

RODRIGO DE SOUZA RUZZI

**RETIFICABILIDADE DAS LIGAS DE NÍQUEL
INCONEL 625 E INCONEL 718**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
2019

RODRIGO DE SOUZA RUZZI

RETIFICABILIDADE DAS LIGAS DE NÍQUEL INCONEL 625 E INCONEL 718

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

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Rosemar Batista da Silva

UBERLÂNDIA – MG

2019

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

R987 Ruzzi, Rodrigo de Souza, 1991-
2019 Retificabilidade das ligas de níquel Inconel 625 e Inconel 718
[recurso eletrônico] / Rodrigo de Souza Ruzzi. - 2019.

Orientador: Rosemar Batista da Silva.
Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-
graduação em Engenharia Mecânica.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.te.2019.2242>
Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica. I. da Silva, Rosemar Batista, 1974-,
(Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação
em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Mecânica				
Defesa de:	Tese, nº 276, COPEM				
Data:	vinte e dois de agosto de dois mil e dezenove	Hora de início:	10:10	Hora de encerramento:	15:10
Matrícula do Discente:	11713EMC004				
Nome do Discente:	Rodrigo de Souza Ruzzi				
Título do Trabalho:	Retificabilidade das ligas de níquel Inconel 625 e Inconel 718				
Área de concentração:	Materiais e Processos de Fabricação				
Linha de pesquisa:	Processos de Fabricação (Usinagem e Soldagem)				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Monitoramento da Integridade de peças retificadas por meio da técnica da impedância eletromecânica - Projeto Edital CNPq Universal 2018 Processo: 426018/2018-4				

Reuniu-se no Anfiteatro E do Bloco 50, Campus Santa Mônica, da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Professores Doutores: Álisson Rocha Machado - FEMEC/UFU; Ruham Pablo Reis - FEMEC/UFU; Alexandre Mendes Abrão - DEMEC/UFMG; Lincoln Cardoso Brandão - DEMEC/UFRJ; Rosemar Batista da Silva - FEMEC/UFU, orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Dr. Rosemar Batista da Silva, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(as) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Rosemar Batista da Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 22/08/2019, às 15:14, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ruham Pablo Reisr, Professor(a) do Magistério Superior**, em 22/08/2019, às 15:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Álisson Rocha Machado, Professor(a) do Magistério Superior**, em 22/08/2019, às 15:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Lincoln Cardoso Brandão, Usuário Externo**, em 22/08/2019, às 15:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Mendes Abrão, Usuário Externo**, em 22/08/2019, às 15:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador 1471638 e o código CRC 9746CC06.

À minha noiva Fernanda pelo apoio e compreensão.

À minha família, especialmente aos meus pais José Renato e Rosemary e meus irmãos Gabriel e Otávio.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por todas as bênçãos que me proporcionou ao longo de toda minha vida e por me guiar dando força, saúde e disposição para que eu pudesse concluir este trabalho.

Aos meus pais José Renato e Rosemary por todo esforço para me colocar nesta posição, por todos os ensinamentos e pelo incondicional apoio em todas fases da minha vida.

Aos meus irmãos Gabriel de S. Ruzzi e Otávio de S. Ruzzi, por todo o apoio dado; vocês são especiais.

À minha noiva Fernanda Parpinelli por estar sempre ao meu lado ao longo desta jornada, pelo apoio, paciência, compreensão e incentivo.

Ao meu Orientador Prof. Dr. Rosemar Batista da Silva, pelo auxílio, ajuda e confiança desde o início deste trabalho. Eu expresso minha total gratidão a ele e apreço, não somente aos conhecimentos compartilhados, mas pelos conselhos e pela amizade construída.

Ao Prof. Dr. Alisson Rocha Machado, por todo o apoio e conhecimento passado em momentos de dúvida.

À Universidade Federal de Uberlândia, UFU, pelos recursos disponibilizados, por acreditar e se preocupar com a educação dos alunos, como também pela oportunidade que me foi dada.

À Pontifícia Universidade Católica do Paraná, PUCPR, nas pessoas do Prof. Dr. Fred Lacerda Amorim e do Técnico Rogério Ferreira da Silva, pelo auxílio no preparo das amostras.

Aos membros do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) e do Laboratório de Usinagem Convencional (LUC), agradeço a amizade, apoio e contribuição ao longo do desenvolvimento do trabalho.

Ao Prof. Me. Raphael Lima de Paiva (UFPI), por toda a ajuda e suporte ao longo do desenvolvimento deste trabalho, pelos conselhos e pela amizade.

Ao doutorando Me. Leonardo Rosa Ribeiro da Silva, pela ajuda com as caracterizações das amostras.

Aos professores Dr. Washington Martins da Silva Junior e Dr. Márcio Bacci da Silva, por todo o apoio ao desenvolvimento deste trabalho, sempre se mostrando prestativos e disponíveis em todas as solicitações de auxílio.

Ao Prof. Dr. Énio Pedone Bandarra Filho e à Pós-doutoranda Letícia Raquel de Oliveira por todo suporte e auxílio na caracterização do fluido de corte utilizado para a realização dos ensaios.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pela bolsa de Doutorado concedida (processo 141472/2017-0) que foi fundamental para realização deste trabalho.

Aos coordenadores e técnicos dos Laboratório de Ensino de Materiais (LEMat) e Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM), ambos da UFU, por disponibilizarem os equipamentos para a análise metalográfica.

Ao Laboratório Multiusuários do Instituto de Química (LMIQ) da UFU e ao técnico Flaysner Magayver Portela pelas análises de MEV e EDS realizadas.

À Villares Metals S.A, nas pessoas de Jefferson Duarte Silva e Eduardo Souza, pela doação dos materiais utilizados nos testes.

À empresa Saint-Gobain Abrasivos da América do Sul, nas pessoas de Fábio Martinho Cézar de Freitas e Marcelo Yuiti Sasaki, pelo fornecimento dos rebolos e dressadores utilizados neste trabalho.

À empresa Blaser Swisslube, na pessoa dos Srs. Marcelo Kuroda e Claus Hirschmann, por gentilmente terem doado os fluidos de corte.

Por fim, a todos que contribuíram de maneira direta ou indireta, meu muito obrigado.

RUZZI, R. de S. Retificabilidade das ligas de níquel Inconel 625 e Inconel 718. 2019. 160f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.te.2019.2242>

Resumo

As ligas à base de níquel são consideradas como materiais difíceis de usinar, dificuldade que é ainda mais agravada quando elas são submetidas ao processo de retificação, exigindo assim mais atenção para determinar parâmetros de usinagem corretos. Dentre as ligas a base de níquel, a mais empregada é o Inconel 718, contudo, o Inconel 625 também tem se destacado pelas suas propriedades peculiares como a elevada resistência a corrosões aquosas e quentes, alta resistência mecânica e resistência à fluência. Neste sentido, este trabalho buscou avaliar o comportamento desta liga durante o processo de retificação e avaliar a sua retificabilidade em relação ao Inconel 718. Para isso foram testados vários parâmetros operacionais. Os ensaios foram realizados em duas etapas. Na primeira etapa foi avaliado o efeito dos principais parâmetros de entrada (penetração de trabalho – a_e , velocidade da peça – v_w , velocidade de corte – v_s , granulometria do rebolo e sentido de retificação) no processo de retificação do Inconel 625 com base na rugosidade (R_a e R_z), forças de corte e energia específica a fim de determinar os parâmetros estatisticamente significativos e então realizar os ensaios para a avaliação da retificabilidade do Inconel 625 (segunda etapa). Nesta etapa foram variados o a_e , v_w , v_s e a granulometria do rebolo na retificação do Inconel 625 e do Inconel 718. Os parâmetros de saída avaliados foram a rugosidade (R_a e R_z), imagens da superfície retificada obtidas via microscopia eletrônica de varredura (MEV), microdureza na superfície e abaixo dela, forças de retificação, energia específica e temperatura na zona de retificação. Em geral, os resultados indicaram que o Inconel 625 apresenta maiores dificuldades para ser retificado que o Inconel 718. As rugosidades (R_a e R_z) obtidas para as peças de Inconel 625 foram maiores que as obtidas para o Inconel 718, em todas as condições analisadas. Sob velocidade de corte mais elevada, houve uma maior presença de deformações plásticas nas superfícies do Inconel 625, que levou ao encruamento da mesma, elevando a microdureza. As forças de corte, assim como a energia específica foram ligeiramente maiores para o Inconel 718, enquanto a temperatura na zona de retificação foi maior para o Inconel 625 quando comparado ao Inconel 718.

Palavras Chave: Retificabilidade, Inconel 625, Inconel 718, Temperatura de retificação, Integridade da superfície.

RUZZI, R. de S. **Grindability of nickel alloys Inconel 625 and Inconel 718.** 2019. 160 f. PhD Thesis, Federal University of Uberlândia, Uberlândia. Available in: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.te.2019.2242>

Abstract

Nickel-based superalloys are classified as difficult-to-cut materials. This difficulty becomes worse when these materials are processed by grinding, thus requiring more attention in the selection of proper grinding parameters. Among the nickel-based superalloys, the Inconel 718 is the most used alloy, however, the Inconel 625 alloy is also important because of its peculiar properties such as resistance to aqueous and hot corruptions, high strength and resistance to creep. In this sense and motivated by the lack of information about grinding of Inconel 625 alloy, this work evaluates the grindability of this superalloy and compares to the Inconel 718, in several operational conditions. The tests were divided in two stages. In the first stage, the effect of the main input parameters (depth of cut – a_e , workspeed – v_w , cutting speed – v_s , grinding wheel mesh and grinding direction) was evaluated for the Inconel 625 based on surface roughness (R_a and R_z), grinding forces and specific energy in order to determine the statistically significant parameters and then use them for the tests for the evaluation of the grindability of the Inconel 625 and Inconel 718 (second stage). In this stage the a_e , v_w , v_s and grinding wheel mesh were varied. The output parameters used to assess the grindability were the surface roughness (R_a and R_z), images of the ground surfaces obtained by scanning electron microscopy (SEM), microhardness on the surface and below it, grinding forces, specific energy and temperature in the grinding zone. In general, the results showed that the Inconel 625 is harder to grind than the Inconel 718. The surface roughness (R_a and R_z) obtained for Inconel 625 workpieces were higher than those obtained for Inconel 718 for all analyzed conditions. With the higher cutting speed, SEM images indicated a greater presence of plastic deformations on the Inconel 625 surfaces, which led to its work hardening, increasing the microhardness. Grinding forces and specific energy were slightly higher for Inconel 718, while the temperature in the grinding zone was higher for Inconel 625 when compared to Inconel 718.

