

LURIAN SOUZA VIEIRA DA SILVA

**INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DE CORTE
EQUIVALENTE E TÉCNICA DE APLICAÇÃO DE
FLUIDO DE CORTE NA INTEGRIDADE DA
SUPERFÍCIE DO INCONEL 718**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2017

LURIAN SOUZA VIEIRA DA SILVA

**INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DE CORTE EQUIVALENTE E
TÉCNICA DE APLICAÇÃO DE FLUIDO DE CORTE NA INTEGRIDADE
DA SUPERFÍCIE DO INCONEL 718**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **Bacharel em Engenharia Mecânica**.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Arthur Alves Fiocchi

Uberlândia – MG

2017

LURIAN SOUZA VIEIRA DA SILVA

**INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DE CORTE EQUIVALENTE E
TÉCNICA DE APLICAÇÃO DE FLUIDO DE CORTE NA INTEGRIDADE
DA SUPERFÍCIE DO INCONEL 718**

Trabalho de conclusão de curso **APROVADO** pela
Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade
Federal de Uberlândia.

Área de Concentração: Materiais e Processos de
Fabricação.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Arthur Alves Fiocchi FEMEC - UFU - Orientador

Prof. Dr. Rosemar Batista da Silva – FEMEC – UFU

**Eng^a. Me. Déborah de Oliveira - Doutoranda do Programa de Pós Graduação
em Eng. Mecânica da UFU.**

UBERLÂNDIA, 2017.

DEDICATÓRIA

Ao meu pai Luiz Carlos (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Luiz Carlos e Mariza, e a minha irmã Ingrid.

Ao Prof. Dr. Rosemar Batista da Silva pelo suporte, orientação e ensinamentos fundamentais ao longo deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Arthur Alves Fiocchi pela complementação na orientação, experiência, esmero e constante ajuda durante o desenvolvimento deste trabalho.

À Universidade Federal de Uberlândia (UFU), à Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC), ao Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) e ao Laboratório de Usinagem Convencional (LUC) pela oportunidade e infraestrutura necessárias para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amigos, em especial ao Cassiano Metier Moura, à doutoranda Déborah de Oliveira, Guilherme Bernardes Rodrigues, Victor von Glehn Mateus, Natália Ferreira, João Pedro Bernardes Amaral, Thomy Fernando Takata, Fernanda Ferreira Rossi e aos demais colegas da 90ª Turma de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, por todo o apoio, companheirismo e solicitude ao longo dos anos.

Ao técnico e doutorando Alcione dos Reis, a técnica Ângela Andrade e ao professor Washington Martins da Silva Junior por todo o suporte técnico e colaboração.

Aos membros do LEPU, em especial a Me. Mariana Landim Silveira Lima, Prof. Cleudes Guimarães, Prof. Raphael Lima de Paiva e ao doutorando Antonio Vitor de Melo pela amizade e auxílio em diversas etapas deste trabalho.

SILVA, L. S. V: **Influência da espessura de corte equivalente e técnica de aplicação de fluido de corte na integridade da superfície do Inconel 718**. 2017, 63 f. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal de Uberlândia - MG.

Resumo

A retificação é um processo de usinagem por abrasão recomendado em aplicações que requerem um elevado nível de precisão dimensional e melhor acabamento superficial em componentes metálicos. O Inconel 718 é uma superliga de níquel que apresenta alta resistência mecânica, a corrosão e a fluência mesmo em elevadas temperaturas, justificando sua aplicação na fabricação de componentes utilizados no setor aeronáutico, por exemplo, em componentes de turbinas e partes de motores aeronáuticos. Diferentemente de outros materiais como aços endurecidos e ferros fundidos, este material apresenta desafios durante a sua usinagem, como preservar a integridade das superfície e sub-superfície após o processo de retificação. A baixa condutividade térmica e forte afinidade química do Inconel 718 com os principais abrasivos convencionais fazem com que o calor seja concentrado na zona de corte, tornando o material mais suscetível a danos térmicos e deterioração do acabamento. Assim, torna-se imprescindível o emprego de fluidos de corte durante o processo de retificação, objetivando principalmente a refrigeração da interface cavaco-ferramenta. Contudo, é crescente a procura por alternativas que reduzam as vazões de fluido empregadas, devido ao seu elevado custo e dificuldade de manuseio e descarte. Assim, a técnica de aplicação de fluido de corte Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) surge como uma alternativa viável a forma de aplicação convencional, caracterizando-se, principalmente, por permitir a redução do volume de fluido de corte empregado. Neste sentido, este trabalho visa contribuir com a retificação de superligas apresentando resultados da integridade da superfície das amostras de Inconel 718 após a retificação plana tangencial com rebolo de carbetto de silício. Os parâmetros de corte utilizados foram: velocidade de corte igual a 38 m/s, velocidade da peça igual a 10 m/min, dois valores de espessura de corte equivalente (0,09 μm e 0,18 μm) e técnicas de aplicação de fluido de corte convencional e MQL. As variáveis de saída analisadas foram: rugosidade, imagens da superfície retificada via MEV, microdureza e microestrutura. Como resultados, observou-se que os valores R_a situaram-se de 0,63 μm , valor considerado limite em operações de semiacabamento. A microdureza apresentou tendência de redução com o aumento da espessura de corte equivalente e redução da refrigeração. Não foram observadas alterações microestruturas das peças nas condições investigadas.

Palavras Chave: Retificação, Inconel 718; Fluido de corte, MQL, Rugosidade, Microdureza.

SILVA, L. S. V. Influence of equivalent chip thickness and different cooling delivery techniques on surface integrity of Inconel 718. 2017. 63p. Monograph. Federal University of Uberlandia – MG.

Abstract

Grinding is an abrasive machining process recommended in applications requiring a high level of dimensional accuracy and better surface finish in metal components. Inconel 718 is a nickel-based superalloy that has high mechanical strength, corrosion, and creep even when they are operating at high temperatures, what justifies its application in the manufacturing of components of turbines and parts of the aeronautical engines. Differently from other materials, such as steels and cast irons, machining of Inconel 718 is impaired because of its properties such as low thermal conductivity and high chemical affinity with the main conventional abrasives for grinding wheels. This will lead to high concentration of heat in the cutting zone and consequently deterioration of surface finish of the component, among other problems. Thus, it is indispensable to employ high volume of coolant during grinding process to cool the grinding zone. However, it is growing a demand for alternatives that reduce the flow rates employed due to their high cost and difficult handling and discard. In this way, the Minimum Quantity Lubrication (MQL) coolant technique can be a viable alternative to the conventional coolant delivery technique (flood coolant), especially because of the extremely low volume of oil employed. In this sense, this work aims to contribute to the grinding of superalloys presenting results of the surface integrity of the Inconel 718 alloy after peripheral grinding operation with silicon carbide grinding wheel. The cutting parameters employed were: cutting speed of 38 m/s, workpiece speed of 10 m / min, two values of equivalent cutting thickness (0.09 and 0.18 μm) and two cutting fluid application techniques: conventional (flood) and MQL. The output variables were roughness, machined surface images via SEM, microhardness and microstructure of the workpiece material. The results showed that the roughness values were below the stipulated limit of 0.63 μm for semi-finishing grinding processes. The microhardness was influenced by the equivalent cutting thickness and cutting fluid technique employed. No changes were observed in microstructures of workpiece under the investigated conditions.

Keywords: Grinding, Inconel 718, Coolant, Roughness, Microhardness, MEV

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Elementos básicos envolvidos no processo de retificação plana tangencial (adaptado de MARINESCU et al., 2007).....	5
Figura 2.2 - Estrutura de um rebolo abrasivo (adaptado de WANG et al., 2016).....	5
Figura 2.3 - Diferenças entre a formação do cavaco na usinagem com ferramentas de ângulos definidos e na usinagem por abrasão (adaptado de NEUGEBAUER et al., 2011).	9
Figura 2.4 - Representação esquemática da formação das zonas elástica e plástica durante a formação do cavaco no processo de retificação (adaptado de KLOCKE, 2009).	10
Figura 2.5 - Principais grandezas físicas do processo de retificação plana (adaptado de ROWE, 2014).	11
Figura 2.6 - Classificação dos fluidos de corte (adaptado de DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2010).	13
Figura 2.7 - Distribuição dos custos relativos ao uso de fluidos de corte nos processos de usinagem no meio industrial (adaptado de SANCHEZ et al., 2010).	15
Figura 2.8 - Representação esquemática da técnica de aplicação de fluido de corte MQL (adaptado de TAWAKOLI et al., 2010).....	16
Figura 2.9 - Micrografias da superfície do Inconel 718 com escala das imagens igual a 500 μm (SINHA et al., 2016).....	20
Figura 2.10 - Distribuição percentual do consumo industrial de superligas de níquel (adaptado de EZUGWU, 2005).....	21
Figura 3.1 - Fluxograma com as etapas do procedimento experimental deste trabalho.	26
Figura 3.2 - Rebolo de SiC 39C60KVK com flange de fixação e contrapesos de balanceamento utilizado nos ensaios.....	27
Figura 3.3 - Superfície da amostra de Inconel 718 após a preparação.	29
Figura 3.4 - Microestrutura do Inconel 718 após ataque químico.....	30
Figura 3.5 - Representação de um ciclo de retificação.....	32
Figura 3.6- Fluidos de corte aplicados na zona de corte.	33
Figura 3.7 - Bocais utilizados para aplicação de fluido de corte na zona de corte pelas diferentes técnicas.....	34
Figura 3.8 - Representação das seções de medição da rugosidade da peça.	35
Figura 3.9 - Esquema de medição de microdureza detalhando o posicionamento das indentações (dimensões em μm).	36

Figura 4.1 - Rugosidade Ra do Inconel 718 em função da espessura de corte equivalente e da técnica de aplicação de fluido de corte.	38
Figura 4.2 - Rugosidade Rz do Inconel 718 em função da espessura de corte equivalente e da técnica de aplicação de fluido de corte.	38
Figura 4.3 - Rugosidade Rq do Inconel 718 em função da espessura de corte equivalente e da técnica de aplicação de fluido de corte.	39
Figura 4.4 - Imagens da superfície do Inconel 718 após a retificação em diferentes condições de corte.....	41
Figura 4.5 - Perfil de microdureza do Inconel 718 após a retificação em diferentes condições de corte.....	43
Figura 4.6 - Microestrutura do Inconel 718 após a retificação em diferentes condições de corte.	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Especificações padrões para rebolos abrasivos convencionais (adaptada de MARINESCU et al., 2004).....	6
Tabela 2.2 - Propriedades dos principais abrasivos (adaptado de MALKIN; GUO, 2008).	8
Tabela 2.3 - Detalhes da composição química, propriedades e microestrutura do Inconel 718.	23
Tabela 3.1 - Principais propriedades mecânicas do Inconel 718 envelhecido (Villares Metals).	28
Tabela 3.2 - Composição química do Inconel 718 determinada no MEV-EDS do LEPU.	29
Tabela 3.3 - Variáveis de entrada utilizadas no processo de retificação do Inconel 718.	31
Tabela 4.1 - Valores dos parâmetros de rugosidade Ra, Rz e Rq obtidos após a retificação do Inconel 718 em diferentes condições de corte.	37

LISTA DE ABREVIACÕES E SÍMBOLOS

a_d (μm)	Profundidade de dressagem
a_e (μm)	Penetração de trabalho
Al_2O_3	Óxido de Alumínio
a_p (μm)	Profundidade de corte
CBN	Nitreto de boro cúbico
CFC	Cúbica de face centrada
EDS	Sistema de energia dispersiva
F_N (N)	Força normal de retificação
F_t (N)	Força tangencial de retificação
h_{cu}	Espessura de cavaco não deformado
h_{eq}	Espessura de corte equivalente
HRc	Dureza Rockwell C
HSS	Aço rápido
HV	Dureza Vickers
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional para Padronização)
MQL	Mínima Quantidade de Lubrificante
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
NbC	Carboneto de nióbio
NBR	Norma Brasileira
R_a (μm)	Desvio aritmético médio de rugosidade
R_{ku}	Fator de achatamento do perfil de rugosidade (<i>Kurtosis</i>)
R_q (μm)	Desvio médio quadrático de rugosidade
R_{sk}	Fator de assimetria do perfil de rugosidade (<i>Skewness</i>)
R_t (μm)	Altura total do perfil de rugosidade
R_z (μm)	Altura máxima do perfil de rugosidade
SiC	Carbeto de Silício
U_d	Grau de recobrimento do rebolo
TCC	Tetragonal de corpo centrado
TiC	Carboneto de titânio
TiN	Nitreto de titânio
T_μ	Profundidade de corte crítica
v_s (m/s)	Velocidade de corte
v_w (m/min)	Velocidade da peça

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Processo de retificação	4
2.1.1 Rebolos e Materiais abrasivos	5
2.1.2 Mecanismo de remoção de material no processo de retificação	9
2.1.3 Principais parâmetros de corte da retificação plana tangencial	10
2.2 Fluidos de corte	12
2.3 Técnicas de aplicação de fluido de corte no processo de retificação	14
2.4 Qualidade da superfície e sub-superfície de peças retificadas	18
2.5 Ligas de níquel	21
2.6 Usinabilidade do Inconel 718	23
CAPÍTULO III – MATERIAL E MÉTODOS	26
3.1 Equipamentos e materiais	27
3.1.1 Máquina Ferramenta	27
3.1.2 Ferramenta de corte	27
3.1.3 Material da Peça	27
3.2 Parâmetros de corte	31
3.3 Fluido de corte e técnicas de aplicação.	32
3.4 Variáveis de saída	34
3.4.1 . Rugosidade	34
3.4.2 . Imagens da superfície retificada	35
3.4.3 . Microdureza	35
3.4.4 . Microestrutura	36
CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
4.1 Rugosidade da superfície	37
4.2 Imagens das superfícies retificadas	40
4.3 Microdureza	42
4.4 Microestrutura das amostras de Inconel 718	44
CAPÍTULO V - CONCLUSÕES	47
Sugestões para trabalhos futuros	48
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A retificação é um processo de usinagem por abrasão recomendado em aplicações que exigem a combinação de um melhor acabamento da superfície e elevado nível de precisão dimensional do componente usinado. Em comparação aos processos de usinagem com ferramenta de geometria definida, a retificação apresenta elevada energia específica de corte devido à sua baixa remoção de material e aos pequenos valores de penetração de trabalho e profundidade de corte empregados. Durante a usinagem, esta elevada energia é convertida em calor através do atrito resultante entre os abrasivos dos rebolos convencionais e a peça, implicando no aumento da temperatura na zona de corte, caracterizando um dos principais desafios da retificação (MACHADO et al.; 2011; MALKIN; GUO, 2008).

O processo de retificação é comumente empregado como etapa final na produção de componentes metálicos e, portanto, o efeito negativo da temperatura sobre este processo deve ser minimizado. Neste sentido, a aplicação de fluidos de corte auxilia na refrigeração, principalmente da peça, e previne danos de origem térmica, como a queima de retífica, trincas e tensões residuais, durante a retificação com rebolos abrasivos convencionais (TAWAKOLI et al., 2010).

Uma das técnicas mais empregadas na retificação para aplicação de fluido de corte é aquela conhecida como convencional ou abundante. Esta técnica, em geral, aplica fluido de corte em altas vazões a baixa pressão (próxima a pressão atmosférica) que atua refrigerando a zona de corte, principalmente da peça. Contudo, o emprego desta técnica apresenta inconvenientes que merecem atenção, com destaque para as elevadas vazões de fluido, exige tratamento adequado para manter a qualidade do fluido, grandes tanques para armazenamento e descarte apropriado. Dependendo do fluido de corte, poderá gerar problemas de saúde nos operadores quando manuseados de maneira inadequada, como também pode causar danos ao meio ambiente. Além disso, os custos com fluido de corte representam cerca de 18% do custo total de produção nos processos de usinagem industriais (SANCHEZ et al., 2010; MALKIN; GUO, 2008; BIANCHI; AGUIAR, PIUBELI, 2004).

Devido à pressão dos órgãos ambientais e de normas que são responsáveis pela regulamentação do emprego e descarte de fluidos de corte, é grande a procura por técnicas que reduzam a quantidade de fluido de corte utilizada. Uma alternativa promissora, que tem apresentado bons resultados nos últimos anos, para reduzir o uso da técnica de aplicação de fluido de corte convencional é a técnica da Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL). Nesta técnica, uma pequena vazão de óleo (20 mL/h a 250 mL/h) misturada a ar comprimido é pulverizada na zona de corte, formando uma fina camada de fluido na interface rebolo-peça. Em geral, a combinação entre as propriedades lubrificantes do óleo e da refrigeração proporcionada pelo ar comprimido promove a redução do atrito entre os abrasivos do rebolo e a superfície da peça retificada, o que resulta em menores forças de corte e acabamento superficial superior (WALKER, 2013; TAWAKOLI et al., 2010; DHAR et al. 2006).

Além da seleção correta de uma técnica de aplicação de fluido de corte para um determinado par ferramenta-peça, é importante também se atentar para a seleção de parâmetros de corte adequados. E a atenção deve ser ainda mais especial quando o material da peça apresenta algumas peculiaridades, tais como afinidade química com o rebolo abrasivo e pobre condutividade térmica. Aliado a esta fato, está a crescente procura por componentes que exigem elevada qualidade superficial e tolerâncias dimensionais apertadas.

