível constatar uma forte influência da atmosfera-lubri-refrigerante nas tensões residuais das amostras de Inconel 718 retificadas, independente da direção.

A atmosfera A Seco apresentou tensões compressivas, para ambas as direções e $a_e = 20 \mu m$, para esta atmosfera eram esperadas tensões trativas que estão relacionadas a grandes gradientes térmicos desenvolvidos durante a retificação como esta metodologia não emprega lubri-refrigerantes os gradientes não são grande apesar da elevação da temperatura. Segundo Malkin e Guo (2008), as interações mecânicas entre os grãos e a peça causam tensões compressivas.

Em geral foram registradas tensões de compressão após a usinagem com a técnica Convencional, independente da direção medida, para $a_e = 20 \mu m$, conforme esperado pois esta é condição de aplicação de fluido que possui maior capacidade de refrigeração em relação às outras atmosferas testadas, já que o volume de fluido entregue é bem mais elevado, enquanto o Convencional utiliza 522.000 mL/h as atmosferas MQL utilizaram apenas 240 mL/h (Tabela 3.4). Além disso, a condutividade térmica da técnica convencional é duas vezes maior que dos outros fluidos empregados (Tabela 3.4), o que auxilia na prevenção de tensões trativas formadas por elevados gradientes térmicos (MALKIN; GUO, 2008).

A realizar comparações entre os valores de tensões observados após a retificação com as diferentes técnicas MQL, é possível observar que a técnica MQL MG 0,05% foi a única que apresentou tensões compressivas (Figs. 4.12 e 4.13) independente da direção medida e para penetração de trabalho $a_e = 20 \mu\text{m}$.

Já as tensões medidas para após a usinagem com a técnica MQL MG 0,10% foram tratativas, independente da penetração de trabalho empregada, e elas foram superiores aquelas obtidas após a usinagem com a técnica da MQL MG 0,00%. Neste caso as propriedades lubrificantes dos fluidos contendo grafeno podem justificar os resultados. As condições tribológicas foram favoráveis com o emprego do grafeno, o que proporcionou a redução do atrito entre rebolo e peça. Contudo não se pode descartar o fato de que se as partículas excederem uma certa concentração, poderá haver aglomeração delas durante a usinagem, portanto dificultando a chegada e espalhamento do fluido na região de corte.

Em relação à técnica MQL MG 0,00%, observa-se que ela proporcionou os menores valores de tensão trativa quando comparado com a MQL MG 0,10% pois, provavelmente, o fluido sem multicamadas de grafeno teve maior acesso à interface de corte o que pode ter permitido melhor lubrificação quando comparada com o fluido com maior concentração. Já as tensões obtidas com menor concentração de grafeno, MQL MG 0,05% foram de compressão para a menor penetração de trabalho e de tração para a maior penetração de trabalho. Considerando que a atmosfera lubri-refrigerante MQL MG 0,05% entre as três, pode-se supor que o efeito lubrificante foi o predominante, maior lubrificação equivale neste caso a menores forças de atrito.

Em geral, o emprego da condição mais severa de usinagem, $a_e = 40 \mu\text{m}$, todas as amostras apresentaram tensões residuais tratativas no sentido transversal (Figura 4.13). Apenas a amostra que foi usinada pela técnica convencional apresentou tensão residual compressiva e no sentido longitudinal, conforme já comentado pela ação refrigerante do fluido de corte que previne a transferência de calor em excesso para a peça. Sabe-se que a maior penetração de trabalho resulta em um maior contato entre os grãos abrasivos e a peça, o que gera maiores deformações e consequentemente maior atrito e mais calor é então gerado.

Malkin e Guo (2008) que afirmam que as deformações térmicas associadas às temperaturas de corte e seus gradientes são os responsáveis pela geração de tensões residuais tratativas e quanto mais severas forem as condições de corte de um processo de retificação, maiores serão as tensões de tração tanto em aços de alta resistência quanto em ligas aeronáuticas, o que leva a uma redução na vida de fadiga das peças e ao surgimento de trincas, que foram também observadas nesta pesquisa, item 4.2.