Keywords: Grindability, Inconel 625, Inconel 718, Grinding temperature, Surface integrity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Principais materiais de alguns componentes de um motor do tipo turbo fan (adaptado de CASAGRANDE JÚNIOR, 2015).	27
Figura 2.2 – Algumas Propriedades do Inconel 625 recozido (a) e do Inconel 718 endurecido por precipitação (b) em função da temperatura de operação (adaptado de SPECIAL METALS, 2008).	28
Figura 2.3 – Variação do ângulo de saída no processo de retificação (BLACK; KOHSER, 2012).	31
Figura 2.4 – Diferenças entre arestas com geometria definida e arestas com geometria indefinida com detalhe para o ângulo de saída (adaptado de NEUGEBAUER et al., 2011).	31
Figura 2.5 – Ilustração das fases da formação do cavaco na retificação (adaptado de KLOCKE, 2009).	32
Figura 2.6 – Classificação das interações físicas entre partículas abrasivas e a superfície da peça (adaptado de ZUM GAHR, 1987).	33
Figura 2.7 – Esquema de distribuição e posicionamento de arestas de corte na superfície de corte do rebolo em relação a superfície sendo retificada (adaptado de KLOCKE, 2009).	34
Figura 2.8 – Esquema dos processos de retificação plana: a) periférica longitudinal, b) tangencial de passagem e c) frontal (adaptado de KLOCKE, 2009).	35
Figura 2.9 – Trajetória dos grãos abrasivos no rebolo durante a retificação: a) sentido concordante, b) sentido discordante (adaptado de KLOCKE, 2009).	39
Figura 2.10 – Exemplos de dressadores (adaptado de JACKSON; DAVIM, 2011).	43
Figura 2.11 – Procedimento e parâmetros de dressagem: (a) Adaptado de Jackson e Davim (2011), (b) e (c) adaptado de Saint-Gobain (2015).	44
Figura 2.12 – Classificação dos fluidos de corte aplicados em retificação (adaptado de DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).	46
Figura 2.13 – Percentual do número total de participantes que utilizam cada parâmetro de rugosidade a) geral e b) por setor individual (adaptado de TODHUNTER et al., 2017).	52
Figura 2.14 – Ilustração das componentes da força no processo de retificação plana tangencial (adaptado de MALKIN; GUO, 2008).	55
Figura 2.15 – a) Metodologia do arco entre o rebolo e a peça apresentado por Kuriyagawa et al. (2003) e b) Temperatura de retificação em função da taxa de remoção de material específica durante a retificação do Inconel 718 (CHEN et al., 2015).	59
Figura 2.16 – Imagem de MEV da superfície de Inconel 718 após a retificação com rebolo de cBN utilizando $v_s = 160$ m/s, $v_w = 200$ mm/min e $a_e = 0,050$ mm (ZHONG; RAMESH; YEO, 2001).	63

Figura 2.17 – Resultados apresentados no trabalho de Yao et al. (2013), a) Tensão residual em função da distância da superfície; b) Microdureza abaixo da superfície; c) Forças de retificação em função da penetração de trabalho e d) Temperatura em função da penetração de trabalho.	64
Figura 2.18 – Valores de rugosidade obtidas no Inconel 600 obtidos após a retificação com diferentes condições de lubri-refrigeração (MANDAL et al., 2014).	65
Figura 2.19 – Imagem de microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície de liga de níquel (GH4169) retificada com $a_e = 0,04$ mm (ZENG et al., 2015).	65
Figura 2.20 – Imagens de microscópio óptico das superfícies de Inconel 718 após a retificação com rebolo de SiC. a) Superfície com queima e b) Superfície sem queima (SINHA et al., 2016).	66
Figura 2.21 – Analise EDX das superfícies de Inconel 718 após a retificação com rebolo de SiC: a) sem queima e b) com queima (SINHA et al., 2016).	67
Figura 2.22 – Valores de rugosidade do Inconel 718 pós a retificação com $a_e = 0,015$ mm em diferentes condições de corte, com e sem a presença de queima (SINHA et al., 2016).	67
Figura 2.23 – Rugosidade Ra do Inconel 718 em função da concentração de nano partículas (ZHANG et al., 2016).	68
Figura 2.24 – Imagens de MEV das superfícies de Inconel 718 após a retificação com um único abrasivo de Al_2O_3 (SINHA; GHOSH; PARUCHURI, 2017).	70
Figura 2.25 – Imagens da superfície de corte do rebolo de alumina com evidência de empastamento após a retificação de Inconel 600 em diferentes condições operacionais (BISWAS et al., 2018).	71
Figura 3.1 – Organograma das etapas para o desenvolvimento deste trabalho.	73
Figura 3.2 – Microestrutura do Inconel 625 após ataque com <i>aqua regia</i> e observada em diferentes equipamentos: a) microscopia ótica da amostra atacada mostrando os grãos e contornos de grão, b) imagem de MEV (Elétron secundário) e c) mapa de análise de EDS identificando os principais elementos.	74
Figura 3.3 – Microestrutura do Inconel 718 após ataque com Kalling's N.2 e observada em diferentes equipamentos: a) microscopia ótica da amostra atacada mostrando os grãos e contornos de grão, b) imagem de MEV (Elétron secundário) e c) mapa de análise de EDS identificando os principais elementos.	75
Figura 3.4 – Máquina com o <i>setup</i> utilizado para a realização dos experimentos.	77
Figura 3.5 – Bocal otimizado para aplicação do fluido de corte (próprio autor).	79
Figura 3.6 – Dimensões de amostra de Inconel 625 e de Inconel 718 utilizada para os testes de retificação (dimensões em mm).	79

Figura 3.7 – Vista do topo do dressador do tipo fliese utilizado no preparo dos rebolos para os testes de retificação.	80
Figura 3.8 – Metodologia utilizada para a medição de microdureza: a) na superfície retificada; b) abaixo da superfície.	85
Figura 3.9 – <i>Setup</i> utilizado para a realização dos ensaios.	86
Figura 3.10 – Sistema utilizado para a aquisição dos dados de força.....	86
Figura 3.11 – Metodologia utilizada para a medição de temperatura.....	87
Figura 3.12 – Valores de temperatura medidos para a condição $a_e = 0,010$ mm, $v_w = 7500$ mm/min e $v_s = 20$ m/s.....	88
Figura 4.1 – Gráficos de efeitos principais dos parâmetros significativos para os parâmetros de rugosidade do Inconel 625: a) Ra e b) Rz.	92
Figura 4.2 – Gráfico da interação significativa para a rugosidade parâmetro Ra para o Inconel 625.....	94
Figura 4.3 – Imagens de MEV das superfícies de Inconel 625 retificadas com rebolos de SiC em diferentes condições de corte.	95
Figura 4.4 – Gráficos de efeitos principais dos parâmetros significativos para as forças de retificação: a) tangencial e b) normal.	98
Figura 4.5 – Gráfico da interação significativa para as forças tangencial (a) e normal (b) durante a retificação do Inconel 625 em diferentes condições de corte.	100
Figura 4.6 – Gráficos de efeitos principais para a energia específica durante a retificação do Inconel 625.....	102
Figura 4.7 – Gráficos das interações significativas para a energia específica durante a retificação do Inconel 625.	103
Figura 4.8 – Rugosidade das superfície de Inconel 625 e de Inconel 718 em função da penetração de trabalho após os ensaios de retificação: a) parâmetro Ra e b) parâmetro Rz.	105
Figura 4.9 – Rugosidade das superfície de Inconel 625 e de Inconel 718 em função da velocidade da peça após os ensaios de retificação: a) parâmetro Ra e b) parâmetro Rz... ..	106
Figura 4.10 – Rugosidade das superfície de Inconel 625 e de Inconel 718 em função da velocidade de corte após os ensaios de retificação: a) parâmetro Ra e b) parâmetro Rz. ..	108
Figura 4.11 – Rugosidade das superfície de Inconel 625 e de Inconel 718 em função da granulometria do rebolo após os ensaios de retificação: a) parâmetro Ra e b) parâmetro Rz.	110
Figura 4.12 – Imagens de MEV das superfícies do Inconel 625 e Inconel 718 retificadas em função da penetração de trabalho ($v_s = 30$ m/s; $v_w = 7500$ mm/min; #80).	113
Figura 4.13 – Imagens de MEV das superfícies de Inconel 625 e Inconel 718 retificadas em função da velocidade da peça ($a_e = 0,010$ mm; $v_s = 30$ m/s; #80).	114

Figura 4.14 – Imagens de MEV das superfícies de Inconel 625 e Inconel 718 retificadas em função da velocidade de corte ($a_e = 0,010$ mm; $v_w = 7500$ mm/min; #80).	115
Figura 4.15 – Imagens de MEV das superfícies de Inconel 625 e Inconel 718 retificadas em função da granulometria do rebolo ($a_e = 0,010$ mm; $v_s = 30$ m/s; $v_w = 7500$ mm/min). .	116
Figura 4.16 – Microdureza na superfície do Inconel 625 retificada em função da penetração de trabalho (a_e): a) Mapa de microdureza nas superfícies e b) valor médio para cada superfície.....	117
Figura 4.17 – Microdureza na superfície do Inconel 718 retificada em função da penetração de trabalho (a_e): a) Mapa de microdureza nas superfícies e b) valor médio para cada superfície.....	119
Figura 4.18 – Microdureza na superfície do Inconel 625 retificada em função da velocidade da peça (v_w): a) Mapa de microdureza nas superfícies e b) valor médio para cada superfície.....	120
Figura 4.19 – Microdureza na superfície do Inconel 718 retificada em função da velocidade da peça (v_w): a) Mapa de microdureza nas superfícies e b) valor médio para cada superfície.....	121
Figura 4.20 – Microdureza na superfície do Inconel 625 retificada em função da velocidade de corte (v_s): a) Mapa de microdureza nas superfícies e b) valor médio para cada superfície.....	122
Figura 4.21 – Microdureza na superfície do Inconel 718 retificada em função da velocidade de corte (v_s): a) Mapa de microdureza nas superfícies e b) valor médio para cada superfície.....	123
Figura 4.22 – Microdureza na superfície do Inconel 625 retificada em função da granulometria do rebolo: a) Mapa de microdureza nas superfícies e b) valor médio para cada superfície.....	124
Figura 4.23 – Microdureza na superfície do Inconel 718 retificada em função da granulometria do rebolo: a) Mapa de microdureza nas superfícies e b) valor médio para cada superfície.....	125
Figura 4.24 – Microdureza abaixo da superfície retificada para as três penetrações de trabalho testadas: a) Inconel 625 e b) Inconel 718 ($v_s = 30$ m/s; $v_w = 7500$ mm/min, #80). 127	
Figura 4.25 – Microdureza abaixo da superfície retificada para as três velocidades de corte testadas: a) Inconel 625 e b) Inconel 718 ($a_e = 0,010$ mm; $v_w = 7500$ mm/min, #80). 128	
Figura 4.26 – Forças de retificação (tangencial e normal) em função da penetração de trabalho (a_e) após a retificação das ligas Inconel 625 e Inconel 718 com rebolo de SiC. ...	130
Figura 4.27 – Forças de retificação (tangencial e normal) em função da velocidade da peça (v_w) após a retificação das ligas Inconel 625 e Inconel 718.	131

Figura 4.28 – Forças de retificação (tangencial e normal) em função da velocidade de corte (v_s) após a retificação das ligas Inconel 625 e Inconel 718.	132
Figura 4.29 – Forças de retificação (tangencial e normal) em função da granulometria do rebolo após a retificação das ligas Inconel 625 e Inconel 718.	134
Figura 4.30 – Energia específica de retificação do Inconel 625 e do Inconel 718 em função da penetração de trabalho.	136
Figura 4.31 – Energia específica de retificação em função da velocidade da peça para os ensaios realizados no Inconel 625 e no Inconel 718.	137
Figura 4.32 – Energia específica de retificação em função da velocidade de corte para os ensaios realizados no Inconel 625 e no Inconel 718.	138
Figura 4.33 – Energia específica de retificação em função da granulometria do rebolo para os ensaios realizados no Inconel 625 e no Inconel 718.	139
Figura 4.34 – Temperatura na zona de retificação de Inconel em função da penetração de trabalho (a_e).	141
Figura 4.35 – Temperatura na zona de retificação em função da velocidade de corte (v_s).	142
Figura 4.36 – Média dos valores normalizados das variáveis de saída: rugosidade (R_a e R_z), forças de retificação (F_t e F_n), variação de microdureza na superfície, energia específica de retificação e temperatura na zona de retificação para o Inconel 625 e para o Inconel 718:a) gráfico de colunas e b) gráfico radar.	144

