

ANTONIO VITOR DE MELLO

**RETIFICAÇÃO DA LIGA Ti-6Al-4V, COM FLUIDO DE
CORTE CONTENDO PARTÍCULAS DE GRAFENO**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2015

ANTONIO VITOR DE MELLO

**RETIFICAÇÃO DA LIGA Ti-6Al-4V, COM FLUIDO DE CORTE
CONTENDO PARTÍCULAS DE GRAFENO**

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

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Rosemar Batista da Silva

UBERLÂNDIA - MG

2015

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

M527r Mello, Antonio Vitor de, 1990-
2015 Retificação da liga Ti-6Al-4V, com fluido de corte contendo
partículas de grafeno / Antonio Vitor de Mello. - 2015.
94 f. : il.

Orientador: Rosemar Batista da Silva.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Inclui bibliografia.

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

CDU: 621

A meus pais, Gilmar e Ivonete
A Gilmar de Mello Júnior (*in memoriam*)

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Uberlândia, à Faculdade de Engenharia Mecânica e ao programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica pela oportunidade de realizar este Curso.

Aos órgãos de fomento, CAPES e CNPQ pelo suporte fornecido ao programa, em especial à CAPES pelo auxílio com bolsa de estudos.

À FAPEMIG, em especial, pelo apoio financeiro concedido ao orientador deste trabalho via PPM-VII, Processo Nº: PPM-00265-13 que permitiu a aquisição de vários itens de consumo utilizados neste trabalho.

Ao Prof. Dr. Rosemar Batista da Silva pelo suporte, orientação, paciência e conhecimento transmitido durante a elaboração desta dissertação.

Aos professor Dr. Anselmo Eduardo Diniz pela doação da amostra de Ti-6Al-4V.

Ao professor Dr. Amauri Hassui pela contribuição na discussão de resultados de publicações geradas deste trabalho.

Ao professor Dr. Rogério Valentim Gelamo pela produção de partículas de grafeno e diluição em fluido de corte.

A Saint-Gobain Abrasivos da América do Sul, representada pelo Sr. Fábio Martinho César de Freitas, pela doação dos rebolos e dressadores.

À Tapmatic do Brasil Ind. e Com. Ltda pela doação do fluido de corte.

Aos colegas do programa de pós-graduação, em especial os componentes do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU): Cleudes Guimarães, Armando Marques, Saimon Vendrame, Luciano Antônio Fernandes, Raphael Lima de Paiva, Mariana Landim Silveira Lima, Marcília B. Amorim Finzi e Alcione dos Reis, pelo companheirismo, aconselhamento e ajuda nos momentos necessários.

A todos que colaboraram ao longo do trabalho, em especial: ao aluno de iniciação científica do LEPU, José Renato Santos do Amaral Cardoso, ao Prof. Dr. Éder Silva Costa, aos técnicos do Laboratório de Usinagem Convencional (LUC), Thiago Martins e Thiago Menezes e à técnica do Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM) Ângela Maria da Silva Andrade.

Aos meus amigos, colegas da 82ª turma de Engenharia Mecânica da FEMEC-UFU, avós, tios e primos que me incentivaram em mais essa etapa de minha formação.

Aos meus pais, Gilmar Alves de Mello e Ivonete Custin de Mello, incentivadores maiores, suporte nas horas de ansiedade, companheiros nos momentos difíceis. Devo-lhes tudo o que sou e o que me tornarei.

A todos, meu muito obrigado.

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.

Resumo

A usinagem das ligas de titânio pelos processos convencionais sempre foi motivo de preocupação para pesquisadores e empresários do setor metal-mecânico. Por isso, muitos trabalhos relacionados à usinagem dessas ligas têm sido investigados visando melhoria da usinabilidade e redução dos custos de processamento. Mas muito pouco tem sido relatado na literatura sobre trabalhos que estudaram a usinabilidade das ligas de titânio ao empregar processos que utilizam ferramentas abrasivas. O custo do material e a baixa procura pela retificação de componentes feitos em titânio são razões para isso. Além disso, estas ligas são pobres condutoras de calor, o que dificulta ainda mais o emprego de ferramentas abrasivas, já que a probabilidade de a peça sofrer por danos de origem térmica será ainda maior. Neste contexto, encontrar as condições de lubri-refrigeração adequadas para o processo de retificação das ligas de titânio pode tornar o mesmo mais eficiente. Neste sentido, este trabalho apresenta os resultados do processo de retificação plana tangencial da liga Ti-6Al-4V utilizando fluido de corte com adição de partículas de grafeno. Os parâmetros de corte utilizados foram: dois valores de penetração de trabalho (a_e), 10 μm e 20 μm , em 2 e 3 passes e variando a forma de aplicação de fluido: em abundância, via técnica de mínima quantidade de lubrificante (MQL) e MQL utilizando fluido com adição de grafeno. O fluido de corte empregado foi o do tipo sintético de base vegetal para todas as técnicas de aplicação de fluido. As variáveis de saída avaliadas foram o acabamento, a microdureza e a potência elétrica consumida. Imagens das superfícies usinadas e do rebolo foram também avaliadas. Os resultados mostraram que a adição de partículas de grafeno ao fluido de corte pode melhorar o comportamento do processo, levando à melhoria da rugosidade superficial da liga de Ti-6Al-4V, como também a uma menor variação dos valores de microdureza abaixo da superfície e menor potência elétrica exigida no motor do rebolo quando a penetração de trabalho maior for utilizada. Os resultados mostraram ainda pouca influência da estratégia em se utilizar 2 ou 3 passes no acabamento produzido nas condições investigadas. Não foram observadas queimas de aspecto visual nas superfícies das amostras nas condições investigadas.

Palavras Chave: Retificação, liga Ti-6Al-4V, Fluido de corte, Grafeno, Penetração de trabalho, Rugosidade, Microdureza.

DE MELLO, A. V. **Peripheral Surface Grinding of Ti-6Al-4V with Graphene Nanoplatelets Dispersed in Cutting Fluid**. 2015. 94 f. Dissertation, Federal University of Uberlândia, Uberlândia.

Abstract

Machining of titanium alloys by conventional processes has always been a concern topic of researchers and practitioners from metal-working industry. So, many works related to these processes have been developed to improve their machinability and to reduce manufacturing costs. However, little information has been reported in the literature about studies with regard the machinability of titanium alloys employing abrasive processes, specially grinding. The high cost of the material and the lack of titanium components that need to be ground are some reasons for this. In addition, these alloys have low thermal conductivity, which impairs use of conventional abrasive tools, because it increases the probability of occurrence of thermal damages. Into this context, it is important to find appropriated lubri-coolant conditions for efficient grinding of titanium and its alloys. The grinding parameters varied were: radial depth of cut (a_e) of 10 μm and 20 μm , 2 and 3 passes and also the cutting fluid delivery technique (conventional one and the minimum quantity lubrication (MQL). Graphene nanoplatelets dispersed in the cutting fluid were also tested via MQL technique. The cutting fluid employed was the vegetable-based synthetic type for all techniques employed. Output variables were the surface roughness, the microhardness and the consumed electrical power. Images of machined surfaces and of the wheel were also obtained and analyzed. The results showed that addition of the graphene particles on the cutting fluid can improve the process performance, leading to improvement of finishing, lower variation in microhardness and lower electric power required in the grinding wheel motor, when the highest radial depth of cut was employed. Also, it was observed that the strategy of using 2 or 3 passes during grinding did not show significant effect on finishing on the conditions investigated. No visual presence of burning was observed on the machined surfaces under the conditions investigated.

Keywords: Grinding, Ti-6Al-4V alloy, Radial depth of cut, Surface Roughness, Microhardness.

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Microestrutura de liga Ti-6Al-4V recozida. Grãos cinzas claro equiaxiais consistem de fase α ; fase intergranular escura é a β (THORTON; COLANGELO, 1985).....	4
Figura 2.2 - Parâmetros de corte em retificação plana tangencial (adaptado de MARINESCU, et al., 2007)	8
Figura 2.3 - Esquema do fluxo de calor em retificação para um único grão abrasivo (JÚNIOR, 1992)	9
Figura 2.4 - Esquema de formação de cavaco com ferramentas de ângulos definidos e com ângulos não definidos (adaptado de NEUGEBAUER et al, 2011)	10
Figura 2.5 - Remoção de material na abrasão de materiais dúcteis (adaptado de KLOCKE, 2009)	11
Figura 2.6 - Remoção de material na abrasão de materiais frágeis (adaptado de MARINESCU, 2007)	12
Figura 2.7 - Diagrama esquemático da formação de cavaco segmentado (KOMANDURI, 1981)	13
Figura 2.8 - Micrografia de cavaco de Ti-6Al-4V (a) produzido no torneamento (KOMANDURI,1981) e (b) produzido após retificação (próprio autor)	13
Figura 2.9 - Imagens de cavacos obtidos após retificação em diferentes atmosferas: (a) a seco; (b) jorro; (c) MQL com nanopartículas de CuO e; (d) MQL com nanopartículas de Al ₂ O ₃ (SETTI et al., 2015)	14
Figura 2.10 - Modelos para a formação de cavaco usinando (a) aço e (b) titânio (adaptado de KOMANDURI, 1981)	15
Figura 2.11 - Retificabilidade de ligas metálicas em % (adaptado de MARINESCU et al., 2007)	17
Figura 2.12 - Classificação padrão para abrasivos convencionais (Al ₂ O ₃ e SiC) (adaptado de MALKIN; GUO, 2008)	19
Figura 2.13 - Classificação de rebolo de abrasivos convencionais.....	20
Figura 2.14 - Superfície queimada de peça de titânio Ti-6Al-4V na retificação utilizando rebolo de CBN; (a) queima severa, (b) queima branda (LI et al., 2011) e em (c) superfície	

com região de queima na retificação da mesma liga com rebolo de Al_2O_3 (AA46K6V) (próprio autor)	25
Figura 2.15 - Estrutura e imagem de MEV dos materiais usados para lubrificação sólida: (a) grafite; (b) nanotubos de carbono; (c) grafeno e; (d) bissulfeto de molibdênio (estruturas: ZARBIN; OLIVEIRA, 2013; IMO, 2008) (imagens via MEV: NIEN, 2011; GRAPHENE, 2009-2015; US RESEARCH, [20--]).....	28
Figura 2.16 - (a) Condutividade térmica, (b) ângulo de contato e (c) viscosidade cinemática avaliados para diferentes materiais e concentrações de nanopartículas dispersas no fluido de corte semi-sintético (SAMUEL et al., 2011)	31
Figura 3.1 - Fluxograma para o procedimento experimental deste trabalho	33
Figura 3.2 - Detalhes das dimensões do rebolo 39C46KVK utilizados nos ensaios de retificação definitivos.....	34
Figura 3.3 - Morsa de precisão Gin 0-90 mm, (a) foto dela montada na máquina, (b) detalhes construtivos.	35
Figura 3.4 - Bocal tipo bico chato para MQL, (a) imagem e (b) detalhes construtivos	35
Figura 3.5 - Vista em perspectiva isométrica da bomba de seringa	36
Figura 3.6 - Dressadores de ponta única (a) Winter e (b) Difer	36
Figura 3.7 - Fluido ME-3 diluído em água, proporção 1:19: (a) sem grafeno (b) com partículas dispersas de grafeno	40
Figura 3.8 - Desenho com dimensões e do corpo de prova de Ti-6Al-4V.....	41
Figura 3.9 - Esquema de identificação padrão utilizada nas amostras.....	42
Figura 3.10 - Microestrutura da liga de titânio Ti-6Al-4V após ataque químico.....	42
Figura 3.11 - Resultado de EDS da amostra de Ti-6Al-4V	43
Figura 3.12 - Coordenadas e detalhes de posicionamento dos bocais	44
Figura 3.13 - Imagem de posicionamento do bocal em operação para (a) bocal de jorro e (b) bocal para uso de técnica MQL	44
Figura 3.14 - Esquema do número de passes realizados	45
Figura 3.15 - Percurso da mesa/peça durante a usinagem.....	46
Figura 3.16 - Base e dressador montados para procedimento de dressagem	47
Figura 3.17 - Medição de rugosidade: (a) apalpador e suporte montados na mesa da máquina retífica e (b) superfície retificada de titânio com marcações dos locais de medição de rugosidade.....	48
Figura 3.18 - Estratégia de medição do perfil de microdureza (dimensões em μm)	49
Figura 3.19 - Montagem de medição de potência elétrica.....	51

Figura 4.1 - Valores do parâmetro Ra para os ensaios realizados com penetração de trabalho (a_e) igual a 10 μm , medidos a cada passe após retificação da liga de Ti-6Al-4V em diferentes atmosferas de usinagem	53
Figura 4.2 - Valores do parâmetro Ra para os ensaios realizados com penetração de trabalho (a_e) igual a 20 μm , medidos a cada passe após retificação da liga de Ti-6Al-4V em diferentes atmosferas de usinagem	54
Figura 4.3 - Valores do parâmetro Rz para os ensaios realizados com penetração de trabalho (a_e) igual a 10 μm , medidos a cada passe após retificação da liga de Ti-6Al-4V em diferentes atmosferas de usinagem	55
Figura 4.4 - Valores do parâmetro Rz para os ensaios realizados com penetração de trabalho (a_e) igual a 20 μm , medidos a cada passe após retificação da liga de Ti-6Al-4V em diferentes atmosferas de usinagem	55
Figura 4.5 - Valor médio do parâmetro Ra obtido após último passe entre ensaio e réplica realizados após retificação da liga de Ti-6Al-4V em diferentes atmosferas de usinagem.....	56
Figura 4.6 - Valor médio do parâmetro Rz obtido após último passe entre ensaio e réplica realizados após retificação da liga de Ti-6Al-4V em diferentes atmosferas de usinagem.....	57
Figura 4.7 - Dispersão percentual dos valores de rugosidade para o parâmetro Ra	58
Figura 4.8 - Dispersão percentual dos valores de rugosidade para o parâmetro Rz	59
Figura 4.9 - Imagens de MEV, ensaios com $a_e = 10 \mu\text{m}$, 2 passes, utilizando (a) técnica convencional (10J2); (b) técnica MQL (10M2) e; (c) técnica MQL com adição de grafeno (10G2)	60
Figura 4.10 - Imagens de MEV, ensaios com $a_e = 10 \mu\text{m}$, 3 passes, utilizando (a) técnica convencional (10J3); (b) técnica MQL (10M3) e; (c) técnica MQL com adição de grafeno (10G3)	60
Figura 4.11 - Imagens de MEV, ensaios com $a_e = 20 \mu\text{m}$, 2 passes, utilizando (a) técnica convencional (20J2); (b) técnica MQL (20M2) e; (c) técnica MQL com adição de grafeno (20G2)	61
Figura 4.12 - Imagens de MEV, ensaios com $a_e = 20 \mu\text{m}$, 3 passes, utilizando (a) técnica convencional (20J3); (b) técnica MQL (20M3) e; (c) técnica MQL com adição de grafeno (20G3)	61
Figura 4.13 - Sequência de imagens obtidas em MEV dos eventos identificados nas superfícies da liga Ti-6Al-4V como fratura de grão sobre a superfície retificada.	62
Figura 4.14 - Imagens de MEV para eventos identificados na superfície retificada nas condições (a) 20M2 e (b) e (c) 20G2	63
Figura 4.15 - EDS feito em micro grão de grafeno, amostra E12.	64

Figura 4.16 - Imagens de estereomicroscópio do rebolo de SiC após ensaio com técnica MQL contendo grafeno. Fotos da borda do rebolo próximo do contato com a peça (região de entrada).	65
Figura 4.17 - Imagens de estereomicroscópio do rebolo de SiC após ensaio com técnica MQL contendo grafeno. Fotos da região central do rebolo.	66
Figura 4.18 - Imagens de estereomicroscópio do rebolo de SiC após ensaio com técnica MQL contendo grafeno. Fotos da saída do rebolo.	66
Figura 4.19 - Imagens da ponta do dressador Difer (a) após uma das réplicas (1 dressagem feita) e (b) Após todas as réplicas (12 operações de dressagem).....	67
Figura 4.20 - Imagens de MEV de medição de microdureza para a liga de titânio Ti-6Al-4V, (a) perfil de indentações e (b) imagem de indentação.....	68
Figura 4.21 - Microdureza medida a partir da superfície retificada para os ensaios realizados com jorro.....	68
Figura 4.22 - Microdureza medida a partir da superfície retificada para os ensaios realizados com uso da técnica MQL	69
Figura 4.23 - Microdureza medida a partir da superfície retificada para os ensaios realizados com uso de técnica MQL com adição de partículas de grafeno	69
Figura 4.24 - Microdureza (HV0,01) obtida para retificação de Ti-6Al-4V para diferentes técnicas de aplicação e fluidos de corte ($a_e = 5 \mu\text{m}$, $v_s = 15 \text{ m/s}$) (adaptado de SADEGHI et al., 2009).....	70
Figura 4.25 - Potência ativa consumida no rebolo nas condições de penetração de trabalho e técnica de lubrificarrefrigeração aplicada ($v_w = 2,7 \text{ m/min}$, $a_p = \text{largura da peça}$).....	71

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Composição, estrutura e propriedades mecânicas para algumas ligas de titânio (adaptado de THORTON; COLANGELO, 1985)	5
Tabela 2.2 - Características do processo de formação de cavaco dos processos de usinagem convencionais com ferramenta de geometria definida e sem geometria definida. 12	
Tabela 2.3 - Dureza Knoop de materiais abrasivos (MARINESCU et al., 2004).....	21
Tabela 2.4 - Índice de friabilidade para abrasivos de Al_2O_3 e SiC (adaptado de MALKIN; GUO, 2008)	21
Tabela 2.5 - Resistência ao desgaste relativa para os abrasivos durante a retificação (adaptado de JACKSON; DAVIM, 2011).....	22
Tabela 2.6 - Descrição de alguns parâmetros de rugosidade (adaptado de MACHADO et al., 2011)	23
Tabela 3.1 - Composição química nominal para a liga Ti-6Al-4V (adaptado de DA SILVA, 2006)	37
Tabela 3.2 - Propriedades físicas da liga Ti-6Al-4V (adaptado de DA SILVA, 2006).....	37
Tabela 3.3 - Tabela dos parâmetros para os ensaios definitivos.....	39
Tabela 4.1 - Valores dos parâmetros de rugosidade Ra e Rz obtidos após a retificação da liga Ti-6Al-4V em várias condições de corte (números ao fundo identificam a amostra).	53
Tabela 4.2 - Valores médios de potência elétrica ativa	71

Lista de Símbolos

a_e	Penetração de trabalho
a_p	Profundidade de corte
b	Largura de corte
h	Espessura de cavaco teórica
h'	Espessura de cavaco deformado
h_{cu}	Espessura de cavaco não deformado
p_{Mi}	Dispersão percentual padronizada
v_c	Velocidade de corte (para ferramenta com geometria definida)
v_s	Velocidade do rebolo (ou de corte)
v_w	Velocidade da mesa (ou da peça)
ϕ	Ângulo de cisalhamento

Sumário

CAPÍTULO I - Introdução	1
CAPÍTULO II - Revisão Bibliográfica.....	3
2.1 Titânio e suas ligas.....	3
2.2 Usinagem com ferramentas abrasivas	6
2.2.1 Retificação	7
2.2.2 Formação de cavaco durante a retificação.....	9
2.2.3 Formação de cavaco durante a retificação de ligas de titânio	12
2.2.4 Retificabilidade das ligas de titânio	15
2.3 Parâmetros pertinentes à retificação plana.....	17
2.4 Rebolo e propriedades	19
2.4.1 Classificação dos rebolos	19
2.4.2 Materiais abrasivos convencionais.....	20
2.4.3 Propriedades e aplicações.....	20
2.5 Integridade superficial	22
2.6 Danos térmicos no processo de retificação	24
2.7 Fluidos de corte em retificação.....	25
2.7.1 Técnica de Mínima Quantidade de Fluido em retificação de titânio.....	26
2.8 Grafeno	30
CAPÍTULO III - Metodologia	32
3.1 Equipamentos e materiais	33
3.1.1 Máquinas-ferramentas	34
3.1.2 Ferramentas de corte.....	34
3.1.3 Acessórios para operação de usinagem	35
3.1.4 Material da peça	37
3.2 Parâmetros de corte.....	37
3.2.1 Preparação dos corpos de prova	37
3.2.2 Ensaios preliminares de retificação.....	38
3.2.3 Ensaios definitivos	39

3.3 Procedimentos adotados	40
3.3.1 Obtenção e caracterização das amostras	41
3.3.2 Ensaios definitivos	43
3.4 Medição das variáveis de saída	47
3.4.1 Rugosidade.....	47
3.4.2 Imagens de microscopia eletrônica e EDS.....	48
3.4.3 Microdureza	48
3.4.4 Imagem da superfície do rebolo.....	50
3.4.5 Potência elétrica	50
CAPÍTULO IV - Resultados e Discussão	52
4.1 Rugosidade superficial	52
4.2 Imagens das superfícies de Ti-6Al-4V retificadas via MEV	59
4.3 Imagens da superfície do Rebolo	64
4.3.1 Dressador	66
4.4 Microdureza da liga Ti-6Al-4V após retificação com rebolo de SiC.....	67
4.5 Potência elétrica.....	71
CAPÍTULO V - Conclusões.....	73
5.1 Sugestões de trabalhos futuros	74
Referências Bibliográficas	75

CAPÍTULO I

Introdução

A usinagem das ligas de titânio pelos processos convencionais sempre foi motivo de preocupação para pesquisadores e empresários do setor metal-mecânico que produzem componentes destes materiais, principalmente da liga Ti-6Al-4V. Dentre as principais razões para a baixa usinabilidade dessa liga destacam-se a afinidade química com a maioria dos materiais de ferramentas de corte, baixa condutividade térmica e formação de cavaco segmentado, entre outras, que levam a alta geração de calor concentrada na região de corte, acelerando o desgaste das ferramentas de corte com ferramenta de geometria definida.

Mas em termos de processo de retificação das ligas de titânio, ainda são poucos os trabalhos na literatura (EZUGWU; WANG, 1997) de forma que qualquer investigação em termos de usinagem desta liga para encontrar parâmetros adequados para a produção de superfícies de melhor qualidade, e que garantam a integridade da superfície dos componentes, será uma grande contribuição.

Como já comentado, a usinagem das ligas de titânio é dificultada pela elevada reatividade química delas com os materiais de ferramentas de corte. E como em retificação são utilizadas cerâmicas e superabrasivos (CBN e PCD) a usinagem se torna mais desafiadora. Dentre estas ferramentas, a menor afinidade é com as ferramentas de diamante, mas devido ao custo dessas ferramentas, a maioria das aplicações na retificação das ligas de titânio ainda são com rebolos de carbetto de silício (SiC) porosos (MARINESCU et al., 2007).

O objetivo geral desse trabalho é estudar e avaliar a influência da técnica de mínima quantidade de lubrificação convencional (MQL), que contém fluido e ar, e MQL com partículas dispersas de grafeno no fluido de corte na integridade da superfície da liga de titânio Ti-6Al-4V durante processo de retificação.

Os objetivos específicos deste trabalho são: investigar o desempenho da adição de partículas de grafeno à técnica MQL usual no processo de retificação plana tangencial da liga de titânio Ti-6Al-4V utilizando diferentes condições de usinagem (v_w e v_s fixos, a_e variável). Para isto, será proposto um planejamento experimental para posterior avaliação.

Neste sentido, este trabalho visa contribuir para o setor de usinagem, em específico o de usinagem por abrasão, gerando dados que servirão de base para futuros estudos sobre a retificação de liga de titânio e buscando soluções às deficiências encontradas no controle da temperatura de superfícies desta superliga, usinadas por retificação. Os ensaios foram conduzidos no Laboratório de Usinagem Convencional da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia. Neste trabalho foram variadas a penetração de trabalho, número de passes e técnica de aplicação de fluido no processo.

Este trabalho é dividido em cinco capítulos. No capítulo I foi apresentada a Introdução.

No capítulo II é apresentada a revisão bibliográfica necessária para a contextualização do tema e os conceitos teóricos utilizados como base para este trabalho, entre eles podem-se citar: processos de usinagem com ferramentas abrasivas, parâmetros pertinentes ao processo, usinabilidade e retificabilidade das ligas de titânio, integridade superficial e uso de grafeno na usinagem.

No capítulo III é apresentada a metodologia utilizada neste trabalho onde se encontram informações como as especificações de equipamentos, ferramentas empregadas e peça usinada, bem como o procedimento experimental detalhado para a condução do processo de usinagem e procedimento de medição das variáveis de saída.

No capítulo IV são apresentados os resultados e discussões pertinentes ao trabalho.

No capítulo V são apresentadas conclusões obtidas nos resultados e as sugestões para trabalhos futuros.

Ao final são apresentadas as referências bibliográficas.

CAPÍTULO II

Revisão Bibliográfica

2.1 Titânio e suas ligas

O titânio é um material que começou a ser utilizado com destaque no cenário comercial em meados do século XX. Ele é obtido comercialmente através da redução do tetracloreto de titânio com magnésio, produzindo uma espécie de esponja de titânio. Essa esponja é então fundida em vácuo para a produção de um lingote metálico. O resultado é um metal branco, de aparência lustrada, com densidade igual 4,51 g/cm³ e um módulo de elasticidade de 110 GPa.

O titânio comercialmente puro possui duas fases distintas, a alfa (α) para temperaturas abaixo de 885 °C e a beta (β) acima dessa temperatura. A fase α tem estrutura hexagonal compacta (HC), enquanto que a β é de cúbica de corpo centrado (CCC). A maioria dos elementos de liga para o titânio tendem a diminuir a temperatura de transformação do Ti de α para β . O alumínio, porém, aumenta essa temperatura, como um estabilizador de fase α em altas temperaturas, o que faz dele um dos elementos mais importantes em muitas ligas de titânio (THORTON; COLANGELO, 1985).

Os elementos de liga: ferro, manganês, cromo, molibdênio, vanádio, nióbio e tântalo, estabilizam a fase β , reduzindo a temperatura de transformação α - β . As adições de nióbio e tântalo melhoram ainda a resistência da liga e ajudam a prevenir a fragilização produzida pela presença de compostos de alumínio e titânio. Quanto aos tipos de estrutura para as ligas de titânio, é comum a separação em três classificações: α , $\alpha + \beta$ e β . As ligas α são constituídas de uma única fase e não passam por uma transformação polimórfica, e por isso essas ligas não são sensíveis a tratamentos térmicos, não desenvolvendo resistência como em outras ligas de titânio. As ligas $\alpha + \beta$ são tratáveis termicamente através de endurecimento por precipitação e possuem boa ductilidade. Uma imagem da microestrutura da liga Ti-6Al-4V, uma liga de titânio $\alpha + \beta$ de alta resistência, pode ser vista na Fig. 2.1. As

ligas β , por outro lado, tem ductilidade relativamente baixa e tende a ter resistência mais elevada que as α e $\alpha + \beta$ (THORTON; COLANGELO, 1985).

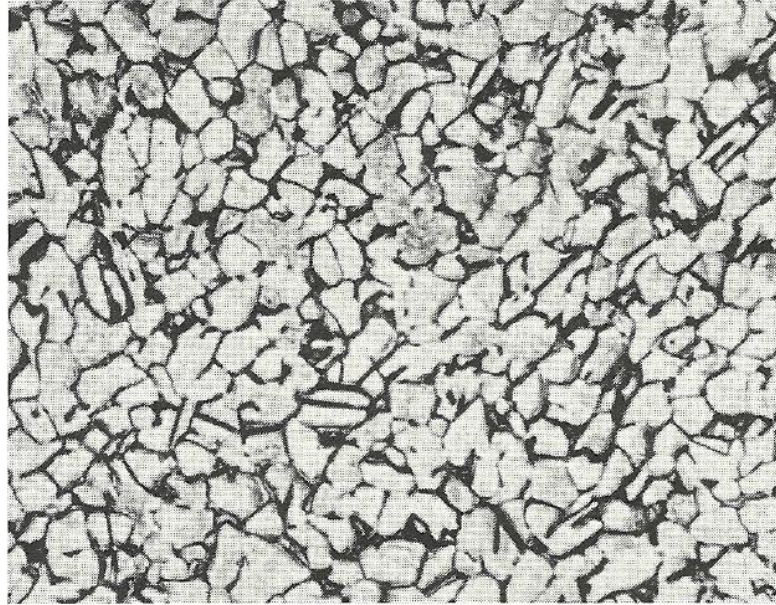


Figura 2.1 - Microestrutura de liga Ti-6Al-4V recozida. Grãos cinzas claro equiaxiais consistem de fase α ; fase intergranular escura é a β (THORTON; COLANGELO, 1985)

Na Tabela 2.1 são apresentadas as propriedades mecânicas e algumas aplicações das principais ligas comerciais de titânio.

Tabela 2.1 - Composição, estrutura e propriedades mecânicas para algumas ligas de titânio (adaptado de THORTON; COLANGELO, 1985)

Composição	Condição	Tensões limite à temp. ambiente		Alongamento (%)	Estrutura	Tratável termicamente	Aplicação típica
		LRT (MPa)	LE (MPa)				
Puro	Recozido					Não	Válvulas de controle hidráulico; acessórios; suportes de fixação; dutos soldados; formas complexas de tubo; estruturas de casco-longarina
ASTM Classe 2		407	276	28			
ASTM Classe 3		518	428	27			
ASTM Classe 4		656	552	25			
Ti-5Al-2,5Sn	Recozido	863	828	18	α	Não	Caixas de transmissão e engrenagem; casco de montagem do compressor de motor a jato e carcaça do estator
Ti-8Al-1Mo-1V	593 °C (8 h), resf. ao ar	1001	932	16	α	Não	Palhetas, discos e caixas de compressor de motor a jato; casco e estrutura internos para conjunto de bicos de motor a jato; estruturas de chapa-longarina experimentais; anteparo de forjamento
Ti-6Al-4V	Recozido	932	828	11	$\alpha + \beta$	Sim	Palhetas, discos, etc., de compressor de motor a jato; rodas e estruturas de trem de pouso; fixadores; suportes; acessórios; garrafas de pressão; quadros; parede anti-chamas; reforços; prótese de quadril
	927 °C (20 min), têmpera em água + 525 °C (8 h), resf. ao ar	1173	1035	7	$\alpha + \beta$		
Ti-6Al-6V-2Sn	Recozido	1139	1070	12	$\alpha + \beta$	Sim	Fechos e controle de entrada de ar; peças forjadas estruturais experimentais
Ti-13V-11Cr-3Al	Recozido	897	863	16	β	Sim	Peças forjadas estruturais; estruturas de chapa-longarina primárias e secundárias; carcaças; quadros; suportes; acessórios; fixadores; e usos especiais
	760 °C (30 min), resf. ao ar	1208	1139	6			

Propriedades como o elevado ponto de fusão (1660 °C), excelente resistência à corrosão e boa resistência mecânica que são mantidas em elevadas temperaturas, além de

ótima relação resistência-peso em relação aos aços, por exemplo, e biocompatibilidade fazem do titânio e suas ligas materiais importantes para várias aplicações do setor aeroespacial, naval, automotivo e médico odontológico (DA SILVA et. al, 2004). Por isso o titânio e suas ligas, principalmente a liga Ti-6Al-4V, são de grande interesse de pesquisadores e cientistas dos setores acadêmicos e industrial. Mas infelizmente, os custos envolvidos em sua obtenção/preparação são um obstáculo para o amplo emprego desses materiais frente às ligas ferrosas e muitas outras não-ferrosas (BROOKS, 1982).