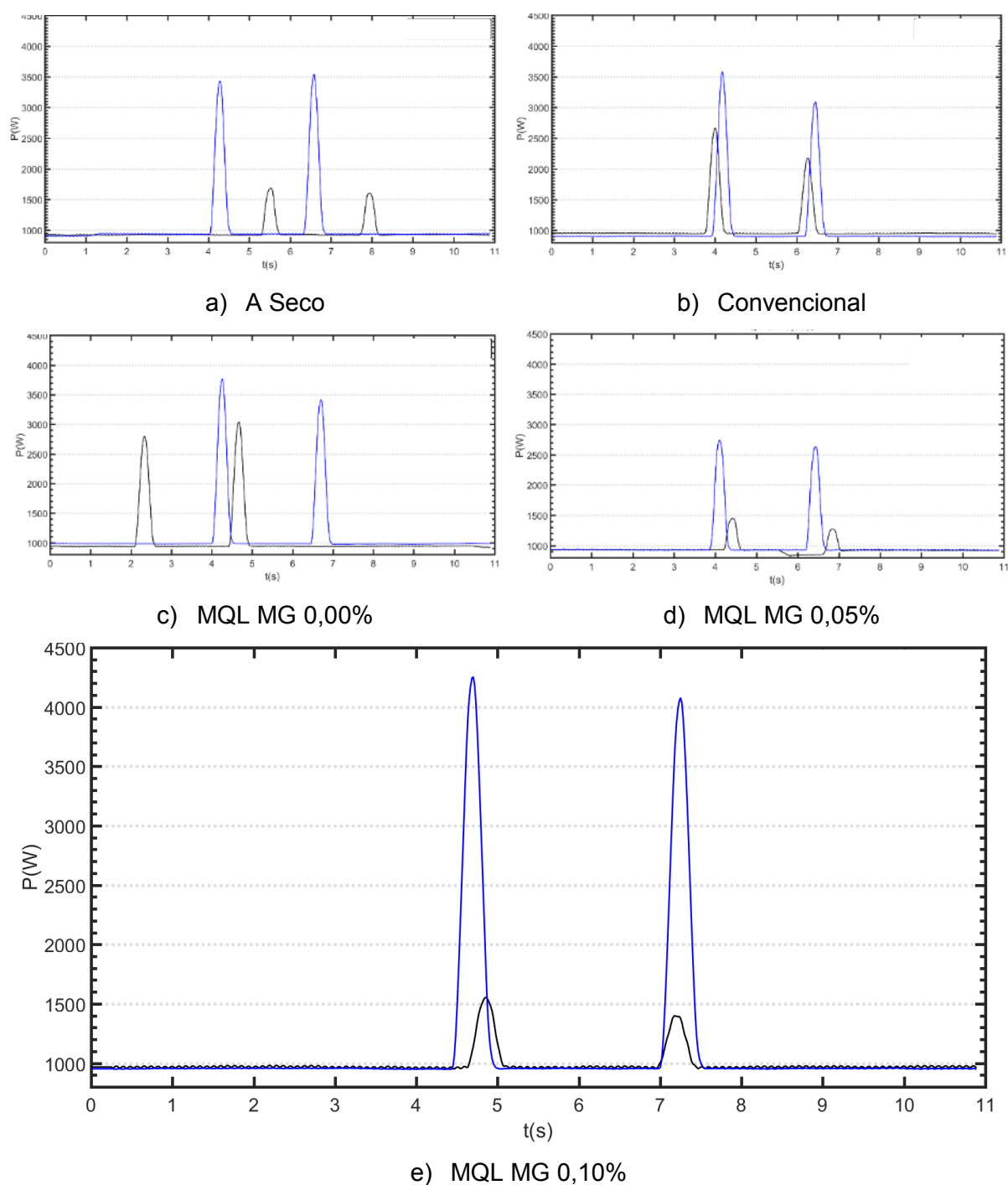
Além disso, as atmosferas MQL MG 0,00%, 0,05% e 0,10% apresentaram comportamentos diferentes com a alteração no valor da profundidade de corte, sugerindo,

portanto, que a quantidade ideal de partículas no fluido de corte para seu melhor desempenho varia com os parâmetros de corte. No estudo de Osterle; Li; Nolze (1999) é possível perceber que além da atmosfera lubri-refrigerante e a penetração de trabalho, o rebolo escolhido também pode interferir nos valores de tensão residual. Complementando, estes autores avaliaram as tensões residuais na superfície de amostras da liga de níquel In738 após a retificação com grandes penetrações de trabalho (*creep-feed*) ($a_e = 0,5$ e 1 mm), com rebolos de alumina e de CBN em diferentes condições de lubri-refrigeração.

Eles observaram que as tensões foram em torno de 1000 MPa (tensões positivas são referentes às trativas) na direção longitudinal e 100 MPa na direção transversal, para a condição a seco e maior $a_e = 0,5\text{ mm}$, enquanto que para a condição que foi empregado fluido de corte em abundancia o valor foi 1500 MPa para ambas as direções de medição, com $a_e = 1\text{ mm}$. Os autores observaram ainda que as tensões caíram para 400 MPa , tanto longitudinal quanto transversal, quando o rebolo de alumina foi dressado continuamente, $a_e = 1\text{ mm}$, e se aproximaram de zero quando empregou o rebolo de CBN, também para as duas direções.

4.6 Potência Instantânea de Retificação

Nas Figuras 4.14 a) a e) são apresentados os gráficos de potência instantânea do processo de retificação do Inconel 718 para as diferentes condições de corte e atmosferas de lubri-refrigeração em relação ao tempo de usinagem.



* Eixo x: tempo (s) e eixo Y: potência (W)

*linha cor preta refere-se $a_e = 20 \mu m$, linha cor azul para $a_e = 40 \mu m$.

Figura 4.14 – Potência durante a retificação de Inconel 718 para diferentes penetrações de trabalho para as diferentes atmosferas lubri-refrigerantes: a) a seco, b) Convencional, c) MQL MG 0,00%, d) MQL MG 0,05% e e) MQL MG 0,10%.

Em todas as figuras, o primeiro pico diz respeito ao primeiro passe do rebolo sobre a peça (movimento de ida) e o segundo pico refere-se ao retorno do rebolo que passa pela peça. Para todos os casos é possível observar que o segundo pico é menor que o primeiro, este resultado é esperado pois já ocorreu remoção de material no primeiro passe, então o esforço ao qual o conjunto máquina/rebolo é submetido é menor. Contudo, esse comportamento não foi observado nos gráficos após a usinagem com as condições a Seco com $a_e = 40 \mu\text{m}$ e MQL MG 0,00% com $a_e = 20 \mu\text{m}$, Fig. 4.1e a) e c), respectivamente

Outro fator importante que engloba todos os resultados na Fig. 4.16 são os elevados valores de potência registrados. Estes valores são superiores ao da potência nominal da retífica, 2,25 kW, no entanto motores elétricos usualmente conseguem operar acima da potência esperada, desde que em condições especiais ou por curtos períodos de tempo (FITZGERALD; INGSLEY; UMANS, 2006 e DEL TORO, 1994).