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Composição química do Inconel 625 e do Inconel 718 (BRADLEY, 1988; REALUM, 2012)	28
Tabela 2.2 – Algumas propriedades físicas do Aço ABNT 1040, do Inconel 625 e do Inconel 718 (CALLISTER; RETHWISCH, 2012; SPECIAL METALS, 2008)	29
Tabela 2.3 – Relação dos parâmetros de corte com algumas das principais variáveis de saída (MALKIN; GUO, 2008).	36
Tabela 2.4 – Propriedades e aplicações de abrasivos (adaptado de MACHADO et al., 2015).	40
Tabela 2.5 – Variações do óxido de alumínio e suas particularidades (CIMSA, 2019; ELFUSA, 2019; SAINT-GOBAIN, 2019).	40
Tabela 2.6 – Variações do SiC e suas particularidades (JACKSON; DAVIM, 2011). ..	41
Tabela 2.7 – Algumas propriedades e características dos fluidos de corte na retificação (adaptado de IRANI; BAUER; WARKENTIN, 2005).	47
Tabela 2.8 – Índices aproximados de usinabilidade de alguns metais (adaptado de BEDDOES; BIBBY, 2003).	49
Tabela 2.9 – Alguns exemplos distintos de faixas de valores forças específicas (tangencial e normal) encontrados na literatura.....	56
Tabela 2.10 – Alguns exemplos de faixas de valores de energia específica encontrados na literatura.	57
Tabela 2.11 – Condutividade térmica de alguns materiais (adaptado de ÇENGEL; GHAJAR, 2012; KOMANDURI, 1982; SPECIAL METALS, 2008).....	61
Tabela 3.1 – Composição química do Inconel 625 de acordo com o mapa de EDS....	74
Tabela 3.2 – Composição química do Inconel 718 de acordo com o mapa de EDS....	75
Tabela 3.3 – Algumas propriedades físicas do Inconel 625 e do Inconel 718 (SPECIAL METALS, 2008).	75
Tabela 3.4 – Principais propriedades mecânicas do Inconel 625 e do Inconel 718 (BRADLEY, 1988).	76
Tabela 3.5 – Viscosidades e massa específica do fluido de corte utilizado (semissintético 1:19 em água).	78
Tabela 3.6 – Condutividade e difusividade térmica do Fluido de corte utilizado (semissintético 1:19 em água).	78
Tabela 3.7 – Parâmetros de entrada avaliados nos testes da etapa 1 para o Inconel 625.	81
Tabela 3.8 - Planejamento fatorial fracionário dos testes da etapa 1 (Inconel 625)....	82

Tabela 3.9 – Parâmetros de corte utilizados na segunda etapa.....	83
Tabela 3.10 – Variáveis de saída analisadas para as condições testadas na segunda etapa.	84
Tabela 4.1 – Análise de variância (ANOVA) para rugosidade (Ra) do Inconel 625 em função dos diversos parâmetros de entrada testados.	90
Tabela 4.2 – Análise de variância (ANOVA) para rugosidade (Rz) das amostras de Inconel 625 em função dos parâmetros de entrada informados na Tabela 3.7.	91
Tabela 4.3 – Análise de variância (ANOVA) para força tangencial de retificação (F_t) versus os parâmetros de entrada.	96
Tabela 4.4 – Análise de variância (ANOVA) para força normal de retificação (F_n) versus os parâmetros de entrada.	97
Tabela 4.5 – Análise de variância (ANOVA) para a energia específica versus os parâmetros de entrada.	101
Tabela 4.6 – Teste de ANOVA de fator único para a penetração de trabalho e os parâmetros de rugosidade (Ra e Rz) das superfície de Inconel 625 e de Inconel 718 retificadas.	105
Tabela 4.7 – Teste de ANOVA de fator único para a velocidade da peça (v_w) e os parâmetros de rugosidade (Ra e Rz) das superfície de Inconel 625 e de Inconel 718 retificadas.	107
Tabela 4.8 – Teste de ANOVA de fator único para a velocidade de corte (v_s) e os parâmetros de rugosidade (Ra e Rz) das superfície de Inconel 625 e de Inconel 718 retificadas.	109
Tabela 4.9 – Teste de ANOVA de fator único para a granulometria do rebolo e os parâmetros de rugosidade (Ra e Rz) das superfície de Inconel 625 e de Inconel 718 retificadas.	111
Tabela 4.10 – Efeitos dos parâmetros de entrada na rugosidade (Ra e Rz) das superfície de Inconel 625 e de Inconel 718 retificadas.	111
Tabela 4.11 – Teste de ANOVA de fator único para a microdureza na superfície retificada em função da penetração de trabalho para o Inconel 625.	118
Tabela 4.12 – Teste de ANOVA de fator único para a microdureza na superfície retificada em função da penetração de trabalho para o Inconel 718.	119
Tabela 4.13 – Teste de ANOVA de fator único para a microdureza na superfície retificada em função da velocidade da peça para o Inconel 625.	120
Tabela 4.14 – Teste de ANOVA de fator único para a microdureza na superfície retificada em função da velocidade da peça para o Inconel 718.	121
Tabela 4.15 – Teste de ANOVA de fator único para a microdureza na superfície retificada em função da velocidade de corte para o Inconel 625.	122

Tabela 4.16 – Teste de ANOVA de fator único para a microdureza na superfície retificada em função da velocidade de corte para o Inconel 718.....	123
Tabela 4.17 – Teste de ANOVA de fator único para a microdureza na superfície retificada em granulometria do rebolo para o Inconel 625.....	124
Tabela 4.18 – Teste de ANOVA de fator único para a microdureza na superfície retificada em granulometria do rebolo para o Inconel 718.....	125
Tabela 4.19 – Teste de ANOVA de fator único para a penetração de trabalho (a_e) e as forças de retificação (F_t e F_n) do Inconel 625 e do Inconel 718.	130
Tabela 4.20 – Teste de ANOVA de fator único para a velocidade da peça (v_w) e as forças de retificação (F_t e F_n) do Inconel 625 e do Inconel 718.	132
Tabela 4.21 – Teste de ANOVA de fator único para a velocidade de corte (v_s) e as forças de retificação (F_t e F_n) do Inconel 625 e do Inconel 718.	133
Tabela 4.22 – Teste de ANOVA de fator único para a granulometria do rebolo e as forças de retificação (F_t e F_n) do Inconel 625 e do Inconel 718.....	134
Tabela 4.23– Efeitos dos parâmetros de entrada na força de retificação (F_t e F_n) do Inconel 625 e do Inconel 718.	135
Tabela 4.24 – Teste de ANOVA de fator único para a energia específica de retificação (U) do Inconel 625 e do Inconel 718 em função da penetração de trabalho.	136
Tabela 4.25 – Teste de ANOVA de fator único para a energia específica de retificação (U) do Inconel 625 e do Inconel 718 em função da velocidade da peça.	137
Tabela 4.26 – Teste de ANOVA de fator único para a energia específica de retificação (U) do Inconel 625 e do Inconel 718 em função da velocidade de corte.	138
Tabela 4.27 – Teste de ANOVA de fator único para a energia específica de retificação (U) do Inconel 625 e do Inconel 718 em função da granulometria do rebolo.	139
Tabela 4.28 – Efeitos dos parâmetros de entrada na energia específica de retificação do Inconel 625 e do Inconel 718.	140
Tabela 4.29 – Teste de ANOVA de fator único para a temperatura na zona de retificação de Inconel 625 e Inconel 718 em função da penetração de trabalho.	141
Tabela 4.30 – Teste de ANOVA de fator único para a temperatura na zona de retificação em função da velocidade de corte.	142
Tabela 4.31– Efeitos dos parâmetros de entrada na temperatura na zona de retificação do Inconel 625 e do Inconel 718.	143

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

γ	Ângulo de saída
ABS	Aceilonitrila Butadieno Estireno
a_d	Profundidade de dressagem
a_e	Penetração de trabalho
Al_2O_3	Óxido de alumínio
ANOVA	Análise de variância
a_p	Profundidade de corte
b_d	Largura efetiva do dressador
cBN	Nitreto cúbico de boro
CCC	Cúbica de corpo centrado
CFC	Cúbica de face centrada
CNT	Nanotubos de carbono
DOE	Planejamento experimental
d_s	Diâmetro do rebolo
EDS	Espectroscopia de energia dispersiva
EDX	Espectroscopia de raios X por dispersão em energia
F_c	Força de corte
FDM	Modelagem por deposição de fundido
F_n	Componente normal da força de retificação
F_{sl}	Força de atrito
F_t	Componente tangencial da força de retificação
h_{cu}	Espessura efetiva do cavaco
h_{eq}	Espessura de corte equivalente
l_c	Comprimento de contato
LN_2	Nitrogênio líquido
$M_{23}C_6$	Carbonetos ricos em cromo
M_6C	Carbonetos ricos em ferro e molibdênio
MC	Carbonetos
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
MoS_2	Bissulfeto de molibdênio
MQL	Mínima quantidade de lubrificante
$Ni_3(Al, Ti)$	Alumineto de níquel e Níquel – Titânio (3:1)
Ni_3Nb	Níquel – Nióbio (3:1)
n_s	Rotação do rebolo

P	Potência de corte ou potência de retificação
Q_w	Taxa de remoção de material
Q_w'	Taxa de remoção de material específica
Ra	Rugosidade média
r_p	Raio de ponta do dressador
Rz	Altura máxima do perfil
SA	Óxido de alumínio monocristalino
S_d	Passo de dressagem
SiC	Carboneto de silício
TCC	Tetragonal de corpo centrado
TCP	Fase topologically close packed
U	Energia específica de retificação
U_d	Grau de recobrimento do rebolo
V_{fd}	Velocidade de dressagem
V_s	Velocidade de corte
V_w	Velocidade da peça
ZnO	Óxido de zinco
α	Ângulo de folga
β	Ângulo de cunha
γ	Matriz da liga
γ'	Fase Gama “Prime”
V_{fa}	Velocidade de avanço
b_w	Largura da peça
γ''	Nitreto de nióbio

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	22
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
2.1. Ligas à base de níquel.....	25
2.1.1. <i>Inconel 625 e Inconel 718</i>	27
2.2. Processo de retificação.....	29
2.2.1. <i>Mecanismo de formação de cavaco</i>	30
2.2.2. <i>Processo de retificação plana tangencial</i>	34
2.2.3. <i>Principais parâmetros de corte no processo de retificação plana tangencial</i>	35
2.2.4. <i>Principais materiais de rebolos para retificação</i>	39
2.2.5. <i>Operação de dressagem</i>	42
2.2.6. <i>Fluidos de corte utilizados no processo de retificação</i>	45
2.3. Retificabilidade.....	48
2.3.1. <i>Principais parâmetros para avaliar a retificabilidade</i>	51
2.3.1.1. Rugosidade da peça	51
2.3.1.2. Microdureza na superfície e perfil de microdureza	53
2.3.1.3. Forças de retificação	55
2.3.1.4. Energia específica de retificação	57
2.3.1.5. Temperatura na zona de retificação	58
2.4. Retificação de ligas à base de níquel	59
CAPÍTULO 3 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	72
3.1. Materiais e equipamentos utilizados	73
3.2. Metodologia utilizada	79
3.2.1. <i>Primeira etapa de ensaios</i>	81
3.2.2. <i>Segunda etapa de ensaios</i>	82
3.3. Equipamentos e parâmetros para medição das variáveis de saída	84
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	89
4.1. Resultados da primeira etapa (retificação do Inconel 625).....	89
4.1.1. <i>Rugosidade (parâmetros Ra e Rz)</i>	89
4.1.2. <i>Análise da superfície por microscopia eletrônica de varredura (MEV)</i>	94
4.1.3. <i>Forças de retificação no Inconel 625</i>	96
4.1.4. <i>Energia específica de retificação do Inconel 625</i>	100

4.2. Resultados da segunda etapa: comparação entre a retificação do Inconel 625 e do Inconel 718.....	103
4.2.1. <i>Rugosidade (parâmetros Ra e Rz)</i>	104
4.2.2. <i>Análise da superfície por microscopia eletrônica de varredura (MEV)</i>	112
4.2.3. <i>Microdureza na superfície retificada</i>	116
4.2.4. <i>Perfil de microdureza (abaixo da superfície retificada)</i>	126
4.2.5. <i>Forças de retificação</i>	128
4.2.6. <i>Energia específica de retificação</i>	135
4.2.7. <i>Temperatura durante a retificação do Inconel 625 e do Inconel 718.</i>	140
4.2.8. <i>Considerações sobre a retificabilidade do Inconel 625 em relação ao Inconel 718</i>	143
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES	146
5.1. Sugestões para trabalhos futuros	149
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	150

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A demanda na indústria por componentes mais sofisticados, que utilizam peças com tolerâncias estreitas e propriedades específicas, cresce cada vez mais. Isso faz com que a busca por novos materiais e por processos de fabricação capazes de atingir tais tolerâncias, sem comprometer o material, também cresçam.