Deste modo, titânio pode ser utilizado tanto para redução de peso em uma estrutura ao substituir ligas de aço mais pesadas ou como opção a superligas em componentes que operam em baixa temperatura de uma turbina a gás, por exemplo. Ele pode ainda ser empregado como substituto ao alumínio quando a temperatura de operação excede as capacidades do mesmo ($\sim 149^\circ\text{C}$), ou em áreas onde resistência à fadiga e corrosão se mostrem como problemas recorrentes (CAMPBELL, 2006). As ligas de titânio podem ainda ser empregadas em componentes que trabalham em temperaturas abaixo 0°C . Entretanto, outras características inerentes às ligas de titânio tais como: tendência de reagir quimicamente com maioria dos materiais de ferramentas de corte a temperaturas superiores a 500°C , formação de cavacos segmentados, baixo módulo de elasticidade e baixa condutividade térmica (37 % e 86 % menor que a condutividade térmica da liga de níquel Inconel 718 e aço AISI 1045, respectivamente) as caracterizam como sendo materiais de difícil corte ou de baixa usinabilidade. A reduzida área de contato cavaco-ferramenta, o desenvolvimento de elevadas temperaturas de corte, elevadas tensões na ponta da ferramenta e de elevadas forças durante a usinagem das ligas de titânio promovem a deformação plástica e/ou aceleram o desgaste da ferramenta (DA SILVA, 2006). Diante deste cenário as velocidades de corte têm que ser reduzidas. Em alguns casos as ferramentas de corte apresentam lascamento e/ou fratura súbita devido à tendência do titânio soldar-se à ponta da ferramenta.

2.2 Usinagem com ferramentas abrasivas

Nos processos de usinagem convencionais com ferramentas abrasivas, ou usinagem por abrasão, o material da peça é removido por meio da ação de grãos abrasivos, os quais são partículas não metálicas, extremamente duras, com arestas afiadas e que apresentam forma e orientação irregular (ASM METALS HANDBOOK, 2004). O lixamento, o jateamento abrasivo, a afiação de ferramentas, o brunimento, a retificação, o polimento e a lapidação,

que são os exemplos mais comuns desta classe, sendo que cada uma possui sua especificidade e aplicabilidade.

Esses processos, em sua maioria, são utilizados para obtenção de superfícies bem acabadas, onde há necessidade de atingir tolerâncias apertadas (IT4, IT6 e tolerância geométrica compatível) e também para a usinagem de materiais frágeis ou de elevada dureza (MARINESCU et al., 2007). Contudo, comparado a outros processos de usinagem convencionais com ferramentas de geometria definida (como fresamento, por exemplo), há um número maior e mais complexos de parâmetros a serem controlados ao empregar os processos de usinagem por abrasão (LEE et al., 2002) que exigem mais atenção do operador. Alguns destes parâmetros, se não forem devidamente selecionados, como é o caso da penetração de trabalho, tipo e forma de aplicação de fluido de corte, podem comprometer a qualidade da superfície usinada.

O processo que mais se destaca entre os processos de usinagem por abrasão é a retificação, por ser a mais amplamente utilizada na indústria metal mecânica. A demanda por produtos usinados e com tolerâncias mais estreitas e livres de defeitos, principalmente na indústria automobilística, é cada vez mais alta, por exemplo, na fabricação de componentes de rolamentos, eixos de câmbios, cruzetas, engrenagens. Na indústria aeroespacial é também um processo requisitado para superfícies de eixos fabricados em titânio, e que impliquem em alto rendimento em termos de produtividade, precisão e custo (KOPAC; KRAJNIK, 2006).

2.2.1 Retificação

A retificação é a designação para processos de usinagem de materiais duros ou frágeis, onde são empregadas ferramentas (rebolos) contendo partículas abrasivas e não metálicas de dureza superior a do material a ser usinado, isto é, o material é removido por meio da ação destes grãos abrasivos os quais apresentam arestas que possuem formas e orientações irregulares (MARINESCU, et al., 2007). Outra forma de classificação é dada por Ferraresi (1969), onde ele cita que a retificação, de um modo geral, é o “processo de usinagem por abrasão destinado à obtenção de superfícies com auxílio de ferramenta abrasiva de revolução. Para tanto, a ferramenta gira e a peça ou a ferramenta se desloca segundo uma trajetória determinada, podendo a peça girar ou não.” Dessa forma, remete-se ao fato de existirem diferentes designações para os processos de retificação, relacionados aos movimentos relativos entre peça e ferramenta, bem como sua aplicabilidade. Dentre elas existe a retificação plana tangencial. O termo “plana” se refere ao formato da peça, que é plana, e o termo “tangencial” pelo fato do processo ser executado com a superfície de revolução da ferramenta (FERRARESI, 1969).

Os principais parâmetros de corte da retificação são a velocidade do rebolo (ou de corte, v_s), a velocidade da peça (ou da mesa, v_w), a profundidade de corte (a_p) e a penetração de trabalho (a_e), como ilustrado para o processo de retificação plana tangencial na Fig. 2.2.

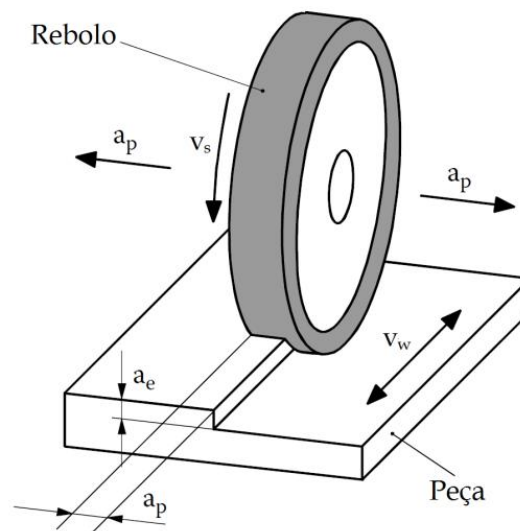


Figura 2.2 - Parâmetros de corte em retificação plana tangencial (adaptado de MARINESCU, et al., 2007)

Kopac e Krajnik (2006) citam algumas características que são intrínsecas do processo de retificação:

- A forma média dos grãos de ferramentas de retificação é definida estatisticamente;
- Grãos abrasivos são frágeis e se quebram formando pontas afiadas;
- Partes protuberantes atuam no processo de corte;
- Arestas com geometria negativa penetram em trajetória quase plana, ocorrendo deformações plásticas e elásticas;
- Remoção de material por muitas arestas simultaneamente;
- Remoção de material na faixa de micrometros (observação difícil);
- Cavacos com seção variável;
- Os ensaios experimentais demandam mais tempo de usinagem.

Segundo Malkin e Guo (2008), o processo de retificação requer uma quantidade significativa de energia para a remoção de material. Energia essa que, transformada em calor, concentra-se dentro da região de corte. Como os materiais cerâmicos convencionais utilizados na fabricação de rebolos possuem, em geral, baixa condutividade térmica, grande parte deste calor é conduzida para a peça (Figura 2.3). O calor gerado na retificação tem

sua maior intensidade no contato entre peça e rebolo, penetrando em direção ao centro da primeira. Com isso, quanto maior a dificuldade do fluido adentrar na região de corte, maior será o calor presente na peça, facilitando processos de dilatação e deformação térmicas.

Durante a usinagem, as elevadas temperaturas desenvolvidas podem causar sérios danos nas superfícies das peças usinadas, como a queima da superfície e outras transformações microestruturais, muitas vezes não visíveis a olho nu. E são muitas as pesquisas que visam contornar estes problemas, seja buscando determinar parâmetros de corte mais adequados (alterando velocidade da mesa, penetração de trabalho, rebolo, fluido de corte e forma de aplicação, dentre outros). Em se tratando do fluido de corte, a aplicação daqueles com elevada capacidade de refrigeração tem sido sempre preferida pois, em geral influencia na força de corte e na integridade superficial da peça, bem como minimiza os desvios dimensionais (muito comuns em retificação) pois algumas de suas funções são de lubrificar e refrigerar a zona de corte. A qualidade e a quantidade do fluido de corte também são fatores que devem ser levados em conta, pois irão influenciar na qualidade da peça usinada (tanto na superfície quanto sub-superfície). A função refrigeração é importante para controlar o gradiente de temperatura na retificação, que influi na integridade superficial da peça (JOHNSON, 1990).

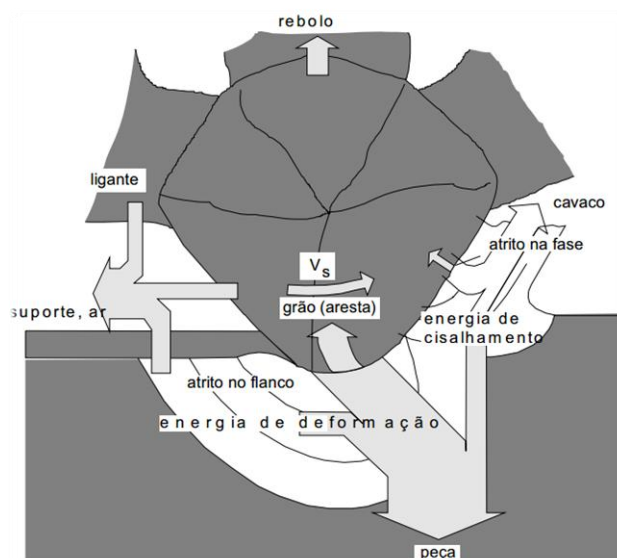


Figura 2.3 - Esquema do fluxo de calor em retificação para um único grão abrasivo (JÚNIOR, 1992)

2.2.2 Formação de cavaco durante a retificação

Embora o grão abrasivo, que contém aresta com geometria não definida, seja menor que uma aresta de uma ferramenta de corte convencional (bit, inserto, broca), para fins de estudo dos fenômenos de usinagem, ele pode ser considerado como uma única aresta.

Neste sentido, por analogia, o processo de remoção de material nos processos por abrasão é semelhante aquele observado em processos de usinagem convencional com ferramenta de geometria definida, como o torneamento (Figura 2.4).

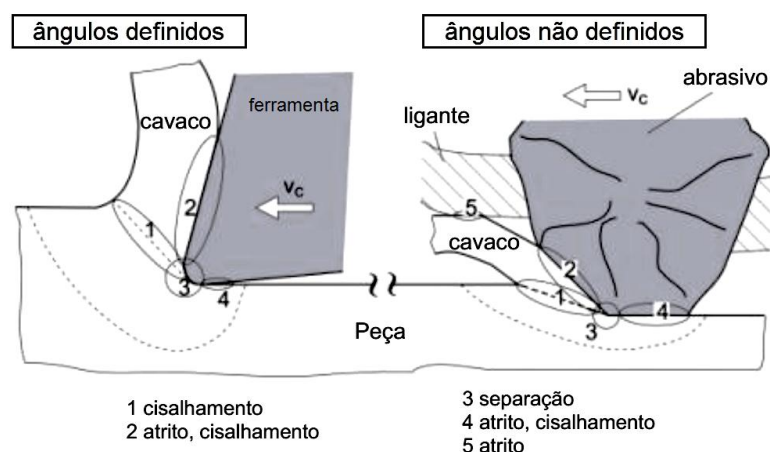


Figura 2.4 - Esquema de formação de cavaco com ferramentas de ângulos definidos e com ângulos não definidos (adaptado de NEUGEBAUER et al, 2011)

Mas algumas considerações devem ser feitas, como é o caso do ângulo de saída do grão que pode alternar entre negativo e positivo durante as sucessivas passagens do rebolo sobre a peça.

Para o processo de retificação, os mecanismos envolvidos no corte (atrito, cisalhamento e remoção do cavaco) são mais difíceis de serem avaliados, tendo em vista a geometria irregular dos grãos abrasivos, as elevadas velocidades de corte empregadas e as dimensões do corte. Aliado a isso, tem-se também a característica refratária dos abrasivos convencionais (alumina e carbeto de silício). Assim, as observações realizadas para os mecanismos de formação de cavaco em processos de usinagem convencional com ferramenta de geometria definida são possíveis devido à dimensão dos cavacos formados e a acessibilidade à região de corte através da técnica de *quick-stop*. Mas as mesmas observações via *quick-stop* tornam-se mais complexas em processo de retificação, uma vez que as velocidades de corte são muito elevadas.

Durante a usinagem com ferramenta de geometria definida, a ferramenta avança contra o material da peça, recalçando-a. Como consequência, o metal sofre deformações passando por todo o campo elástico e plástico, até que em determinado ponto o material não mais resiste e cisalha, formando uma lamela de cavaco que desliza sobre a superfície de saída da ferramenta. Com a continuidade do corte, devido à dinâmica da usinagem, o processo é notoriamente cíclico, podendo gerar cavacos longos e contínuos, caso o material seja dúctil (MACHADO et al., 2011).

Já na usinagem com ferramenta de geometria não definida, por exemplo na retificação, a natureza da formação do cavaco dependerá da interação do grão abrasivo com o tipo de material da peça (dúctil ou frágil) e ela pode ser de duas formas diferentes.

No caso de material dúctil (Figura 2.5), a remoção de material ocorre em três etapas. Inicialmente a aresta cortante do grão abrasivo penetra na peça com uma profundidade bem pequena, causando, inicialmente, apenas deformação elástica. À medida que o grão abrasivo penetra na peça, material da peça vai sendo empurrado e colocado de lado pela aresta cortante, porém, sem remoção de material, ou seja, nesta fase ocorre apenas deformação plástica. Quando a penetração de trabalho do grão abrasivo (h_{cu}) atinge um valor crítico que garante a remoção de material da peça, cavaco é então formado (KÖNIG, 1996). De forma simplificada, algumas diferenças entre as etapas de formação de cavaco entre os processos de usinagem com ferramenta de geometria definida e com geometria não definida são apresentadas na Tab. 2.2.

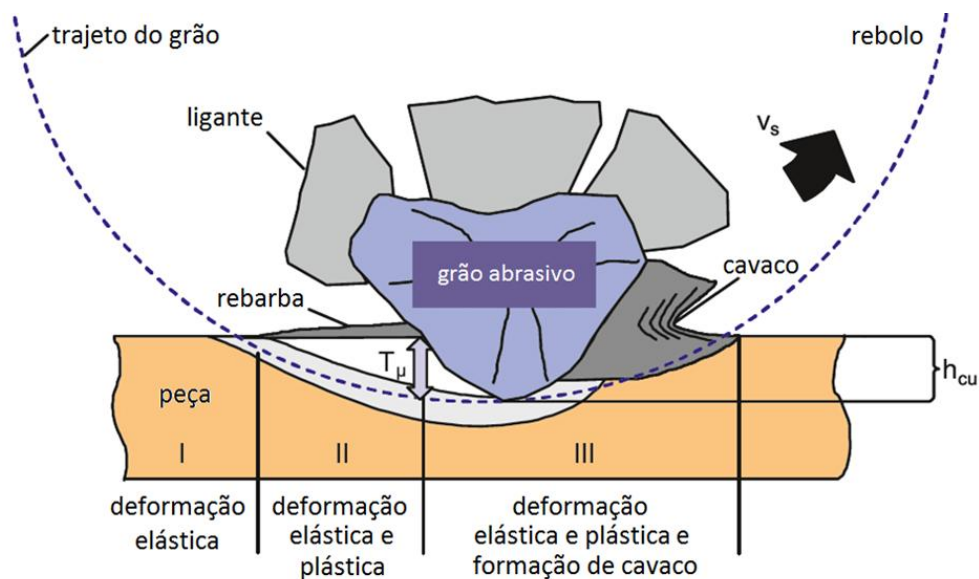


Figura 2.5 - Remoção de material na abrasão de materiais dúcteis (adaptado de KLOCKE, 2009)

Tabela 2.2 - Características do processo de formação de cavaco dos processos de usinagem convencionais com ferramenta de geometria definida e sem geometria definida.

Ferramenta com geometria definida ex.: inserto de metal duro para torneamento (MACHADO et al., 2011)	Ferramenta com Geometria Não Definida ex.: Grãos abrasivos de rebolo para retificação (MARINESCU et al., 2004)
<ul style="list-style-type: none"> • Recalque inicial • Deformação e ruptura • Deslizamento das lamelas • Saída do cavaco • Zona de aderência 	<ul style="list-style-type: none"> • Recalque e sulcamento • Formação de microtrincas e cisalhamento • Escoamento do cavaco • Fusão • Expulsão do cavaco • Formação do cavaco esférico • Ausência de zona de aderência

Para o caso de materiais frágeis (Figura 2.6), que em geral apresentam dureza superior a 42 HRC, com exceção dos ferros fundidos gráfiticos com dureza inferior a 38HRC, a diferença está na ausência do campo plástico, por isso, ao invés de haver deformação prévia, há a fratura do material, gerando cavacos fragmentados.

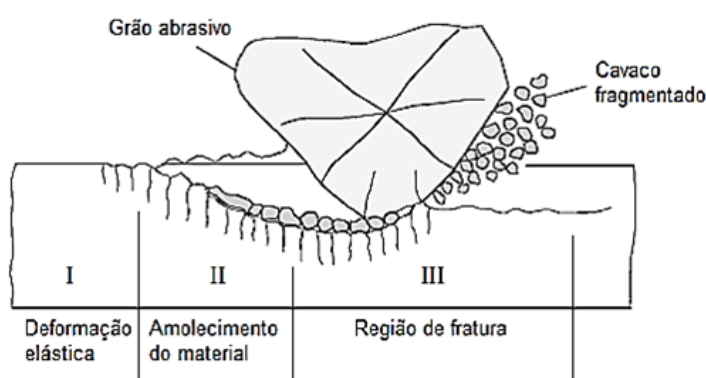


Figura 2.6 - Remoção de material na abrasão de materiais frágeis (adaptado de MARINESCU, 2007)

2.2.3 Formação de cavaco durante a retificação de ligas de titânio

Como a literatura ainda não apresenta muitos resultados sobre o processo de formação de cavaco no processo de retificação das ligas de titânio, é preciso recorrer ao fenômeno de formação de cavaco que ocorre durante a usinagem com ferramenta de geometria definida. Durante a formação de cavaco para ligas com baixa condutividade térmica, como no caso do titânio, que comparada à de um aço AISI 1045 ($50,7 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) é cerca de sete vezes menor ($7,3 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$), a concentração da deformação ocorre em uma

faixa muito estreita no plano de cisalhamento primário (KOMANDURI, 1981), o que leva a um rápido aumento da temperatura nessa faixa, tornando o material mais mole e mais susceptível à deformações. Com o avanço da ferramenta, o material é deformado nessa faixa, deslocando-a no sentido da superfície de saída da ferramenta até que uma nova faixa de material ceda e o processo se repita (Figura 2.7). O cavaco formado é classificado como segmentado e tem a característica de apresentar segmentos com fronteiras altamente deformadas e com núcleo pouco deformado, como demonstrado na Fig. 2.8a.

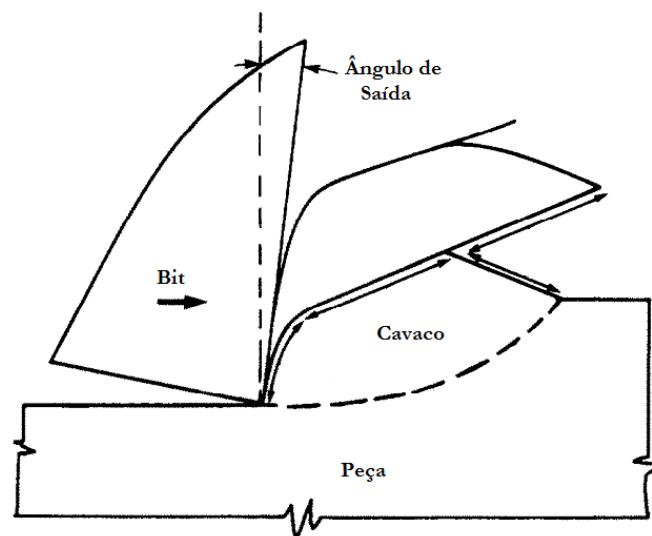
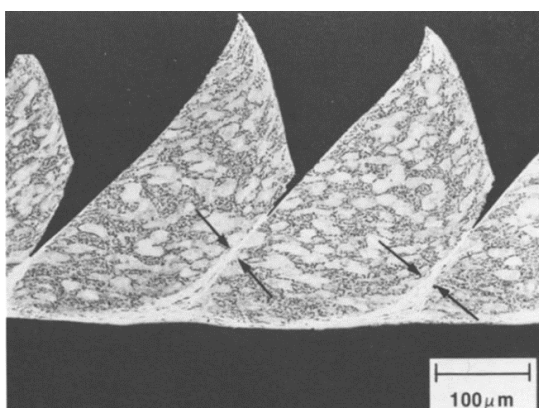
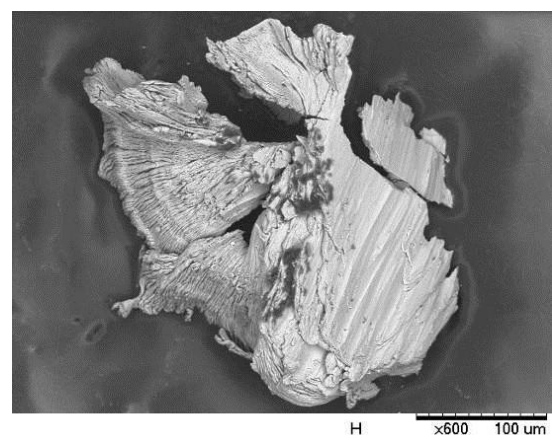


Figura 2.7 - Diagrama esquemático da formação de cavaco segmentado (KOMANDURI, 1981)



(a)



(b)

Figura 2.8 - Micrografia de cavaco de Ti-6Al-4V (a) produzido no torneamento (KOMANDURI, 1981) e (b) produzido após retificação (próprio autor)

Cavacos da liga de titânio Ti-6Al-4V produzidos por retificação com rebolo de carbeto de silício convencional, grana 60 (GC60K5V) foram selecionados e analisados por Setti et al. (2015), como podem ser visto na Fig. 2.9. Eles observaram a formação de cavacos mais longos para condições a seco e com aplicação convencional (jorro), mas com dimensões menores quando utilizada a técnica MQL com nanopartículas devido à formação de aglomerados contendo grão fraturado, nanopartículas e cavacos aderidos um ao outro, devido em grande parte à afinidade química entre os elementos do rebolo e da peça.

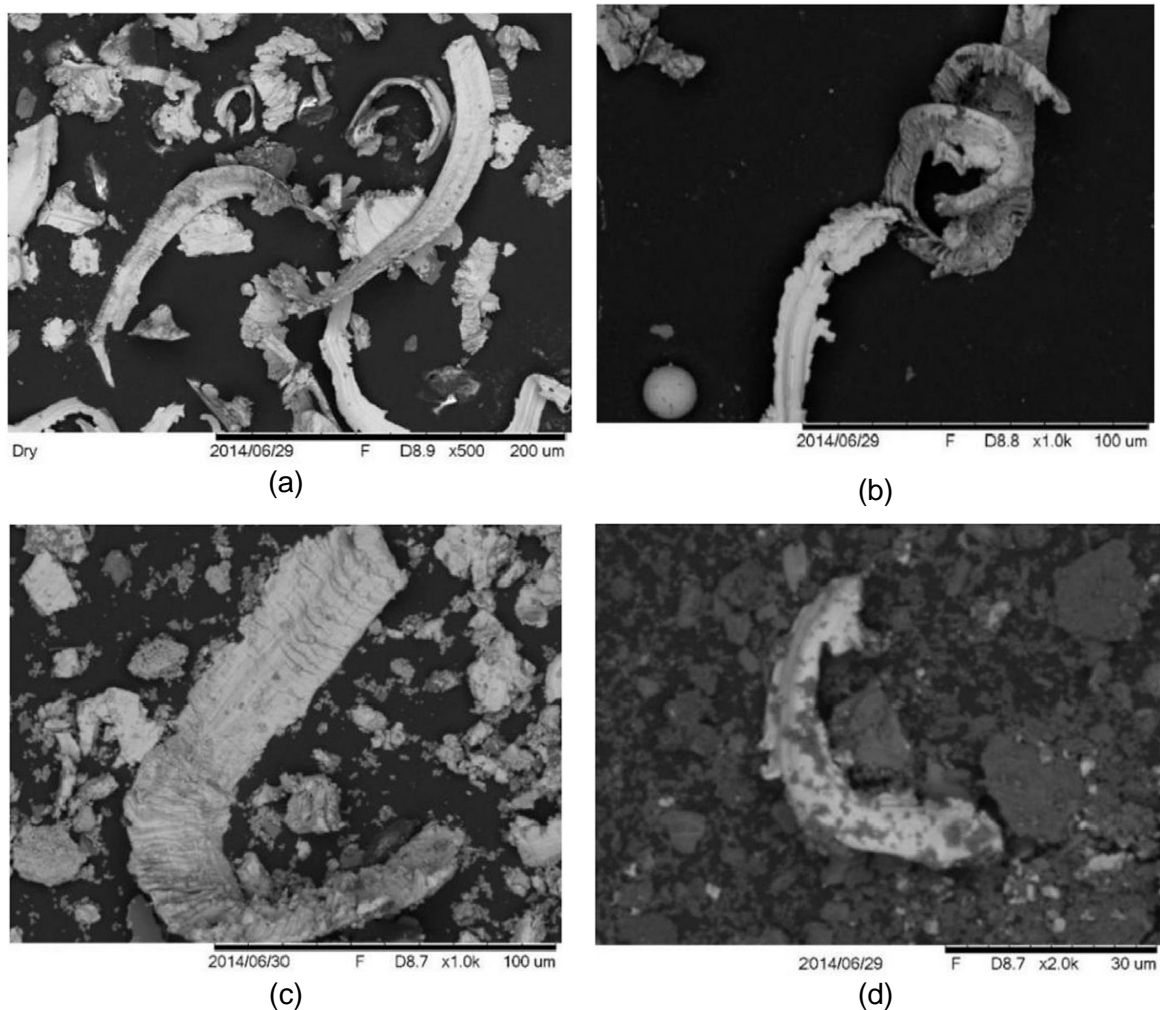


Figura 2.9 - Imagens de cavacos obtidos após retificação em diferentes atmosferas: (a) a seco; (b) jorro; (c) MQL com nanopartículas de CuO e; (d) MQL com nanopartículas de Al_2O_3 (SETTI et al., 2015)

Neste mesmo contexto, Komanduri (1981) discutiu uma comparação feita por Boston et al. (1955) em que se tentou enfatizar que, para uma mesma espessura de corte h , ao se usinar uma peça de aço e outra de titânio, a espessura de cavaco deformado h' obtido para

o titânio seria menor, resultando em um ângulo de cisalhamento maior e, portanto, um grau de recalque menor (mais próximo da unidade) (Figura 2.10).

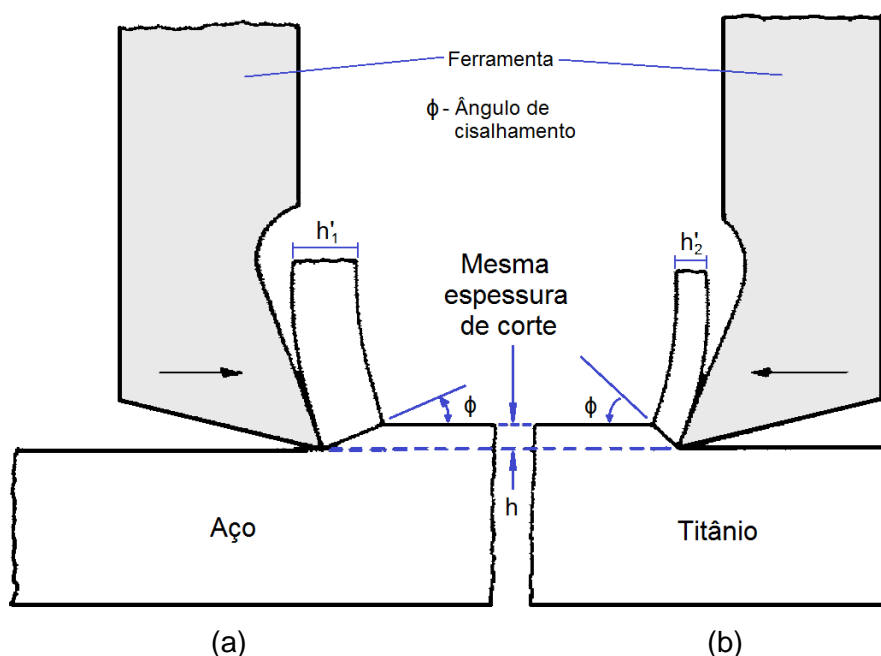


Figura 2.10 - Modelos para a formação de cavaco usinando (a) aço e (b) titânio (adaptado de KOMANDURI, 1981)

Entretanto, essa comparação utiliza a premissa de que há pouca deformação envolvida na formação de cavaco de titânio, o que, mesmo sendo verdade, não valida uma aproximação pelo modelo convencional de formação de cavaco contínuo, pois o cavaco característico de titânio é do tipo segmentado (KOMANDURI, 1981), como mostrado anteriormente.

2.2.4 Retificabilidade das ligas de titânio

As ligas de titânio são consideradas ligas de baixa usinabilidade por todos os processos de usinagem convencional com ferramentas de geometria definida. Há na literatura um grande número de trabalhos que estudaram as características da usinagem de titânio e suas ligas utilizando de processos com ferramenta de geometria definida, mas ainda foi pouco explorado na literatura trabalhos envolvendo o estudo da retificação desta liga.

Ezugwu e Wang (1997) relataram que estudar a usinabilidade desta liga é de grande importância, pois não é fácil encontrar parâmetros adequados que combinem produtividade com garantia de bom acabamento e com garantia da integridade da superfície dos componentes usinados.

Dentre os principais motivos da baixa usinabilidade das ligas de titânio, destacam-se:

- Tendência de reagir quimicamente com maioria dos materiais de ferramentas de corte a temperaturas superiores a 500 °C;
- Formação de cavacos segmentados;
- Baixo módulo de elasticidade (110 GPa) e baixa condutividade térmica ($7,3 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) comparada aos materiais Inconel 718 (204,9 GPa e $11,2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) e aço AISI 1045 (207 GPa e $50,7 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) (DA SILVA, 2006; PUSAVEC et al., 2014);
- A reduzida área de contato cavaco-ferramenta em relação a outros materiais, o que é responsável pela geração de altas tensões na superfície de saída da ferramenta durante a usinagem;
- O desenvolvimento de elevadas temperaturas de corte, elevadas tensões na ponta da ferramenta e de elevadas forças durante a usinagem das ligas de titânio promovem a deformação plástica e/ou aceleram o desgaste da ferramenta (EZUGWU; WANG, 1997). No caso da retificação este aspecto ainda é mais agravante pois as velocidades de corte são maiores e os abrasivos utilizados nos rebolos convencionais são pobres condutores de calor. Com isso, maior calor se concentra na região de corte de forma que a maior parcela de calor será direcionada para a peça.

A Figura 2.11 mostra valores típicos para retificabilidade (termo utilizado para a usinabilidade de materiais metálicos pelo processo de retificação). A retificabilidade leva em conta os parâmetros do processo, tais como a penetração de trabalho, a velocidade da peça e do rebolo e material do rebolo, lembrando que são várias tecnologias para fabricação de abrasivos e ligantes. Nessa figura, as ligas de titânio são aquelas consideradas de mais baixa retificabilidade e elas são comparadas ao material para fabricação de ferramentas, aço rápido, por possuir a maior dureza dentre os listados (normalmente 62 HRc).