Estes autores explicam que este fenômeno é chamado de “escorregamento”, representado por um número adimensional maior que zero e menor ou igual a um, que é definido pela razão da diferença entre a velocidade síncrona e a velocidade do rotor (parte girante do motor) pela velocidade síncrona. Quando a peça está sendo usinada, a carga mecânica aumenta, gerando uma diminuição na rotação do motor o que aumenta o fator escorregamento, como a tensão aplicada ao motor é constante, a potência aumenta de maneira quase proporcional à corrente elétrica.

A potência necessária para realizar retificação com a técnica Convencional foi muito elevada, em relação à potência nominal da retificadora, Fig. 4.14 b), independente da penetração de trabalho empregada e foi a que apresentou os maiores valores de potência para o menor valor de a_e , ficando atrás apenas da atmosfera MQL MG 0,00 %. Isto pode ser um indicativo de que o fluido com maior poder refrigeração por um lado remove calor da peça, reduzindo os efeitos térmicos, mas por outro faz com que o material mantenha sua resistência durante a usinagem, o que demanda maior esforço de corte, consequentemente maior potência. Esta hipótese é respaldada pela condutividade térmica do fluido de corte utilizado neste ensaio é praticamente o dobro do valor da condutividade dos fluidos utilizados na técnica MQL (Tabs. 3.2 e 3.3).

Os resultados de potência para as peças que foram usinadas com a técnica convencional, Fig. 4.14 b), são aqueles que mais se aproximam do comportamento esperado para uma operação de retificação com retirada de material na ida e na volta para um mesmo valor a_e ajustado, ou seja, com a redução da potência no movimento de retorno do rebolo sobre a peça, cerca de 500 W de diferença foi observado.

Já em relação ao MQL MG 0,05%, é possível observar uma redução de quase 1000 W em relação à atmosfera lubri-refrigerante MQL MG 0,00%. A redução pode ser atribuída à

presença de partículas lubrificantes no fluido, que reduzem o atrito entre os grãos abrasivos e o metal da peça, sendo o atrito uma força cujo sentido é contrário ao deslocamento, sua redução reduz também as exigências sobre a retífica. Essa redução devido à presença de partículas lubrificantes também foi observada por Kalita et al. 2012.

Rabiei et al. (2015) verificaram que a técnica MQL reduz as forças de retificação para materiais duros e justificam esta relação à melhoria na capacidade de lubrificação do óleo que é atomizado sobre a região de corte, pois esta técnica favorece a penetração do fluido na zona de contato. Porém, para a maior concentração de partículas (MQL MG 0,10 %), não há maior redução na potência e a rugosidade obtida foi elevada (Fig. 4.1), como já citado no item 4.1, Zhang et al. 2016 estudaram as concentrações de partículas sólidas (nanotubos de carbono e bissulfeto de molibdênio) aplicadas em fluidos de corte e encontraram que os resultados eram piores com o aumento das concentrações elevadas (concentrações variavam de 2 a 12% em peso) pois as partículas aglutinavam e impediam a chegada do fluido à região de corte, fato que pode ter ocorrido para a maior concentração, que por sua vez favorece a aglomeração das partículas.

A fim de visualizar e comparar os resultados de potência obtidos durante a retificação de Inconel 718 em diferentes condições de corte, na Fig. 4.15 são apresentados os picos e potência registrados.