Assim surgiram, dentre outros materiais, as ligas de níquel, amplamente utilizadas na indústria aeroespacial, petroquímica, automotiva e nuclear. Um exemplo da importância dessas ligas no setor aeroespacial está no motor (turbina), onde elas correspondem por aproximadamente 50% do peso do mesmo. Dentre as ligas utilizadas, a mais solicitada é o Inconel 718 (EZUGWU; BONNEY; YAMANE, 2003), contudo, outra liga à base de níquel que merece bastante atenção é o Inconel 625, que apresenta alta resistência à oxidação mesmo em ambientes mais hostis, como é o caso da água marinha, por exemplo, fazendo dele um dos materiais preferidos para aplicações do setor marítimo subaquático e para prospecção e refino de petróleo. Ele também é utilizado no setor aeroespacial, na produção de reversores de turbinas (SHOEMAKER, 2005).

As ligas de níquel recebem este nome devido às suas propriedades mecânicas que são mantidas a altas temperaturas, bem como boa resistência à oxidação e corrosão (MANDAL et al., 2014). No entanto, as mesmas propriedades que se por um lado tornam a utilização da maioria das ligas de níquel atrativa, principalmente do Inconel 718, por outro são responsáveis pela sua pobre usinabilidade com relação aos processos convencionais (MANDAL et al., 2014). Dentre os principais desafios na usinagem destas ligas se destacam a tendência ao encruamento, a abrasividade da liga, a baixa condutividade térmica, a alta resistência mecânica e a alta ductilidade (PUSAVEC et al., 2014).

Assim, se durante a usinagem destas ligas as condições de corte não forem rigorosamente selecionadas, a peça estará sujeita a problemas que irão afetar a superfície usinada, e os problemas se agravam quando estas ligas necessitam ser retificadas. As características refratárias tanto do rebolo abrasivo convencional quanto da peça, promovem

concentração de calor na zona de corte. Além disso, os cavacos gerados apresentam uma pequena seção em virtude do tamanho do grão abrasivo e dos baixos valores de penetração de trabalho empregados nos processos de retificação convencionais, a maior parcela deste calor é direcionada para a peça, o que em conjunto com os baixos valores de condutividade térmica tanto do rebolo quanto do Inconel 718, dificultam ainda mais a dissipação do calor da zona de corte. Como consequência, além da deterioração do acabamento da peça, o rebolo estará sujeito a elevação da taxa de desgaste pela redução da resistência mecânica e química do ligante do rebolo. Em última instância, a peça pode sofrer queima, ou ainda redução da dureza na superfície como também estar sujeita a formação de trincas, empenamentos e distorções, comprometendo assim a funcionalidade do componente (ÖSTERLE; LI, 1997; WENFENG et al., 2010), o que pode levar a prejuízos financeiros, além de colocar vidas em risco.

Neste contexto, o estudo por condições de retificação que garantam a manutenção da integridade da superfície do componente, conciliando a produtividade e acabamento, sem danos ao material durante a usinagem de ligas de níquel (Inconel 718 e 625) torna-se fundamental para o desenvolvimento da indústria, visto o alto valor agregado e a alta responsabilidade dos componentes fabricados com essas ligas. Desta forma, vários trabalhos envolvendo retificação de Inconel 718 foram realizados nos últimos anos, de acordo com a plataforma de busca bibliográfica Science Direct (2019), entre os anos de 1995 e 2018, foram publicados 33 artigos relacionados ao referido tema. No entanto, após a consulta nesta plataforma observou-se que os temas das pesquisas abordaram predominantemente a retificação do Inconel 718, deixando uma lacuna no que diz respeito à retificação do Inconel 625. O Inconel 625 possui dureza de aproximadamente 29 HRc, cerca de 27% menor que a dureza do Inconel 718 (aproximadamente 40 HRc) o que indica à primeira vista ser um material com comportamento dúctil. A condutividade térmica do Inconel 625 é aproximadamente 9,8 W/m.K, cerca de 15% menor que a condutividade térmica do Inconel 718 (aproximadamente 11,4 W/m.K) (SPECIAL METALS, 2008). Portanto, não é possível generalizar o comportamento destas ligas sob o processo de retificação.

Assim, a fim de preencher essa lacuna e de compreender melhor como o Inconel 625 responde à retificação com rebolo de carbeto de silício (SiC), o objetivo desta pesquisa foi avaliar a influência dos principais parâmetros de corte na retificação do Inconel 625 e comparar a retificabilidade do Inconel 625 com o Inconel 718 (utilizado como referência). Para isso, primeiramente foi caracterizada a influência de alguns dos principais parâmetros de retificação, tais como: velocidade de corte, granulometria do rebolo, penetração de trabalho, velocidade da peça e o sentido de retificação (concordante e discordante) no acabamento de peças de Inconel 625 e no processo de retificação do mesmo (forças e energia específica de retificação). Já em uma segunda etapa, foram realizados ensaios de retificação do Inconel

625 e do Inconel 718, variando a penetração de trabalho, a velocidade da peça, a velocidade de corte e a granulometria do rebolo, permitindo assim a comparação entre a retificabilidade do Inconel 625 com o Inconel 718 em termos do acabamento superficial (Rugosidade Ra e Rz e imagens de microscopia eletrônica de varredura das superfícies), variações de dureza na superfície e abaixo das mesmas, forças de retificação (tangencial e normal), a energia específica e a temperatura medida na zona de retificação.

Para atingir esse objetivo, o presente trabalho está estruturado de forma que o Capítulo II apresenta a revisão bibliográfica realizada para o trabalho, abordando os seguintes tópicos: ligas de níquel (Inconel 625 e Inconel 718), o processo de retificação, retificabilidade e retificação de ligas de níquel.

No Capítulo III é apresentado o procedimento experimental onde são caracterizados os materiais utilizados, são apresentados os equipamentos e os métodos empregados na realização dos testes experimentais de retificação. São apresentados ainda os procedimentos para a medição e monitoramento das variáveis de saída: rugosidade, imagens da superfície retificada, microdureza, forças de retificação e temperatura.

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

As conclusões pertinentes ao trabalho estão apresentadas no Capítulo V, onde também se encontram sugestões para trabalhos futuros.

Finalmente, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas ao longo de todo o trabalho.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo está apresentada uma revisão bibliográfica sobre os temas relevantes ao presente trabalho, como as características e especificidades das ligas estudadas nesse trabalho (Inconel 625 e Inconel 718), as características e variáveis do processo de retificação, como também os conceitos de usinabilidade, especificamente retificabilidade, culminando em um estado da arte sobre retificação de ligas de níquel.

2.1. Ligas à base de níquel

O níquel apresenta uma microestrutura cúbica de face centrada (CFC) e não sofre transformações em sua estrutura básica abaixo da temperatura de fusão. De acordo com EZUGWU, et al. (1999), as ligas à base de níquel são caracterizadas e reforçadas por alguns elementos de liga que tendem a melhorar a sua microestrutura ou fase, conforme descrito:

- Matriz da liga (γ): A matriz contínua da fase austenítica da base de níquel possui uma estrutura cúbica de face centrada (CFC), que geralmente contém uma alta porcentagem de elementos em solução sólida, tais como cobalto, cromo, molibdênio e tungstênio;
- Fase Gama “Prime” (γ'): Alumínio e titânio na mesma proporção são adicionados para formar precipitados do tipo $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$, que também possuem estrutura cristalina CFC, coerentes com a matriz;
- Carbonetos: Carbono é adicionado em proporções de 0,05 – 0,2%, reagindo com outros elementos e formando precipitados primários do tipo MC. Durante o tratamento térmico e em trabalho, estes carbonetos se decompõem e formam baixos carbonetos tais como M_{23}C_6 e M_6C , os quais precipitam ao longo dos contornos de grãos;
- Contornos de grão γ' : Para muitas ligas, técnicas de tratamento térmico têm sido desenvolvidas para gerar um filme de precipitados γ' nos contornos de grão, pois acredita-se que isso otimize as propriedades de resistência à ruptura;

- Fases Topologically close packed (TCP): Fases tipo placa que se formam sob certas condições e promovem menor resistência à ruptura e ductilidade.

O níquel em forma de elemento ou de liga com outros metais e materiais tem feito contribuições significativas para sociedade atual e promete continuar a fornecer materiais para um futuro ainda mais exigente. As mudanças na oferta e na demanda em uma economia baseada em tecnologia tem gerado uma gama diversificada de ligas a base de níquel com várias propriedades. As ligas comerciais de níquel podem ser divididas em grupos ou famílias pelos principais constituintes elementares (ASM INTERNATIONAL, 2000). As ligas a base de níquel comercialmente disponíveis incluem o Inconel, Nimonic, Rene, Udimet, Pyromet, dentre outras.

As ligas a base de níquel são as ligas mais empregadas na indústria aeronáutica, respondendo por cerca de 50% em peso dos materiais utilizados em um motor aeroespacial, principalmente no compartimento da turbina a gás (MILLER, 1996). São ligas que contêm entre 30% a 75% de níquel (Ni), e apresentam uma combinação de uma matriz austenítica endurecida por solução sólida (fase γ) com elevadas frações volumétricas de precipitados (ASM INTERNATIONAL, 2000; SUGAHARA et al., 2009).

Além de seu uso em turbinas aeronáuticas, marinhas e industriais, as ligas à base de níquel também são usadas em veículos espaciais, motores de foguete, aeronaves experimentais, reatores nucleares, submarinos, usinas de vapor, equipamentos petroquímicos e outros de aplicações a altas temperaturas (EZUGWU et al., 1999) e por este motivo são também conhecidas como ligas exóticas. Por outro lado, as ligas à base de níquel são conhecidas como algumas das ligas mais difíceis de usinar, ou seja, com pobre usinabilidade (BONNEY, 2004; MANDAL et al., 2014).

Dentre as principais características das ligas de níquel se destacam a sua capacidade de manter suas propriedades mecânicas a altas temperaturas, bem como boa resistência à oxidação e corrosão (MANDAL et al., 2014). Entre as ligas de níquel, o Inconel 718 ocupa uma posição de destaque (EZUGWU; BONNEY; YAMANE, 2003). Ele é muito utilizado pela indústria aeronáutica, principalmente em peças de turbina, devido à sua resistência mecânica à altas temperaturas, como também possui aplicações em outros setores, como o nuclear, por exemplo. Outra liga de níquel bastante utilizada é o Inconel 625, que apresenta alta resistência à oxidação, mesmo em altas temperaturas, sendo bastante utilizado pela indústria petroquímica em equipamentos de utilização marítima subaquática e para prospecção e refino de petróleo, além da indústria aeronáutica em reversores de turbina (KLOCKE et al., 2015).

Tanto o Inconel 718 quanto o Inconel 625 são muito empregados principalmente nos motores aeronáuticos, assim, nota-se na Figura 2.1 que toda a parte quente do motor é em geral feita de ligas a base de níquel, principalmente Inconel 718, enquanto o sistema de exaustão é constituído de componentes feitos de Inconel 625, o que se deve à elevada

resistência a corrosão que esta liga apresenta a elevadas temperaturas. Alguns dos componentes do motor do Airbus A380 feitos de Inconel 718 e Inconel 625 são apresentados na Figura 2.1.