Sabe-se que a usinagem das ligas de titânio é dificultada pela elevada reatividade química delas com os materiais de ferramentas de corte, principalmente as cerâmicas. Neste sentido, como na retificação são utilizadas cerâmicas e superabrasivos (CBN e PCD), a usinagem se torna mais desafiadora. Dentre estas ferramentas, a menor afinidade é com as ferramentas de diamante, mas devido ao custo dessas ferramentas, a maioria das aplicações na retificação das ligas de titânio ainda são com rebolos de carbetos de silício (SiC) porosos. Por outro lado, segundo Marinescu et al. (2007), a usinabilidade (referida aos processos com ferramentas de geometria definida) do titânio se mantém melhor que para ligas à base de níquel ou de cobalto, no caso de formação de cavaco e qualidade da

superfície, e em muitos casos os processos de usinagem com ferramenta de geometria definida são considerados como melhor alternativa à retificação.

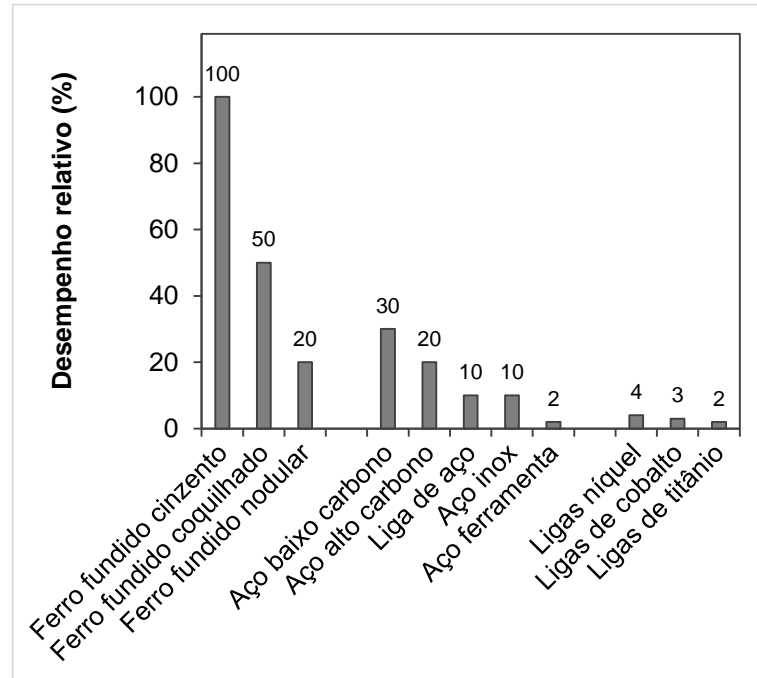


Figura 2.11 - Retificabilidade de ligas metálicas em % (adaptado de MARINESCU et al., 2007)

2.3 Parâmetros pertinentes à retificação plana

Para a caracterização e controle do processo de retificação, faz-se uso de uma série de parâmetros (Figura 2.2), com destaque para:

- Velocidade de corte ou do rebolo (v_s)

Dado em m/s, ela corresponde à velocidade periférica do rebolo e pode ser calculada segundo a Eq. (2.1).

$$V_s = \frac{\pi \cdot d_s \cdot n_s}{60 \cdot 1000} \quad (2.1)$$

Onde d_s é o diâmetro do rebolo, em mm, e n_s , a rotação, em rpm (o índice “s” é referente à palavra em inglês *spindle*, que quer dizer eixo).

Normalmente, este varia entre 10 m/s e 45 m/s para rebolos com abrasivos convencionais (Al_2O_3), mas pode chegar a 90 m/s ou 120 m/s para rebolos superabrasivos

(CBN), o que pode implicar em valores de rotação do eixo-árvore superiores a 10.000 rpm (NUSSBAUM, 1988). Olofson et al. (1965) indicam valores de v_s para retificação de titânio e suas ligas entre 12,7 e 25,4 m/s (2500 a 5000 *sfp*m – *surface feet per minute*), quando utilizado rebolo de SiC, e entre 9,14 e 12,7 m/s (1800 a 2500 *sfp*m) para rebolos de Al_2O_3 . Teicher et al. (2006) utilizaram um rebolo de CBN especial para seu trabalho que possuía um diâmetro de apenas 15 mm, a v_s utilizada foi de 16 m/s. Hood et al. (2007) empregaram as velocidades de 15, 25 e 35 m/s na retificação *creep feed* de uma liga γ -TiAl. No trabalho de Wójcik (2013) a v_s utilizada foi de 25,5 m/s, no de Sadeghi et al. (2009), 15 m/s, e Setti et al. (2015), utilizaram v_s igual a 17 m/s.

- Velocidade da peça (v_w)

Dado em m/min ou em mm/min, expressa a velocidade com que a peça tangencia o rebolo; em retificação plana é equivalente à velocidade de avanço longitudinal ou da mesa (MARINESCU et al., 2007). Assume valores mais modestos que os de v_s , na faixa de 10 m/min a 25 m/min (NUSSBAUM, 1988). Para a aplicação em ligas de titânio, Olofson et al. (1965), recomendam valores de v_w entre 7,2 e 12,7 m/min. Encontram-se ainda valores de 2 m/min (TEICHER et al., 2006), 6 m/min (WÓJCIK, 2013), de 0,15 a 0,6 m/min para retificação *creep feed* (Hood et al., 2007), 20, 30 e 40 m/min (SADEGHI et al., 2009) e 9 m/min (SETTI et al., 2015).

- Profundidade de corte (a_p) ou largura de corte (b)

É a profundidade axial do rebolo na peça ou a largura de penetração da ferramenta na peça, medida na direção perpendicular ao plano de trabalho. Na maioria dos casos é a largura do rebolo que está em contato com a peça. No caso da retificação plana de passagem, esse parâmetro é dado pelo incremento na direção paralela ao eixo do rebolo.

- Penetração de trabalho (a_e)

É a medida da espessura de material (mm) removido por revolução ou passagem da peça, também conhecida com profundidade radial ou o quanto a ferramenta penetra em relação ao plano de trabalho e é medida perpendicularmente à direção de avanço da peça ou rebolo. Esta variável (a_e), exceto em situações especiais, situa-se na faixa de milésimos de milímetros a centésimos ou décimos de milímetros, o que resulta em tolerâncias estreitas (qualidade de trabalho entre IT4 ou IT3) (MACHADO et al., 2011). Em trabalhos de retificação de titânio os valores utilizados foram: 1,25 a 5 mm, para processo *creep feed* (HOOD et al., 2007), 2, 5 e 7 μ m (SADEGHI et al., 2009), 10 a 50 μ m (WÓJCIK, 2013), e 5 μ m (SETTI et al., 2015).

2.4 Rebolo e propriedades

O rebolo é a ferramenta utilizada para processos de retificação em geral. Sua composição se baseia na união de grãos abrasivos cerâmicos por um ligante e com a presença de poros. Dependendo de sua aplicação pode ter formas e composições diferentes, como o tamanho e tipo dos grãos, estrutura do rebolo e tipo de ligante, além do seu formato. A seguir são apresentadas as características dessas ferramentas, especificações e particularidades.

2.4.1 Classificação dos rebolos

A classificação dos rebolos segue determinados padrões em que são identificados (Figura 2.12):

- O material do abrasivo;
- O tamanho do grão (grana ou mesh);
- A dureza do rebolo;
- A estrutura do rebolo (aberta ou fechada);
- O material do ligante, e;
- Quaisquer outras especificações do fabricante.

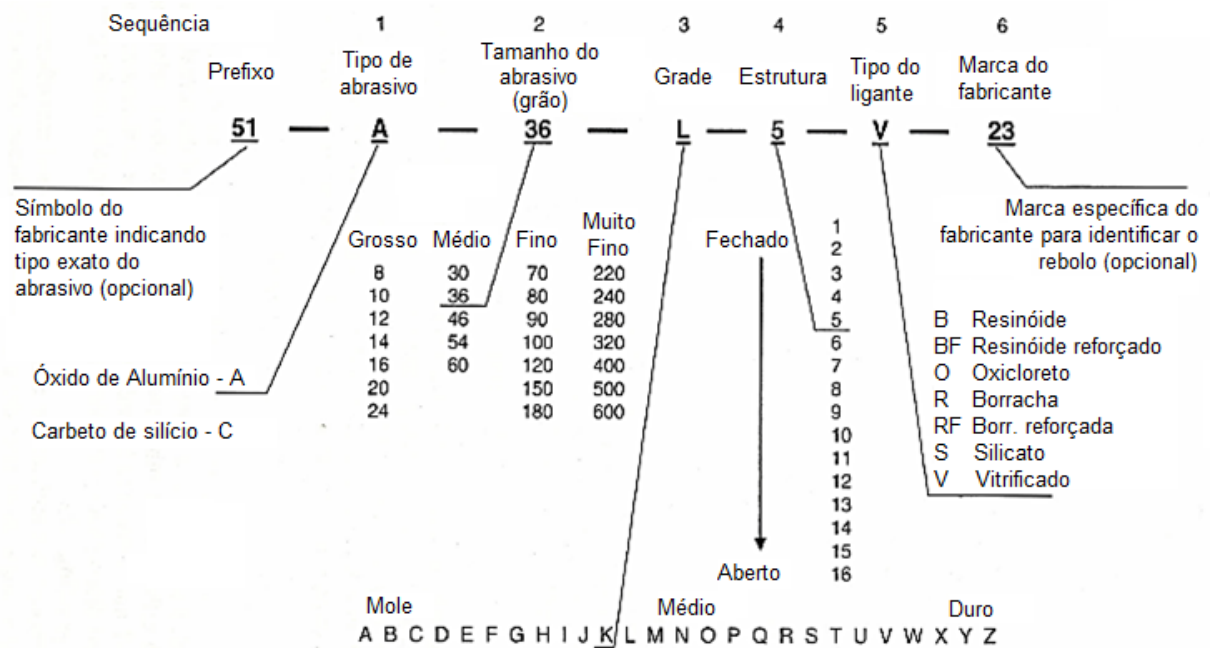


Figura 2.12 - Classificação padrão para abrasivos convencionais (Al_2O_3 e SiC) (adaptado de MALKIN; GUO, 2008)

Entretanto, outras formas de classificação comerciais também são usadas pelos fabricantes (Figura 2.13) onde há também a especificação das dimensões e formato do rebolo.

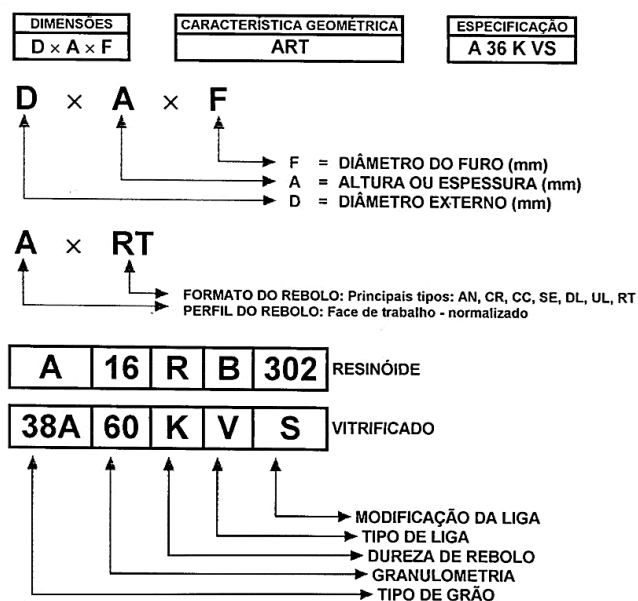


Figura 2.13 - Classificação de rebolo de abrasivos convencionais

2.4.2 Materiais abrasivos convencionais

Os materiais usados como abrasivos incluem tanto minerais naturais quanto produtos sintéticos. Os materiais abrasivos podem ser considerados como ferramentas de corte de geometria não definida caracterizadas por elevada dureza e arestas afiadas. A indústria de abrasivos está baseada em cinco materiais abrasivos: três considerados convencionais, que são o carbetto de silício (SiC), o óxido de alumínio (Al_2O_3) e a granada (abrasivo natural de aparência transparente e baixa dureza se comparada aos demais, mais utilizado no lixamento de madeira). Os outros dois, o diamante (PCD) e o nitreto cúbico de boro (CBN), são considerados superabrasivos (MARINESCU et al., 2004).

2.4.3 Propriedades e aplicações

As propriedades dos materiais abrasivos utilizados para confecção de rebolos são essencialmente a dureza, a tenacidade/friabilidade, a resistência ao atrito e estabilidade química (NUSSBAUM, 1988). A dureza Knoop de cinco abrasivos pode ser observada na Tab. 2.3. Basicamente, quanto maior a dureza do abrasivo mais resistente ao desgaste ele é, e mais eficiente é o processo de corte do material. Por outro lado, quanto maior a dureza do abrasivo, menor é a sua tenacidade, deixando-o susceptível à fratura prematura do grão e acelerando o desgaste do rebolo em algumas situações.

Tabela 2.3 - Dureza Knoop de materiais abrasivos (MARINESCU et al., 2004)

Material	Dureza Knoop (kg mm ⁻²)
Diamante	7000
CBN	4500
SiC	2700
Al ₂ O ₃	2500
Granada	1400

Grãos abrasivos com maior friabilidade tendem a fraturar, expondo novos pontos de corte afiados, podendo fazê-lo um número de vezes antes que o ligante ceda e haja o desprendimento do grão. Assim, o grão permanece afiado e auxilia no desenvolvimento de baixas cargas, gerando acabamentos piores. Abrasivos muito friáveis não seriam eficientes em processos de potências e cargas elevadas por causa de desgaste prematuro. Considerando os abrasivos convencionais, grãos friáveis são normalmente utilizados em aços endurecidos e sensíveis ao calor para garantir a penetração no material à potências e calor por atrito relativamente baixas na retificação de precisão (BERANOAGIRRE; LACALLE, 2013). Na Tab. 2.4 são apresentados os índices de friabilidade para alguns materiais de abrasivos convencionais. Nota-se que os abrasivos a base de alumina tem menor friabilidade que os a base carbetto de silício, com exceção da liga modificada (a maior da tabela) e do óxido de alumínio branco (friabilidade muito próxima às de SiC), amplamente usadas na afiação de ferramentas de aço rápido (65 HRC) (MALKIN; GUO, 2008).

Tabela 2.4 - Índice de friabilidade para abrasivos de Al₂O₃ e SiC (adaptado de MALKIN; GUO, 2008)

Material do Abrasivo	Índice de Friabilidade
Óxido de alumínio	
Modificado (3 % Cr)	65,0
Branco	56,6
Monocristalino	47,7
Regular	35,6
Microcristalino	10,9
10 % ZrO ₂	10,9
40 % ZrO ₂	7,9
Sinterizado	6,5
Carbeto de silício	
Verde	62,5
Preto	57,2

Na Tab. 2.5 (JACKSON; DAVIM, 2011), são apresentados valores relativos de desgaste do rebolo abrasivo ao se retificar alguns materiais.

Tabela 2.5 - Resistência ao desgaste relativa para os abrasivos durante a retificação (adaptado de JACKSON; DAVIM, 2011)

Material retificado Abrasivo (Dureza)				
	Alumina	Aço	Níquel	Titânio
Diamante (9.000 HV)	100.000	1.000	100	500
CBN (4.500 HV)	1.000	10.000	5.000	100
Al ₂ O ₃ (1.800 HV)	< 1	5 - 10	10	1
SiC (2.800 HV)	10	1 - 5	1	10

Desta tabela observa-se a superioridade dos superabrasivos (CBN e diamante), pois são os abrasivos mais duros utilizados como material de rebolo e tendem a ser os mais estáveis quimicamente na usinagem da maioria dos materiais, com exceção da combinação do PCD com materiais ferrosos. Para a retificação de titânio, o material ideal de rebolo seria o diamante, mas, devido ao elevado custo da ferramenta, emprega-se na maioria dos casos rebolos de SiC, pelo seu menor grau de afinidade em relação a Al₂O₃, o que reduz os efeitos de adesão da superfície dos abrasivos com o material da peça.

Esse efeito de adesão entre material e abrasivo tende ao empastamento do rebolo, que ocorre quando os cavacos ficam presos aos grãos do rebolo e tendem a reduzir o tamanho dos poros da ferramenta. Por isso indica-se uso de rebolos com estrutura aberta para o processamento de titânio e suas ligas. Além da estrutura mais aberta, é recomendado ao se trabalhar com titânio que o rebolo seja dressado com maior frequência, para evitar os problemas gerados com atrito promovido por grãos abrasivos desgastados (CAMPBELL, 2006).

2.5 Integridade superficial

A qualidade da superfície pode ser considerada consistir de dois aspectos: topografia da superfície e integridade superficial. A topografia de superfície se refere à geometria da superfície usinada, que é usualmente caracterizada pela rugosidade superficial, embora haja outros parâmetros que possam ser de interesse (MALKIN; GUO, 2008). A integridade superficial de uma peça usinada é resultado de um processo que envolve diversos fatores,

como, por exemplo, deformações plásticas, ruptura, recuperação elástica, vibração, tensões residuais e até mesmo reações químicas (MACHADO et al., 2011) e, para a retificação, os aspectos mais importantes da integridade superficial está relacionada aos danos térmicos causados pela excessiva geração de calor durante o processo (MALKIN; GUO, 2008).

Na análise da integridade superficial, há de se levar em conta não somente a superfície da peça, mas também alterações subsuperficiais que, segundo Machado et al. (2011), envolve fatores mecânicos (deformação plástica, rebarbas, alteração de microdureza, micro ou macro trincas e tensões residuais) e fatores metalúrgicos (recristalização e transformações metalúrgicas);

Em relação à topografia da superfície, também tratada como acabamento, é importante lembrar que a superfície de uma peça é composta de irregularidades (picos e vales) que, basicamente, definem sua rugosidade.

Existem vários parâmetros que são utilizados para quantificar a rugosidade de uma superfície. A Tab. 2.6 mostra alguns dos principais parâmetros de rugosidade utilizados.

Tabela 2.6 - Descrição de alguns parâmetros de rugosidade (adaptado de MACHADO et al., 2011)

Símbolo	Nome	Descrição
Ra	Desvio médio aritmético	Média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de amostragem
Rq	Desvio médio quadrático	Raiz quadrada da média dos valores das ordenadas no comprimento de amostragem
Rt	Altura total do perfil	Soma da maior altura de pico do perfil e da maior profundidade de vale do perfil no comprimento de avaliação
Rz	Altura média máxima do perfil	Média das máximas alturas de pico e vale encontradas em cada comprimento de amostragem

Os parâmetros de rugosidade são medidos normalmente com o auxílio de um rugosímetro, as vezes também chamado perfilômetro, equipamento que, com uma ponta de diamante mede, em um certo comprimento de amostragem definido previamente, os picos e vales da topografia de superfície, calculando os valores de parâmetros como Ra, Rz e Rt, dentre outros.

No estudo de retificação, um grande problema é a alta geração de calor próximo à superfície usinada, levando a peça a sofrer alterações subsuperficiais como na microdureza e transformações micro estruturais, podendo comprometer a vida útil do componente retificado, como será apresentado no tópico a seguir.

2.6 Danos térmicos no processo de retificação

A alta taxa de geração de calor encontrada na zona de corte em retificação leva ao desenvolvimento de temperaturas da ordem de 1600 °C e pode causar danos à superfície da peça. Dentre os danos mais comuns estão a queima da peça, têmpera, formação de martensita não revenida (camada branca) e tensões residuais.

A queima da peça pode ser identificada por uma coloração azulada na superfície – consequência da formação de uma camada de óxido – e é resultado do uso de parâmetro de corte agressivos/inadequados ao processamento do material em questão (MALKIN; GUO, 2008), como exemplificado, para uma peça de liga de titânio TC4 (Ti-6Al-4V) com queima severa por retificação, na Fig. 2.14a. Outra imagem na Fig. 2.14b mostra ainda a aparência de uma superfície da mesma liga de titânio, mas que sofreu queima “branda”, ficando com coloração em tom de bege (LI et al., 2011). Na Fig. 2.14c há um exemplo de peça em que ocorreu uma pequena região azulada com queima severa, circundada por pontos amarelados que podem ser considerados queimas brandas como na imagem anterior. Nesse último caso a queima ocorreu devido à uma falha do sistema de fixação que permitiu que a ferramenta retirasse maior quantidade de material da peça.

Seja a queima da peça, revenimento, formação da camada branca ou tensões residuais, os danos térmicos em peças retificadas são, normalmente, acompanhados por alterações microestruturais e, conseqüentemente, variação de microdureza e outras propriedades mecânicas logo abaixo da superfície retificada. A magnitude dessas variações como também a profundidade em que elas se manifestam dependem dos parâmetros de corte e do desgaste do rebolo.

Em relação à tensão residual, o processo de retificação invariavelmente leva à tensões residuais nas adjacências da superfície acabada, sendo essas predominantemente de compressão para esse processo, as quais podem afetar o comportamento mecânico do material. As tensões residuais são induzidas por deformações plásticas não uniformes nas proximidades da superfície da peça (BIANCHI et al., 2000).

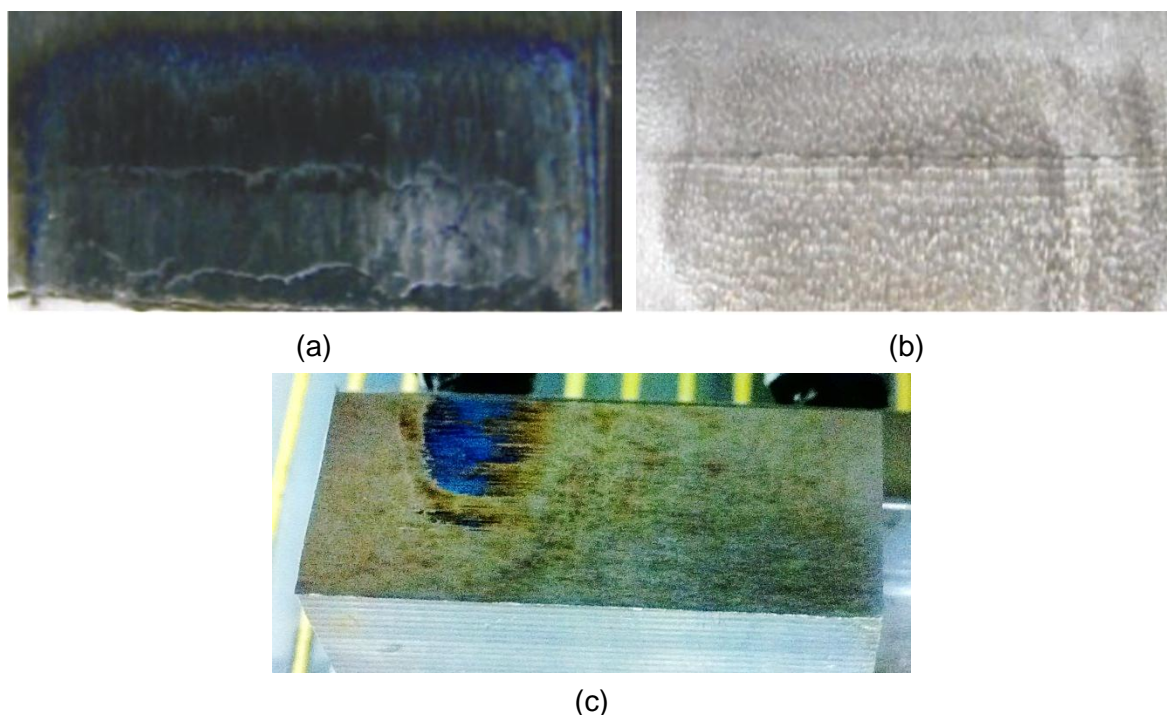


Figura 2.14 - Superfície queimada de peça de titânio Ti-6Al-4V na retificação utilizando rebolo de CBN; (a) queima severa, (b) queima branda (LI et al., 2011) e em (c) superfície com região de queima na retificação da mesma liga com rebolo de Al_2O_3 (AA46K6V) (próprio autor)

2.7 Fluidos de corte em retificação

A retificação é um processo que gera altas temperaturas e grandes quantidades de calor. Além disso, a porcentagem desse calor que é entregue à peça é maior que para outros componentes do processo (fluido, abrasivo e cavaco, vide Figura 2.3). Portanto, o uso de fluido de corte neste processo é de extrema importância para evitar ou amenizar danos térmicos à peça.

A principal função do fluido de corte na retificação é minimizar os impactos mecânicos, térmicos e químicos entre a peça e o rebolo. Assim como os fluidos de corte em processos convencionais com ferramenta de geometria definida (torneamento, fresamento e furação), os fluidos de retificação possuem os efeitos lubrificante e refrigerante.

O efeito lubrificante do fluido de retificação tende a reduzir o atrito entre o grão abrasivo e a peça enquanto que o efeito refrigerante resfria a zona de contato entre grão e peça através de absorção e transporte do calor gerado. Além disso, o fluido de retificação tem como papel secundário a retirada de cavacos da peça e do rebolo, além de oferecer certa proteção ao equipamento contra oxidação (MARINESCU et al., 2007).

Portanto, o fluido de retificação possui essencialmente três funções:

- Reduzir o atrito entre o grão abrasivo e a peça;
- Resfriar a zona de corte;
- Transportar o cavaco para fora da zona de corte;

A norma DIN 51 385 (1981) divide os fluidos de retificação em três grandes grupos: não miscíveis em água (óleos integrais), miscíveis em água (emulsões e soluções) e fluidos sintéticos compostos de água.

Para cada tipo de processo, deve-se prestar atenção para os requisitos de lubrificação e refrigeração exigidas no emprego do fluido de corte. Operações com elevada área de contato rebolo-peça e que produzam cavacos mais longos exigem fluidos de corte com ação predominantemente lubrificante (óleo integral), ao passo que em operações com áreas de contatos menos extensas ou que produzam cavacos na forma de pó, devem ser empregados fluidos refrigerantes.

Fluidos de corte com elevado poder lubrificante reduzem o atrito entre rebolo e peça, evitando assim a elevação da temperatura da peça e tornando o processo mais eficiente. Além disso, óleos integrais possuem ponto de ebulição superior ao da água em aproximadamente 200°C, portanto, suportam temperaturas mais elevadas. Entretanto, além do custo desfavorável, fluidos de corte com alto poder lubrificante apresentam viscosidade elevada, o que dificulta seu acesso à interface ferramenta/cavaco, mesmo empregando bombas potentes. Com isso, o que normalmente se observa na indústria é o uso de fluidos de corte à base água, pois estes permitem variações na ação refrigerante ou lubrificante de acordo com a proporção água/óleo (LINDSAY, 1995 apud MACHADO et al., 2011)

Para retificação de metais, emulsões com concentrações de óleo entre 2 e 15 % são mais utilizados (BRINKSMEIER, 1999). Poucos trabalhos são encontrados na literatura que abordaram o tópico da influência da concentração do fluido de corte na retificação. Brinksmeier et al. (1999) citaram alguns trabalhos que mostraram que com o aumento da concentração, as forças de usinagem, o desgaste do rebolo e as temperaturas envolvidas no processo de retificação diminuíram.

2.7.1 Técnica de Mínima Quantidade de Fluido em retificação de titânio

Especial atenção quanto ao meio ambiente e saúde de operador tem sido discutidas no ambiente industrial e soluções para o melhoramento do ambiente de trabalho tem sido propostas desde o fim do século XX.

Dentre as várias preocupações, está aquela com o uso dos fluidos de corte em usinagem. De um lado está a proposta de eliminação do fluido de corte das linhas de produção, o que seria o ideal para que não houvesse descarte de fluidos contaminados, que

podem vir a infectar um indivíduo. Do outro lado estão aqueles que defendem a utilização do fluido de corte em operações em que há elevada geração de calor, como é o caso da retificação, visto que sua eliminação do processo seria impraticável. Canter (2009) cita que o uso de fluido de corte é essencial na linha de produção para manter níveis mais altos de velocidade de corte e avanço, garantindo ainda que o acabamento das peças atenda às expectativas de projeto. E seguindo esta última vertente, é preciso repensar a forma de aplicação do fluido de corte, pela otimização de bocais, com emprego de fluidos menos agressivos ao meio ambiente, com maior facilidade de descarte e manutenção e ao mesmo tempo eficientes em relação a manter bom acabamento e faixa de desvios geométricos e dimensionais aceitáveis.

Neste contexto, a técnica de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL), também chamada de usinagem próximo do seco (*near dry machining*, em inglês) tem obtido boa aceitação e sucesso em sua aplicação por suas características ambientais amigáveis (em termos de menor volume utilizado de fluido, minimizando dispêndios mais elevados com armazenamento, manutenção e descarte), baseado na preservação do ambiente e em pesquisas para conformidade com o padrão ISO 14000 (SADEGHI et al. 2009). Ela é interessante, pois alia características refrigerantes funcionais do ar comprimido com baixíssimo consumo de fluidos (usualmente <250 mL/h, como utilizado em SETTI et al., 2015). Em muitos casos, essa mínima quantidade de óleo empregada é suficiente para reduzir o atrito com a ferramenta e diminuir a tendência de adesão em materiais com essa característica (SILVA et al., 2005), como é observado para titânio e suas ligas. Na aplicação de MQL para retificação de titânio, o efeito refrigerante é mais associado ao fluxo de ar comprimido e minimamente por efeitos de evaporação. Entretanto são poucos os trabalhos na literatura que utilizam essa técnica no estudo do processo de retificação de titânio e suas ligas, fazendo-se necessário o esforço na investigação dessa área (SADEGHI et al. 2009).

Em adição ao uso crescente da técnica MQL nas pesquisas em usinagem, muito tem se estudado sobre a adição de partículas sólidas dispersas no fluido de corte, no sentido de alcançar maior eficiência dos fluidos de corte devido ao aumento na condutividade térmica e na capacidade de transferência de calor deles por meio da convecção. Estas são propriedades esperadas para aumentar a refrigeração das superfícies de componentes de ligas de titânio que são retificados, por exemplo, que já possuem pobre condutividade térmica. Além disso, podem melhorar as condições tribológicas existentes na interface rebolo-peça e contribuir para minimizar os desvios geométricos e distorções nas peças.

As partículas sólidas mais comuns que tem sido adicionadas em fluidos de corte e que estão registradas na literatura são o grafite em pó, nanotubos de carbono, grafeno, e

bissulfeto de molibdênio (MoS_2). Os diâmetros destas partículas tem variado 100 nm e 500 μm . Estruturas moleculares e imagens podem ser vistas na Fig. 2.15.