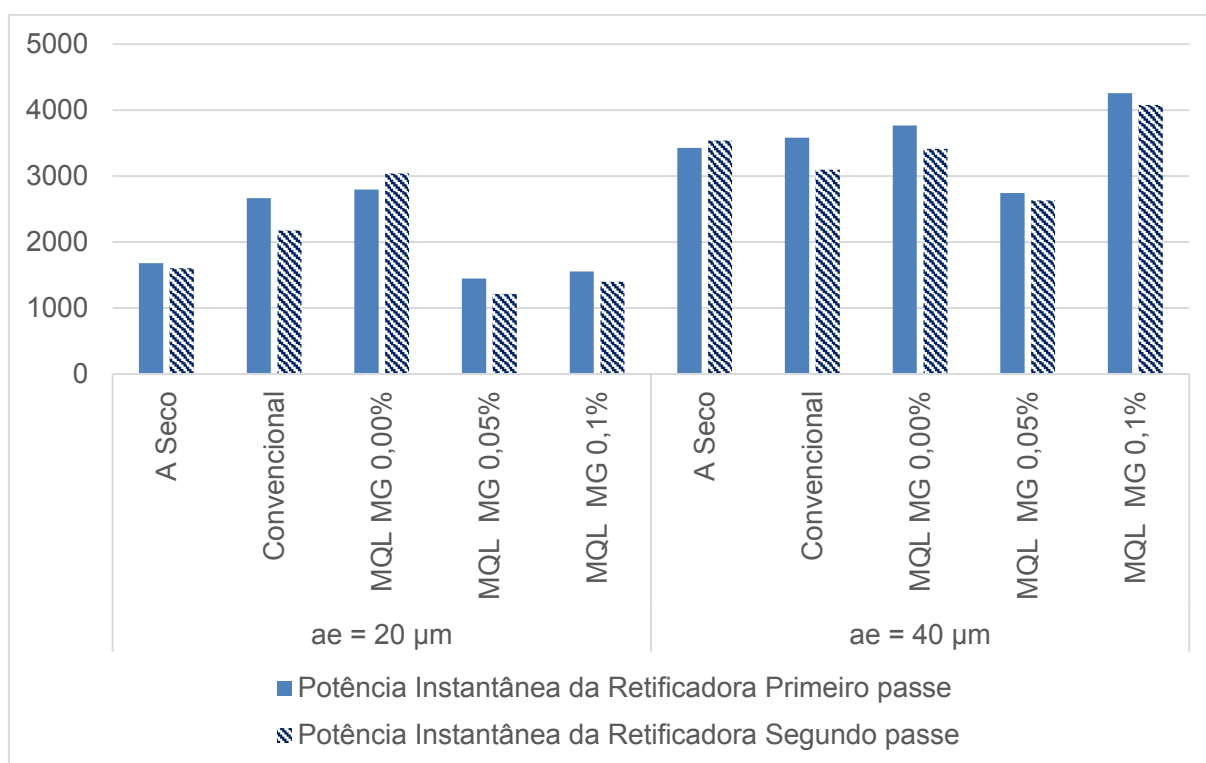


Figura 4.15 – Valores do picos de potência durante a retificação de Inconel 718 para diferentes penetrações de trabalho para as diferentes atmosferas lubri-refrigerantes

Observa-se que ao empregar a condição a seco com $a_e=20\ \mu\text{m}$ os valores de potência obtidos foram relativamente baixos. Ressalta-se que esta condição foi aquela que também resultou no aumento da microdureza na superfície da amostra, Fig 4.5 a), o que pode indicar que esta foi uma condição em que o rebolo exigiu grande esforço para realizar o corte, que elevadas temperaturas foram desenvolvidas na interface rebolo peça devido à falta de refrigeração.

Além disso, sabe-se que a afinidade química entre o Inconel 718 e o material cerâmico do rebolo aumenta com a temperatura. Com isso, grãos do rebolo podem se desgastar rapidamente o que aumenta a área de contato entre abrasivo e peça e, conseqüentemente, piora o acabamento. Em alguns casos, durante a retificação de superligas, apenas as etapas de riscamento e deformação plástica do material da peça podem ocorrer. O pobre acabamento, perda de microdureza e evidências de material plasticamente deformado e formação de trincas obtidos após a usinagem com esta condição foram comentados previamente nas Fig 4.5 a), e Figs. 4.4 a) e b), respectivamente.

Assim como comentado no item 4.1, para a potência ocorre um comportamento que vai de acordo com o apresentado por Marinescu et al. (2007), comparando o MQL MG 0,00% com a atmosfera Convencional há um aumento na rugosidade e um aumento na potência.

Seguindo esta linha de raciocínio, ao se comparar os resultados de potência obtidos após a usinagem com a técnica MQL MG 0,00% com aqueles da técnica MQL MG 0,05%, observa-se que há uma redução tanto na rugosidade (Fig. 4.1) quanto na potência, o que pode ser atribuído às características das partículas de grafeno que potencializam a propriedade de lubrificação do fluido base.

Esta também foi a explicação de ZHAO et al. (2016) que relataram que a viscosidade do fluido também aumenta com a adição de partículas de grafeno, passando de 145,27 para 157,18 mPa.s, que melhora seu poder lubrificante. Outra propriedade que também sofre alteração com a adição de grafeno no fluido de corte é a condutividade térmica. Ela passa de 2,64 W/mK *e-001 (MQL MG 0%) para 2,85 W/mK *e-001 (MQL MG 0,05%), o que representa uma diferença de aproximadamente 7%. Estas alterações vão de encontro com o sugerido por Hadad (2012), que propõe melhorar o processo de usinagem com o emprego de partículas com boas propriedades tribológicas dispersas em fluido de corte e aplicadas pela técnica MQL.

Além disso, seguindo a comparação entre as técnicas MQL com grafeno em diferentes concentrações (MQL MG 0,05% e MQL MG 0,10%), observa-se que o aumento da concentração de partículas resultou no aumento na potência instantânea (Fig. 4.17). Este aumento na concentração em alguns casos resultou também na deterioração da rugosidade (Fig. 4.1), fato que pode estar relacionado com ocorrência de aglomeração das partículas que não permite que o fluido chegue até a região do corte, gerando regiões sem presença de fluido (Zhang et al. 2015, Zhang et al. 2016).

Em relação às propriedades do fluido, a viscosidade do MQL MG 0,10% tem um pequeno aumento em relação à concentração de 0,05%, cerca de 1,4%. Contudo, há uma redução na condutividade térmica para o fluido MQL MG 0,10% que é aproximadamente 7% menor que aquela observada para a técnica MQL MG 0,05%, o que pode influenciar no aumento das potências

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

A partir dos ensaios e análises realizados sobre o processo de retificação plana tangencial de Inconel 718, com rebolo de SiC e diversas atmosferas lubri-refrigerantes, é possível concluir que:

- i. Houve pequena influência da atmosfera e da técnica de aplicação de fluido de corte nos valores de rugosidade e todos os valores de rugosidade média Ra permaneceram abaixo do valor estipulado igual a $0,63\text{ }\mu\text{m}$ para operação de semi-acabamento;
- ii. Os parâmetros de rugosidade Ra e Rt não aumentaram com a penetração de trabalho, principalmente quando foram realizados ensaios de retificação com nas condições: a Seco, MQL MG 0% e MQL MG 0,05%;
- iii. Os menores valores de rugosidade, tanto para parâmetro Ra e Rt, foram obtidos após a usinagem com a técnica MQL MG 0,05 %; e eles foram $Ra = 0,25\text{ }\mu\text{m}$ e $Rt = 1,52\text{ }\mu\text{m}$ ao empregar a condição mais severa de usinagem, $a_e = 40\text{ }\mu\text{m}$;
- iv. O aumento na concentração de grafeno não resultou em benefícios em termos de acabamento, possivelmente por 0,05% de concentração em peso ser o limite além do qual pode haver aglomeração de partículas no fluido de corte, que dificulta a entrada do fluido na interface rebolo-peça, como também a formação de filme lubrificante.
- v. Foram detectadas microtrincas em todas as amostras retificadas em todas as condições de corte utilizadas. Contudo, a presença de grafeno reduziu o número de trincas, bem como as suas dimensões. A técnica MQL MG 0,05% foi aquela que, semelhante à técnica convencional (abundância), gerou o menor número de trincas em relação às outras condições testadas, independente da penetração de trabalho empregada. Estes resultados demonstram que a retificação do Inconel 718 com rebolo de SiC com a técnica MQL com multicamadas de grafeno dispersas em fluido de corte é competitiva tecnicamente com a técnica convencional em termos de rugosidade e

textura da superfície. Além disso, a técnica MQL é considerada mais ecologicamente correta que a convencional por empregar fluido em menor quantidade;

- vi. Diferentes comportamentos para a microdureza foram observados após a usinagem com as diferentes técnicas e atmosferas de usinagem e ela também sofreu influência da severidade do processo. O melhor desempenho foi alcançado após a usinagem com a técnica convencional (Fig. 4.7 b), em que praticamente não houve variação entre os valores medidos e o de referência, antes da usinagem. O segundo melhor desempenho foi constatado ao empregar a técnica MQL MG 0,05%.
- vii. Com base nas imagens das superfícies atacadas das amostras de Inconel 718 é possível afirmar que, para todas as condições de corte, não houve alteração na microestrutura;
- viii. Em relação às tensões residuais, estas foram compressivas após a usinagem em condições mais brandas ($a_e = 20 \mu\text{m}$) com as seguintes atmosferas lubri-refrigerante: A Seco, Convencional e MQL MG 0,05%. As tensões em geral foram tratativas após a usinagem com o maior a_e , independente da direção de medição realizada;
- ix. A atmosfera lubri-refrigerante MQL MG 0,05% foi aquela que exigiu menor potência instantânea da retificadora durante o processo de usinagem, sendo 1448 W e 2740 W para valores de penetração de trabalho iguais a $20 \mu\text{m}$ e $40 \mu\text{m}$, respectivamente;
- x. A condição de usinagem mais severa, $a_e = 40 \mu\text{m}$, não demonstrou ser adequada para o processo de retificação de Inconel 718, pois além de pobre acabamento, queda de dureza e elevado número de trincas nas peças em praticamente em todas as condições de lubri-refrigeração testadas, demandou elevada potência para o corte, o que pode, em longo prazo, causar danos ao equipamento.

Sugestões para trabalhos futuros

As sugestões para que trabalhos futuros possam aprofundar no estudo e complementar os resultados obtidos nesta pesquisa são:

- i. Verificar a influência da técnica MQL com fluido de corte com adição de água e de grafeno na rugosidade e integridade sub-superficial do Inconel 718 nas mesmas condições investigadas nesta pesquisa;
- ii. Realizar ensaios de retificação cilíndrica do Inconel 718 e avaliar os desvios dimensionais e geométricos;
- iii. Testar diferentes tipos de fluidos de corte aplicados pelas técnicas convencional e MQL na retificação do Inconel 718, com também empregar concentrações de grafeno inferiores a 0,05% em peso;
- iv. Investigar a influência da aplicação de nanotubos de carbono dispersos no mesmo fluido de corte na integridade da superfície do Inconel 718;
- v. Verificar a influência da velocidade da mesa e de rebolos de SiC com diferentes granulometrias *mesh* nos mesmos parâmetros de saída analisados nesta pesquisa;
- vi. Realizar ensaios de retificação com diferentes avanços transversais da mesa da máquina e analisar a influência deles na qualidade e integridade das peças usinadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERTS, M., KALAITZIDOU, K., MELKOTE, S. An investigation of graphite nanoplatelets as lubricant in grinding. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. v. 49, p. 966-970, jun. 2009.

<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.06.005>

API Specification 6A718; Specification of Nickel-Based Alloy 718(UNS N07718) for oil and Gas Drilling and Production Equipment, American Petroleum Institute, 1.ed., 2004.

AGOSTINHO, O L; RODRIGUES, A C S; LIRANI, J. **Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões**. São Paulo: Edgard Blucher, 2004.

ASM. **Atlas of microstructures of industrial alloys**. 8.ed., 1972. 569p.

ASM. **Properties and selection - Nonferrous alloys and special-purpose materials**. 10.ed. ASM International, 1990. 3470p. Handbook Vol. 2.

ASM. **ASM metals handbook machining**. 10 Ed., USA: ASM International, 2004. Vol. 16.

ASPINWALL, D. K., SOO, S. L., CURTIS, D. T., MANTLE, A. L. Profiled superabrasive grinding wheels for the machining of a nickel based superalloy. **Annals of the CIRP**. Vol. 56, 2007, p. 335-338.

<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2007.05.077>

BARCZAK, L. M., BATAKO, A. D. L., MORGAN, M. N. A study of plane surface grinding under minimum quantity lubrication (MQL) conditions. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. v. 50, p. 977-985, ago, 2010.