O Inconel 718 é uma liga a base níquel, com grande importância industrial, utilizada na fabricação de componentes do setor aeronáutico. Este material apresenta propriedades vantajosas e atraentes principalmente em temperaturas elevadas, como alta resistência mecânica, à corrosão, à fadiga e à fluência, justificando sua aplicação em componentes críticos, como motores aeronáuticos. Contudo, a manutenção da resistência mesmo em temperaturas elevadas, a baixa condutividade térmica e a afinidade química com a maioria dos materiais abrasivos utilizados para a confecção de rebolos, contribuem com o aumento da temperatura e concentração de calor na interface cavaco-ferramenta, tornando o processo de retificação do Inconel 718 mais complexo, podendo afetar a qualidade e a integridade da superfície retificada (EZUGWU, 2005; EZUGWU; WANG; MACHADO, 1999).

Neste sentido, este trabalho visou apresentar uma contribuição ao estudo da retificação plana tangencial do Inconel 718 com rebolo de carbeto de silício (SiC). Como variáveis de entrada foram testadas a espessura de corte equivalente e a técnica de aplicação de fluido de corte. As variáveis de saída foram a rugosidade e a integridade da superfície e sub-superfície das peças usinadas. Este trabalho foi dividido em cinco capítulos. Neste capítulo I foi apresentada a Introdução.

CAPÍTULO II – capítulo que é formado pela revisão bibliográfica realizada para contextualizar o tema deste trabalho e que engloba os seguintes tópicos: processo de retificação, rebolos e materiais abrasivos, mecanismo de retirada de material no processo de

retificação, principais parâmetros de corte da retificação plana tangencial, fluidos de corte e suas técnicas de aplicação no processo de retificação, qualidade da superfície e sub-superfície de peças retificadas, ligas de níquel e usinabilidade do Inconel 718.

CAPÍTULO III – neste capítulo são apresentados os materiais e equipamentos, como também as variáveis de entrada e de saída utilizadas neste trabalho, sendo eles: máquina-ferramenta, ferramenta de corte, material da peça, parâmetros de corte, fluidos de corte e técnicas de aplicação e os parâmetros de saída (rugosidade, imagens da superfície, microdureza e microestrutura). Além disso, é apresentado o planejamento experimental empregado para o desenvolvimento dos ensaios e monitoramento das variáveis de saída investigadas.

CAPÍTULO IV – neste capítulo são apresentados os resultados obtidos e as respectivas análises e discussões realizadas.

CAPÍTULO V – capítulo que contém as principais conclusões obtidas a partir dos resultados, como também as sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, são listadas as referências bibliográficas utilizadas para elaboração deste trabalho.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada a revisão bibliográfica elaborada para este trabalho, em que são abordados os seguintes tópicos: processo de retificação, rebolos e os seus principais abrasivos, principais parâmetros de corte da retificação, fluidos de corte e suas técnicas de aplicação, qualidade das peças retificadas (rugosidade superficial e integridade da superfície e sub-superfície), ligas de níquel e comentários sobre a usinabilidade do Inconel 718 (material de estudo deste trabalho).

2.1 Processo de retificação

A retificação é um processo de usinagem com ferramenta de geometria não definida que confere às peças usinadas tolerâncias dimensional e geométricas mais apertadas que aquelas proporcionadas pelos processos convencionais com ferramenta de geometria definida, como o fresamento, por exemplo. Neste processo, a remoção de material ocorre pelo contato entre a peça e uma ferramenta abrasiva (rebolo) que gira com elevada rotação e que resulta em velocidades de corte superiores a 30 m/s (MACHADO et al., 2011; MALKIN; GUO 2008).

O processo de retificação pode ser dividido em quatro tipos básicos, Marinescu et al. (2007) classificam-no em: retificação plana tangencial, retificação cilíndrica tangencial, retificação de superfície plana e retificação de superfície cilíndrica. Na Figura 2.1 é apresentado o esquema dos principais elementos básicos do processo de retificação plana tangencial: a máquina (retificadora), o rebolo abrasivo (ferramenta de corte), a cinemática, a peça e o fluido de corte.

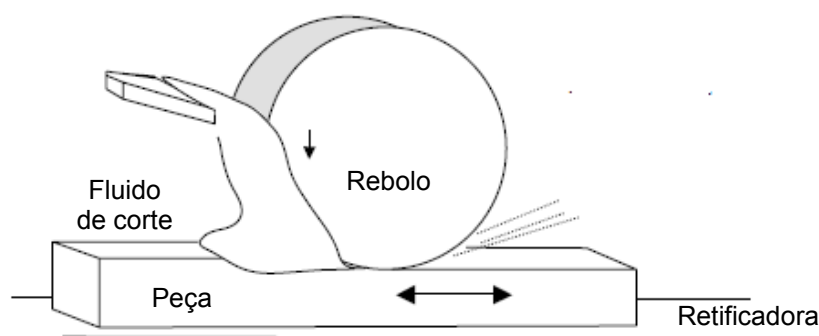


Figura 2.1 - Elementos básicos envolvidos no processo de retificação plana tangencial (adaptado de MARINESCU et al., 2007).

Muitos dos componentes usinados na indústria metal-mecânica necessitam de uma etapa de acabamento a fim de atingir as tolerâncias geométricas e dimensional mais apertadas. Dentre os processos de usinagem convencionais disponíveis, a retificação é uma das opções. Assim, de maneira geral, a retificação pode ser classificada como um processo de acabamento, possibilitando a obtenção de tolerâncias dimensionais estreitas (qualidades de trabalho IT6-IT3) e de baixas rugosidades (entre $0,2 \mu\text{m}$ e $1,6 \mu\text{m}$) (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2010; MACHADO et al., 2011). Além disso, é um processo recomendado para usinagem de materiais de elevada dureza, como aços endurecidos, aços rápidos e metal duro.

2.1.1 Rebolos e Materiais abrasivos

O rebolo é a ferramenta de corte empregada no processo de retificação e consiste em partículas abrasivas com arestas de corte de geometria irregular e não definida ligados por um ligante e por poros entre os abrasivos (Fig. 2.2). Esses abrasivos são partículas não metálicas, de elevada dureza a quente e são responsáveis pela remoção de material da superfície da peça (ROWE, 2014).

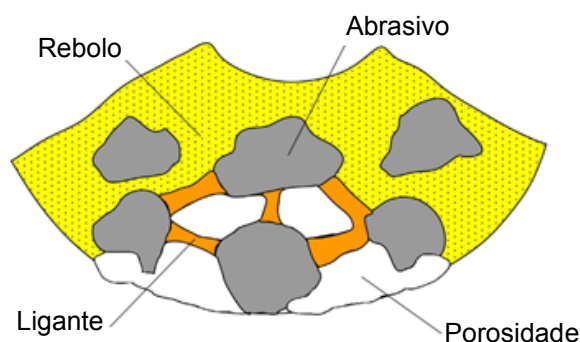


Figura 2.2 - Estrutura de um rebolo abrasivo (adaptado de WANG et al., 2016).

O desempenho dos rebolos no processo de retificação depende dos principais elementos que o compõem: material do abrasivo, tamanho do abrasivo, material do ligante, dureza, estrutura do rebolo e das propriedades do material abrasivo (MALKIN; GUO, 2008):

Para remover material da superfície retificada, Klocke (2009) pontua algumas exigências que devem ser atendidas pelo material de um abrasivo, sendo elas:

- I. Grau de dureza a quente suficientemente elevado para garantir e facilitar a formação do cavaco e manter a aresta de corte afiada por um considerável período de tempo;
- II. Boa resistência térmica a fim de que o abrasivo suporte as elevadas temperaturas do processo, bem como suas grandes taxas de variação;
- III. Resistência química para inibir possíveis reações químicas devido as altas pressões e temperaturas do processo quando em contato com o ar, fluido de corte ou superfície da peça.

Os abrasivos comumente empregados no processo de retificação podem ser classificados em abrasivos convencionais, como o óxido de alumínio (Al_2O_3) e o carbetto de silício ou carboneto de silício (SiC), e superabrasivos, como o nitreto de boro cúbico (CBN) e diamante sintético ou natural (KLOCKE, 2009). Na Tabela 2.1 é apresentada a classificação mais empregada para os rebolos abrasivos convencionais.

Tabela 2.1 - Especificações padrões para rebolos abrasivos convencionais (adaptada de MARINESCU et al., 2004).

ABRASIVO	GRANULOMETRIA MESH		DUREZA	ESTRUTURA	LIGANTE
A – Óxido de Alumínio	Grosso 10,12 14,16 20,24	Médio 30,36 46,54 60	Mole: A-I	Fechada para aberta: 1 – 15	V – vitrificado
					B – resinóide
			Média: J-P		BF – resinóide reforçado
					C – Carbetto de Silício
R – borracha					
Duro: Q-Z	RF – borracha reforçada				

O óxido de alumínio (Al_2O_3) é obtido por eletrofusão, precipitação química ou sinterização e pode ser considerado o abrasivo convencional mais utilizado nos processos de retificação. Ele pode ser classificado em Al_2O_3 comum (cinza), branco, rosa ou zirconado e é recomendado para a retificação de materiais com elevada resistência à tração, como os aços em geral, incluindo o aço-rápido (HSS) (MARINESCU et al., 2004).

O carbetto de silício (SiC) é um abrasivo convencional sintético produzido através da reação entre a sílica e o coque (carbono) e pode ser classificado em carbetto de silício verde (97-99% de pureza) e carbetto de silício preto (pureza inferior a 95%). Os abrasivos de SiC são recomendados, de maneira geral, para a retificação de materiais de baixa resistência a tração, por exemplo de ferros fundidos (com exceção da classe nodular), materiais não ferrosos, como as ligas a base de níquel, titânio, cobre e alumínio. Contudo, em processos onde a temperatura de corte excede 760°C , estes abrasivos podem reagir quimicamente com ligas ferrosas e a base de níquel (MARINESCU; et al., 2004).

O nitreto de boro cúbico (CBN) é um abrasivo sintético com dureza, resistência ao desgaste e condutividade térmica superiores aos abrasivos convencionais. Uma das suas principais vantagens consiste na maior estabilidade térmica na retificação de materiais ferrosos quando comparado ao diamante. Sua aplicação é recomendada para a retificação de ligas de aço, metal duro e cerâmicas (KLOCKE, 2009).

O diamante é um abrasivo que pode ser empregado na forma natural ou sintética de elevada dureza e que, em comparação aos abrasivos comuns, apresenta considerável condutividade térmica (KLOCKE, 2009). Os abrasivos de diamante são recomendados para a retificação de materiais não ferrosos e cerâmicos (MALKIN; GUO, 2008). Na Tabela 2.2 são apresentadas algumas propriedades dos principais materiais abrasivos empregados em rebolos.

Tabela 2.2 - Propriedades dos principais abrasivos (adaptado de MALKIN; GUO, 2008).

Material	Óxido de Alumínio (Al ₂ O ₃)	Carbeto de silício (SiC)	Nitreto de boro cúbico (CBN)	Diamante
Estrutura cristalina	Hexagonal	Hexagonal	Cúbica	Cúbica
Densidade (g/cm ³)	3,98	3,22	3,48	3,52
Ponto de fusão (°C)	2 040	~2 830	~3 200 a 10 500 MPa (ponto triplo)	3 700 a 13 000 MPa (ponto triplo)
Dureza Knoop (GPa)	20,6	23,5	46,1	78,5

Particularmente em relação à retificação de ligas de níquel com rebolos convencionais, a seguir serão apresentados os resultados de dois trabalhos que são utilizados como referências para esta investigação.

Liu; Chen; Gindy, (2007) avaliaram o desempenho de rebolos convencionais (Al₂O₃) e superabrasivos (CBN e diamante) na retificação das ligas de níquel CMSX4 e Inconel 738. Os autores utilizaram penetrações de trabalho entre 0,01 mm e 2,5 mm, velocidades de corte entre 30 mm/s e 55 mm/s e velocidades da peça dentro do intervalo entre 500 mm/min e 2 000 mm/min e concluíram que, a alta tenacidade e resistência das ligas a base de níquel representam o principal desafio na retificação destas. Além disso, eles relataram que os rebolos superabrasivos apresentam maiores valores para a relação G (quociente entre o volume de material removido da peça e o volume de material desgastado do rebolo), evidenciando que houve baixo consumo da camada superficial abrasiva do rebolo. Ainda segundo os autores, o emprego de rebolos convencionais, como o de Al₂O₃, pode ocasionar em temperaturas próximas a 1 000°C na superfície da peça, enquanto que, para rebolos superabrasivos, a temperatura mantém-se próxima a 600°C. Por fim, concluíram que o rebolo de diamante apresenta o melhor resultado na retificação das superligas de níquel citadas, proporcionando os menores valores de rugosidade superficial.

Huddedar et al. (2012) conduziram estudos sobre a retificação do Inconel 718 com rebolo de óxido de alumínio, avaliando, dentre outros, a influência do tamanho do abrasivo no processo. Os autores concluíram que o tamanho do abrasivo do rebolo exerceu forte influência na rugosidade superficial da peça, menores tamanhos de abrasivo proporcionaram

menores espessuras de cavaco e, conseqüentemente, menores valores do parâmetro de rugosidade R_a (desvio aritmético médio do perfil avaliado).

2.1.2 Mecanismo de remoção de material no processo de retificação

A formação do cavaco no processo de retificação ocorre de maneira diferente da observada na usinagem com ferramentas de corte de geometria definida, como mostrado na Fig. 2.3. Na retificação, as partículas abrasivas possuem ângulos de saída da aresta cortante predominantemente negativos e retiram apenas alguns micrometros de material da peça usinada (NEUGEBAUER et al., 2011). Além disso, cada um dos abrasivos que constituem um rebolo possuem arestas cortantes que se distribuem aleatoriamente e são responsáveis pela formação de um pequeno cavaco ao entrar em contato com a peça (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2010).

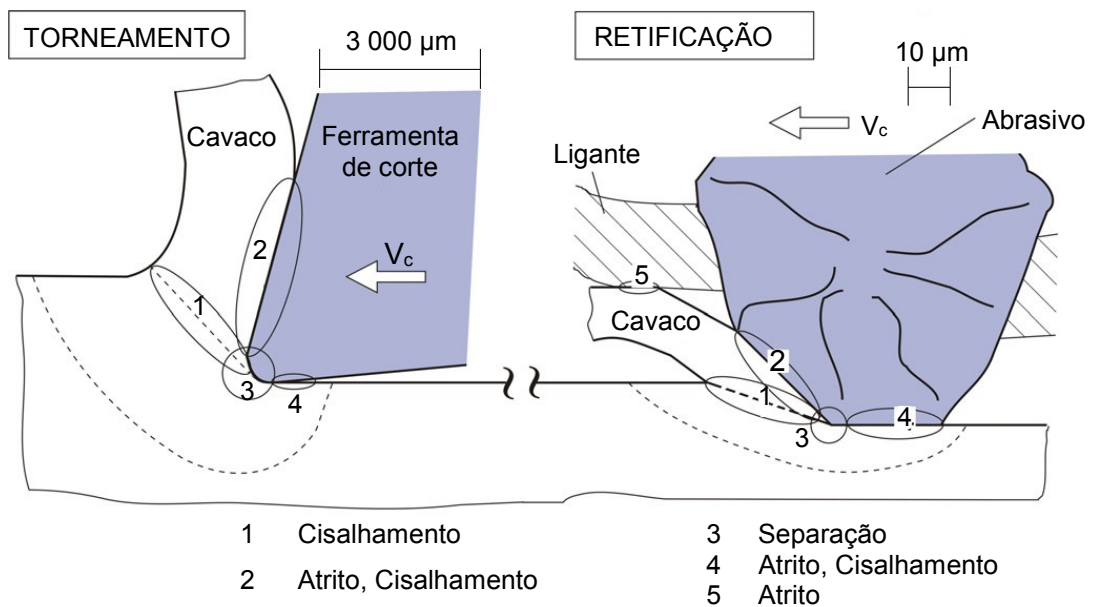


Figura 2.3 - Diferenças entre a formação do cavaco na usinagem com ferramentas de ângulos definidos e na usinagem por abrasão (adaptado de NEUGEBAUER et al., 2011).

Por se tratar de um processo de usinagem abrasivo, a abrasão é um fator determinante na retirada de cavaco na retificação. Marinescu et al. (2007) dividem a formação do cavaco na retificação em regime dúctil em três etapas, como representado na Fig. 2.4:

- I. Etapa I: inicialmente, no comprimento de contato entre o rebolo e a peça, o abrasivo sulca a superfície, ocasionando apenas deformação elástica (escorregamento da partícula abrasiva) (MARINESCU et al., 2007);
- II. Etapa II: ao prosseguir seu caminho o abrasivo penetra na peça aumentando as tensões compressivas e a espessura de cavaco não deformado, denominada h_{cu} ,

o material da peça é empurrado para laterais e frente do abrasivo. Assim, os abrasivos passam a causar deformação plástica de uma porção de material (riscamento). O riscamento representa a deformação plástica de material sem que ocorra a formação do cavaco, à medida que os abrasivos penetram mais na peça maior será a área de contato e, conseqüentemente, maior será o atrito gerado entre a área plana não cortante (desgastada) do abrasivo e a superfície da peça (MARINESCU et al., 2007). Machado et al. (2011) afirmam que esse atrito é prejudicial ao processo, pois a energia nele consumida é elevada e não é utilizada para a formação de cavaco.