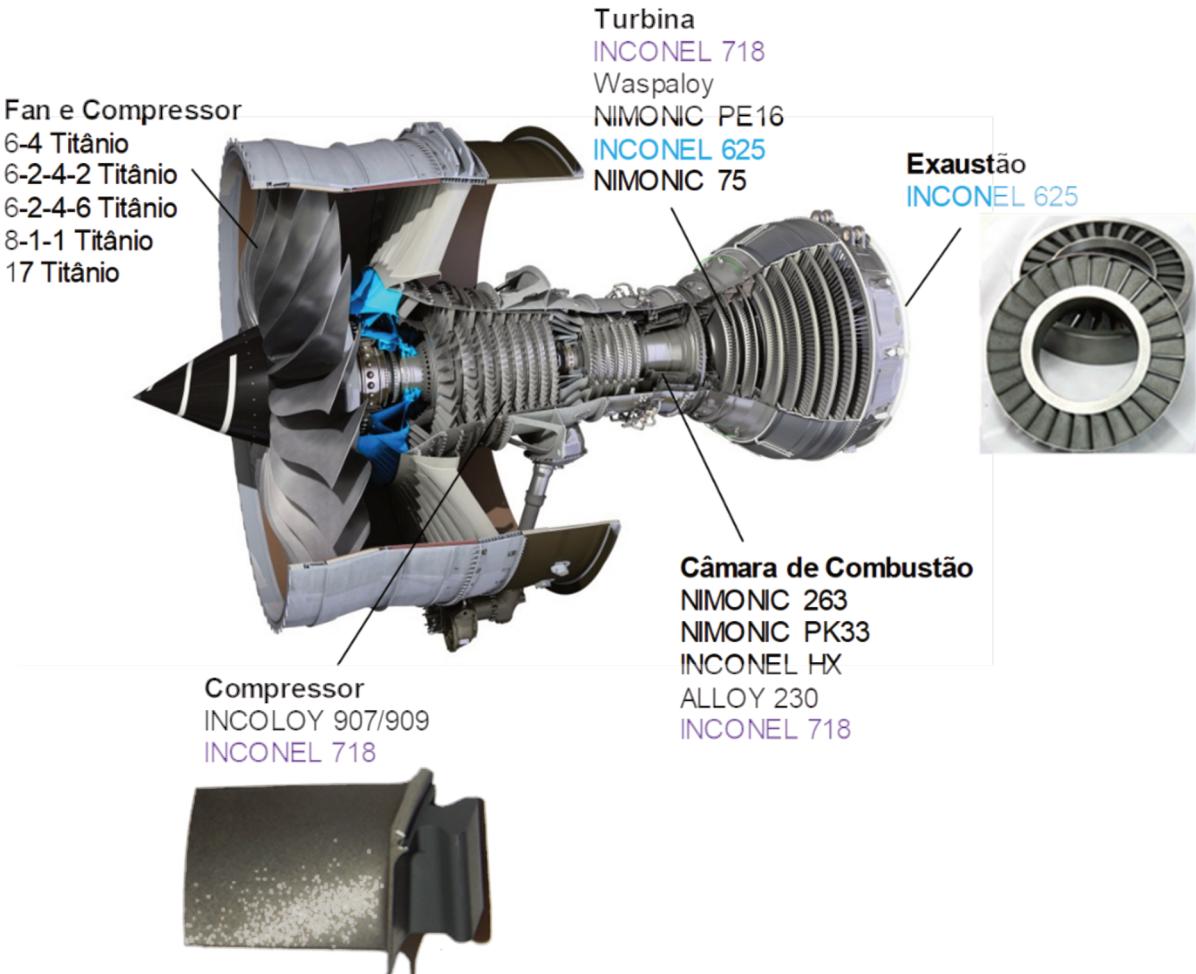


Figura 2.1 – Principais materiais de alguns componentes de um motor do tipo turbo fan (adaptado de CASAGRANDE JÚNIOR, 2015).

2.1.1. *Inconel 625 e Inconel 718*

O Inconel 625, cuja composição química está apresentada na Tabela 2.1, é uma liga de níquel-cromo-molibdênio que contém adição de nióbio que age com o molibdênio para endurecer a matriz da liga e, assim, conferir alta resistência sem um tratamento térmico reforçado, conforme mostrado na Figura 2.2a. A liga resiste a uma ampla gama de ambientes severamente corrosivos e é especialmente resistente à corrosão por pites e fissuras. As suas principais aplicações são nas indústrias de processamento químico, engenharia aeroespacial e marinha, equipamento de controle de poluição e reatores nucleares (SPECIAL METALS, 2008).

O Inconel 718, cuja composição química também está apresentada na Tabela 2.1, é uma liga de níquel-cromo endurecível por precipitação contendo também quantidades significativas de ferro, nióbio e molibdênio, juntamente com quantidades menores de alumínio e titânio. Ele combina resistência à corrosão e alta resistência com excelente soldabilidade, incluindo resistência à trinca pós-solda. A liga possui excelente resistência à ruptura a temperaturas de até 700°C (1300°F), conforme mostra a Figura 2.2b. Assim, ele é o principal material utilizado na fabricação de turbinas a gás, motores de foguete, espaçonaves e reatores nucleares (SPECIAL METALS, 2008).

Tabela 2.1 – Composição química do Inconel 625 e do Inconel 718 (BRADLEY, 1988; REALUM, 2012)

Material	Elementos	Ni	Cr	Fe	Nb	Mo	Ti	Al	Co	C
Inconel 625		61	21,5	-	3,6	9,0	0,2	0,2	-	0,05
Inconel 718	% em peso	54,5	17,8	17,5	4,98	3,03	0,91	0,51	0,45	0,018

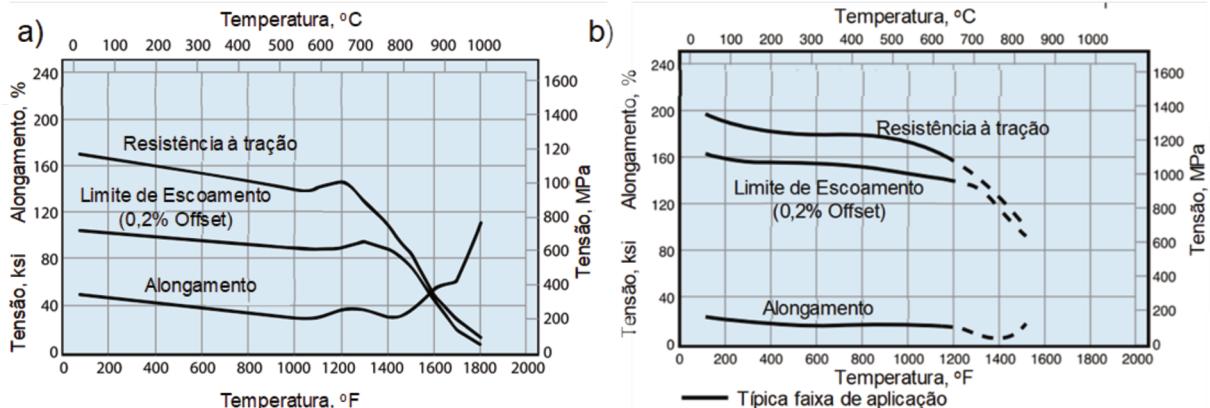


Figura 2.2 – Algumas Propriedades do Inconel 625 recocido (a) e do Inconel 718 endurecido por precipitação (b) em função da temperatura de operação (adaptado de SPECIAL METALS, 2008).

Algumas das principais propriedades físicas do Inconel 625 e do Inconel 718 estão apresentadas na Tabela 2.2, onde também estão apresentadas as mesmas propriedades para o aço ABNT 1040 como referência por também ser uma material retificado.

Tabela 2.2 – Algumas propriedades físicas do Aço ABNT 1040, do Inconel 625 e do Inconel 718 (CALLISTER; RETHWISCH, 2012; SPECIAL METALS, 2008)

Material	Intervalo de fusão (°C)	Densidade (g/cm³)	Conduvidade térmica (W/m.K)	Coeficiente de expansão (μm/m.K)	Microestrutura
Aço ABNT1040	1425 - 1540	7,85	51,9	11,3	CCC
Inconel 625	1290 - 1350	8,44	9,8	12,8	CFC
Inconel 718	1260 - 1336	8,19	11,4	13,0	CFC

2.2. Processo de retificação

A retificação é um processo de usinagem que utiliza um rebolo constituído por grãos abrasivos rotacionando com uma velocidade de corte (v_s), em geral acima de 30 m/s, para remover material de dureza inferior à do rebolo. É em geral a primeira opção para a produção de componentes que exigem requisitos de combinação de tolerâncias estreitas e baixa rugosidade (MARINESCU et al., 2007).

A retificação é considerada um dos processos de remoção de materiais com alto grau de complexidade, quando comparado com outros processos de usinagem com ferramenta de geometria definida, como o fresamento, por exemplo. As suas aplicações compreendem desde o setor da indústria metal-mecânica, automobilística, ferramentaria, até áreas de alta tecnologia, tais como óptica e eletrônica. Além da baixa rugosidade e elevada exatidão dimensional, considerados os requisitos tradicionais para a retificação, as aplicações de alta tecnologia dos componentes retificados muitas vezes precisam de controle das propriedades da superfície, tais como distribuição de tensões residuais e variação microestrutural. Isso implica que se deve entender e considerar os principais fatores que determinam a integridade superficial de um elemento submetido à retificação (JACKSON; DAVIM, 2011).

O conhecimento dos princípios básicos de um processo é um pré-requisito para sua efetiva melhoria e otimização. Durante a retificação, a geração da superfície e topografia no componente usinado é um dos mecanismos básicos. No caso dos processos de usinagem com ferramentas de corte com geometria definida, a penetração de uma aresta de corte define o mecanismo de remoção, que pode ser observado diretamente por meio de métodos modernos de investigação. Já no caso da retificação, a investigação dos mecanismos de remoção é mais complexa devido a um número maior de variáveis no processo. O primeiro desafio é em relação à especificação da ferramenta, os grãos abrasivos não possuem a mesma geometria e se apresentam aleatoriamente distribuídos no volume do rebolo. A geometria das arestas de corte, por não ser definida, consiste em um acoplamento parcialmente simultâneo das arestas de corte envolvidas no processo. Assim, a geração da

superfície será a soma destes engates interdependentes de aresta de corte, que são distribuídos aleatoriamente. Além disso, por causa dos pequenos valores de penetração de trabalho empregados, os cavacos apresentam seções da ordem de alguns micrometros, o que torna a observação e entendimento da formação do cavaco ainda mais difícil (MARINESCU et al., 2007).

2.2.1. Mecanismo de formação de cavaco

Os processos de usinagem convencionais são subdivididos em dois grupos: o primeiro refere-se aquele em que a remoção de material é realizada com ferramentas de arestas com geometria definida e o segundo quando o corte é realizado com ferramentas cujas arestas não são definidas. Se a quantidade, forma e orientação das arestas de corte em relação à peça de trabalho puderem ser descritas explicitamente, o processo é designado como corte com geometria definida, tais como, torneamento, fresamento e furação. Já quando a remoção mecânica de material por múltiplas arestas de corte, cujos ângulos da geometria cortante não podem ser todos determinados, e cuja distribuição e forma pode ser descrita apenas estatisticamente, o processo de usinagem é conhecido como de ferramenta com geometria indefinida (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014). Por normalmente empregarem materiais não metálicos e de elevada dureza também são conhecidos como processos de usinagem por abrasão, sendo os processos mais comuns: retificação, lapidação, brunimento, polimento, jateamento abrasivo, tamboreamento, dentre outros. No caso da retificação há algumas peculiaridades: as arestas de corte podem assumir ângulos de saída (γ) se alternando entre positivo e negativo, mas com predominância para o negativo, o que influencia bastante nas deformações elásticas e plásticas, como também na textura, geradas na peça (Figura 2.3) (MARINESCU et al., 2015). Além disso, os valores de penetração de trabalho são bem inferiores aquele utilizados em usinagem com ferramenta de geometria definida, como no fresamento, por exemplo. Assim, a espessura de corte equivalente na retificação é tão pequena que é importante não negligenciar as tensões elásticas (NEUGEBAUER et al., 2011).