<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2010.07.005>

Blaser Swissslube, Vasco 7000 – Cutting Fluids, disponível em <
http://www.cuttingfluids.com.mx/es/wp-content/uploads/2014/09/Vasco_7000.pdf>, acesso
 em janeiro de 2017.

BONNEY, J. **High-Speed Machining of Nickel-base, Inconel 718, Alloy with Ceramic and Coated Carbide Cutting Tools using Conventional and High-Pressure Coolant Supplies**. 2004. 238 f. Ph.D. Thesis - London South Bank University, London, Great Britain.

CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 5.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002. 589p.

CAMPBELL, F. C. **Manufacturing Technology for Aerospace Structural Materials**. 1.ed. Elsevier Science, 2006. 616p.

CASTRO, P. H. C. **Retificação plana da liga de Inconel 718 em diversas condições de corte**. 2015. 52 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

DA SILVA, R. B., OLIVEIRA, D., DE CASTRO, P. H. C., EZUGWU, E. O., MARQUES, A., MACHADO, A. R., Grinding of Inconel 718 alloy with air-oil-water mixture delivered by MQL technique, **STLE - Annals**, 2016.

DE OLIVEIRA. **Retificabilidade do Inconel 718 com base no acabamento e na microdureza**. 2015. 58 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Aeronáutica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

DE MELLO, A. V. **Retificação da Liga Ti-6Al-4V, com Fluido de Corte contendo partículas de Grafeno**. 2015. 94 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

DEL TORO, V. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. Rio de Janeiro: Prentice Hall do Brasil. 1994.

DEVILLEZ, A., LE COZ, G., DOMINIAK, S., DUDZINSKI, D. Dry Machining of Inconel 718, Workpiece Surface Integrity. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 211. p.1590-1598, mai. 2010.

<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.04.011>

DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L., Tecnologia da usinagem dos materiais. 7ª ed. Campinas, SP: Artliber Editora Ltda, 2010. 286p.

DOREMUS, L., CORMIER, J., VILLECHAISE, P., HENAFF, G., NADOT, Y., PIERRET, S. Influence of residual stresses on the fatigue crack growth from surface anomalies in a nickel-based superalloy, **Materials Science & Engineering A**. v. 644, p. 234–246, jul. 2015.

<https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.07.077>

DOS SANTOS, J.C. **Estudo do uso de ferramentas cerâmicas na usinagem de Inconel 718**. 2010. 64 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade estadual Paulista, Guaratinguetá.

DUDZINSKI, D., DEVILLEZ, A., MOUFKI, A., LARROUQUE`RE, D., V. ZERROUKI , VIGNEAU J. A review of developments towards dry and high speed machining of Inconel 718 alloy, **International Journal of machine tools & manufacture**. v. 44, p.439-456, jun 2004.

[https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(03\)00159-7](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00159-7)

EZUGWU, E.O., TANG, S.H. Surface abuse when machining cast iron (G-17) and nickel-base superalloy (Inconel 718) with ceramic tools. **Journal of Materials Processing Technology** . v. 55, p. 63–69, 1995.

[https://doi.org/10.1016/0924-0136\(95\)01786-0](https://doi.org/10.1016/0924-0136(95)01786-0)

EZUGWU, E.O., WANG, Z. M., MACHADO, A. R. The machinability of Nickel-Based Alloys: A Review. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 86. p. 1-16, 1999.

[https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00314-8](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00314-8)

EZUGWU, E.O. An overview of the machinability of aeroengine alloys. **Journal of Materials Technology**. v. 134, p.233 – 253, 2002.

[https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)01042-7](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)01042-7)

EZUGWU, E. O. Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. v. 45, p. 1353–1367, 2005.

<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.02.003>

FITZGERALD, A. E., KINGSLEY JR., UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas**. 6.ed. Bookman, 2006, 648p.

GONÇALVES NETO, L. M., **Aplicação de fluido de corte em quantidades reduzidas para usinagem do aço SAE 52100 no processo de retificação centerless de passagem**. 2013. 130 f. Tese de Doutorado – Universidade Estadual Paulista, Bauru.

GUIMARÃES, C. **Retificação plana de aços para moldes e matrizes em várias condições de corte e diferentes técnicas de aplicação de fluido de corte**. 2016. 192 f. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

G-Style S.A., Technical Specifications of AISI304, Engineering Department, Disponível em: < <http://www.gstyle.com/en/download/aisi304.pdf>>, acesso em setembro de 2016.

IRANI, R.A., BAUER, R.J., WARKENTIN, A. A review of cutting fluid application in the grinding process. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. v. 45, p.1696–1705, abr. 2005.

<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.03.006>

HADAD, M. J., TAWAKOLI, T., SADEGHI, M. H., SADEGHI, B. Temperature and energy partition in minimum quantity lubrication-MQL grinding process. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. v. 54–55, p. 10–17, 2012.

<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.11.010>

HUTCHINGS, I. M., **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**, 4^a ed., Londres: Arnold, 1996. 273 p.

JACKSON, M. J., DAVIM, J. P. **Machining with Abrasives**. 1.ed. New York: Springer, 2011. 423 p.

<https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7302-3>

KALITA, P., MALSHE, A.P., KUMAR, S.A., YOGANATH, V.G., GURUMURTHY, T. Study of specific energy and friction coefficient in minimum quantity lubrication grinding using oil-based nanolubricants. **Journal of Manufacturing Processes**. v. 14, p. 160–166, mar. 2012.