- III. Etapa III: a aresta cortante da partícula abrasiva atinge um valor de profundidade de corte crítica (T_μ), então a tensão de ruptura do material localizado à frente do abrasivo é ultrapassada levando a ruptura de uma pequena quantidade de material iniciando o processo de formação do cavaco, onde a maior parte da energia passa a ser utilizada para cisalhar o material (MARINESCU et al., 2007).

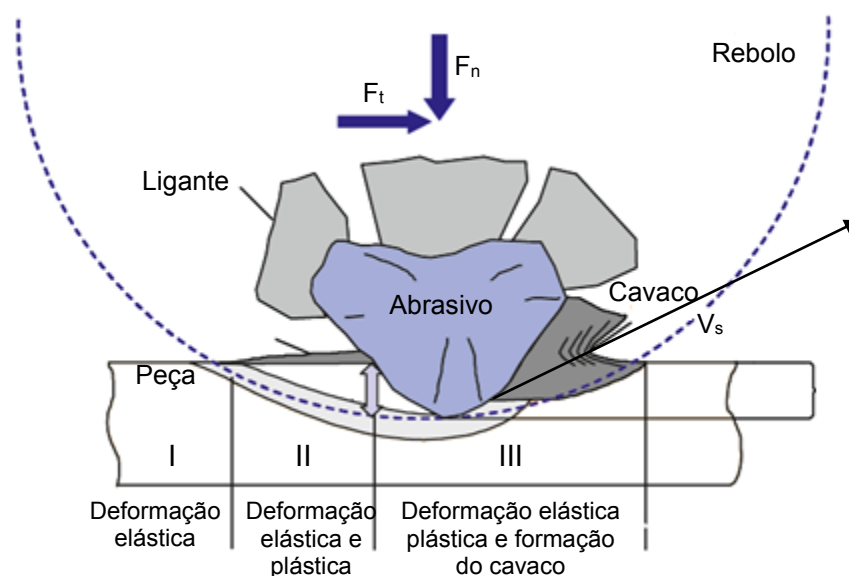


Figura 2.4 - Representação esquemática da formação das zonas elástica e plástica durante a formação do cavaco no processo de retificação (adaptado de KLOCKE, 2009).

2.1.3 Principais parâmetros de corte da retificação plana tangencial

Por ser um processo de acabamento, a retificação ocorre em peças que já passaram por outras etapas de fabricação, ou seja, tem alto valor agregado. Assim, faz-se necessário a escolha adequada dos parâmetros utilizados para que não haja nenhum tipo de dano na peça. Na Figura 2.5 são ilustrados os principais parâmetros de corte empregados no processo de retificação plana tangencial.

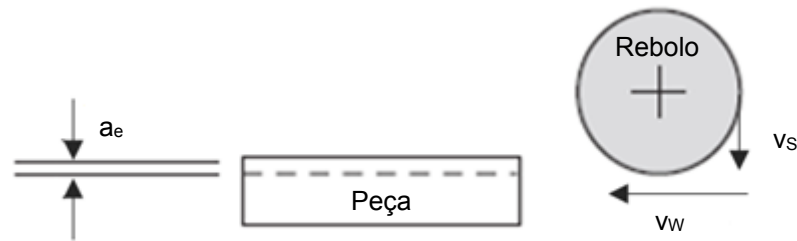


Figura 2.5 - Principais grandezas físicas do processo de retificação plana (adaptado de ROWE, 2014).

A seguir serão descritos os principais parâmetros de retificação:

- Penetração de trabalho (a_e): parâmetro que corresponde à espessura de material removido a cada passagem do rebolo sobre a peça. Ela é medida no plano de trabalho perpendicularmente a direção de avanço da peça (MACHADO et al., 2011; MARINESCU et al., 2007);
- Profundidade de corte (a_p): também conhecida como profundidade de usinagem, representa o quanto o rebolo penetra axialmente na peça, é medida perpendicularmente ao plano de trabalho e pode ser definida como a largura de penetração do rebolo na peça (MACHADO et al., 2011);
- Velocidade de corte (v_s): corresponde à derivada do deslocamento de uma partícula abrasiva na superfície do rebolo em um determinado espaço de tempo. Machado et al. (2001) afirmam que essa velocidade pode variar em um intervalo de 10 m/s a 45 m/s para rebolos constituídos de abrasivos convencionais e entre 90 m/s e 200 m/s para rebolos superabrasivos;
- Velocidade da peça (v_w): parâmetro que influencia bastante no acabamento. No processo de retificação plana, a velocidade da peça é equivalente a velocidade de deslocamento longitudinal da mesa (MARINESCU et al., 2007).
- Espessura de corte equivalente (h_{eq}): este parâmetro é dependente de outros parâmetros de corte (penetração de trabalho, velocidade da peça e velocidade de corte). Ele representa a espessura de material removido pelos abrasivos do rebolo e pode ser calculado pela Eq.(2.1):

$$h_{eq} = v_w \frac{a_e}{v_s} \quad (2.1)$$

A espessura de corte equivalente é diretamente proporcional à penetração de trabalho e, de maneira geral, com o aumento do h_{eq} há o aumento da rugosidade da peça (MARINESCU et al., 2007).

2.2 Fluidos de corte

O atrito resultante entre os abrasivos e a superfície retificada associada a deformação plástica, devido a produção de cavaco, implicam no aumento da geração de calor e consequente aumento da temperatura no contato entre o rebolo e a peça. Com isso, dependendo do gradiente térmico, como também dos materiais da peça e do rebolo, a peça poderá estar sujeita a problemas que causarão danos a sua integridade, por exemplo, alteração da microestrutura, perda de dureza etc. Minimizar estes danos tem sido um dos principais desafios no processo de retificação (MACHADO et al., 2011). Diniz; Marcondes; Coppini (2010) estimam que durante o processo de retificação, aproximadamente 85% do calor gerado é conduzido para a peça, 10% para o rebolo e apenas 5% para o cavaco.

Os principais problemas decorrentes do excesso de calor na peça retificada são: alterações microestruturais na superfície da peça (como a queima, mudança de fase, precipitação de carbonetos, alongamento de grãos, refinamento de grãos), alterações na superfície e sub-superfície, tensões residuais de tração e o aparecimento de trincas (MALKIN; GUO, 2008). Neste sentido, torna-se imprescindível a utilização de fluidos de corte de maneira adequada e eficiente durante a retificação.

O fluido de corte no processo de retificação apresenta as seguintes funções (WALKER, 2013; KLOCKE, 2009):

- I. Lubrificação: proporcionada por fluidos de corte, em geral por fluidos que não são miscíveis em água, que promovem a redução do atrito entre o abrasivo e a peça, reduzindo o calor gerado na interface peça-rebolo e melhorando o acabamento superficial;
- II. Refrigeração: propriedade em geral dos fluidos de corte a base de água que são aplicados na zona de corte via técnica de aplicação convencional e que promovem o arrefecimento da zona de contato entre o rebolo e a peça, absorvendo e transportando o calor produzido. Com isso, evitam-se distorções e outros problemas relacionados com a temperatura na peça, atuando na manutenção da integridade da superfície;
- III. Limpeza do rebolo e da peça durante o processo e transporte de cavacos gerados;
- IV. Proporciona a proteção do equipamento e da peça, protegendo-os contra oxidações e reações químicas indesejadas;

Das funções citadas anteriormente, a função refrigeração é teoricamente aquela que deve prevalecer em processos de retificação devido à elevada geração de calor que ocorre quando são utilizados rebolos abrasivos convencionais. Stemmer (1995) enumera as seguintes vantagens para a utilização de fluido de corte na retificação de acordo com diferentes pontos de vista:

- I. Do rebolo: proporciona um aumento na sua eficiência e vida por evitar que o cavaco permaneça alojado no rebolo;
- II. Da peça: melhora a qualidade superficial, evitando trincas, oxidações e possíveis queimas do material da peça;
- III. Da produtividade: permitem a utilização de maiores velocidades de corte por diminuírem o atrito e, por consequência, a temperatura do processo. Maiores velocidades de corte resultam em maiores taxas de remoção de material da peça e menor valor de espessura de corte equivalente, contribuindo consequentemente para a obtenção de menores valores de rugosidade superficial e tolerâncias dimensionais mais estreitas reduzindo os custos do processo.

Os fluidos de corte são classificados em óleos, emulsões e soluções aquosas, como mostrado na Fig. 2.6.

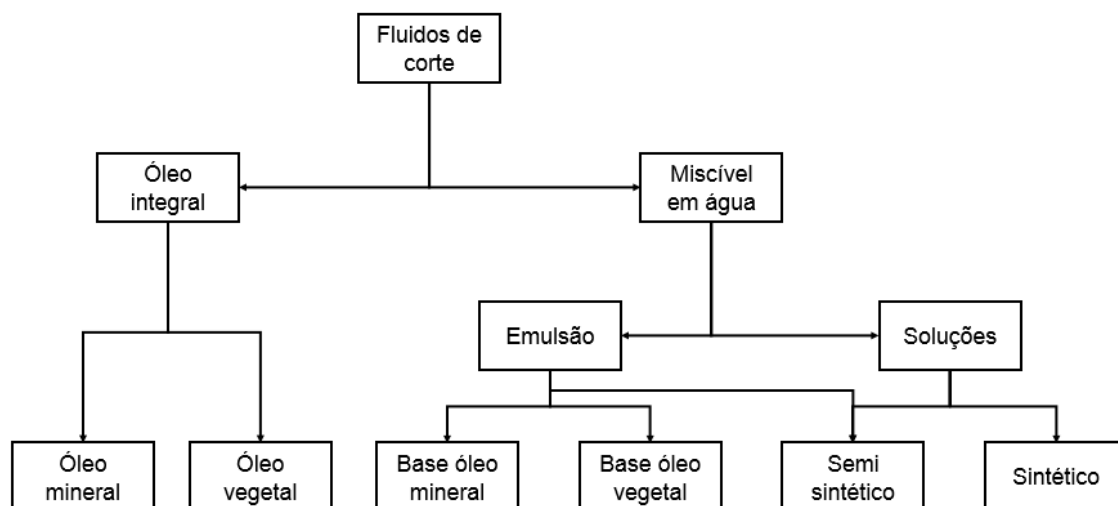


Figura 2.6 - Classificação dos fluidos de corte (adaptado de DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2010).

Machado et al. (2011) e Klocke (2009) apresentam as seguintes características principais para esses fluidos:

I. Óleos: devido a sua elevada viscosidade apresentam boas características lubrificantes e eficiência na redução do atrito e podem ser de base mineral ou vegetal. Porém, os óleos são pouco eficientes na remoção do calor da interface de contato entre o rebolo e a peça devido a sua baixa condutividade térmica. Seu uso é recomendado para aplicações onde os cavacos gerados são longos e para maiores áreas de contato entre o rebolo e a superfície retificada. São também os mais utilizados em operações com a técnica Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL);

II. Emulsões: são compostas por fluidos emulsionáveis, que são compostos de óleo mineral e água em proporções de 1:10 até 1:100 e um agente emulsificante, e por fluidos semissintéticos, que são emulsões que apresentam de 5 a 50% de óleo mineral em sua concentração. Devido à sua alta condutividade térmica, as emulsões apresentam boa capacidade de refrigeração. São os tipos de fluidos mais empregados em processos de retificação;

III. Soluções: as soluções são compostas por óleos completamente dissolvidos em água, dispensando a adição de emulsificantes, e apresentam menores reduções do atrito na interface rebolo-peça do que os fluidos emulsionáveis. As soluções mais completas apresentam agentes umectantes que colaboram com a melhoria das propriedades refrigerantes do fluido.

2.3 Técnicas de aplicação de fluido de corte no processo de retificação

A técnica de aplicação de fluido de corte mais comum no processo de retificação é denominada de convencional, jorro ou abundância e se caracteriza, principalmente, por empregar elevadas vazões de fluido a baixa pressão (geralmente próxima a pressão atmosférica) (MALKIN; GUO, 2008). Além de contribuir para o aumento da vida do rebolo e obtenção de um bom acabamento da superfície retificada, segundo Stemmer (1995), a técnica de aplicação convencional evita que os cavacos gerados e o pó abrasivo resultantes do processo provoquem desgastes dos componentes da retificadora. Contudo, Sanchez et al., (2010) alertam sobre os inconvenientes do uso da técnica convencional de aplicação de fluido de corte:

- I. As altas vazões de fluido, em geral acima de 50 L/min, requerem bombas com maiores potências para o bombeamento até a zona de corte. Além disso, devido às perdas por vazamentos e evaporação, reposições periódicas são realizadas ocasionando em aumento no custo do processo;

- II. Quando manuseados de modo inadequado, os fluidos de corte são responsáveis por problemas de saúde dos operadores, tais como dermatites, bronquites, alergias e até câncer, podendo levar à morte;
- III. Quando são descartados incorretamente e sem tratamento apropriado, os fluidos agredem o meio ambiente, sendo a contaminação de solos e rios os problemas mais frequentes.

Além disso, os custos com fluido de corte representam um valor significativo, como é mostrado na Fig. 2.7. Assim, é de extrema importância encontrar uma técnica de aplicação de fluido de corte que concilie a menor vazão possível e requisitos de projeto, por exemplo, a baixa rugosidade superficial. (BIANCHI; AGUIAR, PIUBELI, 2004). Nesse sentido a técnica da Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) tem se mostrado eficiente na redução do uso de fluidos de corte no processo de retificação.

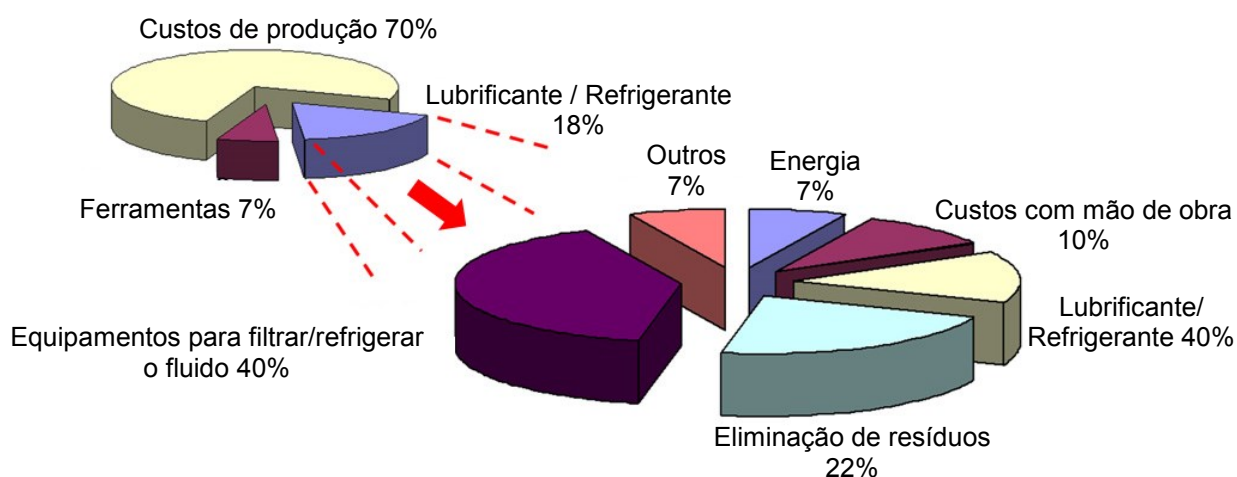


Figura 2.7 - Distribuição dos custos relativos ao uso de fluidos de corte nos processos de usinagem no meio industrial (adaptado de SANCHEZ et al., 2010).

A técnica da mínima quantidade de lubrificante visa sobretudo reduzir a quantidade de fluido de corte utilizada nos processos de usinagem. Nesta técnica, uma mistura de ar pressurizado e de uma pequena quantidade de fluido de corte é pulverizada na zona de corte, assim, de maneira ideal, apenas uma fina camada de fluido de corte cobre a superfície do rebolo antes do contato com a superfície da peça (MARINESCU et al., 2007). Na Figura 2.8 é ilustrado esquematicamente a técnica MQL aplicada em processo de retificação.