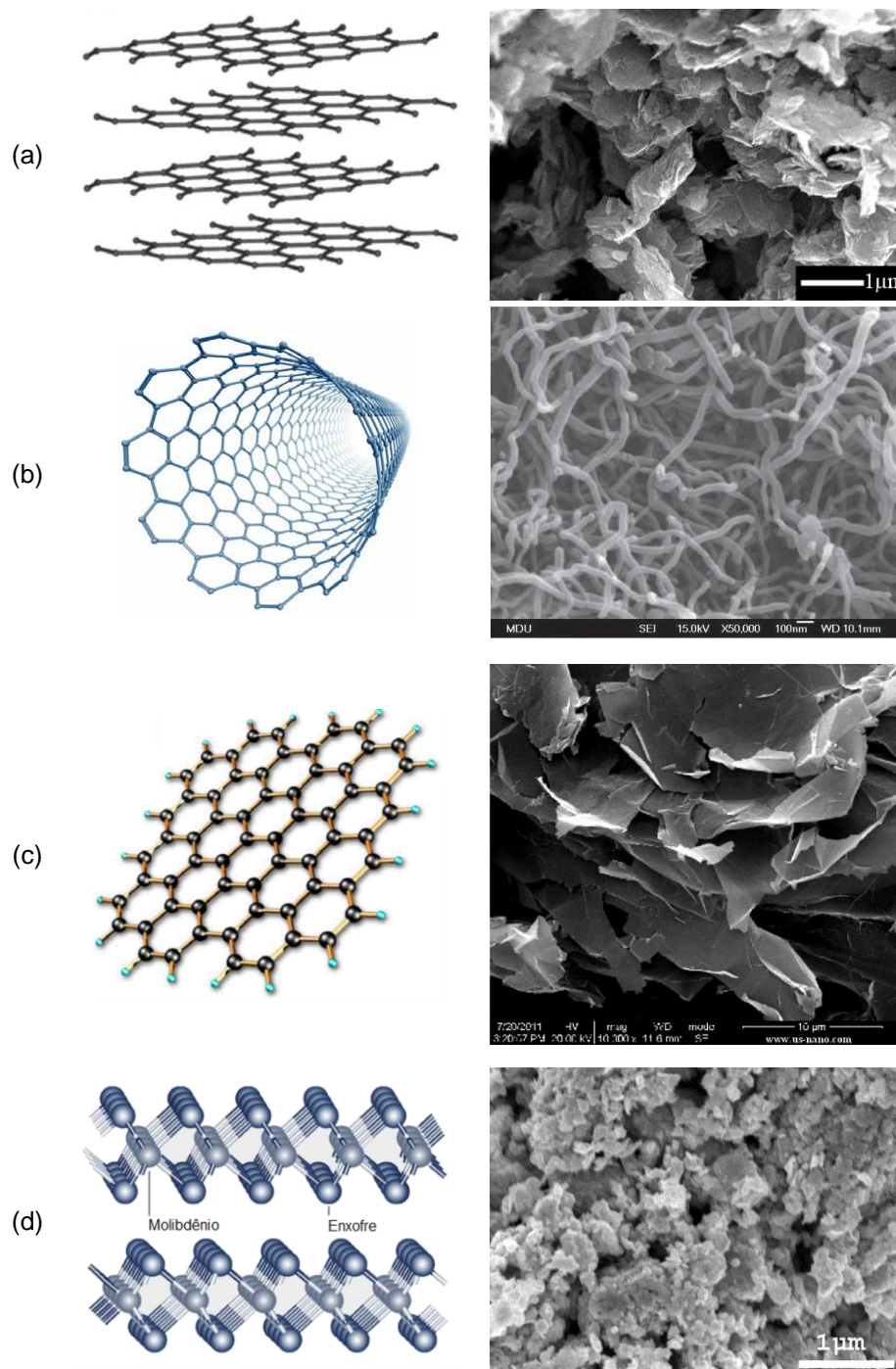


Figura 2.15 - Estrutura e imagem de MEV dos materiais usados para lubrificação sólida: (a) grafite; (b) nanotubos de carbono; (c) grafeno e; (d) bissulfeto de molibdênio (estruturas: ZARBIN; OLIVEIRA, 2013; IMO, 2008) (imagens via MEV: NIEN, 2011; GRAPHENE, 2009-2015; US RESEARCH, [20--])

Alguns trabalhos que empregaram algumas destas partículas como lubrificantes sólidos são apresentados a seguir.

Moura et al. (2015) empregaram dois particulados de grafite de tamanhos diferentes (20 e 40 μm) e bissulfeto de molibdênio (6 μm) em suspensão no fluido de corte base (Quimatic Super Fluido 3, integral), aplicado via MQL no torneamento de liga Ti-6Al-4V. A aplicação de bissulfeto de molibdênio mostrou melhorias no desgaste e vida da ferramenta (acréscimo de 75 %, se comparado à operação a seco para a menor velocidade de corte, e de 32 % para a maior velocidade) e na rugosidade superficial das peças (valores cerca de 25 % menores, comparado aos obtidos para operação a seco, para ferramenta nova e em torno de 28 % menores para ferramenta em fim de vida).

Samuel et al. (2011) empregaram grafeno e nanotubos de carbono dispersos em fluido de corte no microtorneamento de aço 1018 utilizando técnica MQL. Os resultados mostraram que o processo de corte utilizando adições de particulado foram mais eficientes em relação à utilização apenas do semi-sintético (Clear-edge 6519 – Castrol) na diluição de 12,5 %, reduzindo as forças de corte e o gradiente de temperatura durante a usinagem.

Setti et al. (2015) utilizaram rebolo de carbetto de silício, granulometria *mesh* 60, e retificaram a liga Ti-6Al-4V utilizando técnica MQL com nanopartículas de alumina (Al_2O_3) e óxido de cobre (CuO) dispersas no fluido de corte e em diferentes vazões. Ensaio de retificação também foram realizados com fluido de corte em abundância (técnica convencional) para comparação. A presença das nanopartículas, comparado à técnica convencional, permitiu a diminuição do atrito, das forças tangenciais de retificação e das temperaturas na zona de corte.

Alberts et al. (2009) também fizeram uso do grafite disperso em fluido de corte na retificação de um aço ferramenta classe D-2 (62 HRC) com rebolo de alumina branca com granulometria *mesh* 46. Eles empregaram dois tipos de fluidos de corte, um semissintético (Trim SC200, emulsionável) e o outro o álcool isopropílico (IPA) que foram aplicados na zona de retificação via “spray manual” que utiliza dois recipientes a uma vazão de 200 mL/h. Ensaio apenas com os fluidos sem o grafite também foram realizados para comparação. Os autores monitoraram vários parâmetros de usinagem, mas os resultados mais notáveis foram em relação as forças de retificação, que foram menores para partículas de grafite dispersas em álcool isopropílico.

Diante dos resultados promissores sobre a utilização de grafeno disperso em fluido de corte em trabalhos na retificação é que optou-se por utilizá-lo em conjunto com a técnica MQL neste trabalho.

2.8 Grafeno

Partículas de grafeno são obtidas a partir de folhas de grafite e foram descobertas por Geim e Novoselov (2007), pesquisadores da Universidade de Manchester, utilizando uma fita adesiva para retirar pequenos fragmentos de um grande pedaço de grafite. É o material mais forte já demonstrado, consistindo em uma folha plana de átomos de carbono densamente compactados em uma grade de duas dimensões. Ele é um bom condutor térmico e elétrico e pode ser usado para desenvolver circuitos semicondutores e peças de computador. Algumas observações sobre esse material encontrados na literatura são:

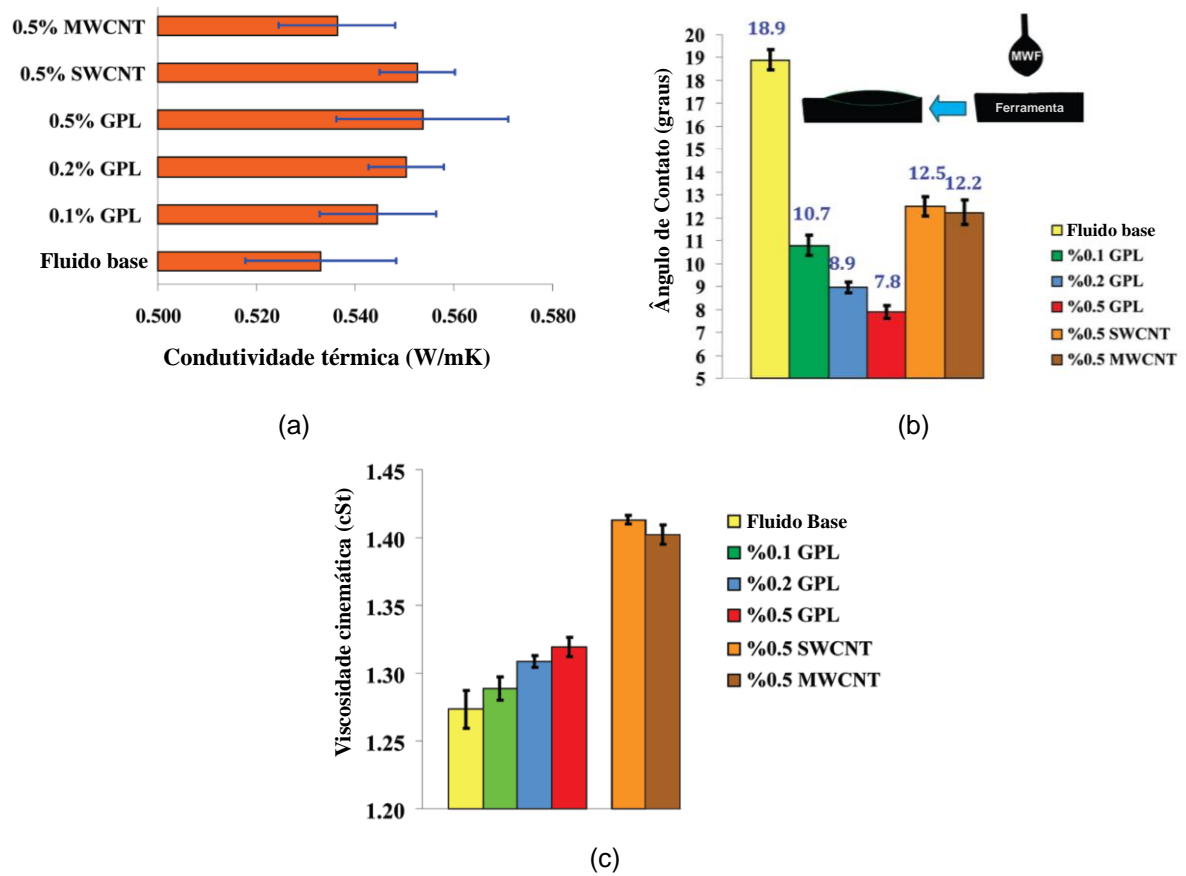
- O grafeno possui características extremamente interessantes para a aplicação em fluidos de corte (ZARBIN e OLIVEIRA, 2013), dentre as quais podem ser citadas:
- É um ótimo condutor térmico (cerca de $5000 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$) (LIU et al., 2014), superando massivamente as condutividades térmicas do cobre ($400 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$), alumínio ($237 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$) e aço ($50,7 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$), por exemplo. A condutividade térmica e resistência mecânica são similares às dos nanotubos de carbono.

Os estudos com esta aplicação ainda são incipientes, mas acredita-se que a ótima condutividade elétrica e térmica deste material possa ser o diferencial quando inserido em um fluido de corte, e assim aumentar a capacidade dele de remover mais calor na zona de corte na usinagem das ligas de titânio (pobre condutora de calor).

Samuel et al. (2011) e Chu et al. (2013) relataram resultados encorajadores quanto ao desempenho da presença do grafeno. Estes últimos informaram que a mistura de grafeno, na concentração de 0,1 % em peso, disperso em fluido integral vegetal a base de canola, reduziu a rugosidade das peças.

No trabalho de Samuel et al. (2011), foram empregadas diferentes concentrações de grafeno e, ainda, a utilização de nanotubos de carbono de uma e múltiplas paredes no processo de microtorneamento. Eles analisaram parâmetros como a condutividade térmica, molhabilidade (ângulo de contato) e viscosidade cinemática das soluções (Figuras 2.16a, 2.16b e 2.16c respectivamente) e fizeram comparações com o fluido convencional.

A adição das partículas de grafeno oferece, segundo os autores, melhor resultado, pois promovem o aumento da condutividade térmica, e da molhabilidade, com aumento mínimo da viscosidade, se comparado à adição de nanotubos de carbono. Os resultados mostraram redução de forças e temperatura no processo de microtorneamento, atribuídos à melhor molhabilidade conseguida com o grafeno e a sua capacidade de penetrar mais eficientemente na interface cavaco-ferramenta.



Onde:

- MWF (*metal working fluid*) - Fluido de corte
- GPL (*graphene platelets*) - Placas de Grafeno;
- SWCNT (*single-walled carbon nanotubes*) - Nanotubos de carbono de parede simples;
- MWCNT (*multiwalled carbon nanotubes*) - Nanotubos de carbono de paredes múltiplas.

Figura 2.16 - (a) Condutividade térmica, (b) ângulo de contato e (c) viscosidade cinemática avaliados para diferentes materiais e concentrações de nanopartículas dispersas no fluido de corte semi-sintético (SAMUEL et al., 2011)

CAPÍTULO III

Metodologia

Neste capítulo serão apresentados os equipamentos empregados nos ensaios preliminares e definitivos de retificação, os materiais das ferramentas e das peças, parâmetros de corte e a metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho, bem como os instrumentos de medição utilizados para a medição das grandezas propostas no trabalho.

A fim de estudar o comportamento da integridade superficial das peças de liga de titânio, Ti-6Al-4V, com as diferentes atmosferas de retificação empregando duas diferentes técnicas de aplicação de fluido (convencional e MQL) foi proposta a metodologia que está resumida no fluxograma da Fig. 3.1. Inicialmente foram preparadas 12 amostras desta liga com seção longitudinal previamente estabelecida. Algumas das amostras foram utilizadas para caracterização e determinação da dureza antes do processo de retificação. Em seguida foram realizados ensaios preliminares de retificação plana para ajuste dos parâmetros a serem utilizados nos ensaios definitivos. Nesta etapa já foram realizadas medições de rugosidade superficial e também captura de imagens em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) das superfícies usinadas. Tanto na etapa de ensaios preliminares quanto naquela de ensaios definitivos as amostras foram devidamente preparadas para ensaio metalográfico e determinação da microdureza. Os resultados obtidos foram agrupados e disponibilizados em gráficos e tabelas para melhor visualização e discussão. Por último foram realizados ensaios em condições de retificação específicas com apenas uma passagem do rebolo sobre a peça para medição da potência elétrica. Todos os ensaios sofreram uma réplica e a média aritmética e desvio padrão foram calculados e apresentados na sessão de resultados.

A seguir serão fornecidos mais detalhes das etapas utilizadas para o desenvolvimento deste trabalho conforme Fig. 3.1.

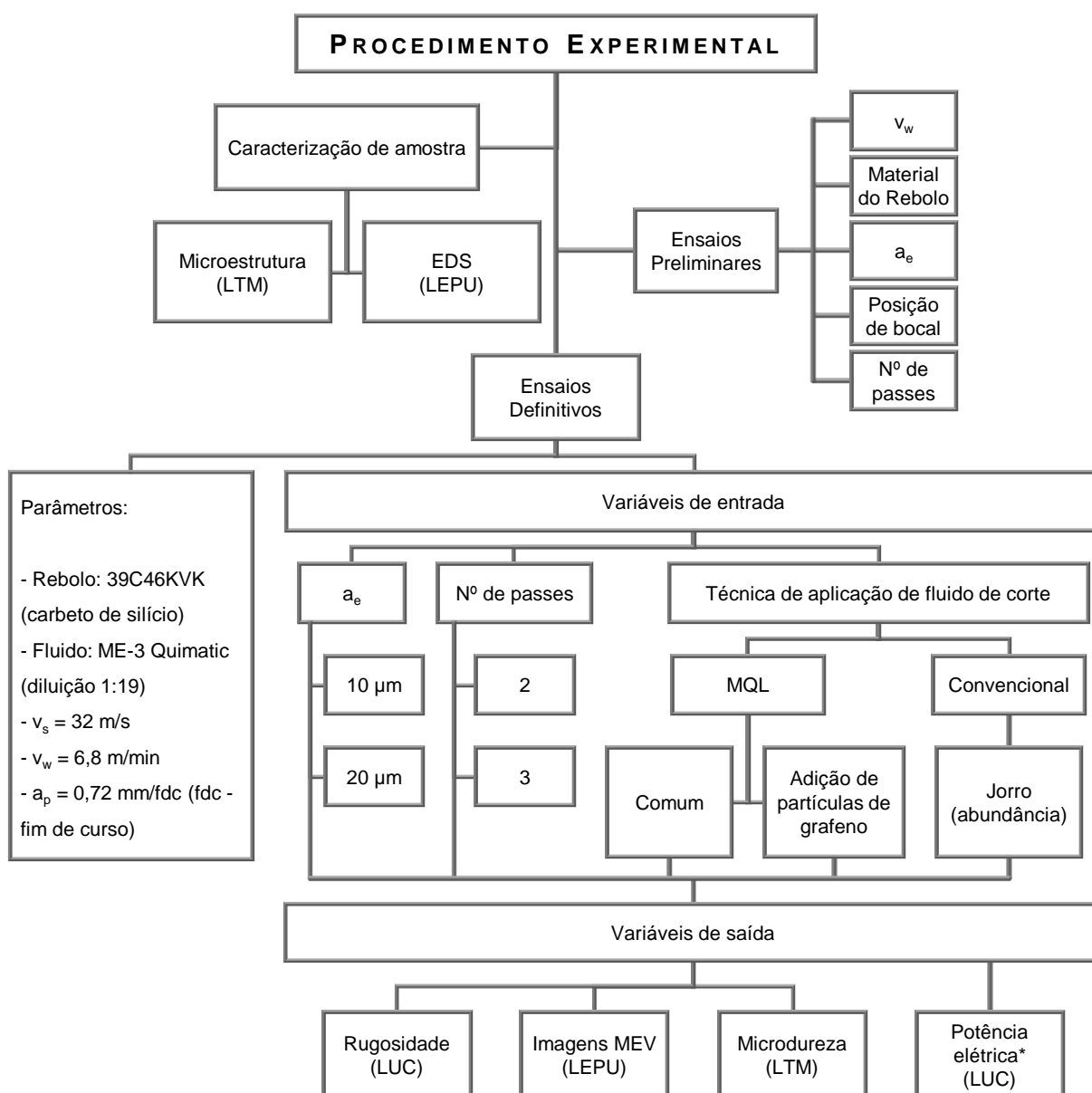


Figura 3.1 - Fluxograma para o procedimento experimental deste trabalho

3.1 Equipamentos e materiais

Nesta sessão são apresentados os materiais e equipamentos utilizados para a realização dos ensaios preliminares e definitivos, preparação de amostras e medição dos resultados.

3.1.1 Máquinas-ferramentas

Todas as amostras da liga Ti-6Al-4V foram devidamente preparadas antes de serem retificadas. Inicialmente, todas as faces da amostra retangular foram fresadas em um centro de usinagem de modelo Discovery 760, da marca ROMI, 11 kW de potência, rotação máxima de 10.000 rpm, pertencente ao LEPU.

A máquina-ferramenta utilizada nos ensaios de retificação foi a retificaora de precisão modelo P36, da marca MELLO, semi-automática, 3 HP (2,25 kW) de potência e rotação (n_s) fixa de 2400 rpm, localizada no LUC.

3.1.2 Ferramentas de corte

Para o processo de fresamento das amostras foi utilizada uma fresa de 80 mm de diâmetro, da fabricante Sandvik, classificação R260.22-080-15. Esta fresa comporta até seis insertos de metal duro. Os insertos utilizados foram de metal duro sem revestimento, classe H13A, com aresta raspadora e sem furo central também da Sandvik.

Para um ensaio preliminar de retificação foi utilizada o rebolo tipo reto, de alumina (óxido de alumínio), classificação AA46K6V, do fabricante Norton – Saint Gobain Abrasives, e dimensões 280 mm x 25 mm x 76 mm (diâmetro externo x espessura x diâmetro interno).

Para os ensaios definitivos de retificação foi utilizado o rebolo tipo reto, de carbetto de silício, classificação 39C46KVK, também do fabricante Norton - Saint Gobain Abrasives, fornecido pela empresa ©Saint-Gobain do Brasil, imagem e dimensões conforme Fig.3.2

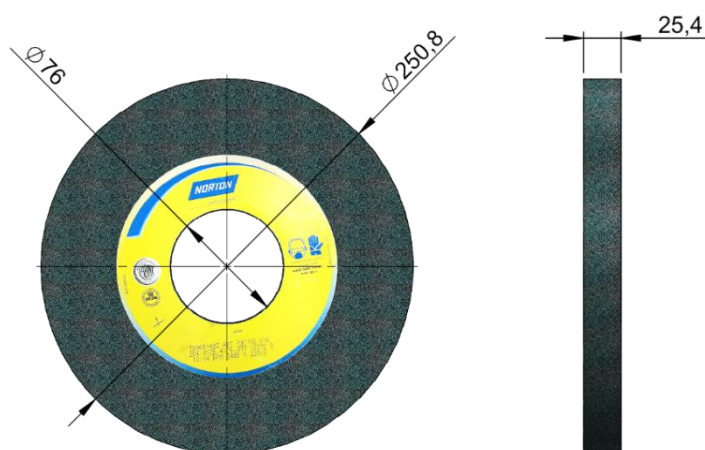
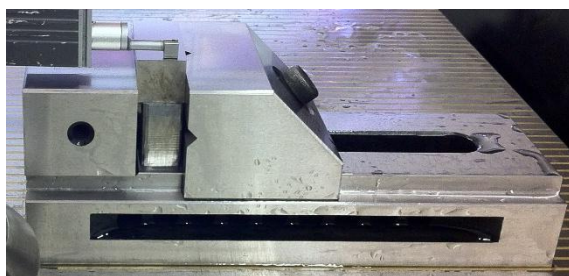


Figura 3.2 - Detalhes das dimensões do rebolo 39C46KVK utilizados nos ensaios de retificação definitivos

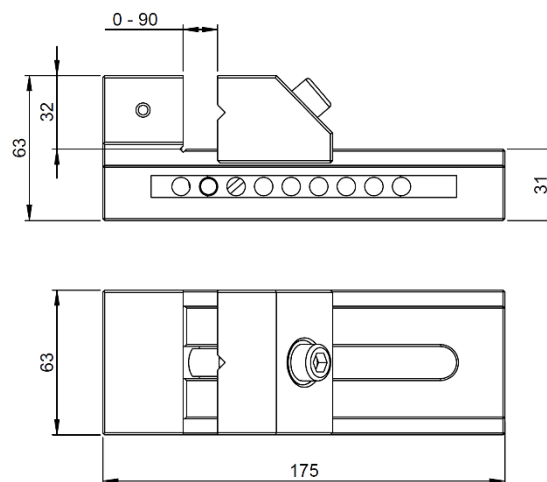
3.1.3 Acessórios para operação de usinagem

A seguir são apresentados os acessórios utilizados nos ensaios: morsa, bocal e sistema de controle de vazão de fluido para o MQL.

- Morsa de precisão Gin, mordente com capacidade para peças entre 0 e 90 mm (Figura 3.3).



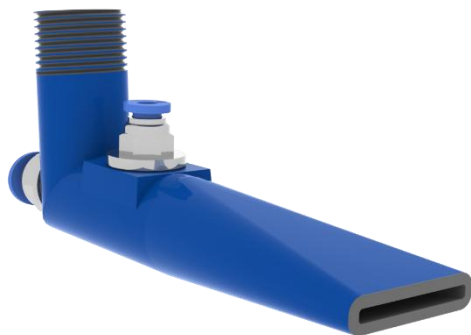
(a)



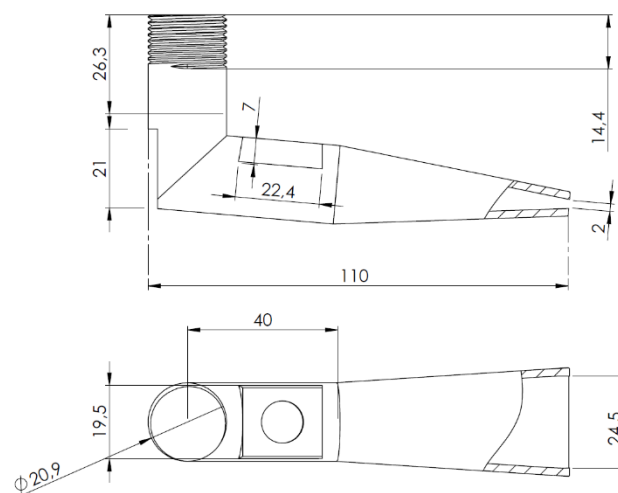
(b)

Figura 3.3 - Morsa de precisão Gin 0-90 mm, (a) foto dela montada na máquina, (b) detalhes construtivos.

- Bocal tipo bico chato, desenvolvido no laboratório, para entrega do fluido utilizando técnica MQL (Figura 3.4) com saída semelhante ao bocal para jorro.



(a)



(b)

Figura 3.4 - Bocal tipo bico chato para MQL, (a) imagem e (b) detalhes construtivos

- Bomba de seringa para controle da vazão de fluido de corte que foi empregada durante os ensaios de retificação utilizando a técnica de aplicação de fluido de corte MQL (Figura 3.5). O controle da vazão se deu através da utilização de placa arduino e programação adequada para leitura da variação controlada por potenciômetro. Este dispositivo foi desenvolvido pelos pesquisadores do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) durante os ensaios de retificação.

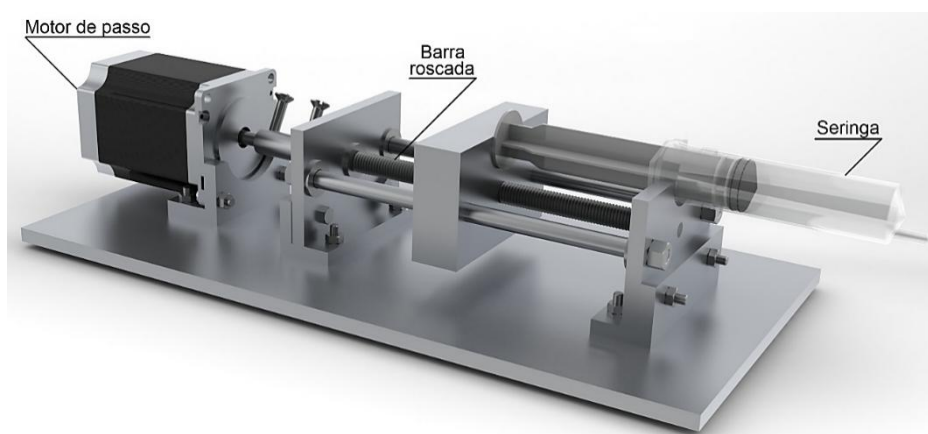


Figura 3.5 - Vista em perspectiva isométrica da bomba de seringa

- Dois dressadores de ponta única de diamante sintético, das marcas Winter e Difer, ambos com raio de ponta 0,3 mm (Figuras 3.6a e 3.6b, respectivamente).

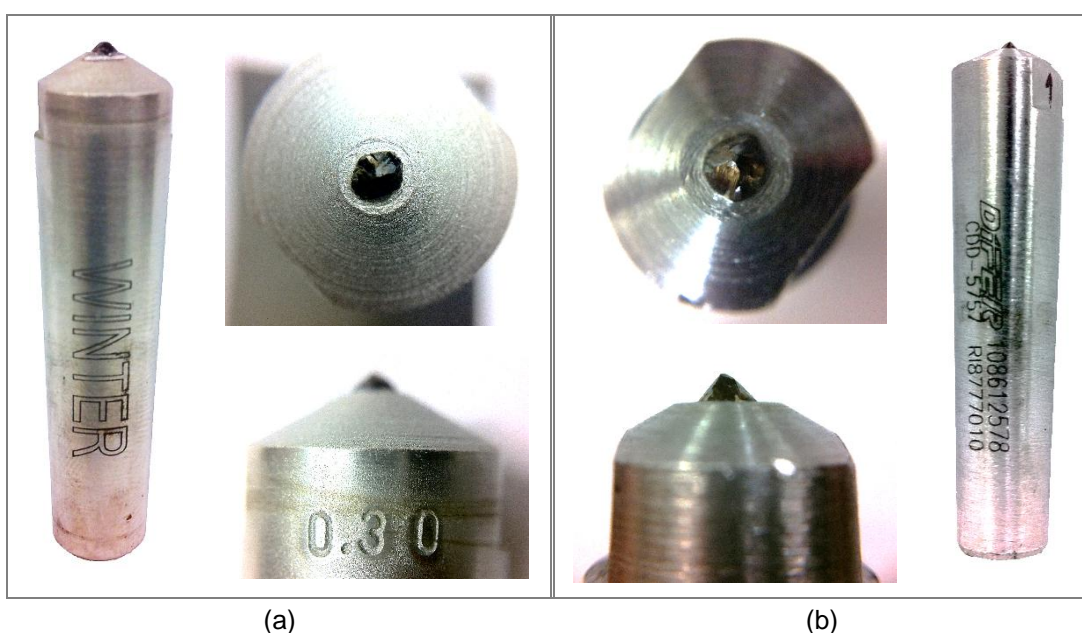


Figura 3.6 - Dressadores de ponta única (a) Winter e (b) Difer

3.1.4 Material da peça

O material da peça é a liga de titânio Ti-6Al-4V, fornecida em bloco retangular de dimensões 160 mm x 78 mm x 16 mm (comprimento x largura x altura). A composição química nominal e propriedades físicas desse material são exibidas nas Tabs. 3.1 e 3.2, respectivamente (DA SILVA, 2006).

Tabela 3.1 - Composição química nominal para a liga Ti-6Al-4V (adaptado de DA SILVA, 2006)

	Composição química (% peso)								
	Al	V	Fe	O	C	H	N	Y	Ti
Mín.	5,5	3,5	0,3	0,14	0,08	0,01	0,03	50 ppm	Balanço
Máx.	6,75	4,5		23					

Tabela 3.2 - Propriedades físicas da liga Ti-6Al-4V (adaptado de DA SILVA, 2006)

Resistência à tração (Mpa)	Alongamento (%)	Densidade (g cm ⁻³)	Ponto de fusão (°C)	Dureza medida* HV100	Condutividade térmica a 20 °C (W m ⁻¹ K ⁻¹)
900-1160	8	4,5	1650	381	6,6

*Medição realizada em durômetro pertencente ao LTM

3.2 Parâmetros de corte

Neste tópico serão apresentados os parâmetros de corte e faixa de valores adotados para os processos de usinagem desde a preparação de corpos de prova, ensaios preliminares e ensaios definitivos.

3.2.1 Preparação dos corpos de prova

Os parâmetros utilizados na preparação dos corpos de prova para o fresamento frontal foram:

- rotação do eixo árvore de 200 rpm (velocidade de corte – v_c – aproximadamente 50 m/min)
- avanço (f) de 0,1 mm/volta
- profundidade de corte (a_p) de 0,2 mm por passe
- penetração de trabalho (a_e) que foi mantida em cerca de 70% do diâmetro da fresa (aproximadamente 56 mm).