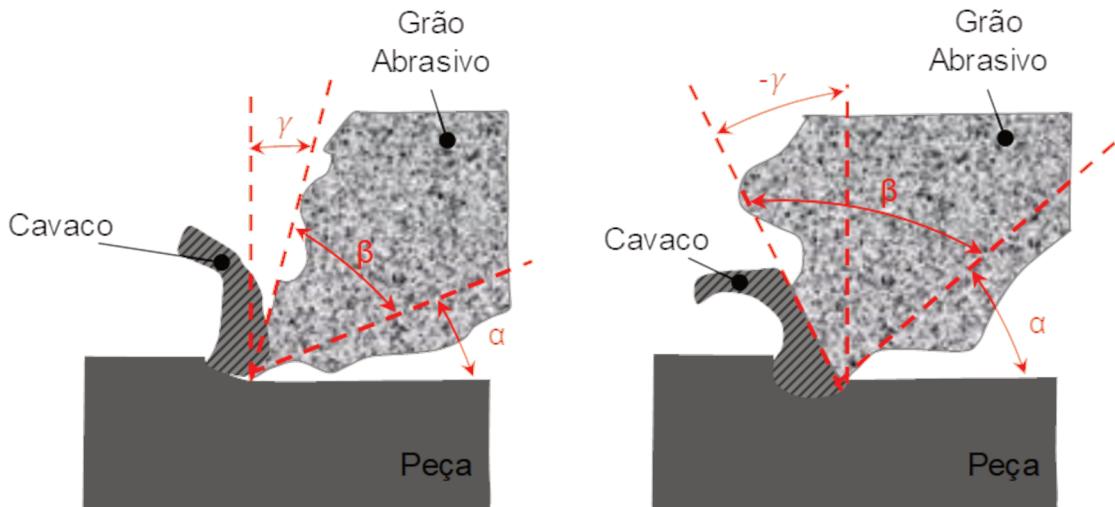


Figura 2.3 – Variação do ângulo de saída no processo de retificação (BLACK; KOHSER, 2012).

Em que: γ é o ângulo de saída; β é o ângulo de cunha; α é o ângulo de folga.

Na Figura 2.4 são ilustradas algumas diferenças entre a formação do cavaco no fresamento e na retificação. Durante o corte, o material é separado mecanicamente por cisalhamento na zona de cisalhamento primário (1). Na zona de cisalhamento secundário, as forças de atrito na face de saída resultam em uma deformação plástica do material (2). Além disso, na zona de ruptura ocorrem elevadas tensões de compressão e levam a uma deformação e subsequente ruptura do material (3). Além de cisalhamento, também ocorre atrito (4 e 5) (NEUGEBAUER et al., 2011).

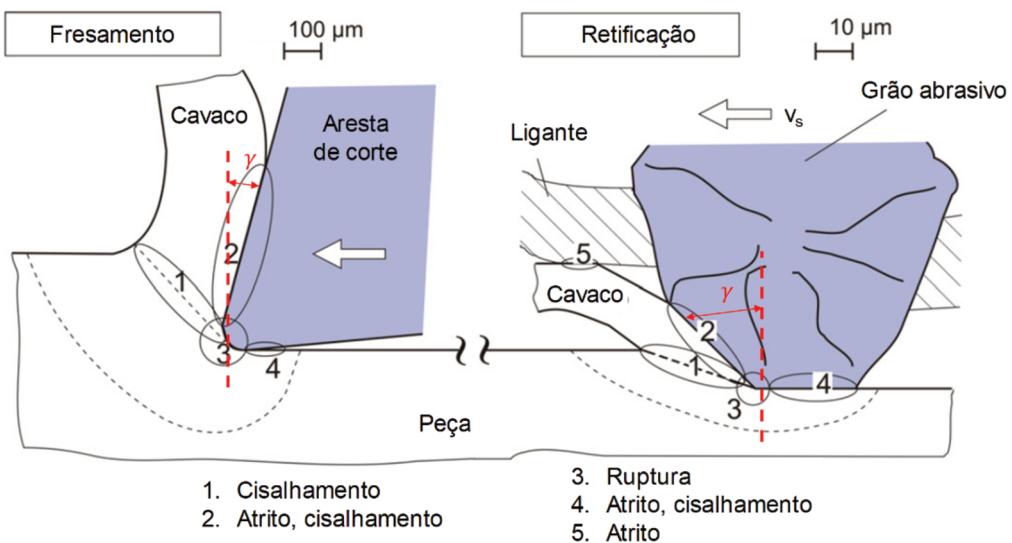


Figura 2.4 – Diferenças entre arestas com geometria definida e arestas com geometria indefinida com detalhe para o ângulo de saída (adaptado de NEUGEBAUER et al., 2011).

A formação do cavaco na retificação é dividida em três fases distintas de interação entre o abrasivo e a peça: a região elástica, a plástica e a de corte (NGUYEN; BUTLER, 2005) que estão ilustradas esquematicamente na Figura 2.5. Malkin e Guo (2008) dividem as três fases em fase de atrito, sulcamento e remoção de material de fato. Na primeira fase, a profundidade de corte é muito pequena e os grãos apenas deslizam na superfície, causando deformações elásticas devido à compressão, com nenhum material removido, é, portanto, a fase da deformação elástica. Com o aumento na penetração dos grãos na superfície da peça, tem-se, além das deformações elásticas a ocorrência de deformações plásticas, ou seja, escoamento lateral e recuperação das deformações elásticas sofridas anteriormente, caracterizando assim a segunda fase, deformação elástica e plástica. A maior penetração dos grãos implica em maiores forças de atrito entre peça e rebolo, onde grande parte da energia continua sendo dissipada por deformações, atrito e calor. Por fim, na terceira e última fase, a aresta de corte atinge um valor de penetração crítico, onde se inicia efetivamente a remoção de material e a formação do cavaco, porém ainda ocorrem deformações elásticas e plásticas, portanto, a fase da deformação elástica e plástica e formação do cavaco. Nesta última etapa grande parte da energia passa a ser consumida no cisalhamento do material e formação do cavaco (KLOCKE, 2009).

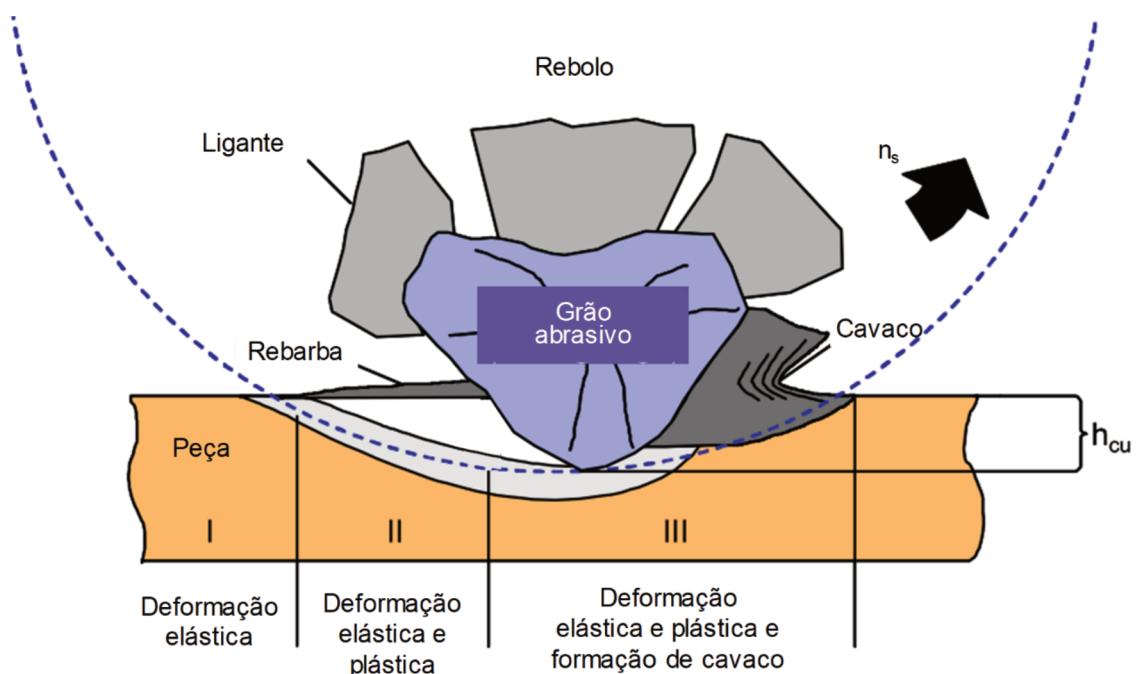


Figura 2.5 – Ilustração das fases da formação do cavaco na retificação (adaptado de KLOCKE, 2009).

Em que:

h_{cu} é a espessura efetiva do cavaco ou espessura do cavaco não deformado.

Em geral, o processo de remoção de material durante o contato de uma aresta de corte abrasiva na superfície de uma peça depende principalmente das propriedades físicas do par peça/abrasivo. Os mecanismos de desgaste da superfície mais comuns resultantes deste processo são, de acordo com Marinescu et al. (2007): microsulcamento, microcorte e microlascamento. Um exemplo esquemático de modelos destes mecanismos pode ser visto na Figura 2.6a-c.

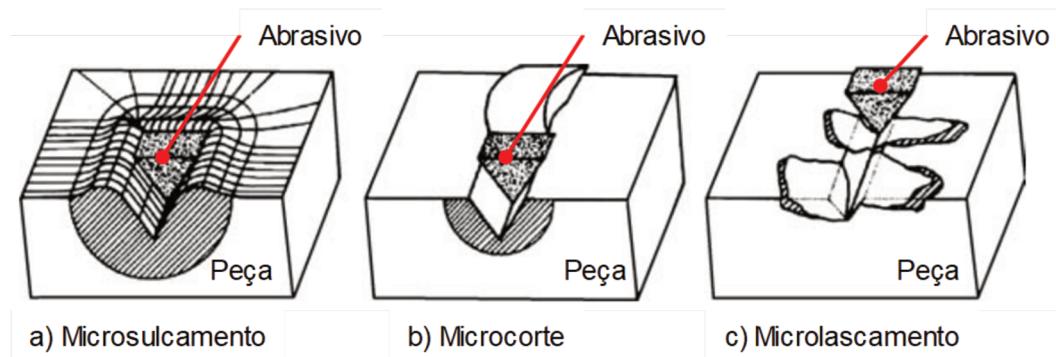


Figura 2.6 – Classificação das interações físicas entre partículas abrasivas e a superfície da peça (adaptado de ZUM GAHR, 1987).

No mecanismo de microsulcamento (Figura 2.6a), há uma deformação plástica contínua do material em direção à borda traçada com uma perda de material insignificante. Em processos reais, o impacto simultâneo de várias partículas abrasivas ou ainda, o impacto repetido de uma partícula abrasiva, leva à falha do material da peça na borda dos traços. O microcorte (Figura 2.6b) ideal provoca a formação de cavacos, onde o volume do cavaco é igual ao volume do traço deixado. Estes mecanismos de desgaste são comuns em metais com comportamento dúctil e relação entre o mecanismo predominante depende dos parâmetros de retificação e a geometria da aresta de corte. Microlascamento (Figura 2.6c) por sua vez, ocorre em casos onde há formação e propagação de trincas. O volume do cavaco removido pode ser várias vezes maior que o volume do traço. Este mecanismo ocorre principalmente durante a usinagem de materiais frágeis (MARINESCU et al., 2007).