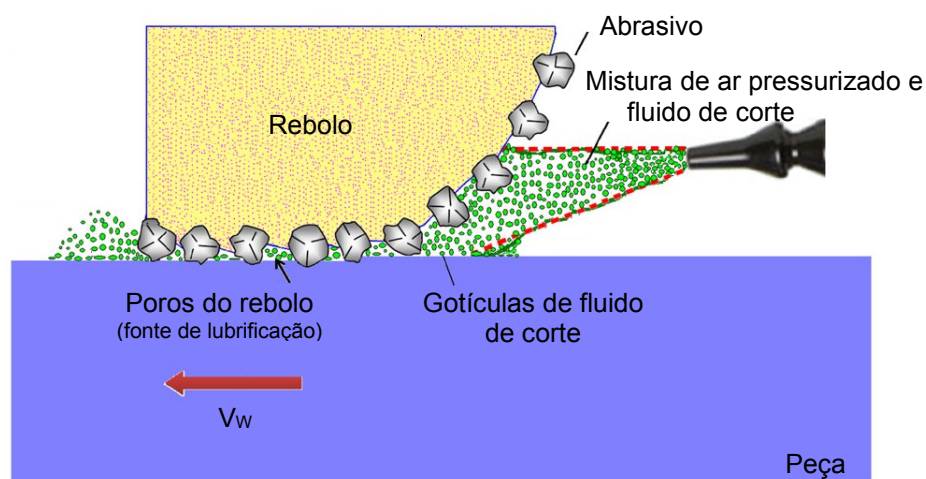


Figura 2.8 - Representação esquemática da técnica de aplicação de fluido de corte MQL (adaptado de TAWAKOLI et al., 2010).

O conceito de aplicação de fluido via técnica MQL refere-se ao emprego de vazões de fluido entre 20 mL/h e 250 mL/h, inferiores a técnica convencional, que utiliza vazões de fluido de 30 000 mL/h a 60 000 mL/h (DHAR et al., 2006). Na técnica MQL, o fluido de corte é transportado até a interface rebolo-peça através do ar comprimido a pressões que variam de 0,2 MPa a 0,7 MPa (MACHADO et al., 2011). A mistura ar comprimido-óleo empregada na técnica MQL pode apresentar alta capacidade lubrificante na interface rebolo-peça apesar de não apresentar elevada capacidade de refrigeração. A ação refrigerante da mistura é consequência do fluxo de ar comprimido utilizado. Já a ação lubrificante da mistura depende da penetração das gotículas de óleo na zona de contato entre o rebolo e a peça que ocorre, por exemplo, por meio dos poros do rebolo que atuam como uma fonte de lubrificação arrastando a mistura para a zona de corte (TAWAKOLI et al., 2010; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2010), como mostrado na Fig.2.8.

Dhar et al. (2006) ponderam sobre as vantagens da técnica MQL do ponto de vista econômico em relação a técnica convencional, uma vez que promove redução dos gastos com o custo de lubrificante e com água, além de diminuir o tempo ciclo de limpeza da peça/ferramenta/máquina. Além disso, a técnica MQL pode proporcionar a redução da potência e energia específica de retificação e possibilitar a visualização da peça retificada durante o processo, uma vez que a névoa formada por ar comprimido e óleo é aplicada na região de corte, não inundando o local da usinagem (OIKAWA et al., 2011).

Embora a técnica MQL apresente várias vantagens, ela também possui limitações no processo de retificação. Dentre elas, destacam-se (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2010):

- I. Poluição ambiental: em contrapartida à diminuição da vazão de fluido de corte produz partículas de óleo no ambiente que requerem cuidados especiais, como um sistema de exaustão e limpeza do ar e fechamento (enclausuramento) da máquina;
- II. Consumo: mesmo utilizando pequenas vazões de fluido, a aplicação via MQL pode ser considerada sem retorno, uma vez que ocorre a completa perda do fluido durante o processo. Além disso, é necessário equipar a máquina ferramenta com sistema de exaustão eficiente para evitar que a névoa formada seja dispersada no ambiente, como também exige o uso de abafadores de ruído ou protetores auriculares para os usuários e pessoas que estejam nas proximidades.

Apesar das limitações citadas anteriormente, a seguir serão apresentados alguns resultados promissores relatados na literatura específica que encorajam o desenvolvimento de pesquisas em retificação com o emprego da técnica MQL.

Benkai et al. (2016) analisaram as forças de corte, a temperatura e a relação entre energia e transferência de calor para a peça durante o processo de retificação da liga de níquel GH4169 utilizando sete diferentes óleos vegetais (milho, amendoim, palma, girassol, mamona, soja e colza) aplicados via técnica MQL e rebolo de óxido de alumínio. Os autores concluíram que os óleos mais viscosos atuaram como bons lubrificantes, assim, a viscosidade exerceu grande influência nas forças e temperaturas de retificação. Os autores relataram que o óleo vegetal mais viscoso proporcionou menores forças normal e tangencial durante a retificação por consequência do efeito lubrificante. No entanto, a maior viscosidade do óleo vegetal também minimizou a capacidade de dissipação de calor do mesmo, ocasionando em maiores temperaturas durante o processo de retificação.

Balan et al. (2016) recentemente conduziram estudos sobre a avaliação do desempenho de diferentes atmosferas lubri-refrigerantes durante a retificação do Inconel 751 com velocidade de corte de 8,60 m/s, 23,25 m/s e 47,10 m/s, velocidade da mesa de 0,4 m/min, 0,6 m/min e 0,9 m/min e penetração de trabalho de 10 μm , 20 μm e 30 μm . Eles avaliaram as forças normal e tangencial, a temperatura do processo, a rugosidade da superfície e a morfologia do cavaco obtidas após a retificação à seco, via técnica MQL convencional (com óleo e ar comprimido) e MQL com nitrogênio líquido. Ao fim do estudo, os autores concluíram que a retificabilidade do Inconel 751 foi melhorada com a aplicação de nitrogênio líquido, uma vez que a temperatura, as forças de corte e a rugosidade da superfície retificada obtidas foram inferiores quando comparadas ao MQL convencional. Além disso, eles constataram que a energia específica de retificação foi entre 50% a 65% menor ao empregar o nitrogênio líquido em comparação com a condição a seco.

Devido ao intenso calor gerado durante a retificação com os rebolos abrasivos convencionais a atmosfera lubrificadorrefrigerante desempenha a importante função de remover parte do calor que é dirigido para a peça durante o processo de retificação. Se as condições mínimas de lubrificação e refrigeração forem garantidas, maior será a vida do rebolo e menor será a rugosidade da superfície retificada (KLOCKE, 2009).

2.4 Qualidade da superfície e sub-superfície de peças retificadas

A qualidade de uma peça pode ser expressa por vários parâmetros, por exemplo a exatidão dimensional, forma e sua rugosidade superficial. A qualidade da superfície e sub-superfície de peças retificadas consiste na avaliação da sua integridade e rugosidade superficiais. A integridade da sub-superfície compreende alterações mecânicas e metalúrgicas como danos térmicos, alterações na dureza e microestrutura e tensões residuais. Já a textura superficial engloba o acabamento e consequentemente a rugosidade da superfície retificada (ROWE, 2014; MALKIN; GUO, 2008).

Machado et al. (2011) definem a rugosidade de uma superfície como a composição de irregularidades finas ou erros microgeométricos oriundos da ação típica do processo de corte, como marcas de avanço e desgaste da ferramenta de corte. A rugosidade pode ser medida através de vários parâmetros, sendo os principais (NBR ISO 4287):

- Desvio aritmético médio do perfil avaliado (R_a): média aritmética dos valores absolutos no comprimento de amostragem;
- Desvio médio quadrático do perfil avaliado (R_q): raiz quadrada da média dos valores das ordenadas no comprimento de amostragem;
- Altura máxima do perfil (R_z): soma da máxima altura dos picos e maior profundidade dos vales do perfil, no comprimento de amostragem;
- Altura total do perfil (R_t): soma das maiores alturas de pico do perfil e das maiores profundidades dos vales do perfil no comprimento de amostragem;
- Fator de assimetria do perfil avaliado ou *skewness* (R_{sk}): quociente entre o valor médio dos valores das ordenadas e o valor R_q ao cubo, respectivamente, no comprimento de amostragem;
- Fator de achatamento do perfil avaliado ou *kurtosis* (R_{ku}): quociente entre o valor médio dos valores das ordenadas à quarta potência e o valor R_q à quarta potência, respectivamente, no comprimento de amostragem.

Quando se trata de processos de retificação, o primeiro parâmetro para avaliar uma peça refere-se à rugosidade da superfície. Segundo Marinescu et al. (2004) são vários os fatores que podem alterar a rugosidade de uma superfície após o processo de retificação, sendo eles: o espaçamento irregular dos abrasivos, profundidades distintas dos abrasivos, efeito da operação de dressagem do rebolo na densidades dos abrasivos, efeito do desgaste do rebolo na densidade dos abrasivos do rebolo, efeito da deflexão dos abrasivos, efeito do faiscamento do rebolo (*spark out*) e adesão entre a peça e os abrasivos do rebolo.

O processo de retificação requer um gasto energético por unidade de material removido elevado. Teoricamente, toda essa energia é convertida em calor e acumulada na zona de corte. O calor causa aumento de temperatura e, dependendo do gradiente, poderá acarretar danos de origem térmica na peça retificada, tais como queima, alteração metalúrgica, tensão residual de tração e trincas (MALKIN; GUO, 2008).

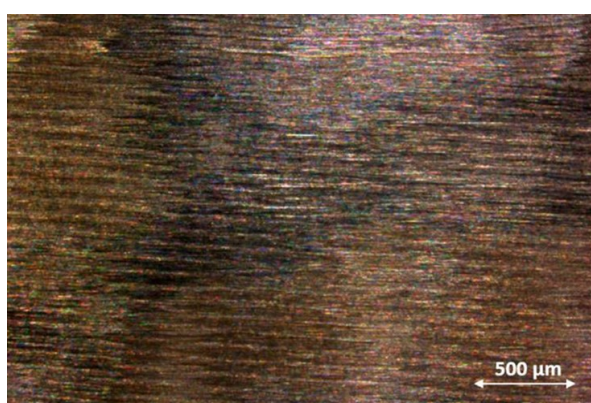
A queima da superfície retificada consiste na formação de camadas de óxido na superfície da peça e é considerada um dos tipos mais comuns de dano térmico, podendo ser observada em diversos materiais metálicos. Essa oxidação ocorre por consequência do aumento da temperatura na presença de oxigênio durante o processo de retificação e causa alterações na sub-superfície e microestrutura da peça. A queima de retificação se apresenta visualmente (mas não exclusivamente) com a mudança da cor do material, em peças de aço, por exemplo, a queima da superfície é caracterizada por marcas de coloração azul escuro (MALKIN; GUO, 2008; MARINESCU et al., 2004).

O processo de retificação pode induzir tensões residuais nas proximidades da superfície retificada, alterando o comportamento mecânico do material. Essas tensões são provenientes de deformações plásticas não uniformes próximas à superfície da peça. As tensões residuais de tração são causadas, principalmente, por deformações decorrentes das altas temperaturas desenvolvidas durante a usinagem. Na zona de corte, a dilatação térmica do material próximo da superfície é limitada pelo material da sub-superfície, resultando em tensões trativas. O emprego de condições mais severas de retificação, como por exemplo a diminuição da refrigeração, em materiais como aços e ligas aeroespaciais de alta resistência podem causar tensões residuais de tração maiores, implicando na redução da resistência e possíveis trincas perpendiculares à superfície retificada (MALKIN; GUO, 2008; MARINESCU et al., 2004).

Osterle e Li (1997) analisaram as respostas térmica e mecânica do Inconel 738 após o processo de retificação *creep feed* (processo que envolve elevadas penetrações de trabalho combinadas com baixas velocidades de avanço) com rebolo convencional de óxido de alumínio e concluíram que o sistema de refrigeração exerce grande influência no processo. Segundo os autores, se este sistema for ineficiente no sentido de remover calor, poderá,

principalmente, levar a formação de camadas brancas (camadas de óxido formadas próximas à superfície e que podem reduzir a vida útil da peça), tensões residuais trativas a poucos micrometros da superfície, como também à formação de microtrincas na superfície usinada, e assim podendo comprometer a funcionalidade da peça. Um outro resultado importante encontrado pelos autores está relacionado ao fato do Inconel 738 manter boa resistência mecânica até, aproximadamente, 1 200°C.

Em outro trabalho recente, Sinha et al., (2016) investigaram a queima superficial na retificação do Inconel 718 com rebolos convencionais de carvão de silício e óxido de alumínio sem aplicação de fluido de corte. Eles analisaram a microdureza, rugosidade da superfície, forças de corte e monitoraram a qualidade superficial da peça para detectar a ocorrência ou não de queima de retifica. A principal conclusão, segundo os autores, é que o rebolo de Al_2O_3 mostrou-se mais eficiente na retificação do Inconel 718, fato evidenciado pela ausência de marcas de queima superficial de aspecto visual nas amostras retificadas com este rebolo. As amostras com queima superficial apresentaram valores de dureza menores do que aquelas sem queima, o que os autores atribuíram à formação de camadas de óxido e amolecimento do material nas proximidades da superfície por consequência do aumento da temperatura. Além disso, a variação da rugosidade da superfície das amostras com queima de retificação superficial foi relativamente maior do que a das amostras em que não houve queima. Tal variação pode ser induzida pelo maior atrito entre a superfície da peça e o rebolo causado pelo desgaste dos abrasivos de SiC. Na Figura 2.9 são mostradas as imagens das amostras de Inconel 718 retificadas com rebolo de SiC (Fig. 2.9 a) e de Al_2O_3 , (Fig. 2.9 b).



a) Superfície com queima de aspecto visual de retificação



b) Superfície sem queima de aspecto visual de retificação

Figura 2.9 - Micrografias da superfície do Inconel 718 com escala das imagens igual a 500 µm (SINHA et al., 2016).

2.5 Ligas de níquel

As ligas a base de níquel, quando submetidas a temperaturas elevadas, apresentam propriedades mecânicas e químicas atrativas, sendo elas: resistência mecânica, alto ponto de fusão, resistências a corrosão, fadiga, fluência, erosão e resistência a choques mecânicos e térmicos (THAKUR; GANGOPADHYAY, 2016). Estas propriedades são as principais responsáveis pela sua extensa aplicação industrial, principalmente para a fabricação de componentes da indústria aeroespacial, como mostrado na Fig. 2.10.

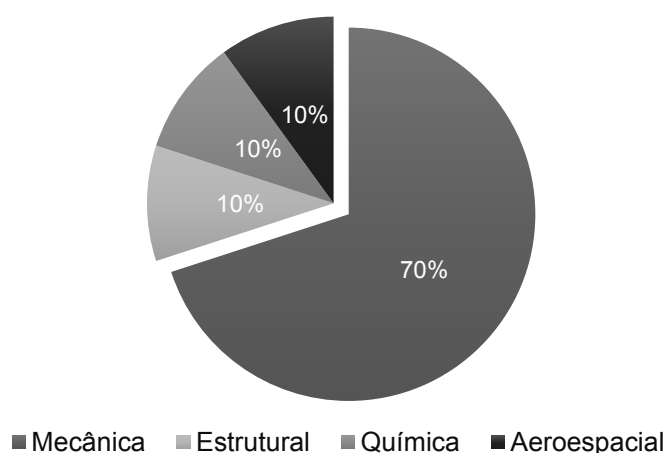


Figura 2.10 - Distribuição percentual do consumo industrial de superligas de níquel (adaptado de EZUGWU, 2005).

As ligas a base de níquel são caracterizadas e reforçadas por elementos de liga com o intuito de melhorar a sua microestrutura ou fase, e dentre eles o destaque é para o cromo, cobalto, alumínio e titânio em quantidades significativas na sua composição. Algumas superligas, como o Inconel 706 e o Inconel 718, apresentam porcentagens significativas de ferro, e por isso são comumente referidas como superligas de níquel-ferro (REED, 2006; EZUGWU; WANG; MACHADO, 1999).

A microestrutura de uma superliga de níquel é composta por diferentes fases, sendo elas (REED, 2006):

- I. Matriz da liga (γ): a matriz contínua das ligas de níquel possui uma estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC) de fase austenítica e geralmente apresenta uma porcentagem considerável de elementos de liga em solução sólida, como o tungstênio, o cromo, o molibdênio e o cobalto;
- II. Fase gama linha (γ'): é formada por precipitados coerentes com a matriz austenítica e é rica em elementos como o alumínio, o titânio e o tântalo. Em superligas de

níquel-ferro, como o Inconel 718, e que contém quantidades significativas de nióbio, o precipitado primário de reforço não é mais a fase γ' e sim a fase γ'' que possui estrutura tetragonal de corpo centrado (TCC). As excelentes propriedades mantidas às altas temperaturas do Inconel 718 devem-se as tensões de coerência e ao número limitado de planos de escorregamento presentes na fase γ'' .

- III. Carbonetos: carbono é adicionado entre 0,05% e 0,2% de modo a reagir com outros elementos, formando precipitados primários do tipo M_xC_y . Durante o tratamento térmico ou processamento da liga, os precipitados M_xC_y podem se decompor em outros carbonetos, como o $M_{23}C_6$ e M_6C , que se precipitam nos contornos de grãos e são ricos em cromo, molibdênio e tungstênio.

O Inconel 718 é uma liga a base de níquel que possui matriz austenítica endurecida por precipitação (fase γ) e precipitados coerentes com a matriz (fase γ''). Além disso, apresenta estruturas do tipo Laves, que são correntes de precipitados e maclas definidas.