3.2.2 Ensaios preliminares de retificação

Os parâmetros utilizados nos ensaios preliminares foram:

- Velocidade da peça (v_w): inicialmente foi utilizado v_w de aproximadamente 10 m/min com um rebolo de alumina (velocidade utilizada em pesquisas com aço para moldes e matrizes), mas em seguida foi adotado um valor médio igual a 6,8 m/min e com rebolo de carbeto de silício pois no primeiro ensaio notou-se presença de queima nas superfícies retificadas.
- Material do rebolo: dois materiais de abrasivos convencionais foram testados: Al_2O_3 e SiC, ambos com granulometria mesh# 46. Inicialmente, foram realizados ensaios com o rebolo de alumina, após os quais, observou-se o que já é relatado na literatura, isto é, a superfície das amostras observada no MEV apresentava grande número de grãos fraturados do rebolo embutidos no material da peça, além disso foram encontradas microtrincas em quase todas as amostras, fatos constatados com frequência muito menor quando utilizado o rebolo de SiC de mesma grana. Além dessas ferramentas, uma terceira, de SiC, mas de granulometria mesh# 100, foi utilizada em teste com valores de penetração de trabalho de 10 e 20 μm . Ao medir a rugosidade foi observada um valor de 0,30 μm para o parâmetro R_a , mas o rebolo se apresentava indícios de empastamento já nos passes iniciais. Optou-se pelo rebolo de SiC, granulometria mesh# 46, que indica um grão maior por conter poros maiores e com isso ser menos propenso a reatividade química com a liga de titânio em estudo (JACKSON E DAVIM, 2011).
- Penetração de trabalho (a_e): foram empregados três valores de a_e (10, 20 e 50 μm) a fim de verificar níveis seguros de operação sem que houvesse queima aparente e visual da peça. Para o valor de 50 μm as superfícies resultantes apresentavam grande quantidade de abrasivos embutidos e aparecimento de microtrincas. Para os outros dois as superfícies tiveram aparência aceitável, ao utilizar rebolo de SiC.
- Posição do bocal: durante a usinagem sabe-se que a forma de entrega do fluido exerce grande influência na qualidade do processo. Por isso, foram testadas diferentes formas de posicionar o bocal. Duas posições foram utilizadas, que foram designadas nos ensaios como: direcionada à interface rebolo-peça (jato de fluido tangente ao rebolo) e diretamente ao rebolo (jato colidente com rebolo).
- Número de passes: o número de passes foi definido após ensaios realizados variando a quantidade de material removida total da peça, ou penetração total do rebolo. Foram testados os valores 40 e 80 μm com a_e incrementais iguais a 10 e 20 μm por passe e avaliados a rugosidade e microdureza. Para a menor

penetração total (40 μm), ambas penetrações resultaram em valores de acabamento bem próximos. Para a maior penetração igual a 80 μm e a_e incremental igual a 10 μm , a rugosidade da superfície resultante foi maior e o perfil de microdureza foi afetado até a profundidade de 180 μm . Optou-se, portanto pela adoção de uma quantidade fixa de número de passes, sendo utilizados os valores de 2 e 3 passes.

3.2.3 Ensaios definitivos

Após os ensaios preliminares, foram então determinados os parâmetros a serem utilizados nos ensaios definitivos. Eles estão apresentados na Tab. 3.3, onde, EX denota o ensaio de número X, RX, a réplica do ensaio X (utilizada apenas no estudo de rugosidade superficial), n_s é a rotação do eixo do rebolo, v_s a velocidade de corte, v_w a velocidade longitudinal da peça, a_p a profundidade de corte (em mm/fdc = milímetros por fim de curso) e a_e , a penetração de trabalho. Foi adotado ainda um código de identificação, para facilitar na exposição dos resultados, na forma AE F P, em que AE, F e P denotam a penetração de trabalho (10 ou 20 μm), a técnica de aplicação de fluido (J - jorro; M - MQL; G - MQL+G) e número de passes (2 ou 3), respectivamente.

Tabela 3.3 - Tabela dos parâmetros para os ensaios definitivos

Ensaio	n_s (rpm) [v_s (m/s)]	v_w (m/min)	a_p (mm/fdc)	Técnica de aplicação de fluido [vazão]	a_e (μm)	Nº de passes	Código de identifi- cação
E1/R1	2400 [32]	6,8	0,72	Jorro [545 L/h]	10	2	10J2
E2/R2						3	10J3
E3/R3					20	2	20J2
E4/R4						3	20J3
E5/R5				MQL [240 mL/h]	10	2	10M2
E6/R6						3	10M3
E7/R7					20	2	20M2
E8/R8						3	20M3
E9/R9				MQL+G [240 mL/h]	10	2	10G2
E10/R10						3	10G3
E11/R11					20	2	20G2
E12/R12						3	20G3

Para a aplicação com técnica MQL, a pressão do ar comprimido foi mantida constante em torno de 0,3 MPa.

O fluido de corte utilizado para ambas as técnicas de aplicação foi o fluido sintético de base vegetal, especificação ME-3, da fabricante Tapmatic do Brasil Ind. e Com. Ltda, doado pelo fabricante para pesquisas em geral no LEPU. Utilizou-se uma diluição de 1:19 (uma parte de fluido concentrado para 19 partes de água), resultando numa mistura homogênea levemente amarelada (Fig. 3.7a). Para os ensaios utilizando técnica MQL, fez-se uso da mesma mistura, buscando eliminar o fator fluido base das variáveis de entrada. Para os testes com técnica MQL com adição de partículas de grafeno o fluido foi previamente diluído na mesma proporção citada anteriormente e enviada para o pesquisador prof. Dr. Rogério Gelamo, Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM), para adição e mistura do grafeno na proporção de 60 mg de grafeno para 200 mL de fluido. O resultado da mistura foi um líquido com diversas partículas escuras suspensas, ficando com coloração preta (Fig. 3.7b).

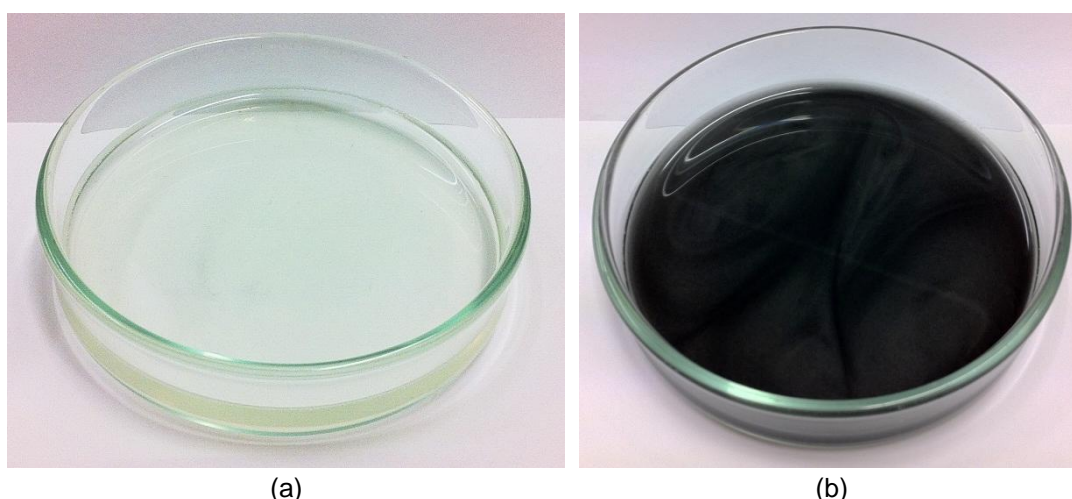


Figura 3.7 - Fluido ME-3 diluído em água, proporção 1:19: (a) sem grafeno (b) com partículas dispersas de grafeno

A profundidade de dressagem (a_d) usada para o condicionamento do rebolo antes de cada ensaio foi de 10 μm em passagem única, com velocidade transversal constante de 105 mm/min e grau de recobrimento (U_d) igual a 3.

3.3 Procedimentos adotados

A partir deste ponto, são descritos os procedimentos adotados nas etapas da metodologia para esse trabalho: obtenção e caracterização das amostras e procedimentos adotados nos ensaios definitivos.

3.3.1 Obtenção e caracterização das amostras

Para obtenção dos corpos de prova o material foi inicialmente fresado para impor à altura do bloco a dimensão de aproximadamente 15 mm e para conferir às duas maiores faces um menor desvio de paralelismo.

Após a preparação por fresamento, as amostras foram cortadas do bloco de material utilizando serra-fita hidráulica pertencente ao Laboratório de Usinagem Convencional (LUC), conferindo aos corpos de prova a dimensão próxima da final, com tolerância 0,10 mm em todas as dimensões (Figura 3.8). As amostras ainda retornaram ao centro de usinagem para correção, por fresamento frontal, das irregularidades dimensionais quanto ao comprimento dos corpos de prova, deixadas pelo processo de serramento.

Os corpos de prova passaram, então, por processo de lixamento de uma das laterais serradas para reduzir ao máximo o desvio de planicidade à face, garantindo melhor contato da superfície da peça com o batente retificado da morsa de precisão.

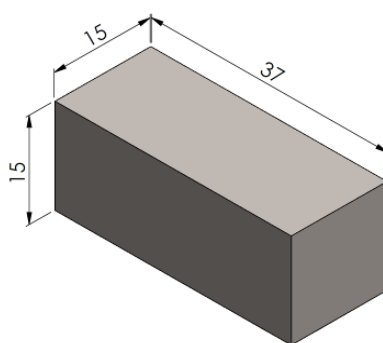


Figura 3.8 - Desenho com dimensões e do corpo de prova de Ti-6Al-4V

Antes de iniciar os ensaios, os corpos de prova foram identificados utilizando punções de marcação em sua face quadrada, na qual se pode identificar o número da amostra (I a XII) e as faces de ensaio (E) e réplica (R) de cada peça, como mostrado esquematicamente na Fig. 3.9.

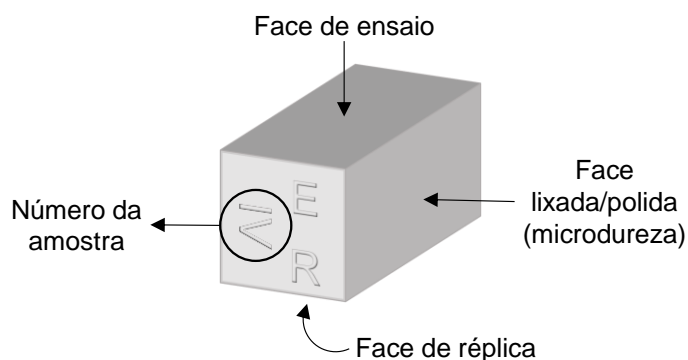
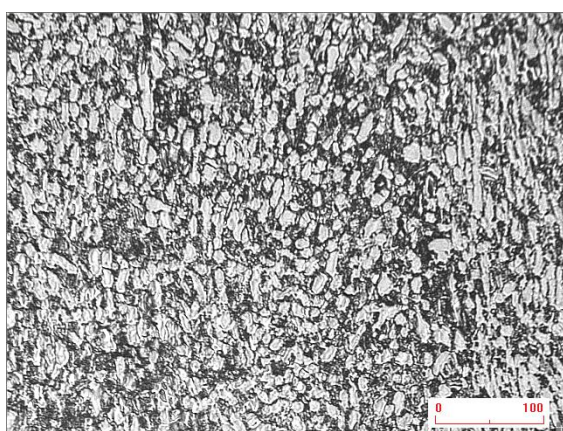


Figura 3.9 - Esquema de identificação padrão utilizada nas amostras

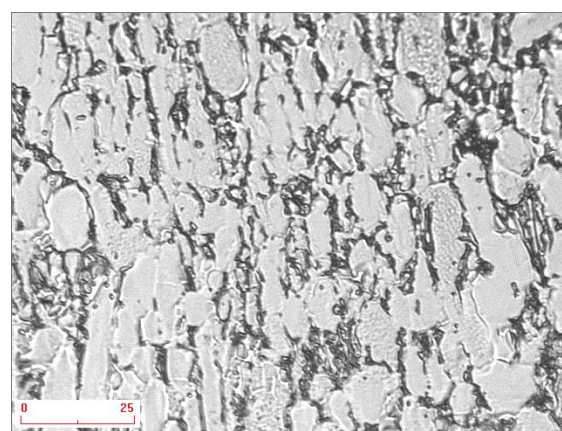
Para caracterização do material, foi destacado uma pequena porção de material, o qual foi embutido em baquelite preta comum, levado para lixamento e posterior polimento, e foi submetido ao ataque químico para revelar a microestrutura. A solução utilizada foi a KROLL'S, a qual tem composição:

- 3 mL de ácido fluorídrico (HF);
- 6 mL de ácido nítrico (HNO_3);
- 100 mL de água.

O ataque químico foi realizado após a imersão da amostra na solução até a completa reação da superfície (cessa borbulhamento proveniente da reação – duração de 20 a 30 segundos). A amostra foi em seguida levada ao aparelho microdurômetro, cujo microscópio embutido foi utilizado para captura das imagens das Figs. 3.10a e 3.10b. Nas imagens podem ser nitidamente identificadas as fases α (mais clara) e β (mais escura) encontradas na liga de titânio Ti-6Al-4V.



(a)



(b)

Figura 3.10 - Microestrutura da liga de titânio Ti-6Al-4V após ataque químico

Para quantificar a composição química do material, baseando-se apenas nos principais elementos de liga (Ti, Al e V), utilizou-se o MEV juntamente com analisador SwiftED3000 para análise de espectroscopia de energia dispersiva (EDS), cujos resultados são apresentados na Fig. 3.11.

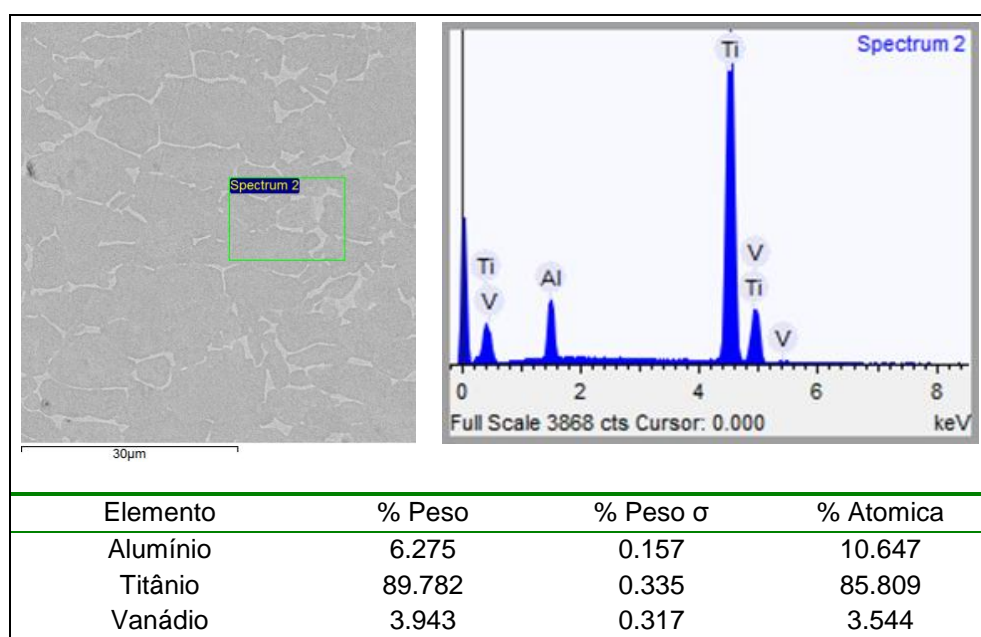


Figura 3.11 - Resultado de EDS da amostra de Ti-6Al-4V

3.3.2 Ensaios definitivos

Para os ensaios de retificação definitivos, as amostras de Ti-6Al-4V foram devidamente montadas na morsa de precisão retificada com auxílio de um calço em aço inox, preparado na própria retificadora, para garantir o posicionamento adequado da altura das amostras. Com o rebolo previamente dressado, a morsa era então depositada sobre a mesa magnética da máquina-ferramenta de forma a deixar o comprimento da peça alinhado com o sentido de movimentação principal da mesa, que é o mesmo do sentido de corte.

Para o posicionamento do bocal de fluido de corte, foi adotado uma posição fixa dos dutos de alimentação e dois bocais de geometria similares, um para os procedimentos utilizando jorro, outro para o uso da técnica MQL (confeccionado no laboratório). Ressalta-se que procurou-se garantir o mesmo o posicionamento e inclinação para ambos bocais. A posição relativa da saída dos bocais ao centro de rotação do rebolo foi medido e mantido constante conforme esquema da Fig. 3.12 e imagens das Figs. 3.13a e 3.13b. Com isso, a montagem do ensaio estava completa. O ensaio era conduzido até o 2º ou 3º passe, conforme ilustrado na Fig. 3.14, dependendo do ensaio em questão.

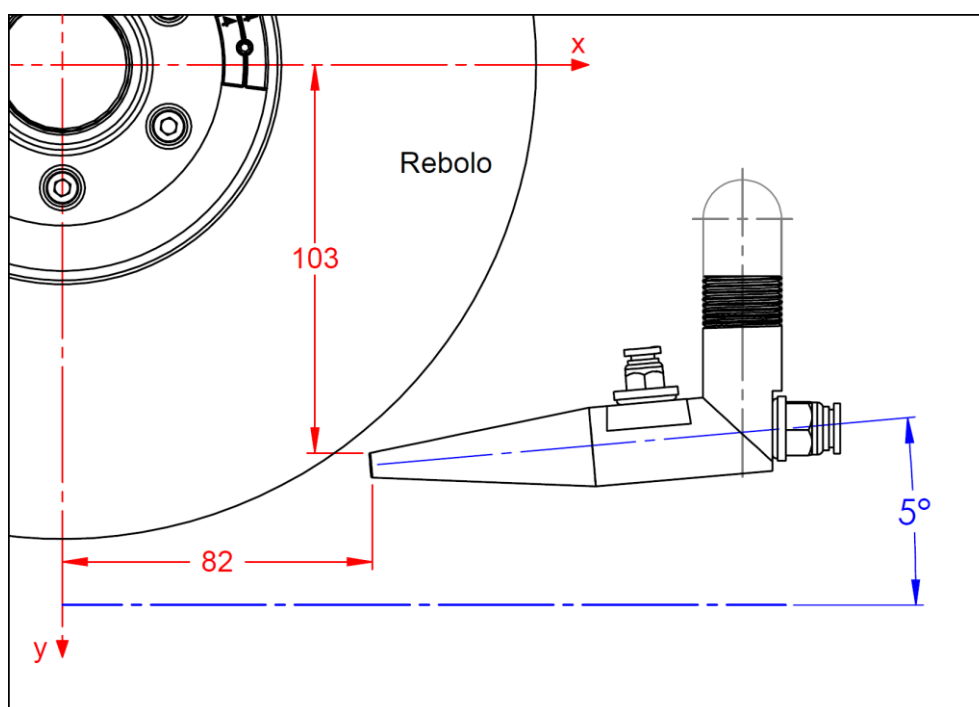


Figura 3.12 - Coordenadas e detalhes de posicionamento dos bocais

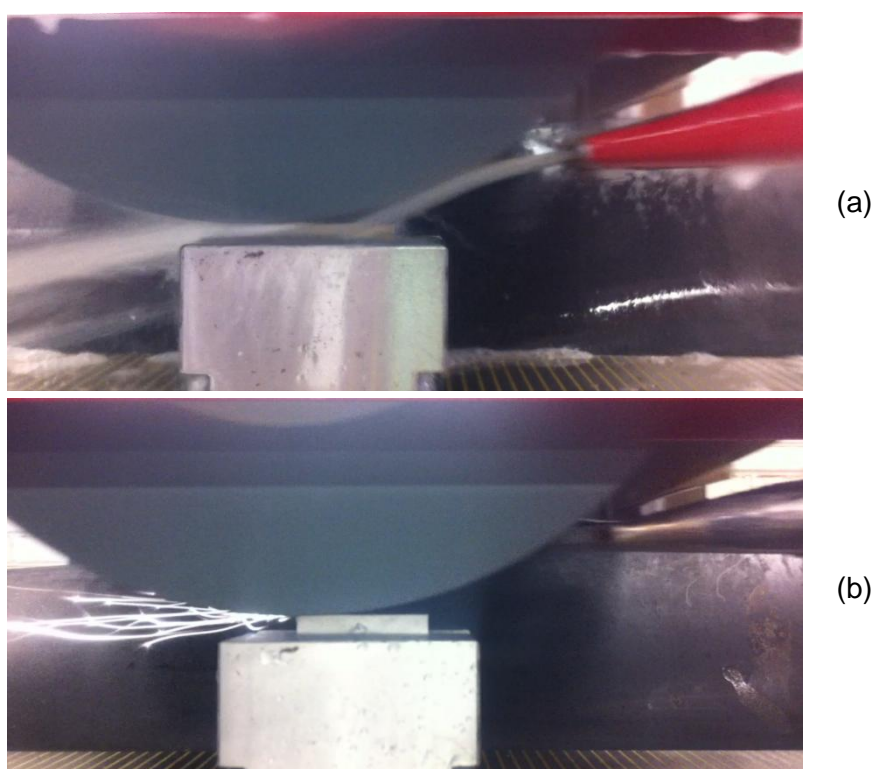


Figura 3.13 - Imagem de posicionamento do bocal em operação para (a) bocal de jorro e (b) bocal para uso de técnica MQL

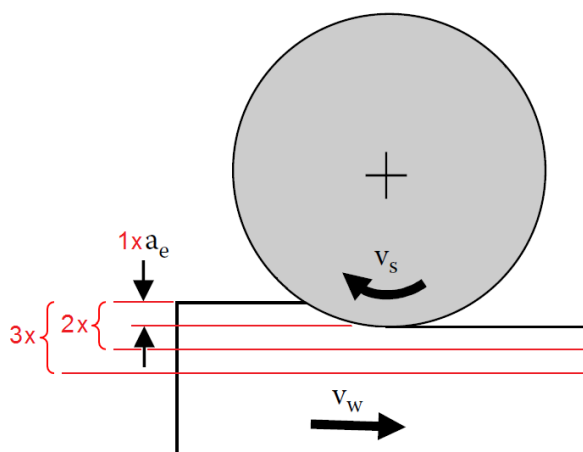


Figura 3.14 - Esquema do número de passes realizados

Para o início do processo de retificação buscou-se a referência da superfície através da aproximação do rebolo já em rotação em direção à peça. Ao primeiro toque na superfície de amostra e constatação de que a face inteira estava alinhada com a movimentação da mesa, a mesa era parada em ponto de repouso e a peça posicionada de forma a orientar a entrada do rebolo sempre do mesmo lado da peça. A escala de movimentação do rebolo era então zerada, para posterior configuração da a_e a ser testada (10 ou 20 μm).

No caso das operações com técnica convencional de aplicação de fluido (jorro), a bomba de fluido era ligada logo após o primeiro toque na peça citado no parágrafo anterior, no caso da técnica MQL, a referência era feita apenas com o fluxo de ar comprimido acionado.

Com o a_e configurado na máquina, o sistema de bombeamento do fluido de corte era acionado (caso não estivesse, como ponderado acima) e a movimentação da mesa era liberada.

Foi adotada a trajetória da mesa/peça conforme ilustrado na Fig. 3.15, em percursos longitudinais com velocidade v_w seguidos de avanços transversais com valor de a_p a cada fim de curso longitudinal (a movimentação transversal da mesa ocorre em um intervalo de aproximadamente 0,5 s). Ao final de cada ciclo completo de retificação, garantiu-se que toda a largura do rebolo percorresse toda a superfície da peça.

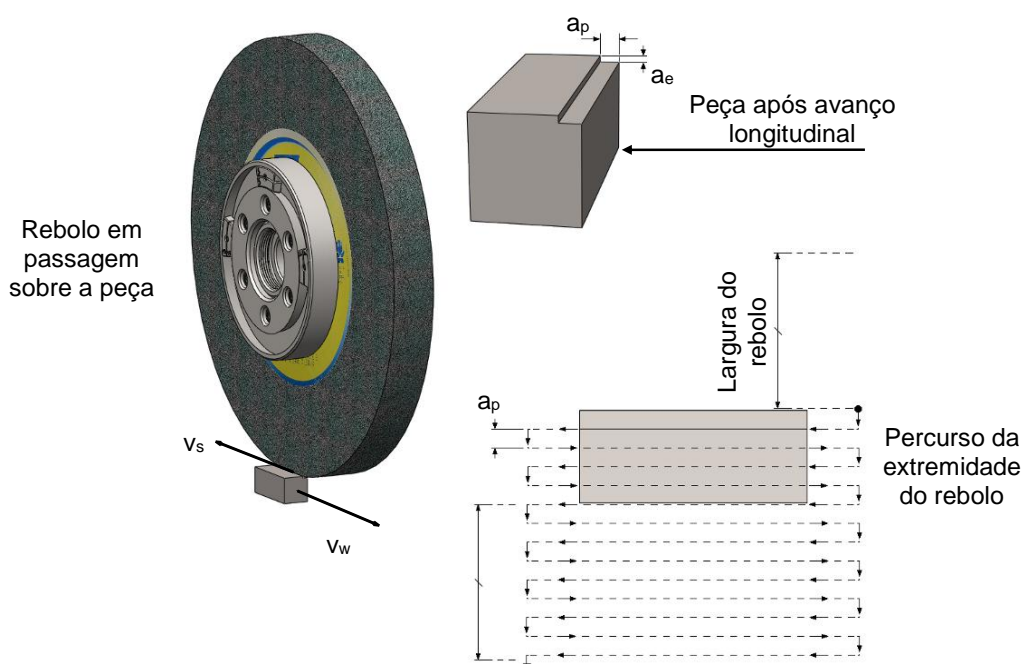


Figura 3.15 - Percurso da mesa/peça durante a usinagem

Ao fim do procedimento, a peça era retirada da morsa, limpa com jato de ar comprimido e guardada em caixa apropriada, devidamente protegida para seguir para as medições das variáveis de saída, a menos da rugosidade, que era tomada com a peça ainda montada na morsa. O rebolo era então dressado e máquina preparada para o próximo ensaio.

Para a dressagem foram utilizados os dressadores de ponta única citados anteriormente, com auxílio de base com sede cônica, como mostrado na Fig. 3.16. A aproximação era feita com a mesa parada e, à partir do primeiro toque entre dressador e rebolo, a bomba de fluido era acionada e o movimento transversal liberado (avanço automático com velocidade constante). O a_d era configurado com o dressador fora do rebolo, deixando que o dressador passasse uma única vez sobre a superfície.



Figura 3.16 - Base e dressador montados para procedimento de dressagem

3.4 Medição das variáveis de saída

A seguir são apresentados os equipamentos e procedimentos adotados para aquisição das variáveis de saída desse trabalho: rugosidade, imagem via microscopia eletrônica, ensaio de microdureza, imagem da superfície de rebolo e potência elétrica consumida.

3.4.1 Rugosidade

Para a medição de rugosidade foi utilizado o rugosímetro modelo SJ-201P, da fabricante Mitutoyo, utilizou-se um comprimento de amostragem (cut-off) de 0,8 mm e comprimento de avaliação igual a 4 mm.

As leituras de rugosidade das peças retificadas foram obtidas com as peças ainda montadas na morsa de precisão e apoiadas sobre a mesa da máquina-ferramenta, como mostrado na Fig. 3.17a. Cinco leituras na direção perpendicular à direção de avanço longitudinal, equidistantes de aproximadamente 7 mm (Figura 3.17b) foram tomadas para cada medição, a média e o desvio padrão foram, então, calculados e armazenados para posterior análise.

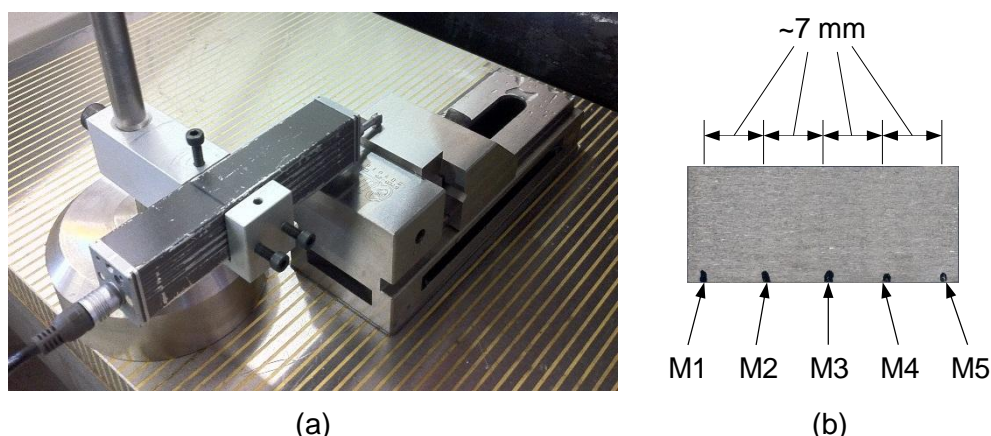


Figura 3.17 - Medição de rugosidade: (a) apalpador e suporte montados na mesa da máquina retífica e (b) superfície retificada de titânio com marcações dos locais de medição de rugosidade

3.4.2 Imagens de microscopia eletrônica e EDS

Para análise da superfície retificada via microscopia eletrônica foi utilizado o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), marca HITACHI, modelo TM 3000 - Tabletop Microscope, com ampliação máxima de 30.000 vezes, presente nas instalações do LEPU. Foi utilizado ainda o equipamento para análise de espectroscopia de energia dispersiva (EDS), vinculado ao MEV, modelo SwiftED3000, em algumas análises e caracterização de elementos encontrados sobre a superfície.

A preparação das amostras para a realização dessa etapa passou por processo de limpeza em cuba ultrassônica que foi preenchida com água. A amostra era então colocada dentro de um béquer que continha acetona (peça totalmente imersa) e o béquer inserido dentro da cuba. Para cada peça o tempo de limpeza foi de cinco minutos. Após o processo na cuba ultrassônica a peça era retirada e seca com ar quente.

Para posicionamento das amostras no interior do MEV foram utilizadas bases em alumínio, próprias do equipamento, com ajuste de altura, e a fixação era dada através de fita adesiva carbonada, para permitir a passagem de corrente pelo contato.

Imagens com ampliação de 250x, 500x e 1000x foram tomadas e armazenadas para posterior análise.

3.4.3 Microdureza

Para medição de microdureza foi utilizado o microdurômetro da marca SHIMADZU, modelo HMV-2series, pertencente ao LTM. A carga normal utilizada foi de 245,2 mN (HV0,025) por um período de 15 s.

Para a medição de microdureza as amostras tiveram de passar por processo de lixamento e polimento da face de medição (indicada na Fig. 3.9). O processo foi executado no Laboratório de Apoio a Fabricação (LAF) da FEMEC-UFU. Para isso foram utilizadas lixas d'água a partir da granulometria mesh 80, passando pelas lixas de granulometria mesh na sequência 180, 320, 600, 1000 e 1200. Na mudança de uma lixa de grana mais grossa para uma mais fina, as amostras foram lavadas em água corrente e limpas com jato de ar comprimido. Ao final do processo, antes de serem levadas ao polimento, um processo de limpeza com aparelho de limpeza por ultrassom, por um tempo estimado de cinco minutos, foi executado.

O polimento foi executado em máquina politriz do LAF utilizando abrasivo de Al_2O_3 com tamanho de grão $0,5\ \mu\text{m}$ (por questão de disponibilidade de equipamento e material para o processo).

As peças passaram ainda por um ataque brando da superfície de medição, à fim de permitir a identificação das fases α e β do material, mas que não prejudicassem a visibilidade da indentação gerada no teste. Nesse ataque, o tempo foi reduzido de cerca de 30 s para cerca de 12 a 15 s.

A estratégia adotada para a varredura do perfil de microdureza abaixo da superfície está exposta na Fig. 3.18.