Devido a distribuição aleatória dos abrasivos na superfície de corte do rebolo (eles possuem posicionamento em diferentes alturas e entre arestas de corte na superfície de corte, vide Figura 2.7), nem todos os grãos abrasivos removem efetivamente material durante uma volta completa do rebolo. Há grãos abrasivos que apenas atritam, outros que atritam e riscam a superfície de trabalho, como também há grãos que efetivamente removem material, sendo que somente devido à ação destes últimos que há a formação de cavaco (KLOCKE, 2009).

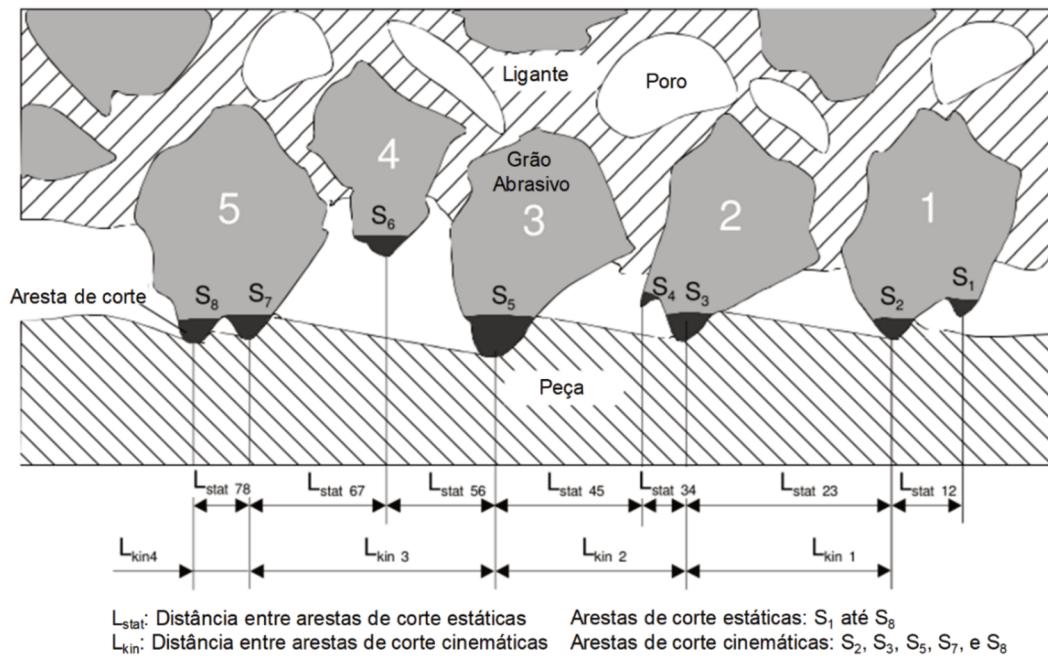


Figura 2.7 – Esquema de distribuição e posicionamento de arestas de corte na superfície de corte do rebolo em relação a superfície sendo retificada (adaptado de KLOCKE, 2009).

2.2.2. Processo de retificação plana tangencial

A retificação plana tangencial, conhecida também como apenas retificação plana, é o processo utilizado para conferir às peças com superfícies planas a combinação de baixa rugosidade e tolerâncias dimensionais mais estreitas que aquelas normalmente obtidas com processos de usinagem com ferramentas de geometria definida. A retificação plana compreende os métodos de periférica de passagem (ou mergulho), periférica longitudinal, e retificação frontal (Figura 2.8a-c). Na prática industrial, a retificação plana é utilizada para retificar ranhuras, perfis, superfícies e nivelamento de grandes superfícies (KLOCKE, 2009). Para superfícies estreitas, canais ou perfis o processo mais utilizado é o processo de retificação tangencial plana de passagem (Figura 2.8b), enquanto para superfícies largas é utilizado o processo de retificação longitudinal (Figura 2.8a).

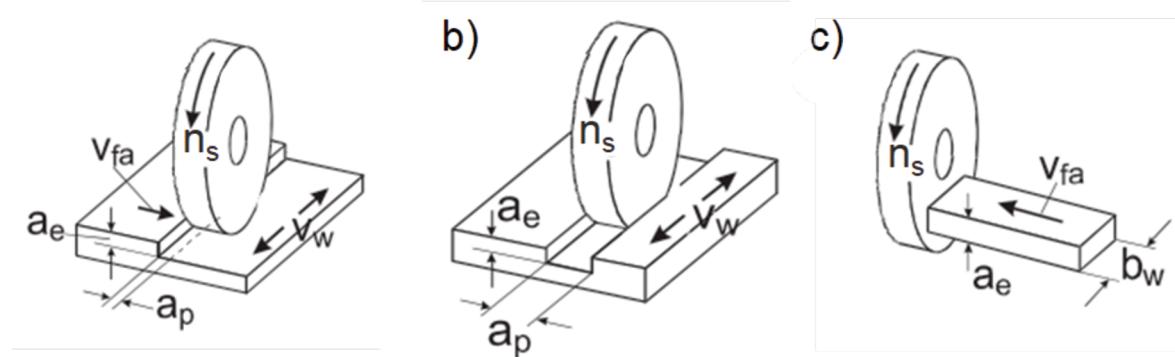


Figura 2.8 – Esquema dos processos de retificação plana: a) periférica longitudinal, b) tangencial de passagem e c) frontal (adaptado de KLOCKE, 2009).

Em que:

n_s é a rotação do rebolo;

v_w é a velocidade da peça;

v_{fa} é a velocidade de avanço;

a_e é a penetração de trabalho;

a_p é a profundidade de corte;

b_w é a largura da peça.

2.2.3. Principais parâmetros de corte no processo de retificação plana tangencial

Para a melhor compreensão do processo de retificação plana tangencial é preciso conhecer os parâmetros de corte ou grandezas físicas relacionadas a ele. E a correta seleção destes parâmetros, assim como ocorre para todos os processos de usinagem, são decisivos para a qualidade das peças produzidas e, consequentemente, para a eficiência do processo. A correlação de alguns destes parâmetros de corte (velocidade de corte – v_s , velocidade da peça – v_w , penetração de trabalho – a_e , taxa de remoção de material e taxa de remoção de material específica – Q_w e Q_w' e espessura de corte equivalente – h_{eq}) com algumas das principais variáveis de saída do processo de retificação (forças, rugosidade, temperatura e energia específica), de acordo com Malkin e Guo (2008) estão sintetizadas na Tabela 2.3. Nesta tabela, pode-se observar que com o as forças de corte tendem a diminuir com o aumento da velocidade de corte e aumentar com todas as demais variáveis, mesma tendência da rugosidade. A temperatura apresenta a tendência de aumentar com todas as variáveis de entrada apresentadas, enquanto a energia específica apresenta uma tendência inversa, ou seja, diminuir com o aumento das variáveis de entrada apresentadas na tabela.

Tabela 2.3 – Relação dos parâmetros de corte com algumas das principais variáveis de saída (MALKIN; GUO, 2008).

Parâmetro	Forças	Rugosidade	Temperatura	Energia Específica
v_s	↑	↓	↑	↓
v_w	↑	↑	↑	↓
a_e	↑	↑	↑	↓
Q_w e Q_w'	↑	↑	↑	↓
h_{eq}	↑	↑	↑	↓

Assim, são apresentados e descritos os principais parâmetros do processo de retificação plana tangencial.

I. Velocidade de corte (v_s): A velocidade de corte ou velocidade periférica do rebolo, de acordo com Malkin e Guo (2008), pode ser calculada pela eq. (1).

$$v_s = \frac{\pi \cdot d_s \cdot n_s}{60.1000} \quad (1)$$

Em que:

v_s é a velocidade de corte (m/s);

d_s é o diâmetro do rebolo (mm);

n_s é a rotação do rebolo (rpm).

De acordo com Marinescu et al. (2007), são utilizados para o processo de retificação, geralmente, valores de velocidade de corte acima de 30 m/s podendo chegar a valores acima de 100 m/s como mostrado no trabalho de Zhong, Ramesh e Yeo (2001), por exemplo, onde foi empregado $v_s = 160$ m/s. Contudo para materiais com tendência ao encruamento podem ser adotados valores menores de v_s , como no trabalho de Sinha et al. (2017), onde foi empregado $v_s = 18$ m/s durante a retificação do Inconel 718.

II. Velocidade da peça (v_w): No caso da retificação plana tangencial, a velocidade da peça (v_w), dada em mm/min, é definida como a velocidade da mesa e está diretamente relacionada com a rugosidade final da peça, sendo que o aumento de v_w tende a aumentar a rugosidade da superfície (JACKSON; DAVIM, 2011).

A faixa de utilização da velocidade da peça no processo de retificação plana tangencial, de acordo com Nussbaum (1988a), é de 5000 a 25000 mm/min.

III. Penetração de trabalho (a_e): Representa a profundidade de penetração da ferramenta, medida no plano de trabalho (MACHADO et al., 2015), ou seja, representa a profundidade de material removida da peça, no caso da retificação plana tangencial, por passagem da mesa (MARINESCU et al., 2007).

A faixa de utilização da penetração de trabalho no processo de retificação plana tangencial, de acordo com Nussbaum (1988a), é de 0,010 a 0,100 mm.

IV. Profundidade de corte (a_p): A profundidade de corte ou largura de usinagem (a_p) é dada em mm, e representa a profundidade ou largura de penetração da ferramenta, medida em uma direção perpendicular ao plano de trabalho (MACHADO et al., 2015). No caso da retificação plana tangencial de passagem pode ser caracterizada pela largura do contato peça/rebolo, ou seja, é a largura do rebolo que está efetivamente removendo material, portanto, é menor ou igual a largura do rebolo (KLOCKE, 2009).

V. Taxa de remoção de material (Q_w): A taxa de remoção de material (Q_w) é o volume de material removido por unidade de tempo. O aumento deste parâmetro implica no aumento da espessura equivalente de corte (h_{eq}), que por sua vez deteriora o acabamento da peça. A taxa de remoção de material pode ser determinada conforme a eq. (2) (MALKIN; GUO, 2008).

$$Q_w = a_e \cdot a_p \cdot v_w \quad (2)$$

Em que:

Q_w é a taxa de remoção de material (mm^3/min);

a_e é a penetração de trabalho (mm);

a_p é a profundidade de corte (mm);

v_w é a velocidade da peça (mm/min).

VI. Taxa de remoção de material específica (Q_w'): Parâmetro calculado pelo quociente da taxa de remoção de material (Q_w) pela profundidade de corte (a_p), conforme a eq. (3) (MALKIN; GUO, 2008).

$$Q_w' = \frac{Q_w}{a_p} = a_e \cdot v_w \quad (3)$$

Em que: Q'_w é a taxa de remoção de material específica ($\text{mm}^3/\text{mm} \cdot \text{min}$);

O Q'_w representa a taxa volumétrica de remoção de material por unidade de largura ativa do rebolo e por isso é muito útil para determinar eficiência de processos de retificação (CAMERON; BAUER; WARKENTIN, 2010).

VII. Espessura de corte equivalente (h_{eq}): É o parâmetro empírico que apresenta boa correlação com as forças e energia de retificação, como também com a rugosidade da peça e desgaste do rebolo (MALKIN; GUO, 2008). Ele corresponde à espessura de material (cavaco) sendo deformado a uma razão volumétrica por unidade de largura, ou ainda à taxa de remoção de material por unidade de área da superfície de corte do rebolo passando pela zona de retificação. A definição mais simples é a relação entre a taxa de remoção específica do material Q'_w e v_s (HEINZEL; BLEIL, 2007). Ela pode ser calculada pela eq. (4) (MARINESCU et al. (2007) :

$$h_{eq} = \frac{a_e \cdot v_w}{v_s \cdot 60} = \frac{Q'_w}{v_s \cdot 60} \quad (4)$$

Em que:

h_{eq} é a espessura equivalente de corte (μm);

Apesar da espessura equivalente de corte não levar em consideração o espaçamento entre os grãos do rebolo, ela pode ser considerada um dos melhores parâmetros de caracterização de um processo de retificação, uma vez que engloba importantes características do processo e está diretamente relacionado com a qualidade da peça retificada (MARINESCU et al., 2004).