As estruturas denominadas Laves são aquelas do tipo corrente formadas por precipitados. O contorno de grão caracterizado pela existência de uma simetria em forma de espelho da rede cristalina é denominado contorno de macla. Neste tipo de contorno é observado que os átomos que se localizam em um dos lados do contorno possuem átomos em espelho localizados do outro lado do mesmo contorno. Assim, uma macla pode ser definida como a região de material entre estes contornos que apresentam átomos espelhados. De um modo geral, as maclas são caracterizadas por regiões que possuem lados relativamente retos e paralelos e com um contraste visual distinto do contraste visto nas regiões que não possuem macla (CALLISTER, 2012; ASM, 1972).

Algumas das principais propriedades características das ligas de níquel, como a alta resistência em temperaturas elevadas e baixa condutividade térmica, representam um desafio durante a sua usinagem. No processo de retificação, por exemplo, as temperaturas elevadas na zona de contato entre o rebolo e peça podem levar a possíveis danos térmicos a superfície retificada (WENFENG et al., 2010).

Thakur; Gangopadhyay (2016) publicaram uma série de resultados compilados a respeito da integridade superficial de superligas de níquel após vários processos de usinagem. A principal conclusão apresentada é que os defeitos superficiais observados na usinagem de superligas de níquel incluem deformações do grão, microtrincas, marcas de avanço, têmpera superficial e presença de material aderido. De acordo com a observação dos autores, a maioria desses defeitos são resultados do uso de parâmetros de corte não adequados. Em processos de acabamento, como a retificação, a aplicação eficiente de fluidos de corte pode minimizar esses defeitos.

2.6 Usinabilidade do Inconel 718

Alta resistência mecânica, a corrosão e a fluência principalmente a altas temperaturas (acima de 700°C) são propriedades que tornam o Inconel 718 um dos principais materiais para uso em aplicações do setor aeronáutico, como na fabricação de componentes de turbinas a gás e a vapor e componentes de motores aeronáuticos. (KADAM; PAWADE, 2017). Além disso, o Inconel 718 também mantém sua ductilidade e resistência à fadiga em uma ampla faixa de temperatura (entre aproximadamente -150°C e 700°C), justificando sua aplicação em tanques de armazenamento criogênico (SINHA et al., 2016). Na Tabela 2.3 são apresentadas a composição química, as principais propriedades mecânicas e detalhes da microestrutura do Inconel 718.

Tabela 2.3 - Detalhes da composição química, propriedades e microestrutura do Inconel 718.

Inconel 718	Composição Química (REED, 2006)		Principais propriedades qualitativas e microestrutura (THAKUR; GANGOPADHYAY, 2016)
	Elemento	% em massa	Elevada resistência mecânica, a oxidação e a corrosão. É uma liga endurecida por precipitação e possui em sua microestrutura carbonetos de nióbio (NbC), carbonetos de titânio (TiC) e fase endurecedora γ'' .
	Níquel	base	
	Cromo	19,00	
	Ferro	18,50	
	Nióbio	5,10	
	Molibdênio	3,00	
	Titânio	0,90	
	Alumínio	0,50	
	Carbono	0,04	

Mas estas mesmas propriedades que tornam o Inconel 718 atrativo para aplicações às quais os aços não são adequados, por outro lado, apresentam-se como desafios para a sua usinagem com ferramentas de geometria definida e também com aquelas de geometria não definida, por exemplo, em operações de retificação. As principais causas são apresentadas a seguir (EZUGWU, 2005; EZUGWU; WANG; MACHADO, 1999):

- I. Grande parte da sua resistência é mantida durante o processo de usinagem devido a manutenção das suas propriedades mecânicas mesmo a altas temperaturas;

- II. É suscetível ao encruamento, semelhante aos aços inoxidáveis, devido a sua matriz austenítica, contribuindo com o desgaste e diminuindo a vida da ferramenta de corte;
- III. Apresenta afinidade química com a maioria dos materiais utilizados em ferramentas comerciais, possibilitando a ocorrência de desgaste por difusão na ferramenta;
- IV. Baixa condutividade térmica (cerca de $11 \text{ W/m}^\circ\text{C}$), proporcionando um aumento significativo da temperatura na interface ferramenta-peça;
- V. A presença de carbonetos de elevada dureza na sua microestrutura tendem a causar desgaste abrasivo nas ferramentas de corte utilizadas, afetando a qualidade da superfície usinada.

O Inconel 718 possui pobre usinabilidade em relação aos outros materiais como aços baixo carbono e inoxidáveis, por exemplo, ele é cerca de 75% pior de ser usinado do que o aço inoxidável.

E comentando mais especificamente sobre processo de retificação, o desafio em usinar o Inconel 718 é ainda maior quando se trata de rebolos abrasivos convencionais, pois estes apresentam pobre condutividade térmica. Marinescu et al. 2007 relembram que, dependendo da quantidade de calor que é gerada durante o processo de retificação e que é transferida para a peça, esta poderá apresentar alguns problemas como pobre acabamento e aqueles conhecidos como de origem térmica (trincas e microtrincas, alterações metalúrgicas, camadas afetadas termicamente e queima de retífica) que podem levar a prejuízos econômicos. Portanto, se o rebolo apresenta pobre condutividade térmica, maior será quantidade de calor a ser direcionada para a peça, o que pode agravar ainda mais a qualidade da peça.

Tso (1995) avaliou o processo de retificação do Inconel 718 com rebolos convencionais (óxido de alumínio e carbetto de silício verde) e superabrasivos (CBN) em diferentes condições de corte. O autor relatou que os valores de rugosidade da superfície retificada aumentaram quando foram empregadas menores velocidade de corte e maiores velocidade da mesa e penetração de trabalho. Além disso, o autor concluiu que o rebolo de CBN mostrou-se mais adequado para a retificação do Inconel 718, obtendo menores valores de rugosidade da superfície e forças de retificação e maior precisão dimensional.

Outro estudo sobre a retificação do Inconel 718 foi conduzido por Yao et al. (2013) que avaliaram a integridade superfície da liga após a retificação empregando rebolos de óxido de alumínio e CBN e diferentes condições de corte. Eles concluíram que o rebolo de Al_2O_3 foi o mais apropriado para a retificação do Inconel 718 por ter proporcionado os menores valores

de rugosidade, tensões residuais e não alteração na microdureza da peça. Além disso, os autores relataram que as imagens das superfícies retificadas com rebolo de CBN apresentaram marcas interrompidas pela passagem dos abrasivos, riscos e, em algumas condições de corte, microtrincas de retificação, enquanto que as imagens das superfícies retificadas com rebolo de Al_2O_3 mostraram uma superfície mais homogênea com marcas características do processo de retificação.

CAPÍTULO III

MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentadas a máquina-ferramenta, ferramenta e o material da peça utilizados nos ensaios de retificação, bem como as condições de corte empregadas. Além disso, são detalhados os parâmetros de saída analisados e o procedimento experimental utilizado para o desenvolvimento deste trabalho. Na Figura 3.1 é apresentado o fluxograma com as etapas desenvolvidas durante condução dos ensaios de retificação.

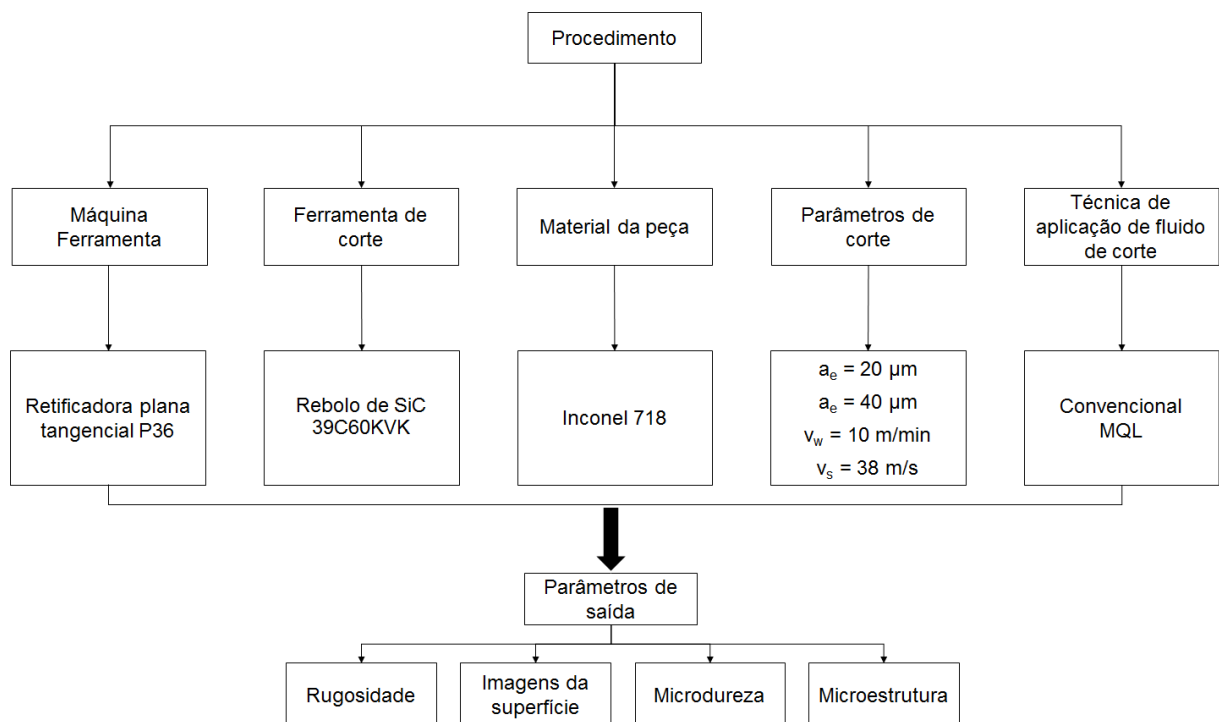


Figura 3.1 - Fluxograma com as etapas do procedimento experimental deste trabalho.

3.1 Equipamentos e materiais

Nesta sessão são apresentados os detalhes dos equipamentos e materiais empregados para a realização dos ensaios de retificação.

3.1.1 Máquina Ferramenta

A máquina-ferramenta utilizada nos ensaios foi uma retificadora plana tangencial, modelo P 36, semiautomática, do fabricante Mello S.A Máquinas e Equipamentos. Ela possui resolução no anel graduado da manivela para o deslocamento radial do rebolo, eixo Z, igual a 5 μm , rotação constante igual a 2 400 rpm, potência nominal do motor de 2,5 kW, e está localizada no Laboratório de Usinagem Convencional (LUC) da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

3.1.2 Ferramenta de corte

Nos ensaios de retificação foi utilizado um rebolo do tipo reto, de carbetto de silício (SiC), com especificação 39C60KVK, dimensões de 305 mm por 25 mm por 76 mm (diâmetro externo x espessura x diâmetro interno), com granulometria mesh 60, ligante vitrificado, do fabricante Norton-Saint Gobain Abrasivos, mostrado na Fig. 3.2.



Figura 3.2 - Rebolo de SiC 39C60KVK com flange de fixação e contrapesos de balanceamento utilizado nos ensaios.

3.1.3 Material da Peça

Como material de estudo deste trabalho foi escolhida a superliga de níquel Inconel 718, na forma envelhecida, com dimensões de 20 mm de comprimento por 15 mm de altura por 15 mm de largura, sendo a face de 20 mm por 15 mm a utilizada durante os ensaios de

retificação. Na Tabela 3.1 são apresentadas as propriedades mecânicas do Inconel 718 fornecidas pela Villares Metals.

Tabela 3.1 - Principais propriedades mecânicas do Inconel 718 envelhecido (Villares Metals).

Limite de escoamento (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)	Dureza média (HRc)
1 070	1 262	49

Todos os corpos de prova foram preparados antes dos ensaios de retificação. Na sequência foram utilizadas uma serra fita semiautomática Franho, modelo FM 20 e fresadora CNC ROMI, modelo Interact 4, 22 CV, 60 Hz, com rotação máxima do eixo árvore de 4 000 rpm. Para tal, foram utilizados sete insertos de metal duro revestidos com nitreto de titânio (TiN) do fabricante SANDVIK Coromant montados em uma fresa de 125 mm de diâmetro. Nos ensaios foram utilizados: rotação de 250 rpm, velocidade de corte de 98 m/min e profundidade de corte de 3 mm para desbaste e de 1 mm para acabamento.

Para finalizar a preparação, a fim de reduzir possíveis desvios de planeza nas superfícies das amostras a serem retificadas, todas as amostras foram retificadas na mesma retificadora e com o mesmo rebolo dos ensaios definitivos. Contudo foram empregadas condições de corte mais brandas (penetração de trabalho igual a 10 μm). Devido as características não ferromagnéticas do Inconel 718, tanto na etapa de preparação quanto de ensaios definitivos de retificação foi utilizada uma morsa de precisão para fixar as amostras na mesa ferromagnética da retificadora.

Antes dos ensaios de retificação, uma amostra foi selecionada para caracterização e análise microestrutural a fim de permitir comparações com aquelas obtidas após a usinagem. A composição química, apresentada na Tab. 3.2, foi avaliada utilizando um microscópio eletrônico de varredura (MEV) TM 3000, pertencente ao Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) da Faculdade de Engenharia Mecânica da UFU, por meio da técnica EDS (sistema de energia dispersiva) com tempo de aquisição de 29,7 s, tempo de processamento de 5 s e tensão elétrica de aceleração de 15 kV.

Tabela 3.2 - Composição química do Inconel 718 determinada no MEV-EDS do LEPU.

Elemento	%em peso dos elementos
Carbono	5,588
Alumínio	0,497
Titânio	0,860
Cromo	16,899
Ferro	19,079
Níquel	49,000
Nióbio	4,582
Molibdênio	3,495

A superfície da amostra preparada de Inconel 718 foi avaliada via microscopia eletrônica utilizando um MEV, Fig. 3.3, com ampliação de 1 000 vezes para posteriores comparações com as superfícies obtidas após os ensaios de retificação.

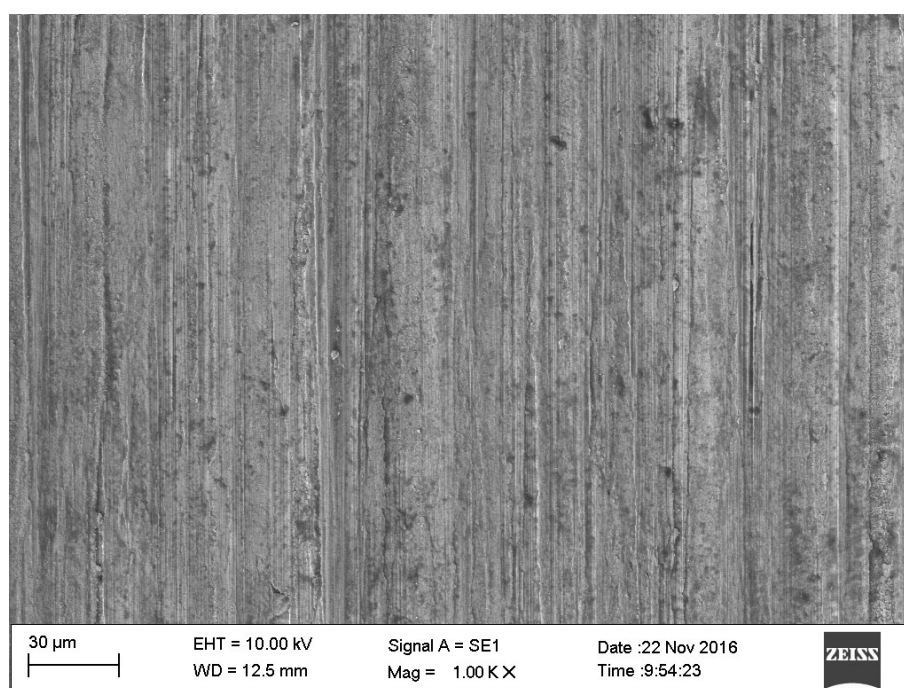
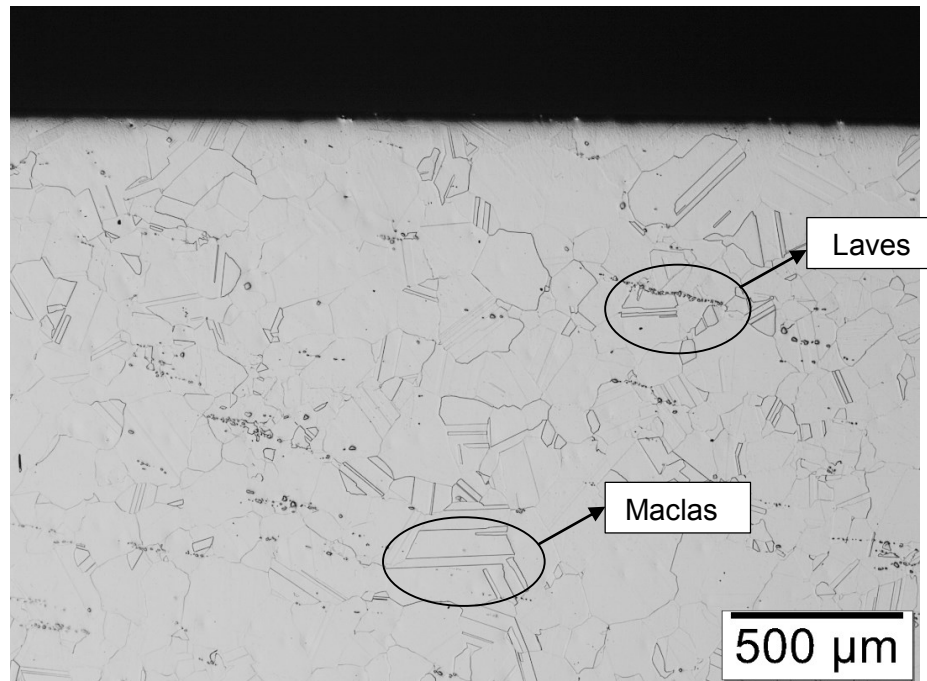
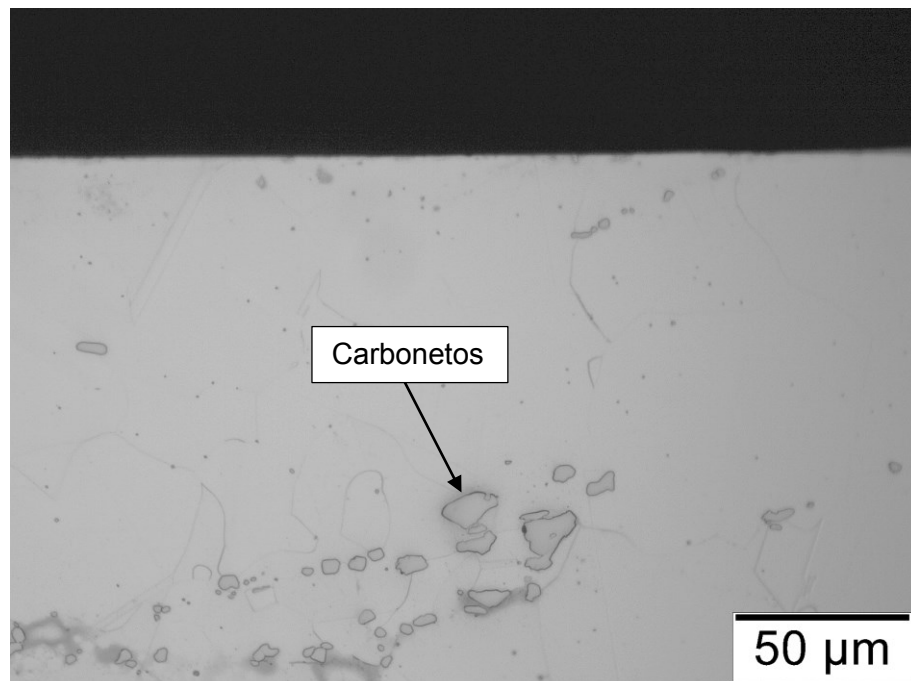