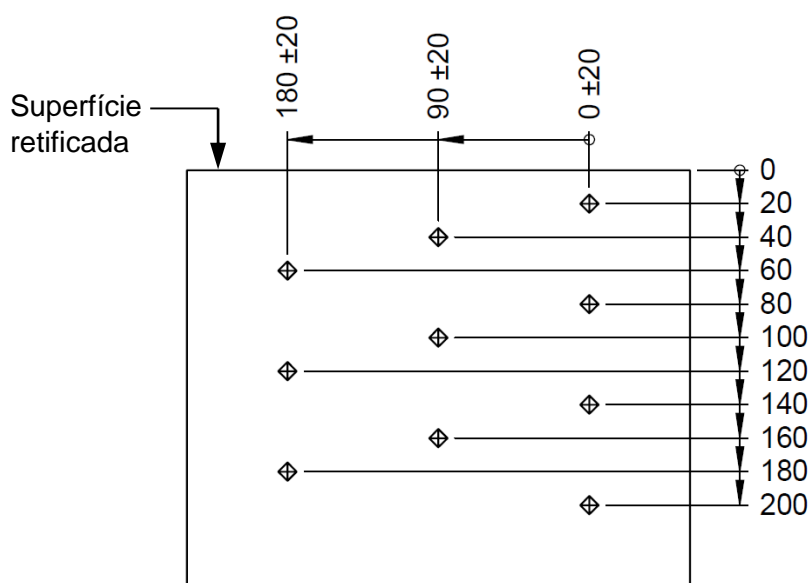


Figura 3.18 - Estratégia de medição do perfil de microdureza (dimensões em μm)

O perfil de indentação era iniciado sempre a $20\ \mu\text{m}$ da superfície retificada, aprofundando em valores equidistantes e incrementais de $20\ \mu\text{m}$, deslocados horizontalmente de $90 \pm 20\ \mu\text{m}$ para a esquerda, retornando à cota horizontal zero a cada

três indentações. Essa margem de dispersão de 20 μm à esquerda e à direita serviram para posicionar a indentação de forma a pegar, em sua maior parte, apenas a fase equiaxial α , buscando reduzir flutuações de valores de microdureza, como foi observado em medições feitas durante os ensaios preliminares.

O valor médio das diagonais das indentações foi de 10 μm .

3.4.4 Imagem da superfície do rebolo

Para captura de imagens da ferramenta (rebolo), foi utilizado o microscópio estéreo SZ61, da marca Olympus, ampliação máxima de 45x, pertencente ao LEPU.

Para a captura da imagem o rebolo foi apoiado entre duas mesas com alturas próximas, utilizando, para isso, um eixo para balanceamento estático com sede cônica para acoplamento na flange do rebolo. O microscópio passou então por calibragem da imagem a uma ampliação de 45x, utilizando escala de aço inox comum. Com o auxílio das hastes de posicionamento, o microscópio foi posicionado sobre a superfície do rebolo, e a imagem capturada através de câmera acoplada ao equipamento.

3.4.5 Potência elétrica

Para avaliação dos valores de potência elétrica ativa consumida no motor do rebolo da retificadora foi utilizado um alicate wattímetro modelo SKAW-01, marca Skill-Tec.

Para a medição da potência elétrica foi necessário ter acesso aos cabos de alimentação do motor do eixo árvore. Para isso, a caixa ao lado do motor foi aberta e em cada um dos três cabos de alimentação, um cabo com ponteira tipo jacaré foi colocado para leitura da tensão no motor nos terminais L1, L2 e COM do wattímetro, conforme recomendado pelo fabricante. Uma das fases ainda foi aberta e um cabo foi adicionado para que a leitura de corrente por efeito hall do equipamento pudesse ser feita afastada da mesa, tomando o cuidado de a leitura de corrente ser feita em uma das fases ligadas em L1 ou L2, como indicado no manual. O equipamento foi então ligado, a botoeira de seleção posicionada para leituras de potência ativa (kW), e o equipamento configurado para leitura de potência em montagem com três cabos e três fases (o padrão do equipamento utiliza a configuração de quatro cabos e três fases) (Figura 3.19).

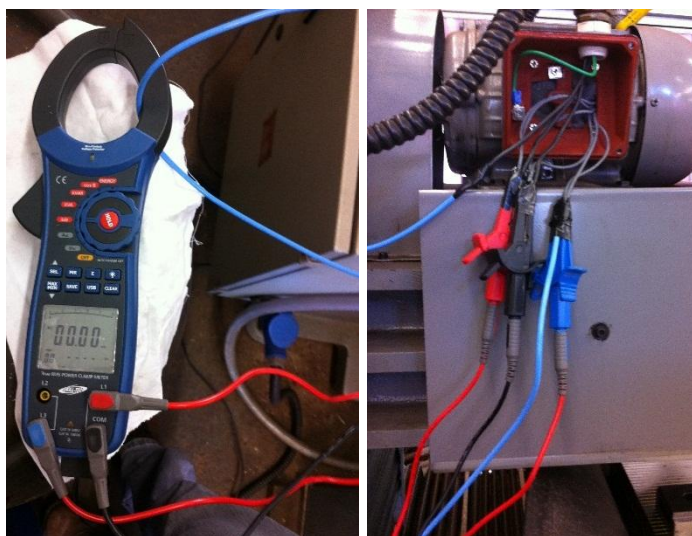


Figura 3.19 - Montagem de medição de potência elétrica

Os parâmetros de corte para a medição de potência segue quase o mesmo padrão utilizado nos ensaios definitivos. Para esse teste, foram adequados o a_p e a v_w , nos quais o a_p utilizado foi igual à largura da peça (rebolo com espessura maior que a largura da peça), e a v_w foi reduzida de 6,8 m/min para cerca de 2,7 m/min. Não houve movimento transversal da mesa. A seleção desses parâmetros foi necessária pois, ao se realizar o procedimento padrão utilizado nos ensaios definitivos, o equipamento de medição não demonstrou ter sensibilidade suficiente para aquisição da leitura. Desse modo, a solicitação sobre o motor do rebolo foi ampliada o suficiente para gerar leitura, e, com a redução da velocidade da peça, uma fração de tempo a mais de contato rebolo peça foi conseguido.

As leituras de potência foram tomadas segundo o valor de pico mostrado na tela do equipamento, a cerca de 1,5 segundo após a entrada do rebolo na peça. Foram realizadas três leituras para cada conjunto de variáveis de entrada (10 e 20 μm de a_e , operações com técnica de aplicação de fluido convencional, MQL e com adição de partículas de grafeno), ou seja, seis testes foram conduzidos com três leituras realizadas para cada um.

CAPÍTULO IV

Resultados e Discussão

Neste capítulo serão apresentados os resultados e discussões pertinentes aos dados obtidos para ensaios de retificação de liga de titânio Ti-6Al-4V conduzidos no Laboratório de Usinagem Convencional da FEMEC-UFU. As variáveis de entrada empregadas foram a penetração de trabalho (a_e), o número de passes e a técnica de aplicação de fluido empregada, a saber: convencional ou Jorro (ou ainda abundância), técnica MQL e variação da técnica MQL mas com fluido contendo partículas de grafeno dispersas.

Os parâmetros de saída analisados foram, na ordem de obtenção e análise: medições de parâmetros Ra e Rz de rugosidade superficial, imagens das superfícies retificadas via microscópio eletrônico de varredura, medição de perfil de microdureza a partir da superfície retificada e consumo de potência elétrica no motor do rebolo. Além disso, por último, são apresentadas as imagens da superfície do rebolo para verificação da superfície e identificação de possíveis materiais aderidos.

4.1 Rugosidade superficial

Os valores para os parâmetros Ra e Rz obtidos para os experimentos podem ser observados na Tab. 4.1, esses valores correspondem à média e desvio padrão (D.p.) calculados a partir das cinco leituras tomadas ao longo da superfície para cada passe completo do rebolo sobre a peça, onde a_e é a penetração de trabalho, +G é o fluido com grafeno disperso. Os resultados para Ra e Rz passe a passe estão ainda dispostos graficamente nas Figs. 4.1 e 4.3, respectivamente, para o a_e de 10 μm , e nas Figs. 4.2 e 4.4, respectivamente, para os procedimentos utilizando a_e igual a 20 μm .

Tabela 4.1 - Valores dos parâmetros de rugosidade Ra e Rz obtidos após a retificação da liga Ti-6Al-4V em várias condições de corte (números ao fundo identificam a amostra).

Técnica de aplicação de fluido de corte:				Jorro		MQL		MQL+G	
a_e (μm)	Núm. de passes	Passe	parâ- metro	Média (μm)	D.p. (μm)	Média (μm)	D.p. (μm)	Média (μm)	D.p. (μm)
10	2	1ª	Ra	0,83	0,13	0,73	0,09	0,52	0,05
			Rz	4,74	0,41	4,39	0,38	3,67	0,13
		2ª	Ra	0,82	0,10	0,60	0,05	0,40	0,04
			Rz	4,92	0,41	3,97	0,36	2,83	0,22
	3	1ª	Ra	0,81	0,13	0,66	0,09	0,61	0,03
			Rz	5,32	0,84	4,02	0,29	4,33	0,13
		2ª	Ra	0,87	0,16	0,53	0,09	0,52	0,03
			Rz	5,00	0,84	3,47	0,47	3,43	0,11
		3ª	Ra	0,84	0,19	0,53	0,06	0,55	0,03
			Rz	5,00	0,89	3,53	0,27	3,51	0,06
20	2	1ª	Ra	0,78	0,15	0,88	0,05	0,88	0,02
			Rz	4,98	0,56	5,68	0,53	5,44	0,10
		2ª	Ra	0,71	0,12	0,80	0,18	0,60	0,09
			Rz	4,23	0,69	5,05	0,60	4,06	0,45
	3	1ª	Ra	0,75	0,11	0,88	0,06	0,87	0,08
			Rz	4,70	0,42	5,34	0,32	5,35	0,32
		2ª	Ra	0,67	0,16	0,82	0,10	0,69	0,08
			Rz	4,22	0,68	5,02	0,52	4,40	0,44
		3ª	Ra	0,59	0,10	0,85	0,05	0,74	0,08
			Rz	3,79	0,74	5,21	0,14	4,46	0,14

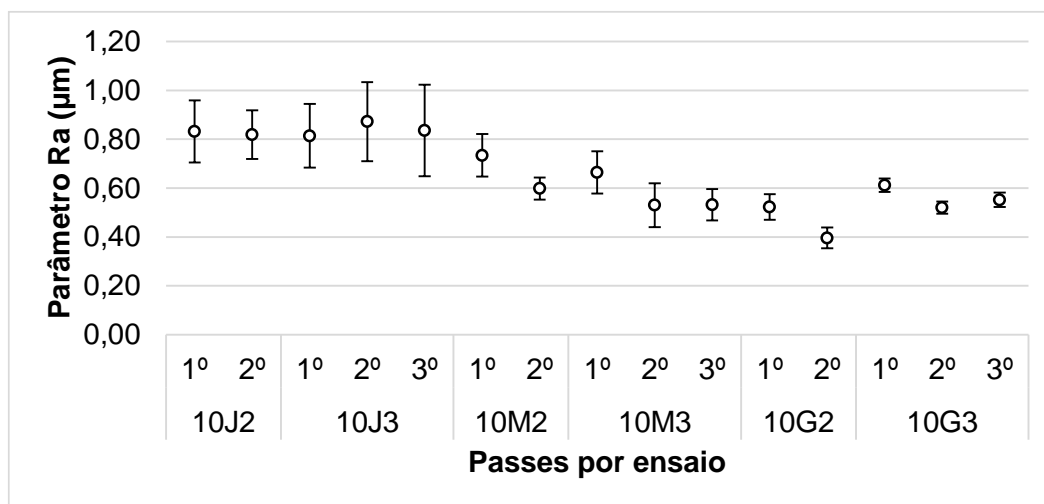


Figura 4.1 - Valores do parâmetro Ra para os ensaios realizados com penetração de trabalho (a_e) igual a 10 μm , medidos a cada passe após retificação da liga de Ti-6Al-4V em diferentes atmosferas de usinagem

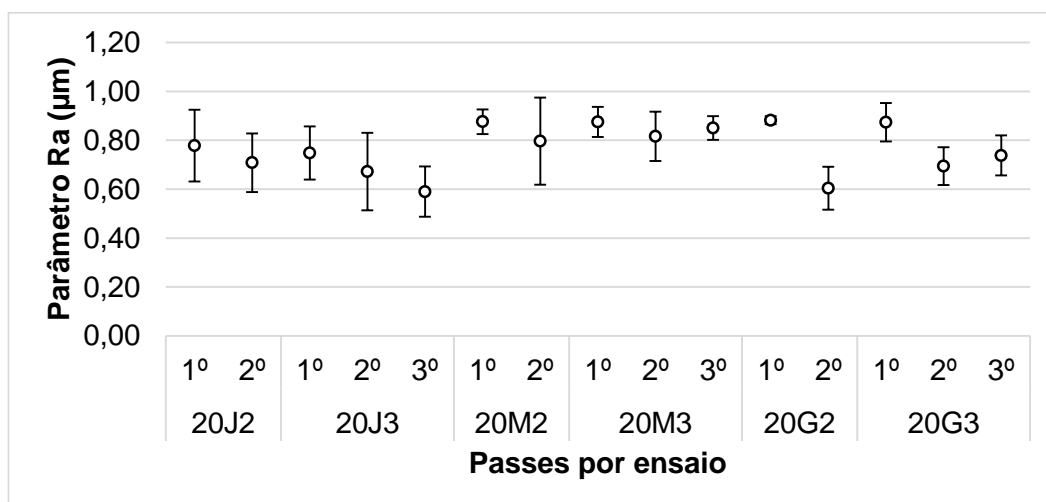


Figura 4.2 - Valores do parâmetro Ra para os ensaios realizados com penetração de trabalho (a_e) igual a 20 μm , medidos a cada passe após retificação da liga de Ti-6Al-4V em diferentes atmosferas de usinagem

Da tabela 4.1 e Figuras 4.1 e 4.2 pode-se notar que todas as leituras médias registradas se mantiveram abaixo de 1,2 μm , o que é aceitável para os procedimentos de retificação de semi-acabamento segundo a literatura, que expõe valores até 1,6 μm (1,5 μm para alguns autores) para a retificação (MALKIN; GUO, 2008, MARINESCU et al., 2007).

Com exceção do ensaio 10J3, observa-se que a rugosidade descrece com a progressão nos passes, com leve queda para o segundo ou a manutenção do valor. Esse fato é mais visível para os procedimentos utilizando a técnica MQL, onde a diferença entre os dois primeiros passes atingem entre 18 % e 32 %.

Ao comparar a sucessão de passes, observa-se que em alguns casos, os valores de rugosidade para passes de parâmetro idênticos, por exemplo, 1º e 2º passes das amostras 9 (10G2) e 10 (10G3), ambas utilizando MQL com partículas de grafeno e 10 μm de a_e , não mostraram repetibilidade, com valores de 11 % inferiores (2º passe, entre 10M2 e 10M3) e 31 % superiores (2º passe, entre 10G2 e 10G3). Isso se explica por ser difícil de obter repetibilidade mesmo sobre as mesmas condições de processo, pois há um número maior de parâmetros e de certa forma mais complexos de serem controlados na retificação (LEE et al., 2002; DE MELLO, 2013).

Pela Figura 4.1, observa-se ainda que a rugosidade obtida para os ensaios utilizando a técnica MQL foram relativamente menores que aquelas observadas para o procedimento utilizando a técnica convencional, e entre os ensaios com MQL comum e com adição de grafeno, observam-se valores bem próximos (0,53 e 0,55 μm , respectivamente, ao final de 3 passes), mas com dispersões menores para os ensaios realizados com o grafeno. Na Fig. 4.2, para os ensaios com 20 μm de a_e , o quadro se inverte e os resultados para o

procedimento com jorro produziram menores valores de rugosidade que para aqueles ensaios em que foi empregada a técnica MQL. Outra observação a se fazer é que para a maior profundidade os dados de parâmetros idênticos, como citado para os de menor penetração, tiveram em termos de valores médios uma menor dispersão, pois os valores ficaram entre 5 % abaixo e 15 % acima entre eles.

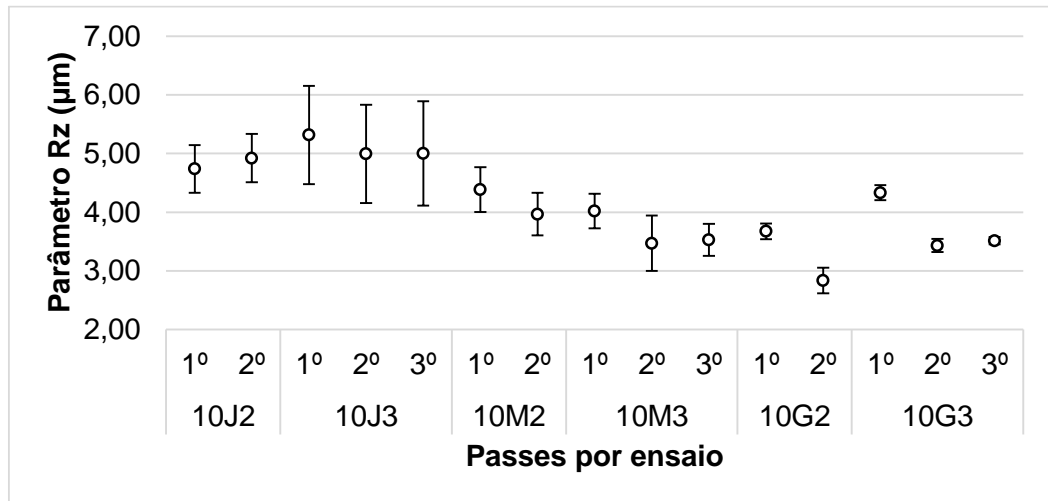


Figura 4.3 - Valores do parâmetro Rz para os ensaios realizados com penetração de trabalho (a_e) igual a 10 μm , medidos a cada passe após retificação da liga de Ti-6Al-4V em diferentes atmosferas de usinagem

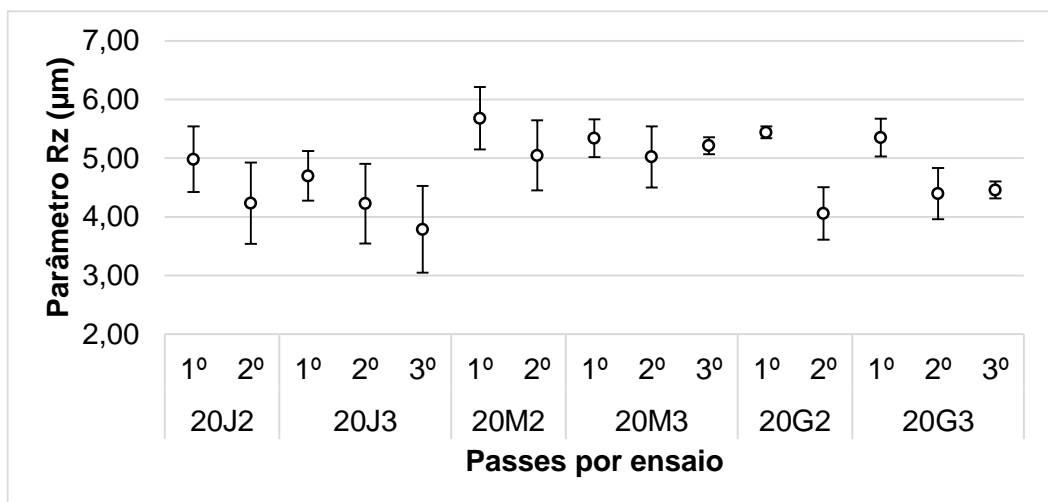


Figura 4.4 - Valores do parâmetro Rz para os ensaios realizados com penetração de trabalho (a_e) igual a 20 μm , medidos a cada passe após retificação da liga de Ti-6Al-4V em diferentes atmosferas de usinagem

Os valores do parâmetro de rugosidade R_z mostrados nas Figs. 4.3 e 4.4 apresentam comportamento semelhante ao observado para o parâmetro R_a , isto é, para a_e igual a $10\text{ }\mu\text{m}$, os experimentos realizados com jorro resultaram em valores mais elevados de rugosidade que para aqueles ensaios em que foi utilizada técnica MQL, e para a_e igual a $20\text{ }\mu\text{m}$, a situação é contrária, com valores de rugosidade R_z obtidos após a retificação com a técnica jorro, em média, mais baixos que aqueles obtidos após usinagem com a técnica MQL. Em geral, do 1º para o 2º passe houve queda do R_z para todos os ensaios, exceto para o ensaio E1 onde houve aumento 4 %, mas que não se julgaria significativo por causa da dispersão dos valores; do 2º para o 3º, houve a manutenção do valor, com leve acréscimo para a maioria dos casos, apenas para o E4 houve queda de 10 % nesse valor.

De forma análoga para os valores de R_a , ao se observar os valores de R_z para parâmetros idênticos, notam-se variações entre 13 % inferiores (2º passe, entre 10M2 e 10M3) e 21 % superiores (2º passe, entre 10G2 e 10G3) para os ensaios realizados com a menor penetração. Para os ensaios com maior penetração, essas variações ficaram entre 6 % abaixo (1º passe, entre 20M2 e 20M3) e 8 % superiores (2º passe, entre 20G2 e 20G3), mostrando novamente, em termos de valores médios, uma menor variação.

Após as medições de rugosidade para as réplicas realizadas, foram calculados os valores médios de R_a e R_z para a superfície final (após último passe) e dispostos graficamente nas Figs. 4.5 e 4.6, respectivamente, para todos os doze ensaios e réplicas realizados.

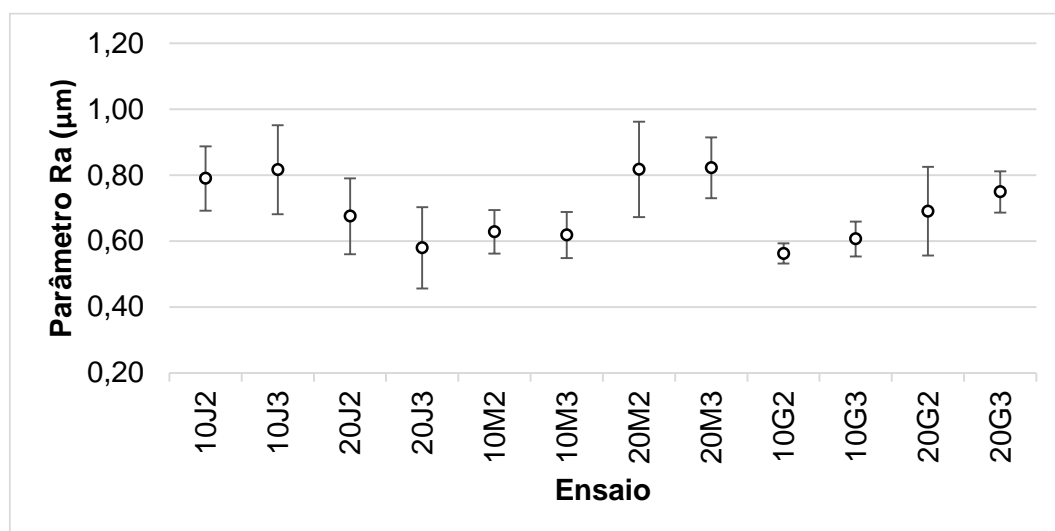


Figura 4.5 - Valor médio do parâmetro R_a obtido após último passe entre ensaio e réplica realizados após retificação da liga de Ti-6Al-4V em diferentes atmosferas de usinagem

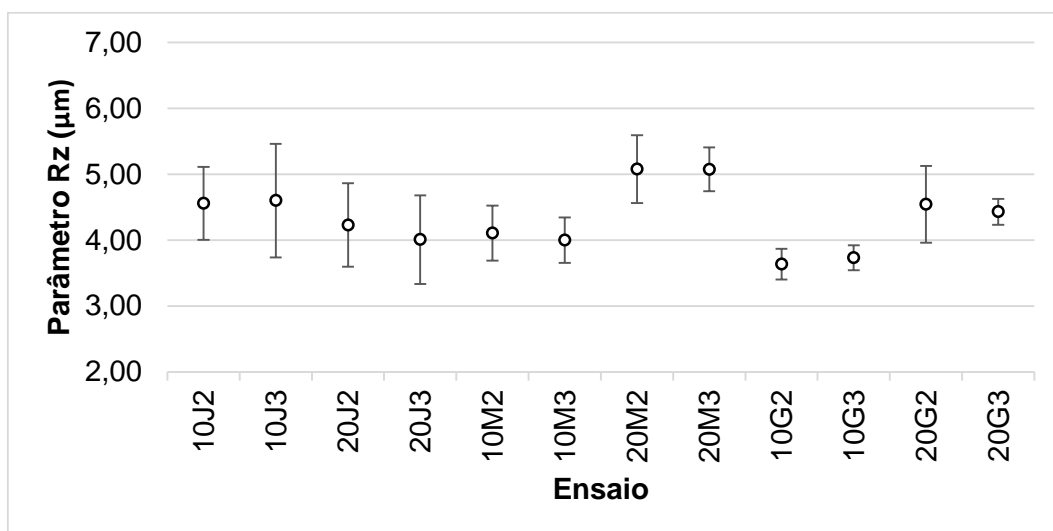


Figura 4.6 - Valor médio do parâmetro Rz obtido após último passe entre ensaio e réplica realizados após retificação da liga de Ti-6Al-4V em diferentes atmosferas de usinagem

Observa-se destas figuras que o comportamento das curvas para Ra e Rz são semelhantes nos dois gráficos. Pela observação desses, pode-se dizer que:

- Para os ensaios utilizando a técnica MQL tanto com fluido sem grafeno (MQL) quanto com fluido com grafeno (MQL+G), os valores de rugosidade se comportaram conforme relatado na literatura, na qual espera-se que os valores de rugosidade sejam diretamente proporcionais à penetração de trabalho (MALKIN; GUO, 2008; MARINESCU et al., 2007), o que não ocorreu para os ensaios utilizando a técnica jorro, na qual ao se dobrar a penetração a rugosidade caiu cerca de 22 e 10 %, em média, para os parâmetros Ra e Rz, respectivamente. Esse mesmo comportamento é observado em De Mello et al. (2015). Para técnica MQL os aumentos de Ra e Rz, respectivamente, foram de 32 e 25 %, e, para a MQL+G, 23 e 22 %.
- Dos valores relativos ao número de passes, pouca mudança pode ser observada ao passar de 2 para 3 passes no processo. Mas, para o Ra dos ensaios com jorro, a_e igual a 20 µm, nota-se uma tendência de queda nessa transição (14 % no valor médio) e, para os ensaios de MQL+G, para ambas penetrações de trabalho, demonstram leve tendência de aumento (8 e 9 % para menor e maior a_e , respectivamente).
- Para a menor penetração de trabalho, a rugosidade obtida após a retificação empregando as técnicas MQL e MQL+G foi menor que aquela obtida após a usinagem com jorro. Entretanto, para a maior penetração, os resultados para o jorro foram menores, como se a elevação da geração de calor pela elevação da

quantidade de material retirada por passe fosse suficiente para atingir um limiar onde os efeitos de lubrificação e refrigeração fornecidos pelo uso da técnica MQL já não são suficientes para garantir o controle do aspecto superficial da peça.

Durante a realização das medições de rugosidade, notou-se ainda um comportamento recorrente ao se tratar da dispersão dos valores ao longo da superfície retificada. Para que fosse avaliado o comportamento médio entre todas as medições de rugosidade feitas, adotou-se o seguinte procedimento:

- Cada leitura feita foi padronizada a um nível de dispersão percentual (p_{Mi}) a partir da média obtida para cada amostra, para tanto, utilizou-se a Eq. (4.1):

$$p_{Mi} = \frac{Ra_{Mi} - \overline{Ra}}{\overline{Ra}} \cdot 100 \quad (4.1)$$

Onde Ra_{Mi} é a leitura para o parâmetro Ra de rugosidade ao executar a medição no ponto Mi de medição, e \overline{Ra} é a média aritmética das leituras realizadas de M1 a M5, na amostra em questão. Dessa forma, a média das dispersões de valores é igual a zero;

- Calculado o p_{Mi} de cada valor medido, foi tomada a média de todos os valores de dispersão para uma mesma técnica de aplicação de fluido e um mesmo ponto de medição (ilustração e identificação dos pontos de medição na Fig. 3.17b). Com isso os resultados foram agrupados e apresentados graficamente nas Figs. 4.7 e 4.8.

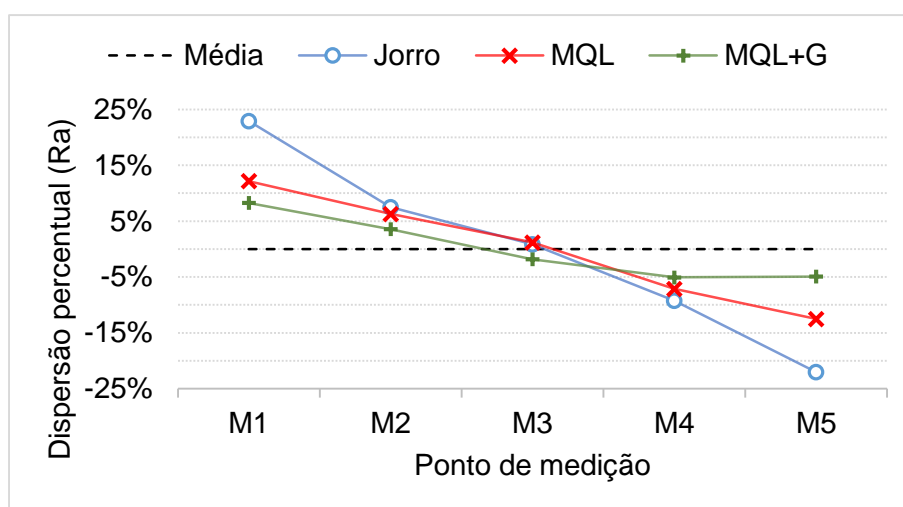


Figura 4.7 - Dispersão percentual dos valores de rugosidade para o parâmetro Ra

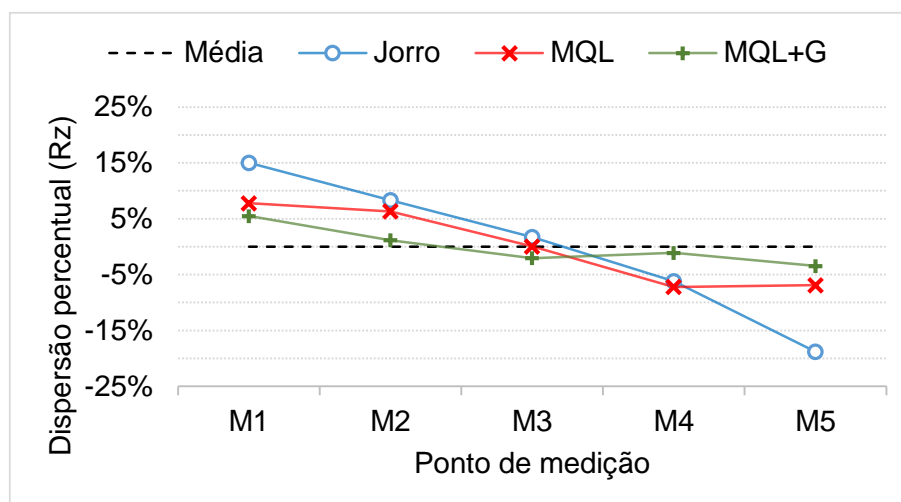


Figura 4.8 - Dispersão percentual dos valores de rugosidade para o parâmetro Rz

Nota-se que há uma menor dispersão dos valores de rugosidade, tanto para o parâmetro Ra, quanto para o Rz, nos ensaios realizados utilizando a técnica MQL+G. Por outro lado, as amostras retificadas utilizando a técnica de jorro mostraram maior dispersão, demonstrando que essa técnica pode ser menos efetiva em garantir o controle da rugosidade superficial ao longo do curso de avanço do rebolo. Isso reforça a ideia do melhoramento do processo ao utilizar a técnica MQL com fluido de corte contendo partículas de grafeno. Até o momento de fechamento deste trabalho não foi encontrada na literatura algum trabalho que abordasse esse ponto de análise em específico.