<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2012.01.001>

KALITA, P., MALSHE, A.P., JIANG, W., SHIH, A.J., 2010. Tribological study of nanolubricant integrated soybean oil for minimum quantity lubrication (MQL) grinding. **Transactions of NAMRI/SME** 38. v. 38, p.137–144, 2010.

KALPAKJIAN, S.; SCHMID, R. **Manufacturing Processes for Engineering Materials**. 5.ed. PE International Edition, 2009.

KITAGAWA, T., KUBO, A., MAEKAWA, K. Temperature and wear of cutting tools in high-speed machining of Inconel 718 and Ti-6Al-6V-2Sn. **Wear**. v. 202, p.142-148, 1997.
[https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(96\)07255-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(96)07255-9)

KLOCKE, F. **Manufacturing process 2: grinding, honing, lapping**. Berlin: Springer, 2009. 433 p.

KLOCKE, F., KLINK, A., VESELOVAC, D., ASPINWALL, D.K., SOO, S. L., SCHMIDT, M., SCHILP, J., LEVY, G., KRUTH, J. Turbomachinery component manufacture by application of electrochemical, electro-physical and photonic processes. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**. v. 63, p. 703–726, 2014.
<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.05.004>

KLOCKE, F., SOO, S. L., KARPUSCHEWSKI, B., WEBSTER, J. A., NOVOVIC, D., ELFIZY, A., AXINTE, D. A., TONISSEN, S. Abrasive machining of advanced aerospace alloys and composites. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**. v. 64, p. 581–604, 2015.
<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.05.004>

LI, H., ZHANG, H., CHENG, X. The effect of temperature, defect and strain rate on the mechanical property of multi-layer graphene: Coarse-grained molecular dynamics study. **Physica E**. v. 85, p. 97–102, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.physe.2016.07.003>

MACHADO, A.R., ABRÃO, A. M., COELHO, R. T., DA SILVA, M. B. **Teoria da usinagem dos materiais**. 2.ed. São Paulo: Blucher. 2011. 371p.

MAHER, Alloy 718 Data Sheet, Disponível em: <
<http://www.maher.com/media/pdfs/718-datasheet.pdf>>, acesso em setembro de 2016.

MALKIN, S.; GUO, C. **Grinding technology: theory and application of machining with abrasives**. 2.ed. New York: Industrial Press Inc., 2008.

MANDAL, B., SARKAR, A., BISWAS, D., DAS, S., BANERJEE, S. An effective grinding fluid delivery technique to improve grindability of inconel-600. In: 5th INTERNATIONAL & 26th ALL INDIA MANUFACTURING TECHNOLOGY, DESIGN AND RESEARCH CONFERENCE (AIMTDR 2014) December, IIT Guwahati. Assam, Índia, 2014.

<https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2874.5768>

MARINESCU, I. D., ROWE, W. B., DIMITROV, B. **Tribology of abrasive machining processes**. 1.ed. New York: Willian Andrew, 2004. 758p.

MARINESCU, I. D.; HITCHINER, M.; UHLMANN, E.; ROWE, W. B.; INASAKI, I. **Handbook of Machining with Grinding Wheels**. New York: CRC Press, 2007. 596p.

MARQUES, A., NARALA, S.K.R., MACHADO, A.R., GUNDA, R.K., JOSYULA, S.K., DA SILVA, R.B., DA SILVA, M.B. Performance assessment of MSQL: Minimum quantity solid lubricant during turning of Inconel 718. **Proc IMechE Part B: Journal Engineering Manufacture**. p. 1-16, mai 2015.

<https://doi.org/10.1177/0954405415592128>

NBR ISO 2768-2, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2001.

NBR ISO 6158, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 1995.

NORTH AMERICAN STAINLESS, Long products Stainless Steel Grade Sheet, Disponível em: <<http://www.northamericanstainless.com/wp-content/uploads/2010/10/Grade-304-304L.pdf>>, acesso em setembro de 2016.

OHBUCHI, Y., OBIKAWA, T. Adiabatic shear in chip formation with negative rake angle. **International Journal of Mechanical Sciences** v.47, p. 1377–1392, 2005.

<https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2005.05.003>

OSTERLE, W., LI, P.X. Mechanical and thermal response of a nickel-base superalloy upon grinding with high removal rates. **Elsevier, Materials Science and Engineering**. v. A238, p. 357–366, mai.1997.

[https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(97\)00457-7](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(97)00457-7)

OSTERLE, W., LI, P.X, NOLZE, Influence of surface finishing on residual stress depth profiles of a coarse-grained nickel-base superalloy, **Elsevier, Materials Science and Engineering**. v. A262, p. 308-311, out. 1999.

[https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(98\)01018-1](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(98)01018-1)

PATURI, U.M.R., MADDUA, Y. R., MARURIA, R. R., NARALAB, K. R. Measurement and analysis of surface roughness in WS2 solid lubricant assisted minimum quantity lubrication (MQL) turning of Inconel 718. **13th Global Conference on Sustainable Manufacturing - Decoupling Growth from Resource Use, Elsevier**. v. 40, p. 138-143, 2016.

<https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.082>

RABIEI, F., RAHIMI, A.R., HADAD, M.J., ASHRAFIJOU, M. Performance improvement of minimum quantity lubrication (MQL) technique in surface grinding by modeling and optimization. **Journal of Cleaner Production**. v. 86, p. 447-460, 2015.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.08.045>

RAMON-RAYGOZA, E. D., RIVERA-SOLORIO, C. I., GIMENES-TORRES, E., MALDONADO-CORTES, D., CARDENAS-ALEMAN, E., CUE-SAMPEDRO, R. Development of nanolubricant based on impregnated multilayer graphene for automotive applications: Analysis of tribological properties. **Powder Technology**. ed. 302, p. 363–371, 2016.