Figura 3.3 - Superfície da amostra de Inconel 718 após a preparação.

Em seguida, a amostra foi lixada, polida e atacada quimicamente para análise da sua microestrutura. O Inconel 718 possui matriz austenítica endurecida por precipitação (fase γ) e precipitados coerentes com a matriz (fase γ''). Além disso, o material apresentou estruturas do tipo Laves, que são correntes de precipitados, maclas definidas, mostradas na Fig. 3.4a e carbonetos, mostrados na Fig. 3.4b.



a) Estruturas de maclas e laves.



b) Carbonetos presentes na microestrutura do Inconel 718

Figura 3.4 - Microestrutura do Inconel 718 após ataque químico

3.2 Parâmetros de corte

Os parâmetros de corte empregados nos ensaios de retificação do Inconel 718 são apresentados na Tab. 3.3.

Tabela 3.3 - Variáveis de entrada utilizadas no processo de retificação do Inconel 718.

Parâmetro	Valor/unidade	
Velocidade de corte (v_s)	38 m/s	
Velocidade da peça (v_w)	10 m/min	
Penetração de trabalho (a_e)	20 μm	
	40 μm	
Espessura de corte equivalente (h_{eq})	0,09 μm	
	0,18 μm	
Profundidade de corte (a_p)	15 mm	
Fluido de corte	Semissintético de base vegetal – Vasco 7 000	
Técnica de aplicação de fluido de corte	Convencional Vazão: 522 000 mL/h Diluição: 1:9	MQL Vazão: 240 mL/h Sem adição de água
Grau de recobrimento do rebolo (U_d)	3	
Profundidade de dressagem (a_d)	10 μm	

Antes de cada ensaio de retificação foi realizada a dressagem do rebolo com o auxílio de um dressador de ponta única de diamante sintético, do fabricante WINTER, com raio de ponta de 0,3 mm. A dressagem do rebolo foi realizada utilizando a técnica de aplicação de fluido de corte convencional e foi adotado grau de recobrimento do rebolo (U_d) igual a 3.

O critério de parada dos testes adotado foi um ciclo de retificação, Fig. 3.5, com valores de penetração de trabalho, 20 μm e 40 μm . Assim, para os valores de penetração de trabalho de 20 μm e 40 μm , os valores de volume de material removido teóricos resultaram em 6 mm³ e 12 mm³, respectivamente.

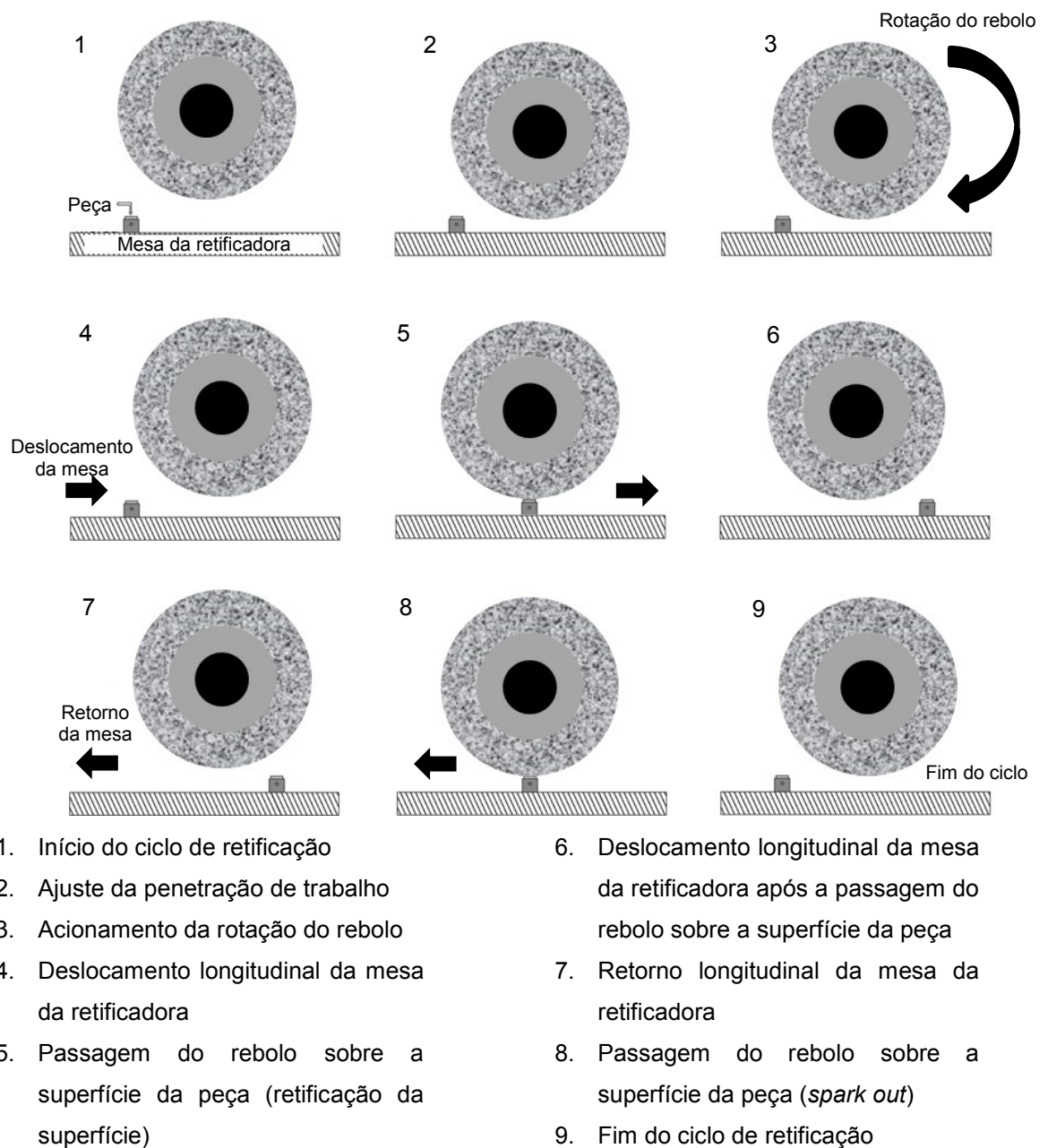


Figura 3.5 - Representação de um ciclo de retificação.

3.3 Fluido de corte e técnicas de aplicação.

Foram utilizadas duas técnicas de aplicação de fluido de corte: a técnica convencional e a técnica da Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL). O fluido de corte empregado em ambas as técnicas foi o fluido semissintético de base vegetal Vasco 7 000, da fabricante Blasser Swisslube. Este fluido é recomendado para a usinagem de materiais ferrosos e não ferrosos.

Para a técnica convencional foi utilizada uma emulsão (óleo em água) com concentração de 1:9 (Fig. 3.6a), a uma vazão de 522 L/h (522 000 mL/h) e pressão de descarga aproximadamente igual a atmosférica. Para a técnica MQL foi utilizada uma vazão de 240 mL/h de óleo (Fig. 3.6b) não diluído em água, a uma pressão de descarga de aproximadamente 0,5 MPa.



a) Emulsão (fluido Vasco 7000 + água) com concentração de 1:9 aplicado via técnica convencional.



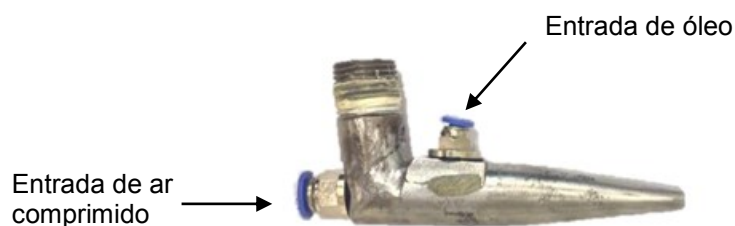
b) Fluido Vasco 7000 aplicado via técnica MQL.

Figura 3.6- Fluidos de corte aplicados na zona de corte.

Nos ensaios com a técnica convencional foi utilizado um bocal convencional tipo sapata com orifício de saída tipo chato, próprio da retificadora direcionado tangente ao rebolo, mostrado na Fig. 3.7a. Nos ensaios com a técnica MQL foi utilizado um bocal semelhante ao da máquina-ferramenta desenvolvido por Guimarães (2016), mostrado na Fig. 3.7b, com o intuito de garantir a chegada de maneira simultânea do óleo e do ar comprimido em um mesmo bocal, direcionando a mistura para a zona de corte.



a) Bocal utilizado nos ensaios com a técnica de aplicação de fluido de corte convencional.



- b) Bocal utilizado nos ensaios com a técnica de aplicação de fluido de corte MQL (GUIMARÃES, 2016).

Figura 3.7 - Bocais utilizados para aplicação de fluido de corte na zona de corte pelas diferentes técnicas.

Para controle e ajuste da vazão de fluido de corte aplicado via técnica MQL, foi desenvolvido pelos pesquisadores do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) uma bomba de seringa. O controle da vazão ocorreu através de uma placa de arduino programada adequadamente ligada a um potenciômetro. Maiores detalhes sobre este sistema podem ser encontrados no trabalho de De Mello (2015).

3.4 Variáveis de saída

Nesta seção serão apresentadas as variáveis de saída adotadas para avaliar a retificação do Inconel 718, sendo elas: rugosidade, imagens da superfície retificada via MEV, microdureza e microestrutura.

3.4.1 . Rugosidade

A rugosidade da superfície foi definida pelos parâmetros de rugosidade Desvio aritmético médio do perfil avaliado (R_a), Altura máxima do perfil (R_z), Desvio médio quadrático do perfil avaliado (R_q), Altura total do perfil (R_t) utilizando um rugosímetro portátil SJ201 P/M da marca MITUTOYO, com resolução de $0,01 \mu\text{m}$ e ponta do apalpador de diamante. O comprimento de onda do filtro (*cut-off*) adotado foi igual a $0,8 \text{ mm}$, e o comprimento de avaliação de $4,0 \text{ mm}$.

As medições foram realizadas perpendicularmente à direção de avanço longitudinal da peça e equidistantes de aproximadamente 2 mm (Fig. 3.8) Para efeito estatístico, em cada amostra foram realizadas nove medições e os resultados são a média aritmética dessas medições.

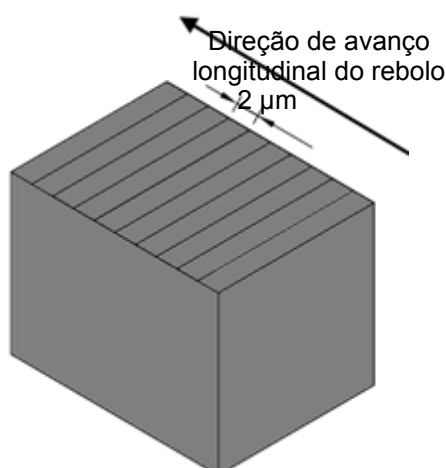


Figura 3.8 - Representação das seções de medição da rugosidade da peça.

3.4.2 . *Imagens da superfície retificada*

As imagens das superfícies das amostras retificadas foram obtidas utilizando um microscópio eletrônico de varredura (MEV), modelo EVO MA10, do fabricante Zeiss, pertencente ao Laboratório Multiusuário de Microscopia Eletrônica da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia. Imagens da superfície com ampliações de 1 000 e 5 000 vezes foram adquiridas, utilizando detector de elétrons secundários (SE), distância de trabalho (distância entre o feixe de elétrons e as amostras) de 12,5 mm e tensão elétrica de aceleração de 10 kV, com o objetivo de identificar possíveis danos superficiais.

3.4.3 . *Microdureza*

Para a medição da microdureza das peças foi utilizado um microdurômetro SHIMADZU – Série HMV 2, pertencente Laboratório de Apoio a Fabricação (LAF) da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia. A carga normal aplicada foi de 490,03 mN (HV 0,05) por um período de 15 s. Durante a preparação para a medição da microdureza, as amostras foram lixadas com lixas d'água de carbetto de silício, do fabricante 3M, com granulometrias mesh na seguinte sequência: 180, 240, 320, 400, 600 e 1 200.

As medições foram iniciadas a 20 µm da superfície retificada, com uma distância horizontal entre as indentações de aproximadamente 40 µm e espaçamento entre indentações de 20 µm (Fig. 3.9) até que a distância em relação a superfície retificada atingisse o valor de 400 µm. A partir daí se fez uma última medição a 7,5 mm da borda da superfície retificada.

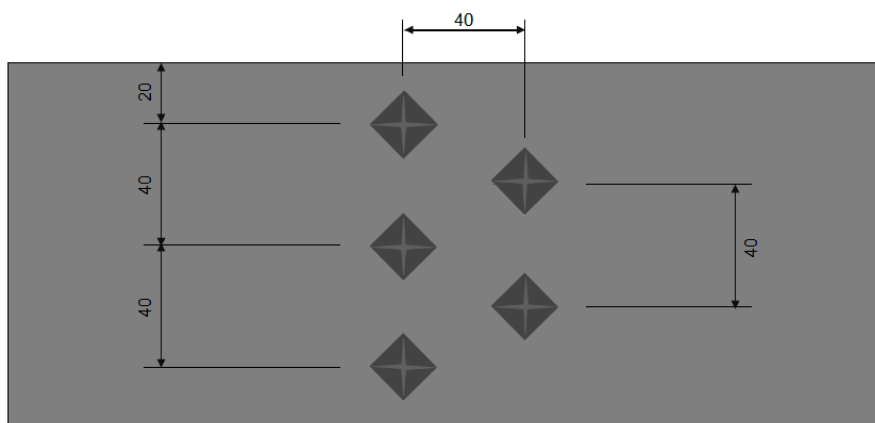


Figura 3.9 - Esquema de medição de microdureza detalhando o posicionamento das indentações (dimensões em μm).