4.2 Imagens das superfícies de Ti-6Al-4V retificadas via MEV

As imagens de microscopia eletrônica das superfícies retificadas estão dispostas nas Figs. 4.9 a 4.12. Para todas as amostras o comportamento da superfície foi semelhante, todas apresentaram sulcos preferenciais na direção de corte principal, além de mostrar porções de material deformado plasticamente, que podem ser provenientes de material aderido na face dos grãos abrasivos que são depositados novamente na superfície e então delaminados pelos grãos abrasivos subsequentes, como é relatado em Tang et al. (1990) e Malkin e Guo (2008).

Os ensaios 20J2, 20J3, 20M2, 20M3, 20G2 e 20G3 se referem àquelas condições em que o grãos penetraram mais sobre a superfície da peça e assim o fluxo de material de titânio que sai pela lateral do grão será maior. Sabe-se que ao utilizar uma penetração menor, uma menor porção do grão abrasivo atua no corte. Estas marcas evidenciam este comportamento que também é típico de aços que são retificados (DE MELLO et al., 2015).

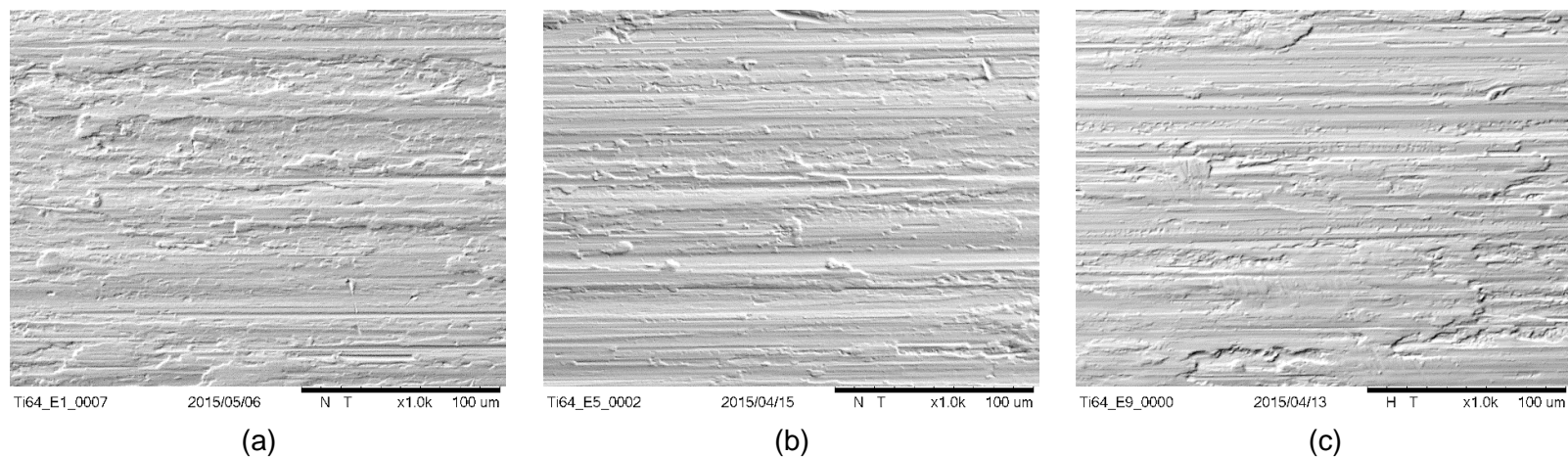


Figura 4.9 - Imagens de MEV, ensaios com $a_e = 10 \mu\text{m}$, 2 passes, utilizando (a) técnica convencional (10J2); (b) técnica MQL (10M2) e; (c) técnica MQL com adição de grafeno (10G2)

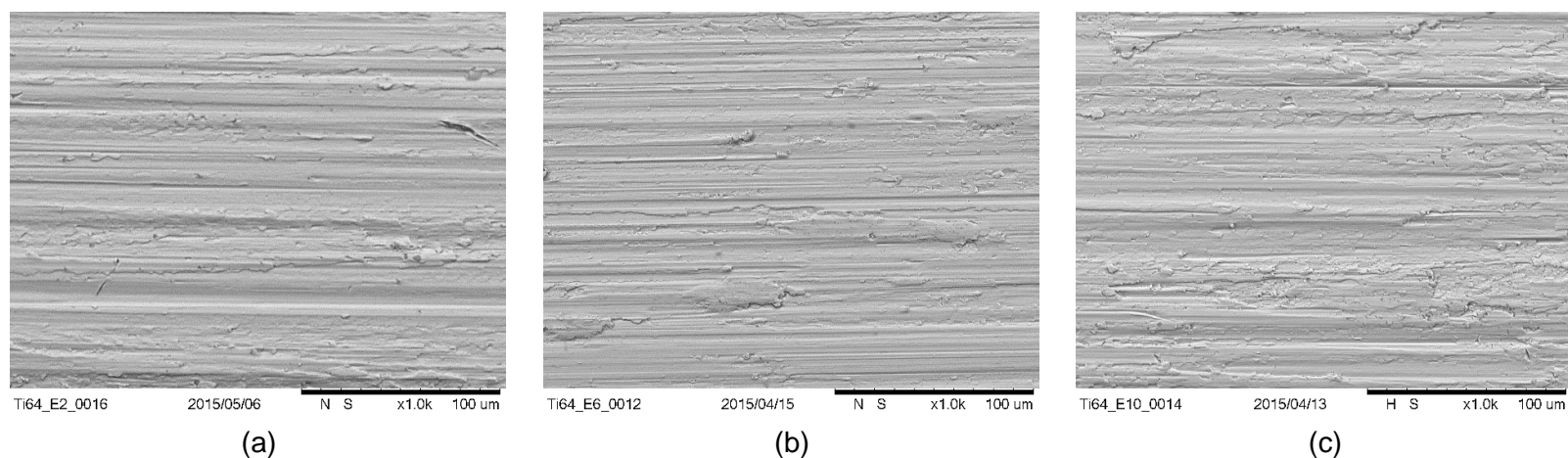


Figura 4.10 - Imagens de MEV, ensaios com $a_e = 10 \mu\text{m}$, 3 passes, utilizando (a) técnica convencional (10J3); (b) técnica MQL (10M3) e; (c) técnica MQL com adição de grafeno (10G3)

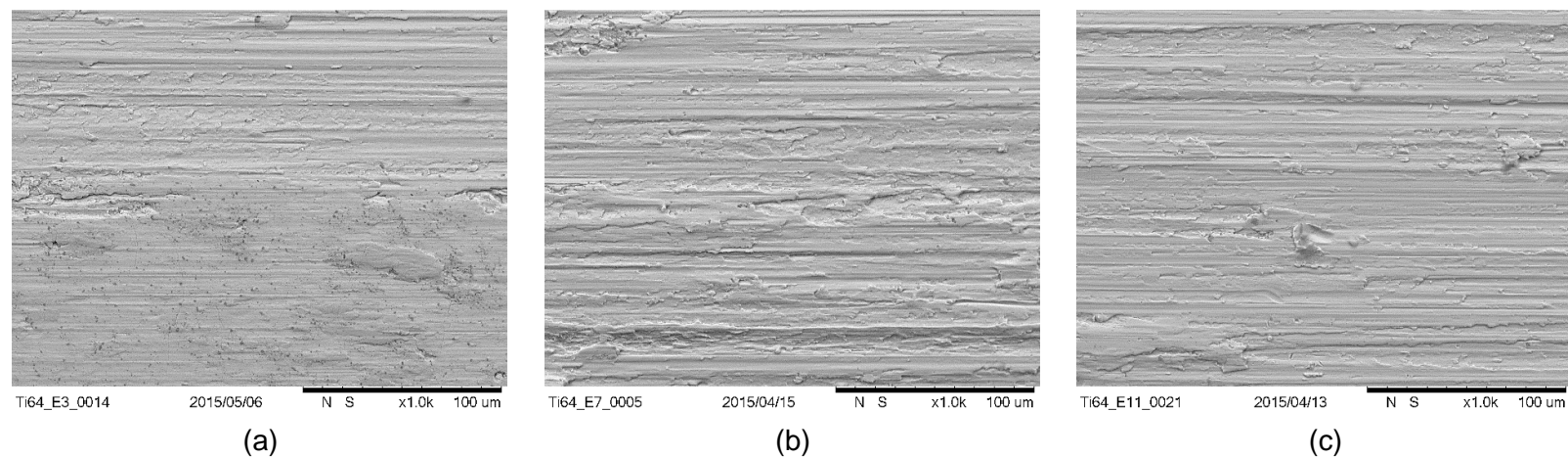


Figura 4.11 - Imagens de MEV, ensaios com $a_e = 20 \mu\text{m}$, 2 passes, utilizando (a) técnica convencional (20J2); (b) técnica MQL (20M2) e; (c) técnica MQL com adição de grafeno (20G2)

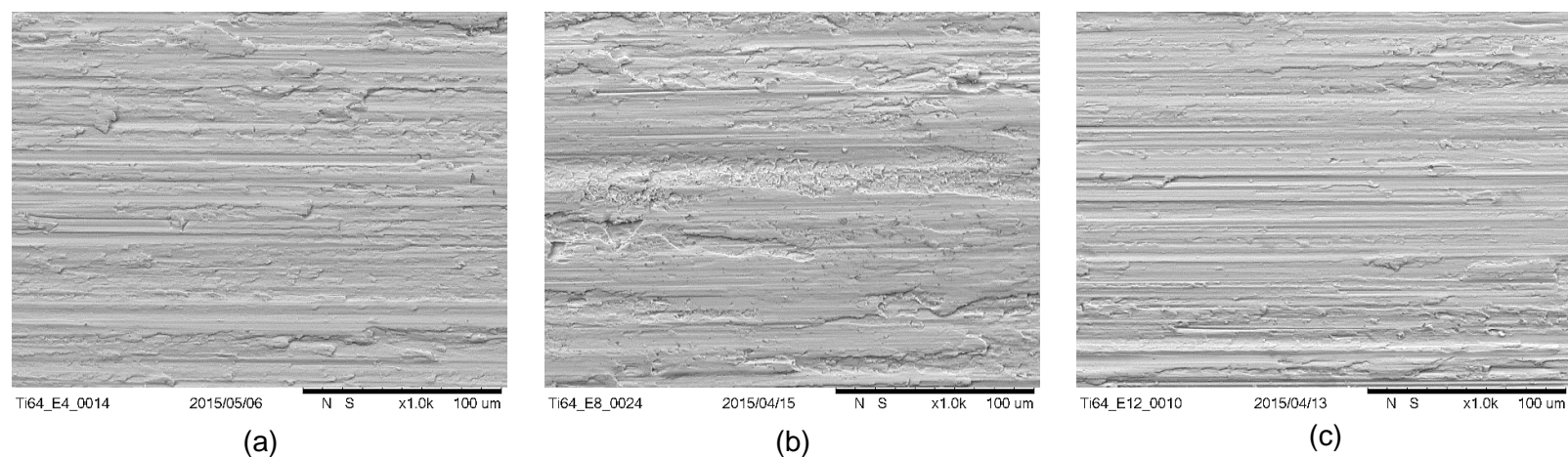


Figura 4.12 - Imagens de MEV, ensaios com $a_e = 20 \mu\text{m}$, 3 passes, utilizando (a) técnica convencional (20J3); (b) técnica MQL (20M3) e; (c) técnica MQL com adição de grafeno (20G3)

Além dos aspectos superficiais observados anteriormente, alguns eventos foram identificados na superfície das peças durante a obtenção das imagens de MEV. Esses eventos foram registrados e podem ser vistos nas Figs. 4.13 e 4.14.

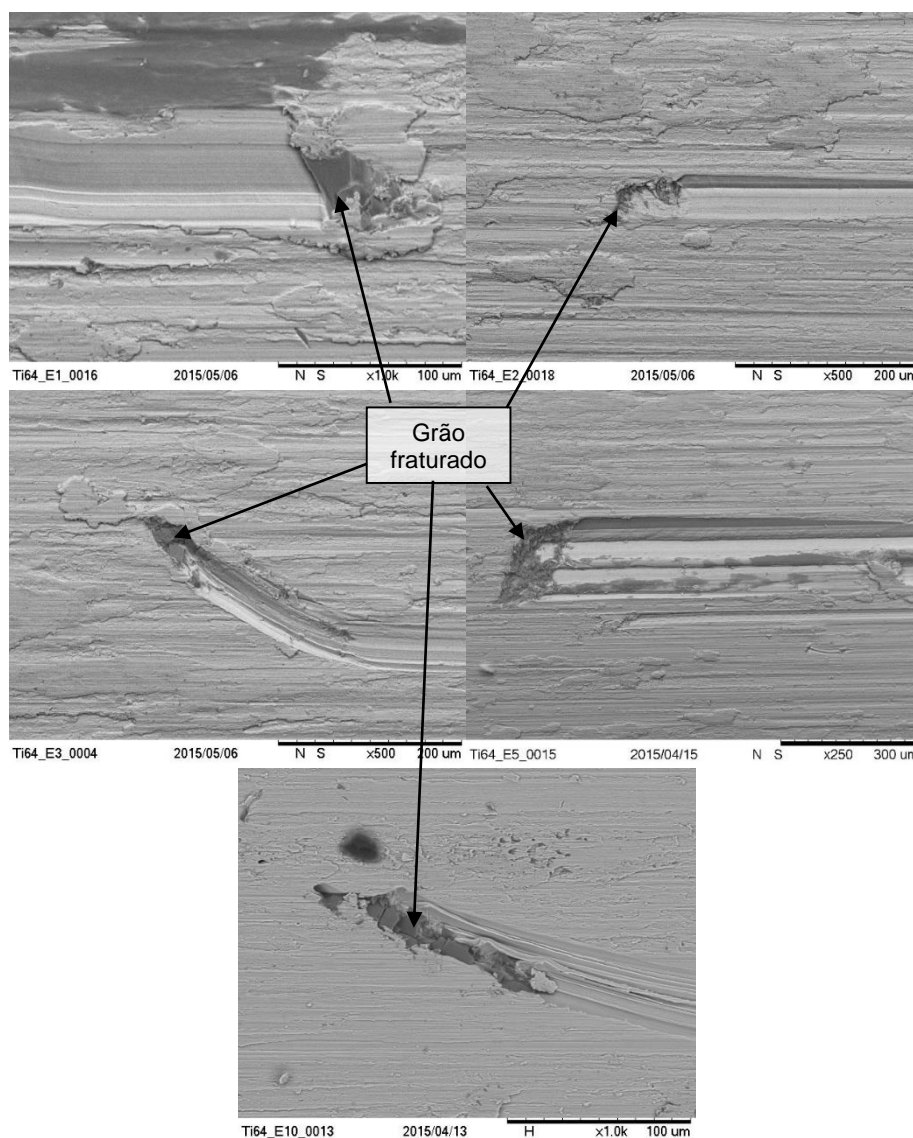


Figura 4.13 - Sequência de imagens obtidas em MEV dos eventos identificados nas superfícies da liga Ti-6Al-4V como fratura de grão sobre a superfície retificada.

Na Figura 4.13, há a presença de grãos abrasivos embutidos na superfície retificada, observados em todas as amostras ensaiadas e que pode indicar uma forte adesão entre material da peça e grão abrasivo e/ou possíveis forças de corte elevadas para as condições dos testes. Segundo Malkin e Guo (2008), na retificação de ligas de difícil usinagem, como o titânio e o aço inoxidável austenítico, há maior tendência à craterização e embutimento de fraturas de grãos abrasivos. Esse tipo de dano, ainda segundo eles, fornece uma fonte de

concentração de tensões que pode ter um efeito negativo sobre a resistência em serviço e as propriedades de fadiga.

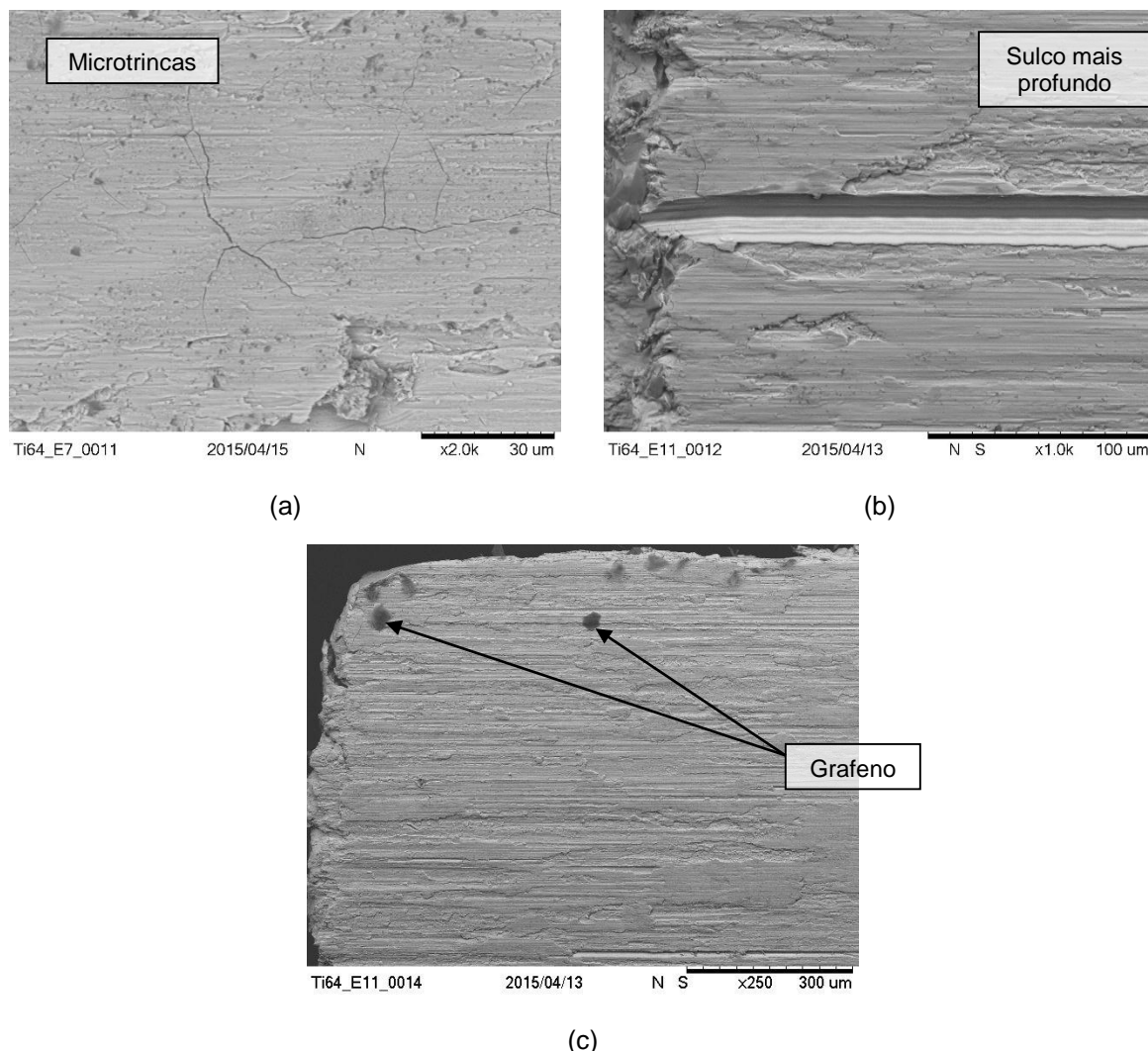


Figura 4.14 - Imagens de MEV para eventos identificados na superfície retificada nas condições (a) 20M2 e (b) e (c) 20G2

Outros eventos foram observados nas superfícies usinadas, dentre eles o aparecimento de microtrincas (ensaio 20M2, Figura 4.14a), que podem ser indicativo de tensões residuais de tração na superfície da peça, deixada pelo processo de retificação, aliadas às características de grande afinidade química entre material da peça e do rebolo, além da pobre condutividade térmica da liga Ti-6Al-4V, que promove a concentração do calor transmitido à peça nas camadas mais próximas à superfície retificada, o que pode elevar a temperatura final na superfície. Na passagem da peça pelo ponto de incidência do fluido refrigerante há a refrigeração da superfície de forma mais acelerada que das camadas subsuperficiais, esse gradiente flutuante leva a processos de contração e dilatação cíclicos,

que podem levar à formação de microtrincas. Além disso, a presença de sulcos mais proeminentes (profundos) foram identificados em todas as amostras (exemplo na Fig. 4.14b). Eles podem também atuar como concentradores de tensão, a exemplo do entalhe feito em peças de ensaio Charpy (que tem exatamente o papel de concentração de tensões e controle do ponto de abertura de trinca), e são elementos aleatórios do processo de retificação. Foram ainda visualizados grãos de grafeno presos às superfícies de todas as amostras que passaram pelo processo utilizando a técnica MQL+G (a exemplo da Fig. 4.14c), mesmo após a limpeza em cuba ultrassônica, comprovado pelo teste de EDS, mostrado também na Fig. 4.15.

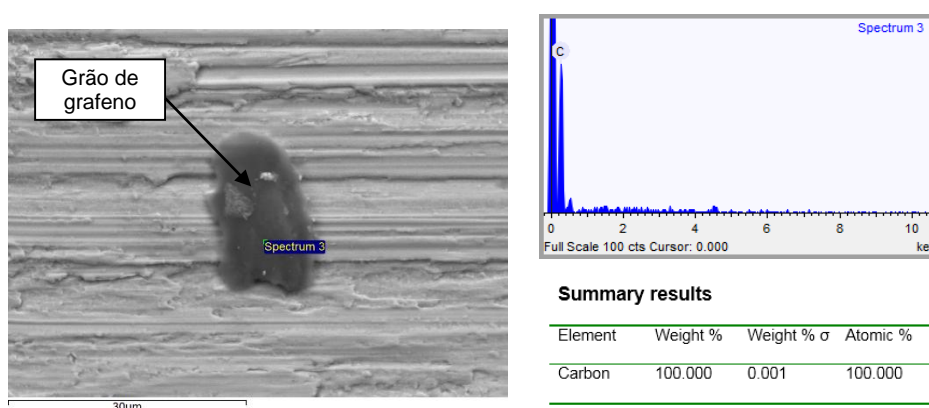


Figura 4.15 - EDS feito em micro grão de grafeno, amostra E12.

O fato do grão de grafeno permanecer aderido à superfície do material é benéfico para o sistema tribológico formado entre o grão abrasivo e a peça, uma vez que ele atuará como lubrificante sólido, oferecendo um efeito de lubrificação limite, melhorando as condições de corte na retificação quando as forças de corte são grandes o suficiente para romper o filme de óleo depositado sobre a superfície do(a) peça/abrasivo. O contato direto com a superfície pode garantir também uma melhor troca de calor entre meio ambiente e a peça, utilizando os grãos de grafeno aderidos à superfície como meio de condução.

Não foram identificadas queimas de aspecto visual em nenhum dos ensaios e réplicas.

4.3 Imagens da superfície do Rebolo

As imagens obtidas da superfície do rebolo utilizado nos experimentos com técnica MQL+G, utilizando estereomicroscópio, podem ser vistas nas Figs. 4.16, 4.17 e 4.18 para a entrada, meio e saída do rebolo, respectivamente.

Pode-se observar que, para as imagens da entrada do rebolo (região que primeiro toca na peça no momento da retificação), há áreas de tom acinzentado que podem ser indicações de material aderido da peça de titânio nos abrasivos do rebolo, não visualizadas para as imagens do centro e saída do rebolo, que se espera terem passado por condição mais branda que a primeira região. Contudo, como o aspecto da superfície do rebolo tem tons escuros que dificultam a identificação precisa desses elementos, nenhuma conclusão válida pode ser retirada com 100 % de confiança. Para tal seria necessário a separação de uma porção de material da ferramenta para análise em MEV e EDS para confirmação, o que não foi possível devido às expectativas de reutilização da ferramenta para estudos futuros.

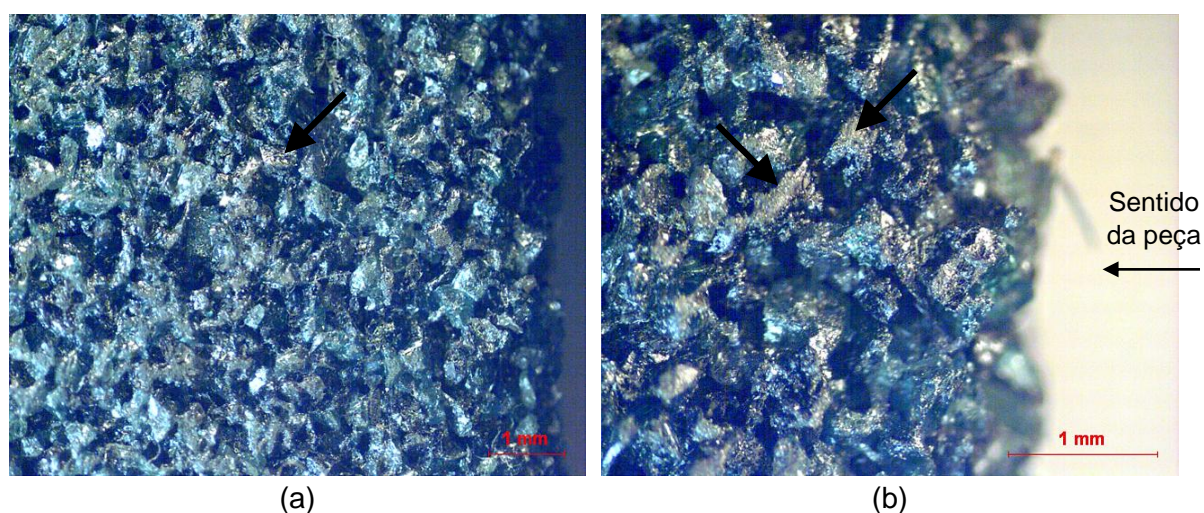


Figura 4.16 - Imagens de estereomicroscópio do rebolo de SiC após ensaio com técnica MQL contendo grafeno. Fotos da borda do rebolo próximo do contato com a peça (região de entrada).

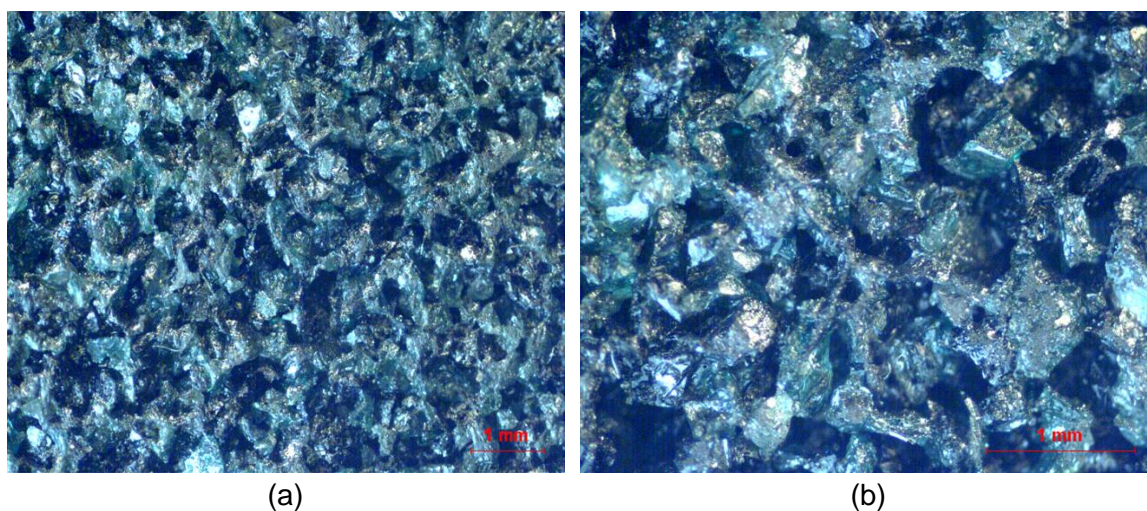


Figura 4.17 - Imagens de estereomicroscópio do rebolo de SiC após ensaio com técnica MQL contendo grafeno. Fotos da região central do rebolo.

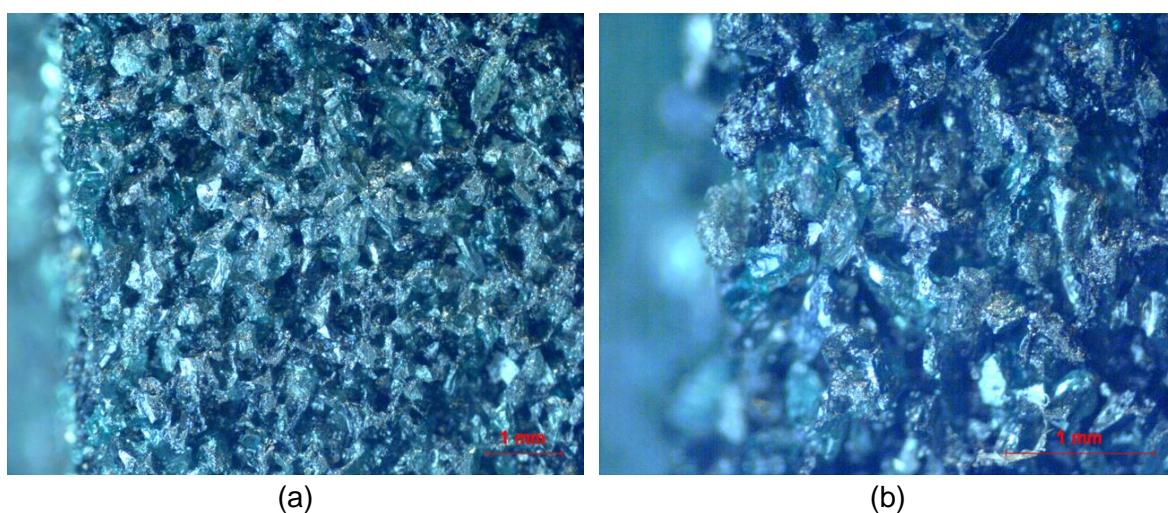


Figura 4.18 - Imagens de estereomicroscópio do rebolo de SiC após ensaio com técnica MQL contendo grafeno. Fotos da saída do rebolo.

4.3.1 Dressador

Na realização das réplicas, o dressador de diamante sintético de ponta única da fabricante Difer teve a imagem de sua ponta monitorada através de fotografias (Figuras 4.19a e 4.19b)

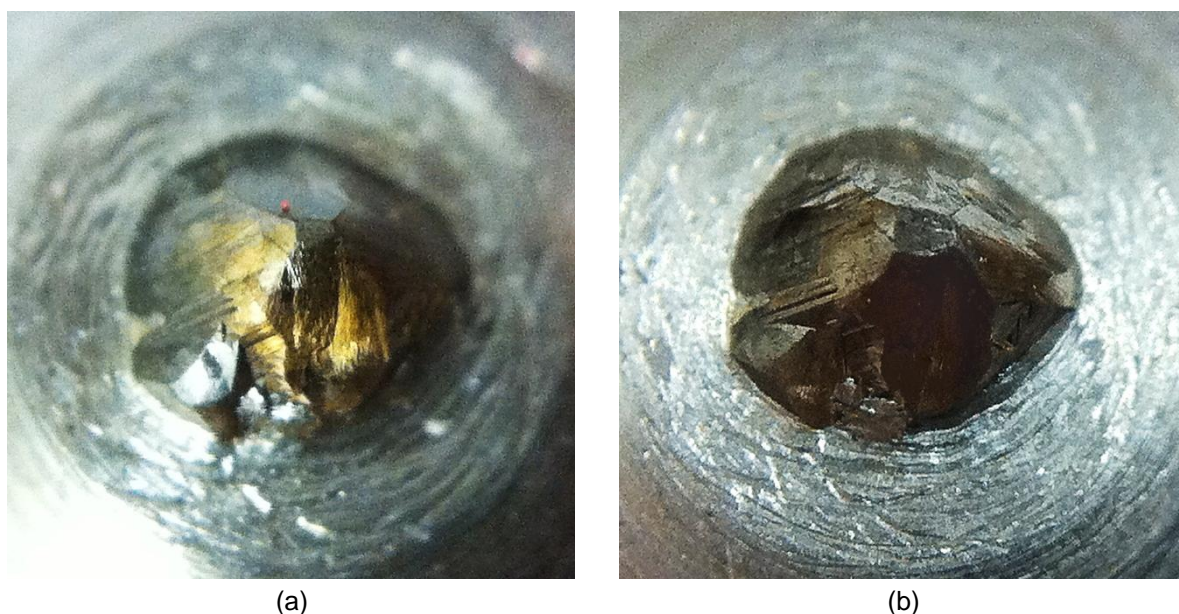


Figura 4.19 - Imagens da ponta do dressador Difer (a) após uma das réplicas (1 dressagem feita) e (b) Após todas as réplicas (12 operações de dressagem)

Através de manipulações de imagem pode se chegar a um valor aproximado que exhibe que, após todas as réplicas, a área de desgaste final do dressador ficou com dimensão 305 % maior que a área inicial. Como pode se perceber, o desgaste inicial do dressador foi muito rápido (há menos material para suportar a carga do trabalho) pois com apenas uma dressagem realizada, a área de desgaste na ponta do dressador já era cerca de 33 % da área que ela atingiu após 12 operações de dressagens.