<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.08.072>

REED, R. C. **The Superalloys Fundamentals and Applications**. 1.ed. New York: Cambridge University Press, 2006. 392p.

<https://doi.org/10.1017/CBO9780511541285>

RESENDE, D. L., NETO, C. M., REIS, D. A. P., HIRSCHMANN, A. C. O. Estudo do comportamento mecânico da superliga inconel 718 em temperaturas elevadas. In: **15º ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E PÓS-GRADUAÇÃO DO ITA – XV ENCITA**, 15, 2009, São José dos Campos. **Anais**.

ROUXINOL, F. P., GELAMO, R. V., AMICI, R. G., VAZ, A. R., MASHKALEV, S. A., Low contact resistivity and strain in suspended multilayer grapheme, **Applied Physics Letters**, ed. 97, 2010.

<http://dx.doi.org/10.1063/1.3528354>

SANCHEZ, J.A., POMBO, I., ALBERDI, R., IZQUIERDO, B., PLAZA, S., MARTINEZ-TOLEDANO, J. Machining evaluation of a hybrid MQL-CO2 grinding technology. **Journal of Cleaner Production**. v. 18, p. 1840-1849, jul. 2010.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.07.002>

SHAHIL, K. M. F., BALANDIN, A. A. Thermal properties of grapheme and multilayer graphene: Applications in thermal interface materials. **Solid State Communications**. ed. 152, p.1331–1340, 2012.

<https://doi.org/10.1016/j.ssc.2012.04.034>

SINHA, M. K., SETTI D., GHOSH S., RAO P. V., An investigation on surface burn during grinding of Inconel 718. **Journal of Manufacturing Processes**. v. 21, p. 124–133, jan.2016.

<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2015.12.004>

SUGAHARA, T., NETO, C. M., REIS, D. A. P., HIRSCHMANN, A. C. O., PIORINO NETO, F. Estudo do comportamento em fluência da superliga inconel 718. IN: 15º ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E PÓS-GRADUAÇÃO DO ITA – XV ENCITA, 15, 2009, São José dos Campos. **Anais**.

TAWAKOLI, T., HADDAD, M., SADEGHI, M. H., DANESHI, SADEGHI, B. Minimum quantity lubrication in grinding: effects of abrasive and coolant-lubricant types. **Journal of Cleaner Production**. v. 19, p. 2088-2099, 2011.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.06.020>

TSO, P. Study on the grinding of Inconel 718. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 55, p 421-426, 1994.

[https://doi.org/10.1016/0924-0136\(95\)02026-8](https://doi.org/10.1016/0924-0136(95)02026-8)

VILLARES METALS, Liga especial resistente à alta temperatura, disponível em: <<http://www.villaresmetals.com.br/villares/pt/Produtos/Ligas-Especiais/Resistentes-a-alta-Temperatura/VAT718QA-ASTM-B637-ICONEL-718>>, acesso em janeiro de 2017.

WALKER, T., The MQL Handbook, **A guide to machining with minimum quantity lubrication**, Copyright © 2013, Unist, Inc. V1.0.3.

WANG, Y., LI C., ZHANG, Y., LI, B., YANG, M. ZHANG, X., GUO, S., LIU, G. Experimental evaluation of the lubrication properties of the wheel/workpiece interface in MQL grinding with diferent nanofluids. **Tribology International**. v. 99, p. 198–210, abr 2016.

<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.03.023>

WANG, Y., LI C., ZHANG, Y., YANG, M., LI, B., JIA, D., HOU, Y., MAO, C. Experimental evaluation of the lubrication properties of the wheel/workpiece interface in minimum quantity lubrication (MQL) grinding using different types of vegetable oils. *Journal of Cleaner Production* 127, p. 487-499, jun. 2016.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.121>

WEI, Z., NI, Z., BI, K., CHEN, M., CHEN, Y. Interfacial thermal resistance in multilayer graphene structures. **Physics Letters**. v. A 375, p. 1195–1199, jan. 2011.

<https://doi.org/10.1016/j.physleta.2011.01.025>

XU, X. P., YU, Y.Q., XU, H.J. Effect of grinding temperatures on the surface of a nickel-based superalloy. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 129, p. 359-363, 2002.

[https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00656-8](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00656-8)

ZENG Q, LIU G, LIU L, QIN Y, Investigation into Grindability of a Superalloy and Effects of Grinding Parameters on its Surface Integrity. **Journal of Engineering Manufacture**, p.238–250, 2015.

<https://doi.org/10.1177/0954405414526384>

ZHANG, D., LI, C., JIA, D., ZHANG, Y., ZHANG, X. Specific grinding energy and surface roughness of nanoparticle jet minimum quantity lubrication in grinding. **Chinese Journal of Aeronautics**. v. 28(2),p. 570–581, fev. 2015.

<https://doi.org/10.1016/j.cja.2014.12.035>

ZHANG, Y., LI, C., JIA, D., LI, B., WANG, Y., YANG, M., HOU, Y., ZHANG, X. Experimental study on the effect of nanoparticle concentration on the lubricating property of nanofluids for MQL grinding of Ni-based alloy. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 232, p.100–115, ago. 2016.

<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.01.031>

ZUM GAHR, K.-H. **Microstructure and wear of materials**. [S.l.]: Elsevier, 1987.