3.4.4 . Microestrutura

Nesta etapa as amostras foram novamente lixadas, com lixas d'água de carbetto de silício, do fabricante 3M, com granulometrias mesh na seguinte sequência: 180, 240, 320, 400, 600 e 1 200, para remoção de camadas de óxidos e polidas com pasta de diamante de $1\ \mu\text{m}$ e sílica coloidal de $0,2\ \mu\text{m}$. Em seguida, elas foram atacadas quimicamente por imersão utilizando-se a solução Kalling nº 2, cuja composição química é uma mistura de cloreto de cobre em etanol e ácido clorídrico, nas seguintes proporções: 100 mL etanol + 100 mL HCl + 5 g CuCl_2 . A microestrutura das superfícies retificadas foi obtida utilizando um microscópio ótico Olympus, modelo BX51, pertencente ao Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM) da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos após a retificação plana tangencial do Inconel 718, com rebolo de carbeto de silício em diferentes condições de corte. As variáveis de entrada empregadas foram a espessura de corte equivalente (h_{eq}) e a técnica de aplicação de fluido de corte. Os parâmetros de saída obtidos e analisados foram: rugosidade da superfície, imagens das superfícies retificadas, microdureza e, por fim, a microestrutura das amostras de Inconel 718.

4.1 Rugosidade da superfície

Os valores dos parâmetros de rugosidade R_a (Desvio aritmético médio do perfil avaliado), R_z (Altura máxima do perfil) e R_q (Desvio médio quadrático do perfil avaliado) utilizados para avaliar a rugosidade das superfícies em diferentes condições de corte são mostrados na Tab. 4.1. Os valores correspondem a média aritmética das nove medições obtidas para cada ensaio de retificação seguida do seu desvio padrão. Os resultados para R_a , R_z e R_q ainda estão dispostos graficamente nas Figs. 4.1, 4.2 e 4.3, respectivamente.

Tabela 4.1 - Valores dos parâmetros de rugosidade R_a , R_z e R_q obtidos após a retificação do Inconel 718 em diferentes condições de corte.

Espessura de corte equivalente	Parâmetro de rugosidade	Técnica de aplicação de fluido de corte	
		Convencional (μm)	MQL (μm)
0,09 μm	R_a	0,31 $\pm$ 0,03	0,43 $\pm$ 0,01
	R_z	2,25 $\pm$ 0,36	2,62 $\pm$ 0,09
	R_q	0,39 $\pm$ 0,04	0,53 $\pm$ 0,1
0,18 μm	R_a	0,31 $\pm$ 0,02	0,34 $\pm$ 0,02
	R_z	2,25 $\pm$ 0,38	2,31 $\pm$ 0,29
	R_q	0,43 $\pm$ 0,03	0,42 $\pm$ 0,03

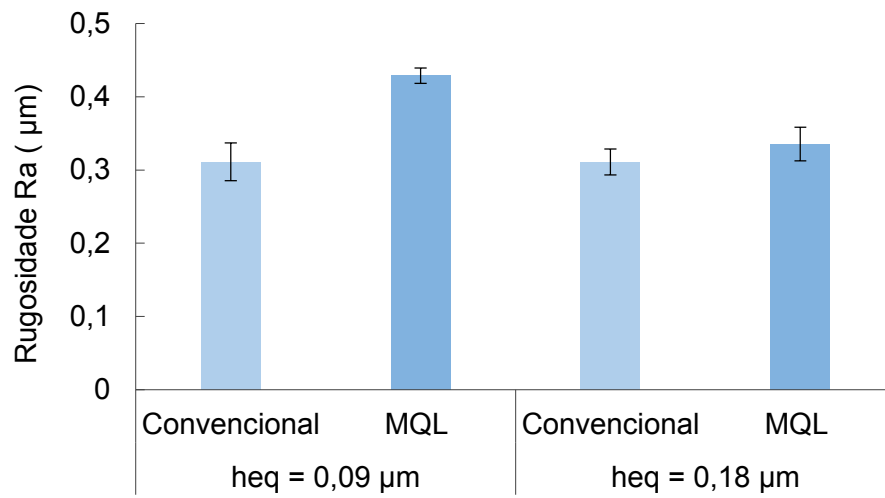


Figura 4.1 - Rugosidade Ra do Inconel 718 em função da espessura de corte equivalente e da técnica de aplicação de fluido de corte.

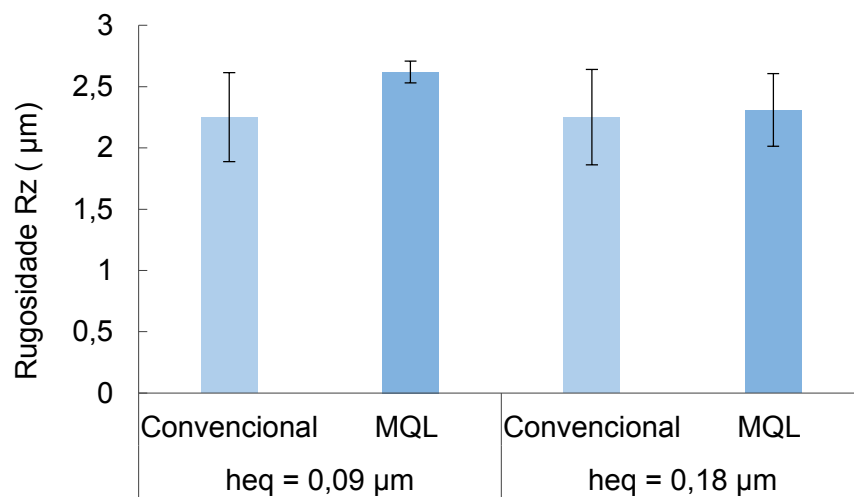


Figura 4.2 - Rugosidade Rz do Inconel 718 em função da espessura de corte equivalente e da técnica de aplicação de fluido de corte.

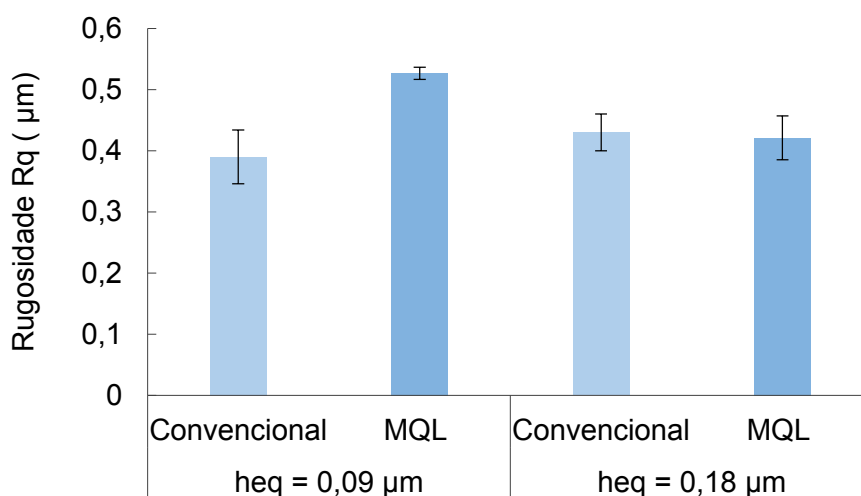


Figura 4.3 - Rugosidade Rq do Inconel 718 em função da espessura de corte equivalente e da técnica de aplicação de fluido de corte.

Da Tabela 4.1 e das Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 observa-se que os comportamentos dos parâmetros Ra, Rz e Rq são bem semelhantes. Em geral, não houve influência da espessura de corte equivalente nos valores de rugosidade quando se empregou a técnica convencional de aplicação de fluido de corte. Vale ressaltar que esta técnica proporcionou os menores valores de rugosidade. Já para os ensaios com a técnica MQL os resultados mostraram que a rugosidade Ra e Rz diminuem com o aumento da espessura de corte equivalente. O maior valor de rugosidade parâmetro Ra foi registrado para espessura de corte equivalente de 0,09 µm com a técnica MQL. Observa-se ainda da Fig. 4.1 que todos os valores de rugosidade Ra situaram-se abaixo do valor limite estabelecido de 0,63 µm para processos de retificação de semiacabamento (KALPAKJIAN, SCHMID, 2009).

De acordo com Machado et al. (2011) a rugosidade Ra aumenta com a espessura de corte equivalente, uma vez que maior será a espessura de cavaco formada e deformação plástica do material na região próxima à superfície do rebolo, implicando em uma deterioração do acabamento. Porém, são vários os fatores que afetam a rugosidade de uma superfície retificada. Segundo Marinescu et al. (2004), os fatores que podem influenciar a rugosidade de uma superfície após o processo de retificação são: espaçamento irregular dos abrasivos, profundidades distintas dos abrasivos, efeito da operação de dressagem do rebolo na densidade dos abrasivos, efeito do desgaste do rebolo na densidade dos abrasivos, efeito da deflexão dos abrasivos e adesão entre a peça e os abrasivos do rebolo.

Hadad et al. (2012) indicaram que, apesar da boa lubrificação atingida com o emprego da técnica de aplicação de fluido de corte MQL durante o processo de retificação, a capacidade de refrigeração proporcionada pela técnica MQL é inferior à observada com a

técnica convencional. Assim, os autores afirmam que a técnica MQL é menos eficiente na remoção de calor da zona de corte, contribuindo com um aumento na temperatura dessa região. Além disso, as altas temperaturas na zona de corte tendem a contribuir com o aumento da adesão do metal da peça nos abrasivos, reduzindo artificialmente a rugosidade superficial da superfície retificada (MALKIN; GUO, 2008).

Na retificação do Inconel 718, ainda deve ser considerada a sua elevada reatividade química com a maioria das ferramentas de corte disponíveis (EZUGWU, 2005) inclusive com as cerâmicas (aquelas que compõem o rebolo), o que acelera o desgaste dos abrasivos, contribui para a aleatoriedade na geração de cavacos e deteriora o acabamento das partes usinadas.

4.2 Imagens das superfícies retificadas

Nesta seção são mostradas as imagens das superfícies após o processo de retificação obtidas via microscopia eletrônica de varredura, com o objetivo de investigar a qualidade das superfícies retificadas. Na Figura 4.4 são mostradas as imagens da superfície do Inconel 718 após a retificação em diferentes condições de corte com uma ampliação de 5 000 vezes e escala das imagens igual a 2 μm para comparações e análises.

Observa-se da Figura 4.4 marcas de avanço, características do processo de retificação, que são deixadas pela passagem dos abrasivos. É possível observar ainda que o espaçamento entre estas marcas aumenta de acordo com o aumento da espessura de corte equivalente, uma vez que o aumento da espessura de corte equivalente implica em uma maior área de contato entre o abrasivo e a peça, e consequentemente maior deformação plástica da superfície retificada.

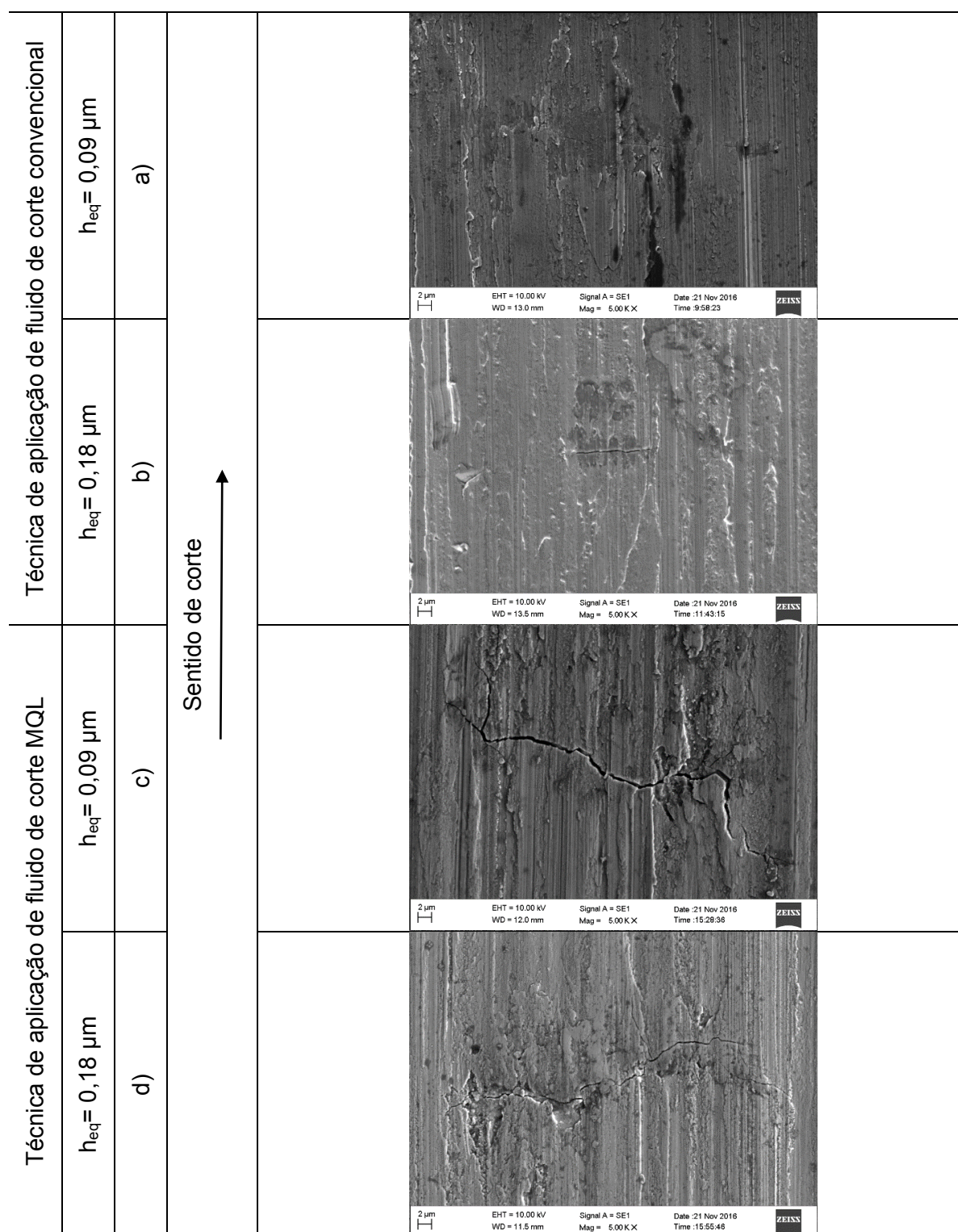


Figura 4.4 - Imagens da superfície do Inconel 718 após a retificação em diferentes condições de corte.

Da Figura 4.4 é possível observar a presença de sulcamentos, conhecidos da terminologia Inglesa como *plowing*. Este fenômeno está relacionado com a deformação plástica sem remoção de material na forma de cavaco, apresentando como característica o

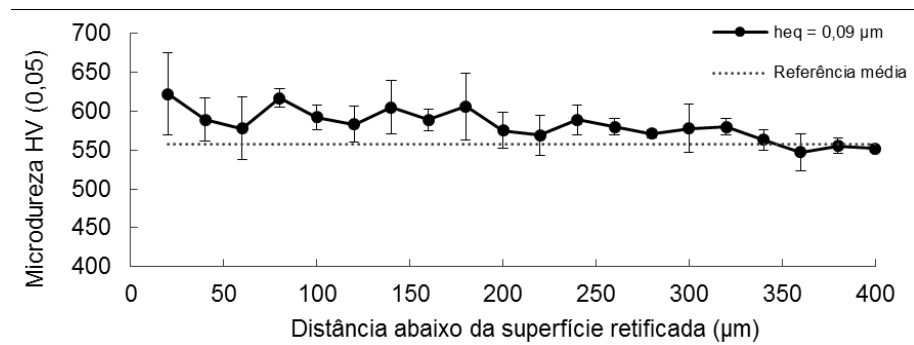
fluxo lateral de material através do caminho dos abrasivos. Materiais dúcteis e que apresentam elevada resistência mecânica, como é o caso do Inconel 718, apresentam uma maior tendência à adesão entre o material da superfície da peça retificada e os abrasivos, que podem contribuir com a formação do sulcamento (MALKIN; GUO, 2008).

Ainda da Figura 4.4 observa-se a presença de microtrincas, mais evidentes ao se empregar a técnica de aplicação de fluido de corte MQL. Os campos de tensões tratativas formados imediatamente após a passagem do rebolo são perpendiculares a direção de avanço, por esta razão as trincas observadas são perpendiculares a direção de avanço do rebolo. Segundo Marinescu et al. (2004), após a passagem do rebolo a superfície da peça é refrigerada de forma mais acelerada que a sua sub-superfície, ocasionando em um gradiente de temperatura entre a superfície da peça e o rebolo durante o processo de retificação. Este gradiente de temperatura leva a contração e dilatação térmica do material que pode ocasionar a formação de microtrincas. Além disso, a baixa condutividade térmica do Inconel 718 resulta em alta concentração de calor na zona de corte que pode causar tensões residuais de tração e trincas perpendiculares a superfície retificada (SINHA et al., 2016; MALKIN; GUO, 2008).