4.4 Microdureza da liga Ti-6Al-4V após retificação com rebolo de SiC

Na Figura 4.20a pode se ver o perfil de indentações obtido para uma das amostras e na Fig. 4.20b há uma imagem de uma indentação isolada para exemplificar o que foi comentado na metodologia, com a indentação acomodada no interior da fase α da liga de estudo a fim de reduzir flutuações de valores decorrentes do fato de a indentação abranger as duas fases do material, que tem microestruturas diferentes.

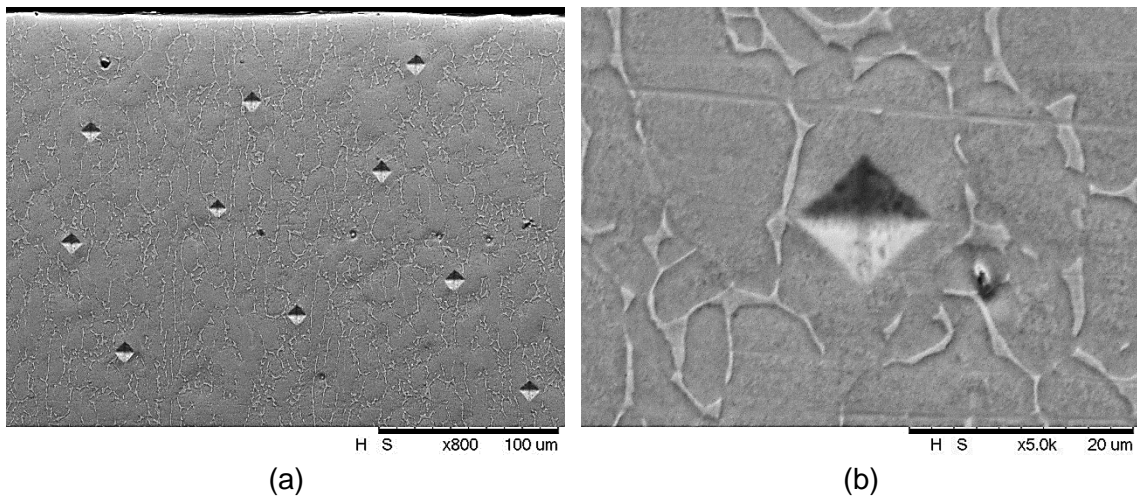


Figura 4.20 - Imagens de MEV de medição de microdureza para a liga de titânio Ti-6Al-4V, (a) perfil de indentações e (b) imagem de indentação

Nas Figuras 4.21, 4.22 e 4.23 são apresentados os gráficos resultantes das medições de rugosidade a partir da superfície usinada para os ensaios com jorro, MQL e MQL+G, respectivamente.

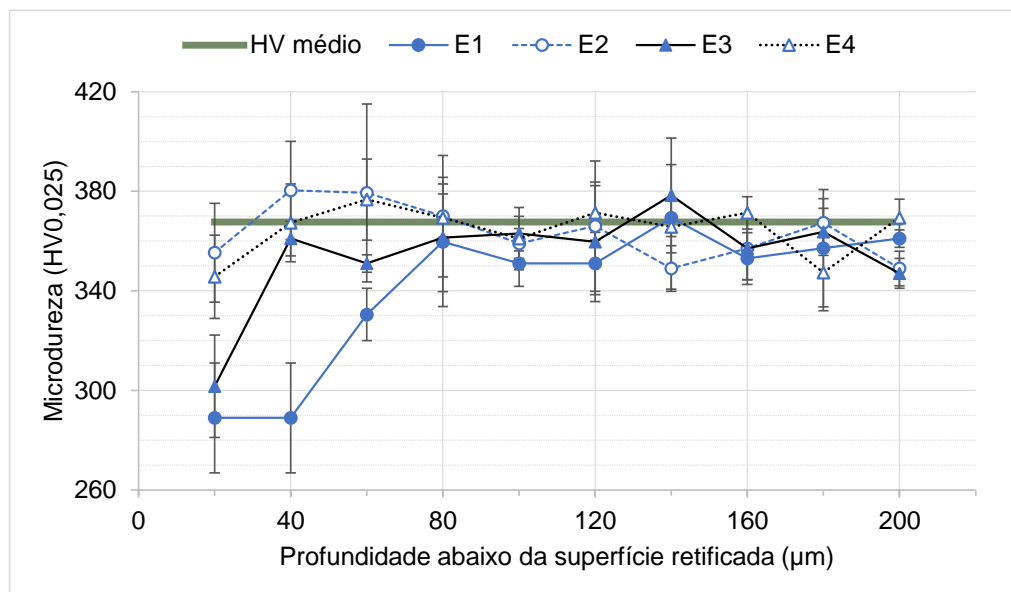


Figura 4.21 - Microdureza medida a partir da superfície retificada para os ensaios realizados com jorro

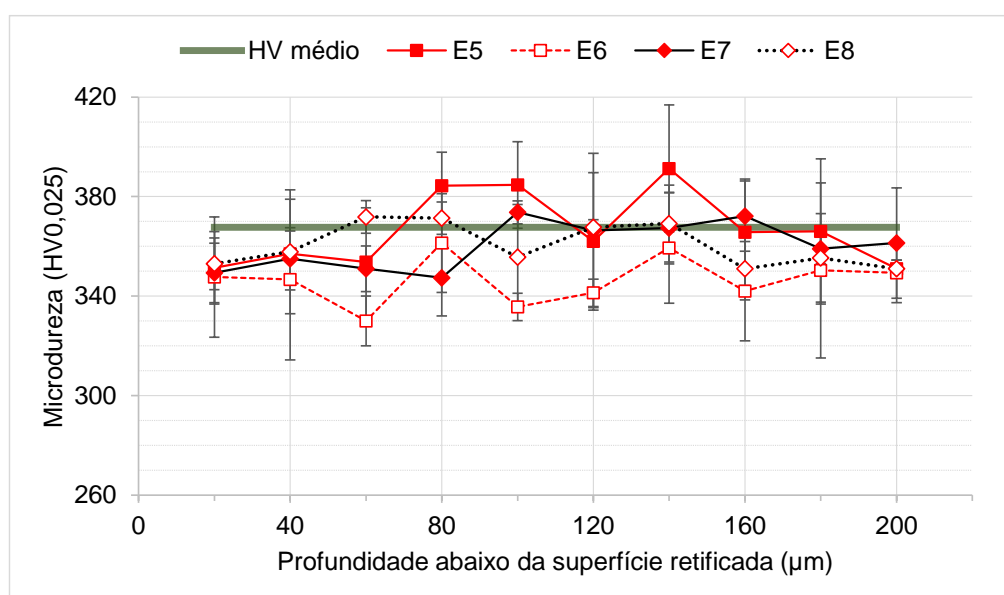


Figura 4.22 - Microdureza medida a partir da superfície retificada para os ensaios realizados com uso da técnica MQL

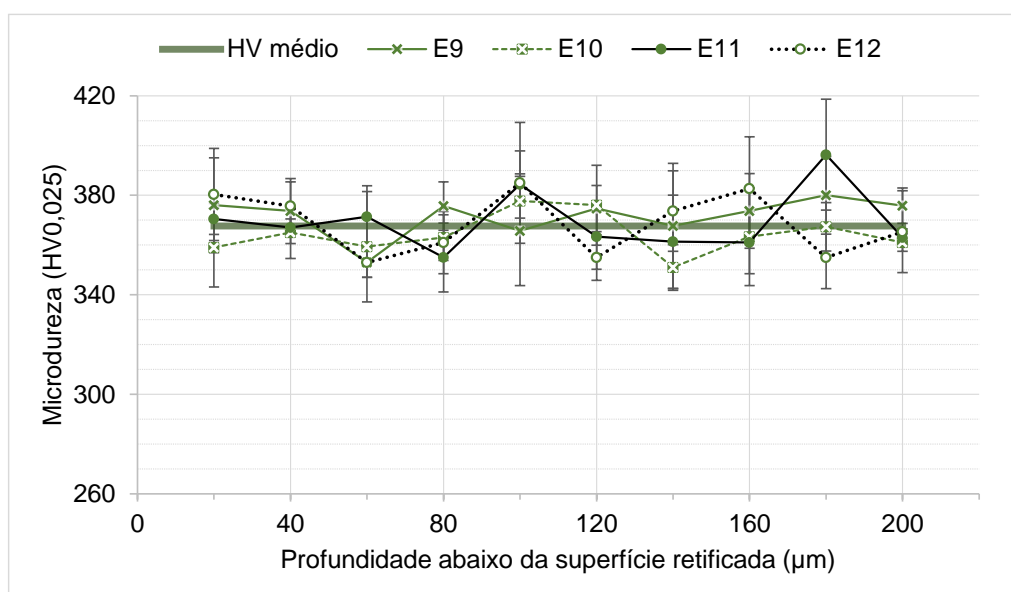


Figura 4.23 - Microdureza medida a partir da superfície retificada para os ensaios realizados com uso de técnica MQL com adição de partículas de grafeno

Observa-se que, na maioria dos ensaios, não houve região afetada pelo calor nas amostras de Ti-6Al-4V, com exceção dos ensaios E1 (10J2) e E3 (20J2), em que se observam quedas de dureza próximos à superfície de até 80 e 40 μm de profundidade, respectivamente, bem como observado por Sadeghi et al. (2009) para a operação de jorro, em que foi observada a maior queda de microdureza dentre as condições testadas. Sadeghi et al. (2009) observaram ainda que os valores de microdureza obtidos próximos à superfície

para os processos utilizando aplicação de fluido pela técnica MQL tiveram menor queda, como pode ser observado na Fig 4.24.

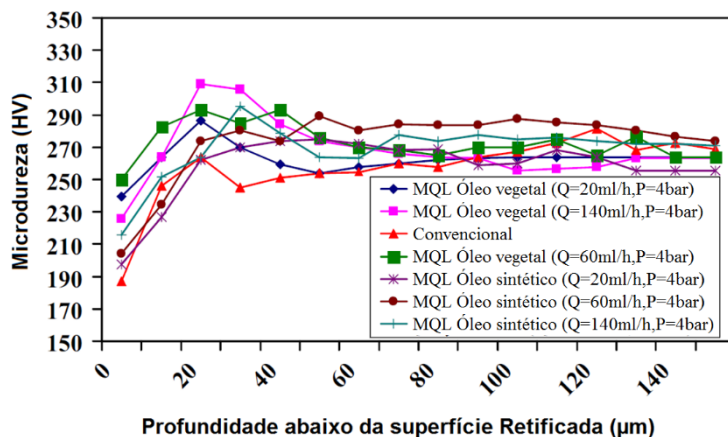


Figura 4.24 - Microdureza (HV0,01) obtida para retificação de Ti-6Al-4V para diferentes técnicas de aplicação e fluidos de corte ($a_e = 5 \mu\text{m}$, $v_s = 15 \text{ m/s}$) (adaptado de SADEGHI et al., 2009)

Contudo, as medições realizadas por Sadeghi et al. (2009) partiram de uma profundidade igual a $5 \mu\text{m}$, o que não foi possível de ser efetuado nesse trabalho pois a carga adotada para os testes aqui foi cerca de 2,5 vezes maior que a utilizada no trabalho deles. Isso ocorreu pois, durante testes preliminares, ao se tentar fazer leituras com a escala HV0,01 (100 mg) a indentação não se apresentava de forma “legível” no equipamento, podendo comprometer a veracidade dos resultados. Seria necessário realizar as medições com um nanodurometro, equipamento não existente nos laboratórios da UFU. Enfim, se comparadas às microdurezas obtidas por Sadeghi et al. (2009) a partir da profundidade $20 \mu\text{m}$, observa-se que há semelhança nos comportamentos. O que há de se levar em consideração são os parâmetros utilizados, pois eles utilizaram penetração menos agressiva ($5 \mu\text{m}$) e v_s muito menor (15 m/s se comparados aos 32 m/s utilizados aqui), ou seja, se houve concordância entre os resultados deve-se à boa atuação das técnicas empregadas nesse trabalho.

Observa-se ainda dos gráficos de microdureza que os valores obtidos para as condições de MQL+G se mantiveram menos dispersas e mais próximas das leituras para a média do núcleo de material não afetado, se comparado às técnicas de jorro e MQL comum, provando novamente que há benefícios na utilização de partículas de grafeno no fluido de retificação utilizado.

4.5 Potência elétrica

Os valores obtidos nas medições de potência elétrica ativa do motor do eixo-árvore da máquina-ferramenta utilizada estão expostos na Tab. 4.2, e graficamente na Fig. 4.25.

Tabela 4.2 - Valores médios de potência elétrica ativa

Técnica de aplicação de fluido de corte	a_e (μm)	Potência (kW)	Desvio Padrão (kW)
Em vazio (sem carga)		1,20	0,00
Jorro	10	1,33	0,02
	20	1,46	0,05
MQL	10	1,29	0,04
	20	1,44	0,04
MQLG	10	1,33	0,10
	20	1,34	0,04

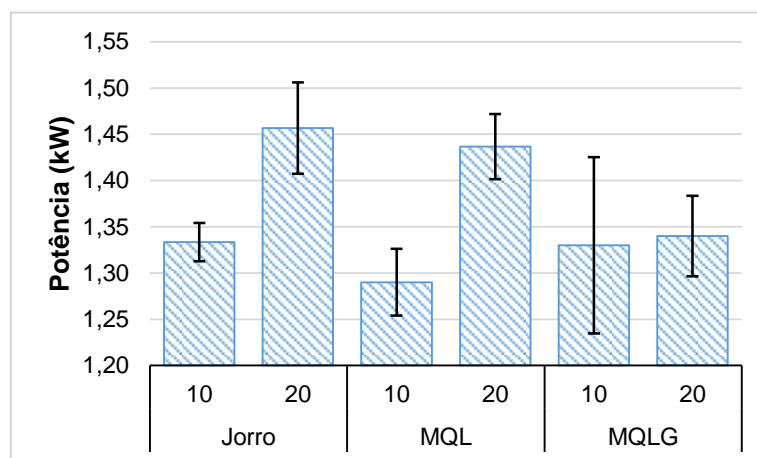


Figura 4.25 - Potência ativa consumida no rebolo nas condições de penetração de trabalho e técnica de lubrificação aplicada ($v_w = 2,7$ m/min, a_p = largura da peça).

Da Tabela 4.2 e Figura 4.25 pode-se observar que os valores de potência elétrica apresentaram comportamento esperado, uma vez que ao se aumentar os esforços, através do aumento da penetração de trabalho, espera-se que o consumo de energia (potência) pelo motor também se eleve. Observa-se que o gráfico da Fig. 4.25 se inicia na leitura de 1,20 kW, que foi a leitura obtida para o acionamento do rebolo sem outra carga atuante, para que então se pudesse se analisar o que foi consumido a mais de potência, referido a partir daqui como consumo líquido (CL). Enfim, o consumo a mais de potência, CL, para o ensaio com jorro, ao passar de 10 para 20 μm de a_e , quase dobrou (foi 96 % superior), ou

em termos absolutos, sofreu aumento de 9 %. Quando os ensaios foram realizados com a técnica MQL o aumento foi maior, com 163 % CL ou 11 % absolutos. Após os ensaios com o MQL+G, 8 % CL e 1 % absolutos. Para esse último caso, deve se dar atenção à barra de dispersão do ensaio realizado com a_e igual a 10 μm , o que faz dessa leitura inconclusiva. Entretanto, para as leituras feitas para o ensaio com a_e igual a 20 μm pode-se observar um grande benefício da técnica MQL+G ao reduzir a solicitação de potência do motor em 45 e 41 % CL (8 e 7 % absolutos) em comparação aos processos com jorro e MQL comum, respectivamente. Ou seja, o procedimento de retificação com uso de técnica MQL, ao utilizar fluido com partículas de grafeno dispersas, pode se alcançar benefícios relacionados também à redução de forças de corte que podem estar associados ao comportamento de lubrificação limite que as partículas de grafeno podem apresentar.

CAPÍTULO V

Conclusões

A partir dos resultados obtidos neste trabalho sobre retificação de liga de titânio Ti-6Al-4V ao utilizar fluido emulsionável sintético de base vegetal com adição de partículas de grafeno e diferentes penetrações de trabalho (a_e), as seguintes conclusões podem ser retiradas:

- Os valores de rugosidade R_a obtidos para a liga Ti-6Al-4V após de retificação plana foram compatíveis com os valores relatados na literatura para o processo de retificação de semi-acabamento e eles permaneceram abaixo de $1,2\text{ }\mu\text{m}$;
- Os ensaios com medição de rugosidade após cada passe demonstraram que o maior valor para o acabamento superficial encontra-se, na maioria dos casos, no primeiro passe, exibindo queda de até 32 % para o valor do segundo passe, a exceção foi para a condição E2 (jorro, $10\text{ }\mu\text{m}$, 3 passes, R_a) em que o segundo passe teve valor médio minimamente superior ao primeiro;
- Pouca variação foi observada no acabamento das peças ao empregar a estratégia de retificar com 2 ou 3 passes tanto pela técnica MQL ou MQL+G. Já para a técnica de jorro, observou-se leve tendência de queda no valor médio de rugosidade para a condição E4 ($20\text{ }\mu\text{m}$, 3 passes, R_a e R_z);
- Ao retificar com o menor valor de a_e ($10\text{ }\mu\text{m}$) os valores de rugosidade para a técnica MQL+G se mostraram inferiores aos obtidos após usinagem com a técnica MQL, e os valores obtidos para esta última foram, por sua vez, inferiores àqueles obtidos após a usinagem com a técnica jorro. Para o maior valor de a_e ($20\text{ }\mu\text{m}$), esse comportamento se inverte, com valores mais baixos na utilização da técnica de jorro, seguido dos valores obtidos para MQL+G e MQL;
- As imagens de microscopia eletrônica mostraram que nas superfícies das amostras houve ocorrência de regiões com deformação plástica, onde a penetração de maior valor ($20\text{ }\mu\text{m}$) gerou superfícies com marcas mais

acentuadas devido ao maior volume de material retirado por passe na retificação;

- Não foram identificadas queimas das peças de aspecto visual em nenhum dos ensaios e réplicas realizados;
- Devido à afinidade química entre o material do rebolo e a liga Ti-6Al-4V e também pela baixa condutividade térmica, microtrincas foram identificadas na superfície de uma das amostras (ensaio E7 – 20M2);
- Foi observada a presença de grãos embutidos na superfície das amostras de titânio em geral, que podem ser atribuídos aos efeitos de adesão entre material da peça e abrasivo e possível elevação das forças para as condições testadas, atendendo a expectativas citadas na literatura;
- Quanto as imagens da superfície do rebolo nenhuma conclusão pode ser tirada devido à dificuldade de identificação dos elementos na imagem;
- Com exceção dos ensaios E1 (10J2) e E3 (20J2), não foi identificada região afetada segundo os resultados de microdureza abaixo da superfície. Para esses dois, houve queda do valor de dureza próximo à superfície, concordando com resultados encontrados na literatura para condições mais brandas de retificação;
- Para os ensaios com técnica MQL+G, os valores de microdureza revelaram-se menos dispersos que para as outras duas técnicas empregadas;
- O uso de partículas de grafeno no fluido de retificação exerceu pouca influência na potência elétrica consumida para o menor valor de a_e (10 μm). Contudo, para o maior valor (20 μm), observou-se redução de cerca de 8 e 7 % nesse consumo em comparação aos processos com jorro e MQL comum, respectivamente.

5.1 Sugestões de trabalhos futuros

A partir dos resultados encontrados durante a realização desse trabalho são sugestões para trabalhos futuros:

- Realizar ensaios de retificação da liga Ti-6Al-4V com a técnica MQL com adição de outros lubrificantes sólidos, como o grafite e o bissulfeto de molibdênio;
- Investigar a aplicação de fluido integral via técnica MQL em vez de fluido diluído com água;
- Investigar a influência do tempo de spark-out (centelhamento) na retificação plana tangencial da liga Ti-6Al-4V.

Referências Bibliográficas

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

ASM METALS HANDBOOK. **Machining**, 10th Edition, Volume 16, ASM International, USA, 2004.

BERANOAGIRRE, A.; LACALLE, L. N. L. Grinding of Gamma TiAl Intermetallic Alloys. The Manufacturing Engineering Society International Conference. MESIC 2013, **Procedia Engineering** 63, p. 489-498, 2013.

BIANCHI, E. C.; MONICI, R. D.; SILVA, E. J.; AGUIAR, P. R; VALARELLI, I. D. Análise do Comportamento da Microestrutura de Materiais endurecidos retificados com rebolos de CBN. **Material Research**, Vol. 3, nº 4, 2000.

BOSTON, O. W.; CADDELL R. M.; COLWELL L. V.; MCKEE R. E.; PACKER, K. F.; VISSER, P. R., **Machining titanium**, Final Rep., Production Engineering Department, University of Michigan, U.S. Army Contract 20-018ORD-11918. 1955.

BRINKSMEIR, E.; HEINZEL, C.; WITTMAN, M. Friction, cooling and lubrication in grinding. **Annals of the CIRP**. Vol. 48, p. 581–598, 1999.

BROOKS, C. R. **Heat Treatment, Structure and properties of Nonferrous Alloys**. ASM International, Metals Park, Ohio. 1982.

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

CANTER, N. The Possibilities and Limitations of Dry Machining. **Tribology and Lubrication Technology**, p. 40-44, 2009.

CHU, B.; SINGH, E.; KORATKAR, N.; SAMUEL, J. Graphene-enhanced environmentally-benign cutting fluids for high performance micro-machining applications. **Journal of Nanoscience and Nanotechnology**, Vol. 13, p. 5500-5504, 2013.

DA SILVA, R. B. **Desempenho de diferentes Materiais de Ferramentas de Corte no Torneamento de Acabamento da liga de titânio Ti-6Al-4V com a Tecnologia de Aplicação de Fluido de Corte à Alta Pressão**, 2006. 299 p. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.

DA SILVA, R. B.; MACHADO, A. R.; EZUGWU, E.O.; BONNEY, J. Fluido de corte aplicado à alta pressão é a solução para usinagem de liga de titânio em HSM. **Usinagem 2004** - Feira e Congresso. São Paulo-SP. 11 p. 2004.

DE MELLO, A. V.; DA SILVA, R. B.; GUIMARÃES, C.; HASSUI, A.; DE FREITAS, F. M. C. Avaliação do Acabamento e Microdureza de liga de Titânio Ti-6Al-4V após a Retificação Plana Tangencial. In: **8º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, Salvador, 10 p., 2015.

DE MELLO, A. V.; SILVA, G. H.; **Estudo da repetibilidade e da reprodutibilidade do processo de afiação de bits de HSS**. 2013. 99p. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

DIN 51 385. 1981. Kühlschmierstoff - Begriffe. Berlin, Beuth;

EZUGWU, E. G.; WANG, Z. M. Titanium alloys and their machinability - a review. **Journal of Materials Processing Technology**, Volume 68, pp. 262-274. 1997.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**, Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo - SP, 1969.

GEIM, A. K.; NOVOSELOV, K. S. THE RISE OF GRAPHENE. **Nature Materials**, vol. 6, p. 183 - 191. 2007.

GRAPHENE Supermarket, Imagens via MEV dos lubrificantes sólidos: grafite, nanotubos de carbon e bissulfeto de molibdênio, **Web site**, 2009-2015. Disponível em: <<https://graphene-supermarket.com>>, Acesso em Julho de 2015.

HOOD, R.; LECHNER, F.; ASPINWALL, D.K.; VOICE, W. Creep feed grinding of gamma titanium aluminide and burn resistant titanium alloys using SiC abrasive. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, vol. 47, p. 1486–1492, 2007.

IMOA - International Molybdenum Association. Molybdenum-Sulfur Compounds in Lubrication, **Web Site**, 2008. Disponível em: <<http://www.imoa.info/molybdenum-uses/molybdenum-chemistry-uses/lubricants.php>>. Acesso em Julho de 2015.

JACKSON M. J.; DAVIM J. P. **Machining with Abrasives**. Ed. Springer, New York, 2011.

JOHNSON, G. A. Beneficial compressive residual stress resulting from CBN grinding. In: **SME Second International Grinding Conference**, p. 12. 1990.

JÚNIOR, J. F. **Estudo fenomenológico do processo de retificação creep-feed**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Carlos, 1992.

KLOCKE, F. **Manufacturing Processes 2 – Grinding, Honing, Lapping**. RWTH edition, ed. Springer, Verlag Berlin Heidelberg, 2009.

KOMANDURI, R. Some clarifications on the mechanics of chip formation when machining titanium alloys. **Wear**, p. 15-34, 1981.

KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren Band 2**. Schleifen, Honen, Läppen. 3. Auflage, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf. 1996.

KOPAC, J. & KRAJNIK, P., 2006. High-performance grinding - A review. **Journal of Materials Processing Technology**, Volume 175, pp. 278-284.

LEE, E.-S.; KIM, J.-D.; KIM, N.-H. Plunge grinding characteristics using the current signal of spindle motor. **Journal of Materials Processing Technology**. Publicado por Elsevier Science B.V., 2002.

LI, X.; CHEN, Z.; CHEN, W. Suppression of Surface Burn in Grinding of Titanium Alloy TC4 Using a Self-inhaling Internal Cooling Wheel. **Chinese Journal of Aeronautics**. Vol. 24, p. 96-101, 2011.

LIU, J.; WANG, F.; ZHANG, L.; FANG, X. ZHANG, Z. Thermodynamic properties and thermal stability of ionic liquid-based nanofluids containing graphene as advanced heat transfer fluids for medium-to-high-temperature applications. **Renewable energy**. Vol. 63, p. 519-523, 2014.

MACHADO, A.R.; ABRÃO, A.M.; COELHO, R. T.; DA SILVA, M. B. **Teoria da usinagem dos Materiais**. 2ª. ed., São Paulo, Editora Edgard Blücher Ltda., 2011.

MALKIN, S.; GUO, C. **Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives**, 2nd Edition, Industrial Press Inc., New York, 2008.

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

MARINESCU, I.D., ROWE, W.B., DIMITROV, B., INASAKI, I. **Tribology of abrasive machining processes**. 1ed. Norwich, William Andrew Inc., 2004.

MOURA, R. R.; DA SILVA, M. B.; MACHADO, Á. R.; SALES, W. F. The effect of application of cutting fluid with solid lubricant in suspension during cutting of Ti-6Al-4V alloy. **Wear**, vol. 332-333, p. 762-771. 2015.

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

NIEN, Y.-H. **Carbon Nanotubes - Polymer Nanocomposites: Chapter 18 - The Application of Carbon Nanotube to Bone Cement**. InTech, 13 p., 2011. ISBN: 978-953-307-498-6, DOI: 10.5772/17259. Disponível em: <<http://www.intechopen.com/books/carbon-nanotubes-polymer-nanocomposites/the-application-of-carbon-nanotube-to-bone-cement>>, Acesso em Julho de 2015.

NUSSBAUM, G. C. **Rebolos & abrasivos - Tecnologia básica**. São Paulo: Ícone Editora, 1988.

OLOFOSON, C. T.; BOULGER, F. W.; GURKLIS, J. A. **Machining and Grinding of Titanium and its alloys**. *NASA Technical Memorandum* (NASA TM X-53312). George C. Marshall Space Flight Center, Huntsville, Alabama. 1965.

PUSAVEC, F.; DESHPANDE, A., YANG, S.; M'SAOUBI, R.; KOPAC, J.; DILLON JR., O. W.; JAWAHIR, I.S. Sustainable machining of high temperature Nickel alloy – Inconel 718: part 1 – predictive performance models. **Journal of Cleaner Production**, v. 81, p. 255-269. 2014.

SADEGHI, M. H.; HADAD, M. J.; TAWAKOLI, T.; EMAMI, M. Minimal quantity lubrication-MQL in grinding of Ti-6Al-4V titanium alloy. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 44, p. 487-500, 2009.

SAMUEL, J.; RAFIEE, J.; DHIMAN, P.; YU, Z.-Z.; KORATKAR, N. Graphene Colloidal Suspensions as High Performance Semi-Synthetic Metal-Working Fluids. **The Journal of Physical Chemistry C**, ACS Publications, vol. 115, p. 3410–3415, 2011.

SETTI, D.; SINHA, M. K.; GHOSH, S.; RAO, P.V. Performance evaluation of Ti–6Al–4V grinding using chip formation and coefficient of friction under the influence of nanofluids. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, vol. 88, p. 237-248, 2015.

SILVA, L. R.; BIANCHI, E. C.; CATAI, R. E.; FUSSE, R. Y.; FRANÇA, T. V.; AGUIAR, P. R. Study on the behavior of the minimum quantity lubricant-MQL technique under different lubrication and cooling conditions when grinding ABNT 4340 steel. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering** XXVII, p. 192-199. 2005.

TANG, J. S., PU, X. F., XU, H. J., ZHANG, Y. Z. Studies on Mechanisms and Improvement of Workpiece Burn During Grinding of Titanium Alloys. In **CIRP Annals**, Nanjing Aeronautical Institute/People's Republic of China, p. 353-356. 1990.

TEICHER, E.; GHOSH, A.; CHATTOPADHYA, A. B.; KÜNANZ, K. On the grindability of Titanium alloy by brazed type monolayered superabrasive grinding wheels. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, vol. 46, p. 620–622, 2006.

THORTON, P. A.; COLANGELO, V. J. **Fundamentals of Engineering Materials**. Prentice Hall. 1985.

US RESEARCH Nanomaterials Inc. Imagem via MEV de placas de grafeno, **Web site**, [20--]. Disponível em: <<http://www.us-nano.com/inc/sdetail/3767>>. Acesso em Julho de 2015.

WÓJCIK, R. The Effect of Grinding in Titanium Alloy Deformation. **Mechanics and Mechanical Engineering**, vol. 17, No. 4, p. 309–315, 2013.

ZARBIN, A. J. G.; OLIVEIRA, M. M. Nanoestruturas De Carbono (Nanotubos, Grafeno): Quo Vadis?, **Química Nova**, vol. 36, No. 10, p. 1533-1539, 2013.