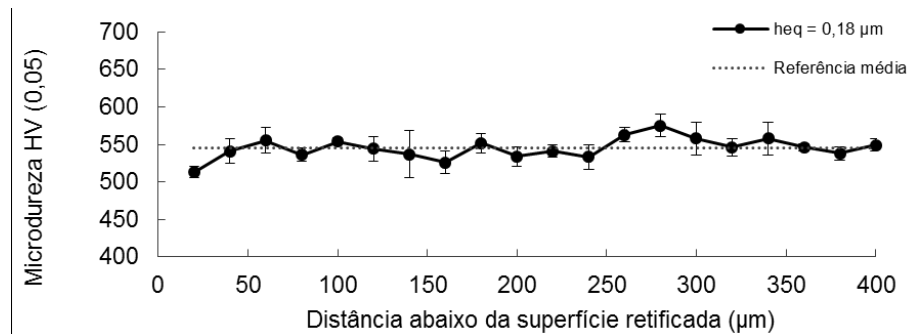
Xu; Yu; Xu (2002) avaliaram o efeito da temperatura na integridade superficial da liga à base de níquel K417 durante o processo de retificação utilizando rebolo convencional de Al_2O_3 e relataram a presença de microtrincas nas superfícies das peças retificadas. Os autores atribuíram as trincas ao elevado gradiente de temperatura existente entre a superfície da peça e o rebolo e as altas temperaturas na zona de corte durante o processo de retificação. Quando o fluido de corte atinge regiões da peça que estão em altas temperaturas, e neste caso estão em estado de dilatação na superfície, a tendência é provocar a contração. Com isso, quando o material está submetido a constantes estados de tensão de tração e compressão, estará propenso ao surgimento de trincas.

4.3 Microdureza

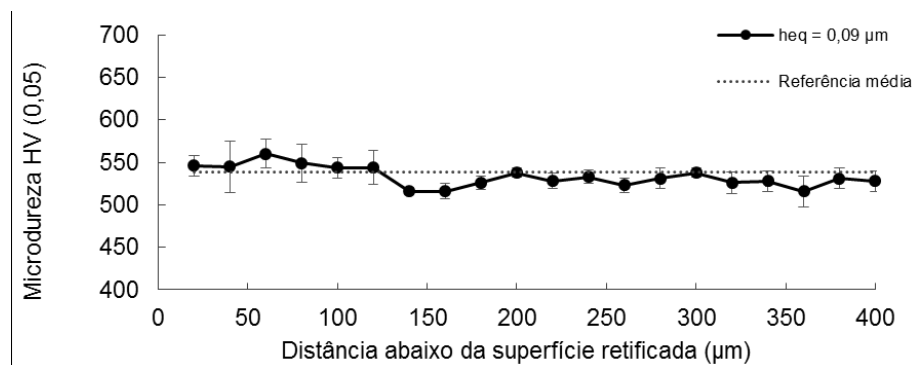
Na Figura 4.5 são mostrados os perfis de microdureza do Inconel 718 em função da distância abaixo da superfície retificada obtidos após o processo de retificação em diferentes condições de corte. Além disso, também é mostrada a microdureza média do metal de cada amostra obtida antes dos ensaios de retificação a uma profundidade de 400 μm , profundidade está em que se admite que a superfície do metal não sofreu alterações metalúrgicas devido ao processo de retificação.



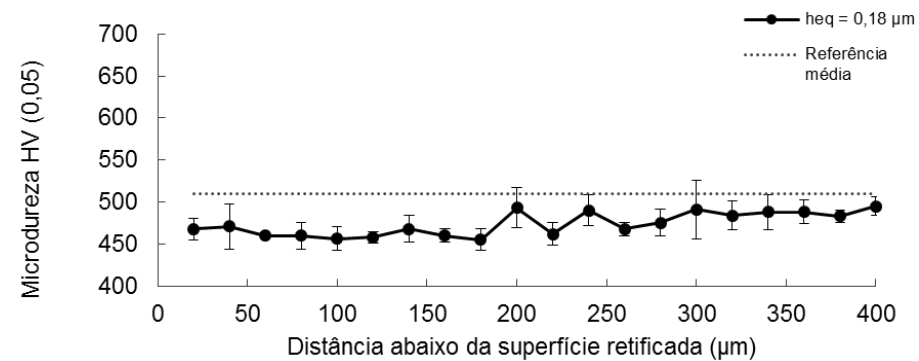
a) $h_{eq} = 0,09 \mu\text{m}$ e técnica de aplicação de fluido de corte convencional.



b) $h_{eq} = 0,18 \mu\text{m}$ e técnica de aplicação de fluido de corte convencional.



c) $h_{eq} = 0,09 \mu\text{m}$ e técnica de aplicação de fluido de corte MQL.



d) $h_{eq} = 0,18 \mu\text{m}$ e técnica de aplicação de fluido de corte MQL.

Figura 4.5 - Perfil de microdureza do Inconel 718 após a retificação em diferentes condições de corte.

Da Figura 4.5 observa-se que os valores de microdureza situaram-se em torno da média em todas as condições testadas, assim não pode-se afirmar se houve influência significativa das condições de corte empregadas durante o processo de retificação na microdureza do Inconel 718. Da Figura 4.5d é possível observar que houve uma tendência de redução no valor de microdureza obtida após a retificação com espessura de corte equivalente $h_{eq} = 0,18 \mu\text{m}$ e técnica de aplicação de corte MQL em relação a microdureza média obtida antes dos ensaios de retificação.

As altas temperaturas inerentes ao processo de retificação podem contribuir com a origem de danos de origem térmica na superfície retificada. Ao se empregar uma maior espessura de corte equivalente ($h_{eq} = 0,18 \mu\text{m}$) maior será a área de contato entre a superfície retificada e o rebolo, aumentando assim o atrito e o calor na zona de corte. Além disso, a temperatura na interface rebolo-peça tende a ser maior ao se empregar a técnica de aplicação de fluido de corte MQL em relação a técnica convencional devido a sua menor capacidade de refrigeração. Assim, a concentração de calor na zona de corte aliada a baixa condutividade térmica do Inconel 718 pode causar alterações microestruturais, como a alteração na microdureza da amostra.

Em relação ao elevado desvio padrão observado para a microdureza deve-se a heterogeneidade presente na microestrutura do Inconel 718, que é uma liga endurecida por precipitação e que apresenta em sua microestrutura carbonetos de nióbio (NbC), carbonetos de titânio (TiC) e fase endurecedora γ'' (REED, 2006).

4.4 Microestrutura das amostras de Inconel 718

Nesta seção são mostradas as imagens da microestrutura do Inconel 718 após o processo de retificação obtidas via microscopia ótica, com o objetivo de investigar possíveis alterações metalúrgicas e compará-las com as imagens da microestrutura obtidas antes do processo de retificação mostradas na Fig. 3.4. Na Figura 4.6 são mostradas as imagens da microestrutura do Inconel 718 após a retificação em diferentes condições de corte e escala das imagens igual a $500 \mu\text{m}$.

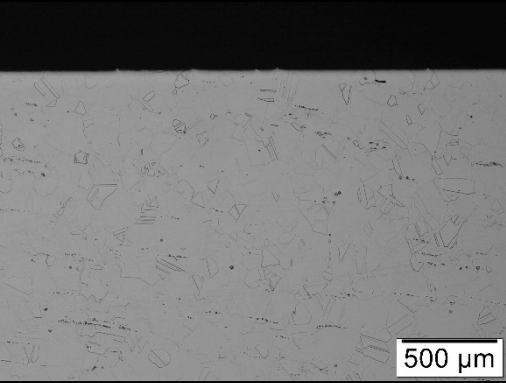
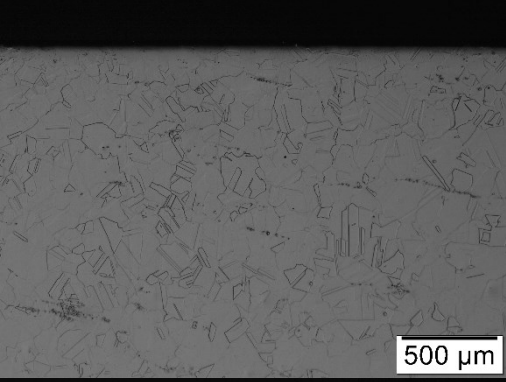
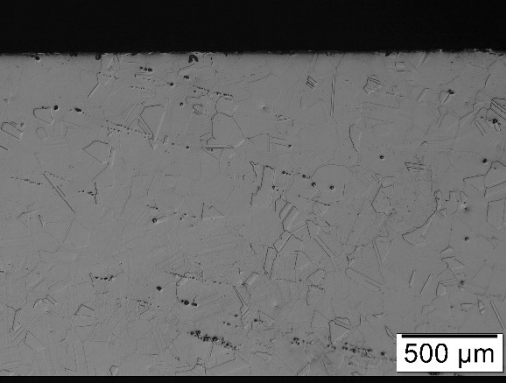
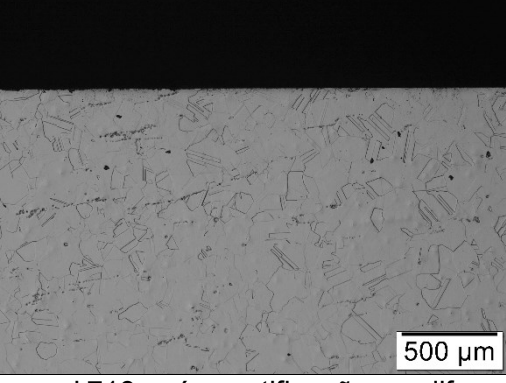
Técnica de aplicação de fluido de corte convencional	$h_{eq} = 0,09 \mu m$	b)		
	$h_{eq} = 0,18 \mu m$	b)		
Técnica de aplicação de fluido de corte MQL	$h_{eq} = 0,09 \mu m$	c)		
	$h_{eq} = 0,18 \mu m$	d)		

Figura 4.6 - Microestrutura do Inconel 718 após a retificação em diferentes condições de corte.

Da Figura 4.6 é possível observar que não há evidência qualitativa de alteração na microestrutura das amostras do Inconel 718 que comprometam a integridade do material, mesmo nas amostras onde as condições de corte provocaram uma tendência de diminuição da microdureza. As microestruturas mostradas na Fig. 4.6 possuem bastante semelhança

com aquela obtida antes do processo de retificação, mostrada na Fig. 3.4, o que vai de encontro com a afirmação de que não houve variação na microestrutura da amostra. Por fim, é possível inferir que não houve diferença significativa na microestrutura ao utilizar duas espessuras de corte equivalente e distintas técnica de aplicação de fluido de corte.

.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

A partir dos resultados dos ensaios de retificação plana tangencial do Inconel 718 com rebolo de carbeto de silício e em diferentes condições de corte, as seguintes conclusões podem ser obtidas:

- I. Os valores de rugosidade R_a obtidos situaram-se abaixo de $0,63\text{ }\mu\text{m}$, independente da condição testada, valor limite estabelecido como aceitável para processos de retificação e semiacabamento;
- II. O comportamento dos parâmetros de rugosidade R_a , R_z e R_q são semelhantes. De um modo geral, não houve aumento nos valores de rugosidade R_a e R_z com o aumento da espessura de corte equivalente, principalmente nos ensaios com a técnica de aplicação de fluido de corte MQL;
- III. Microtrincas foram observadas nas superfícies retificadas em todas as condições de corte investigadas, fato este que pode ser associado à baixa condutividade térmica do Inconel 718 aliada as altas temperaturas na zona de corte. Contudo, a usinagem com a menor espessura de corte equivalente ($0,09\text{ }\mu\text{m}$) combinada com a técnica convencional de aplicação de fluido de corte resultou no menor número de microtrincas;
- IV. Os valores de microdureza mantiveram-se em torno do valor médio de referência (valores medidos antes dos ensaios de retificação) e foi observado uma tendência na redução da dureza com o aumento da espessura de corte equivalente e redução da refrigeração;
- V. As imagens da microestrutura das amostras de Inconel 718 obtidas após os ensaios de retificação mostraram que, para todas as condições de corte investigadas, não houve alteração microestrutural.

Sugestões para trabalhos futuros

- I. Empregar valores de espessura de corte equivalente e de velocidade da peça menores;
- II. Avaliar a retificabilidade de superligas de níquel com composição química semelhante ao Inconel 718 utilizando as mesmas condições de corte investigadas a fim de se estabelecer comparações;
- III. Testar diferentes vazões de fluido de corte e também de mais de um bocal na retificação do Inconel 718;
- IV. Avaliar diferentes graus de recobrimento do rebolo (Ud) e testar o dressador do tipo Fliesen.
- V. Avaliar outras técnicas de dressagem do rebolo que possam influenciar na macrogeometria e microgeometria do rebolo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASM. **Atlas of microstructures of industrial alloys**. 8.ed., 1972. 569p.
- BALAN, A.S.S.; VIJAYARAGHAVAN, L.; KRISHNAMURTHY, R.; KUPPAN, P.; OYYARAVELU, R. An experimental assessment on the performance of different lubrication techniques in grinding of Inconel 751. **Journal of Advanced Research**. v.7, p. 709-718, 2016.
- BENKAI, L.; CHANGHE, L.; YANBIN, Z.; YAOANG, W.; DONGZHOU, J.; MIN, Y. Grinding temperature and energy ratio coeficiente in MQL grinding of high-temperature nickel-base alloy by using different vegetable oils as base oil. **Chinese Journal of Aeronautics**. v. 29, p. 1084-1095, 2016.
- BIANCHI, E. C.; AGUIAR, P. R.; PIUBELI, B. A. **Aplicação e utilização dos fluidos de corte nos processos de retificação**. 1.ed. São Paulo: Artliber Editora, 2004. 110p.
- CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 589p.
- 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.
- DHAR, N.R.; KAMRUZZAMAN, M.; AHMED, M. Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear and surface roughness in turning AISI-4340 steel. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 172. p.299-3014, 2006.
- DINIZ, A. E; MARCONDES, F. C; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 7.ed. São Paulo: Artliber Editora, 2010. 268p.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.

HUDDER, S.; CHITALKAR, P.; CHAVAN, A.; PAWADE, R. S. Effect of cooling environment of grinding performance of nickel based superalloy Inconel 718. **Journal of Applied Sciences**. v. 12, p. 947-954, 2012.

KADAM, G. S.; PAWADE, R. S. Surface integrity and sustainability assessment in high-speed machining of Inconel 718 - An eco-friendly green approach. **Journal of Cleaner Production**. v. 147, p. 273-283, 2017.

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

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

LIU, Q.; CHEN, X.; GINDY, N. Assessment of Al_2O_3 and superabrasive wheels in nickel-based alloy grinding. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. v.33, p.940-951, 2007.

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.

MALKIN, S.; GUO, C. **Grinding technology: Theory and application of machining with abrasives**. 2.ed. New York: Industrial Press, Inc., 2008. 372p.

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

MARINESCU, I. D.; HITCHINER, M.; UHLMANN, E.; ROWE, W. B.; INASAKI, I., **Handbook of Machining with Grinding Wheels**. 1.ed. Boca Rota: CRC Press, 2007. 596p.

NBR ISO 4287, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2002.

NEUGEBAUER, R.; BOUZAKIS, K. D.; DENKHA, B.; KLOCKE F.; STERZING, A.; TEKKAYA, A. E.; WERTHEIM, R. Velocity effects in metal forming and machining processes. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**. v. 60, Issue 2, p. 627-650, 2011.

OIKAWA, M. H.; BIANCHI, E. C.; DESTRO, R. S.; SOUZA, R.M.; CANARIM, R. C.; ALVES, M. C. S.; AGUIAR, P. R. Cerâmicas avançadas no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho utilizando a técnica da mínima quantidade de lubrificação (MQL) com rebolos diamantados. **Revista Matéria**. v.16. p.560-573. 2011.

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

REED, R. C. **The Superalloys Fundamentals and Applications**. 1ed. New York: Cambridge University Press, 2006. 372p.

ROWE, W. B. **Principles of Modern Grinding Technology**. 2ed. Oxford: Elsevier, 2014. 480p.

SANCHEZ, J. A.; POMBO, I.; ALVERDI, 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, 2010.

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, 2016

STEMMER, C.; E. **Ferramentas de corte II: Brocas, Alargadores, Ferramentas de Roscar, Fresas, Brochas, Rebolos, Abrasivos**. 2.ed. Florianópolis: Editora da UFSC. 1995. 326p.

TAWAKOLI, T., HADDAD, M., SADEGHI, M. H., DANESHI, SADEGHI, B. Investigation on minimum quantity lubricant - MQL grinding of 100Cr6 hardened steel using different abrasive and coolant–lubricant types. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. v.50, p. 698–708, 2010.

THAKUR, A.; GANGOPADHYAY, S. State-of-the-art in surface integrity in machining of nickel-based super alloys. **Journal of Cleaner Production**. v. 147, p. 25-54, 2016.

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

WALKER, T. **The MQL Handbook: A guide to machining with minimum quantity lubrication**. 1ed. Unist, Inc, 2013. 43p.

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, 2016.

WENFENG, D., JIUHUA, X., ZHENZHEN, C., HUNGHUA, S., YUCAN, F., Grindability and Surface Integrity of Cast Nickel-based Superalloy in Creep Feed Grinding with Brazed CBN Abrasive Wheels, **Chinese Journal of Aeronautics**. v. 23, p. 501-510, 2010.

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.

YAO, C. F.; JIN, Q. C.; HUANG, X. C.; WU, D. X.; REN, J. X.; ZHANG, D. H. Research on surface integrity of grinding Inconel 718. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. v. 65, p. 1019-1030, 2013.