VIII. Sentido de retificação: Representa a trajetória com que o rebolo descreve em relação à velocidade da peça (ou da mesa no caso da retificação plana tangencial). Ele pode ser concordante ou discordante. A retificação no sentido concordante ocorre quando v_s e v_w estão na mesma direção, enquanto o sentido discordante se caracteriza pelos vetores v_s e v_w apresentarem sentidos opostos. Considerando uma aresta de corte como um ponto fixo no rebolo sua trajetória cíclica aparece como descrito na Figura 2.9 (KLOCKE, 2009).

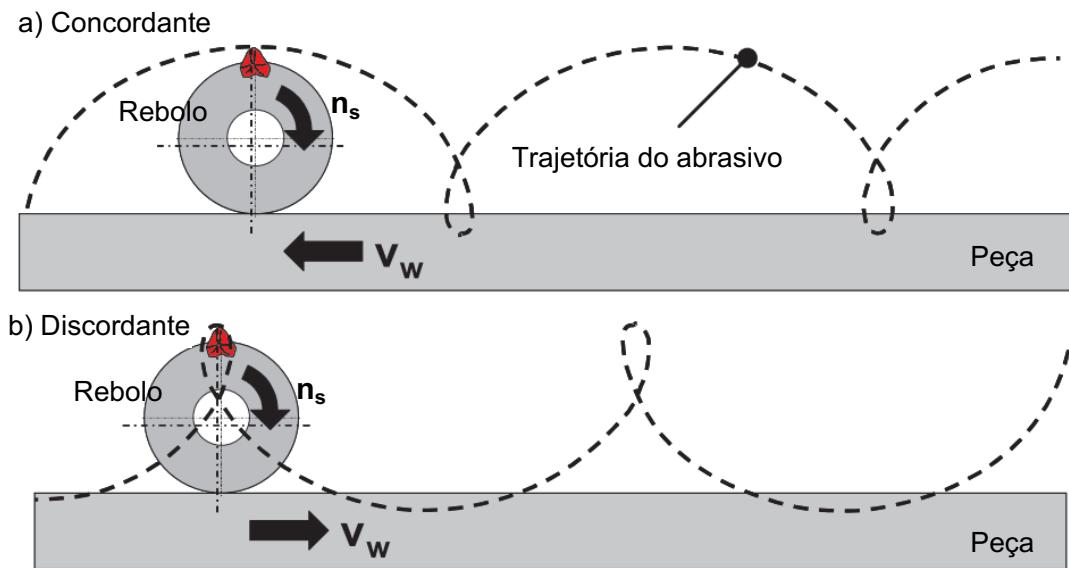


Figura 2.9 – Trajetória dos grãos abrasivos no rebolo durante a retificação: a) sentido concordante, b) sentido discordante (adaptado de KLOCKE, 2009).

Assim, a rugosidade cinemática depende do sentido de retificação adotado que, segundo Klocke (2009), tende a ser menor no sentido discordante. No entanto, na literatura já há relatos de resultados em que menores valores de rugosidade foram obtidos com a retificação no sentido concordante (KÖNIG; ARCISZEWSKI, 1988; TSO, 1995).

2.2.4. Principais materiais de rebolos para retificação

São quatro as principais classes de materiais para rebolos abrasivos de retificação: o óxido alumínio (Al_2O_3), o carboneto de silício (SiC), o nitreto cúbico de boro (cBN) e o diamante. Os dois primeiros materiais são considerados como abrasivos convencionais enquanto os dois últimos são chamados de “superabrasivos” (MACHADO et al., 2015). Na Tabela 2.4 podem ser observadas algumas das propriedades e principais aplicações destes materiais. Nesta tabela, observa-se que o Al_2O_3 apresenta a menor condutividade térmica, no entanto a maior estabilidade térmica. Os superabrasivos (cBN e diamante) apresentam dureza e condutividade térmica maior que os abrasivos convencionais (Al_2O_3 e SiC), no entanto apresentam menor estabilidade térmica. As principais aplicações estão relacionadas à afinidade química.

Tabela 2.4 – Propriedades e aplicações de abrasivos (adaptado de MACHADO et al., 2015).

Abrasivo	Estrutura cristalina	Dureza Knoop (kgf/mm ²)	Condutividade térmica relativa	Estab. Térmica (°C)	Afinidade química	Principais Aplicações
Al ₂ O ₃	Hexagonal	2100	1	1750	Cerâmicas, óxidos, etc	Aços em geral e ferro
cBN	Cúbica	4700	35-120	1400	Nenhuma	fundido nodular
SiC	Hexagonal	2400	10	1500		Ferros fundidos em geral, ligas não ferrosas, cerâmicas, metal duro
Diamante	Cúbica	8000	100-350	800	Materiais que assimilam carbono	

Dentro das quatro classes de abrasivos existem variações, por exemplo, para o Al₂O₃ há o sinterizado convencional, o fundido, o monocristalino, grãos zirconados e grãos cerâmicos (seeded gel), conforme apresentado na Tabela 2.5. Para o SiC, há, dentre outros o preto e o verde, conforme apresentado na Tabela 2.6 (SAINT-GOBAIN, 2015a).

Tabela 2.5 – Variações do óxido de alumínio e suas particularidades (CIMSA, 2019; ELFUSA, 2019; SAINT-GOBAIN, 2019).

Variação	Particularidade
Sinterizado convencional	Óxido de alumino convencional
Fundido	Apresenta alta pureza e capacidade de reposição de arestas, além de boa tenacidade
Monocristalino	Apresenta uma boa borda com múltiplos prismas e alta dureza, uma grande capacidade de retificação com um baixo calor.
Grãos zirconados	Óxido de alumínio com zircônio, proporcionam melhor desempenho para operações de desbaste.
Grãos cerâmicos	Estrutura microcristalina que proporciona maior friabilidade para o rebolo.

Tabela 2.6 – Variações do SiC e suas particularidades (JACKSON; DAVIM, 2011).

Variação	Particularidade
Verde	Mais duro, friável e angular que o preto, recomendado para metais duros, ligas e cerâmicas
Preto	Recomendado para retificação de metais não ferrosos com baixa dureza e não metálicos como borracha, etc.

Em geral, rebolos de Al_2O_3 são recomendados para materiais de elevada resistência a tração, como os aços em geral, enquanto os de SiC para materiais de baixa resistência a tração. Para as ligas em geral são recomendados os rebolos de SiC. Outro parâmetro importante dos rebolos é a estrutura do mesmo, sendo que para a retificação de materiais com alta ductilidade, são recomendados rebolos com estrutura aberta para poderem alojar os cavacos gerados sem que ocorra o fenômeno do empastamento (SAINT-GOBAIN, 2015a).

Tso (1995) realizou ensaios de retificação do Inconel 718 com diferentes tipos de rebolos (Al_2O_3 , SiC e cBN) e observou que o rebolo de SiC apresentou os melhores resultados para retificação a seco. Contudo, o autor relatou que rebolo superabrasivo de cBN superou os demais em todos os parâmetros analisados, com exceção do custo.

Em outro trabalho, Liu et al. (2007) compararam três tipos de abrasivos (Al_2O_3 , cBN e Diamante) na retificação do Inconel 718 e observaram que os rebolos superabrasivos sofreram um menor desgaste em relação ao de óxido de alumínio. Entretanto, os rebolos superabrasivos apresentaram desvantagem com relação ao fenômeno do empastamento (obstrução dos poros do rebolo por cavacos). Ainda assim, os autores destacaram que o rebolo de diamante foi o mais apropriado.

Durante a retificação de Inconel 718 com rebolos de cBN e de óxido de alumínio monocristalino, Yao et al. (2013) constataram que os menores valores de rugosidade da peça foram obtidos com o rebolo de óxido de alumínio monocristalino.

Sinha et al. (2016) também realizaram um estudo experimental de retificação do Inconel 718 com rebolos de óxido de alumínio e de carbeto de silício, que incluía a análise das forças de retificação, e observaram que a componente normal das forças de retificação foi maior ao empregar o rebolo de Al_2O_3 em relação ao rebolo de SiC.

Em dois trabalhos recentes de retificação plana tangencial de Inconel 718 em diferentes atmosferas de usinagem, De Oliveira (2017) utilizou rebolo de carbeto de silício (SiC), enquanto que Sinha et al. (2018) empregaram o rebolo de Al_2O_3 . Confrontando os resultados apresentados por De Oliveira (2017) com os apresentados por Sinha et al. (2018), observa-se que rugosidade (Ra) é cerca de 0,31 μm ao empregar o rebolo de SiC com uma penetração de trabalho a_e de 0,020 mm, enquanto ao usar o rebolo de Al_2O_3 e mesma penetração de trabalho empregada por De Oliveira (2017) foi registrado um valor de Ra de aproximadamente

0,45 μm . Esse comportamento se deve à friabilidade dos abrasivos, que, de acordo com Jackson e Davim (2011) e Malkin e Guo (2008), qualquer que seja a classe do SiC, ele é mais friável que o Al_2O_3 , assim, apresenta uma maior capacidade de formar novas arestas de corte e evitar o arredondamento das mesmas. Malkin e Guo (2008) sugerem ainda que o SiC é mais recomendado para acabamento de metais não ferrosos. Alves (2005) destaca que aumentando a friabilidade há uma melhora no acabamento superficial e uma diminuição no consumo energético e nas forças de corte.

2.2.5. *Operação de dressagem*

Por dressagem entende-se como sendo o processo que visa perfilar e afiar o rebolo. A operação de perfilamento do rebolo visa conferir forma ao rebolo, podendo gerar também um perfil específico sobre o rebolo, como também para remover os cavacos e outras substâncias que estejam no rebolo (MARINESCU et al., 2007). Já a afiação do rebolo refere-se à remoção do ligante entre os grãos abrasivos a fim de garantir melhor exposição deles e maior eficiência no processo de formação de cavaco. Assim, a dressagem é responsável pela topografia e forma macroscópica do rebolo (MALKIN; GUO, 2008).

De acordo com Jackson et al. (2007), cerca de 10% do rebolo é gasto no processo de usinagem enquanto que os demais 90% com a dressagem, o que faz com que o seu entendimento, principalmente dos parâmetros de dressagem, seja determinante para a eficiência e no processo de retificação, uma vez que a dressagem inapropriada ou se não for feita no momento certo, implicará em perda prematura de abrasivos e prejuízos.

Segundo Malkin e Guo (2008), as operações de dressagem mecânica geram superfícies compostas de macro e micro-efeito. O macro-efeito determina a posição em que as arestas dos grãos abrasivos estão localizadas na superfície do rebolo e depende do formato do dressador, da profundidade de penetração deste (a_d) e do passo da dressagem (S_d). Já o micro-efeito, é formado pelo arrancamento dos grãos desgastados (com baixa ancoragem no ligante) e fratura dos grãos que não se desgastaram por completo, em que novas arestas de corte são geradas pelo dressador.

Os processos de dressagem podem ser realizados por dressadores estáticos ou rotativos, sendo este último recomendado para rebolos superabrasivos. Para o processo de dressagem com dressador estático existem três tipos de dressadores principais: ponta única de diamante, conglomerado (prodress) e fliese (SAINT-GOBAIN, 2015b), ambos fabricados com diamantes que podem ser naturais ou sintéticos. Alguns dos principais tipos de dressadores estão ilustrados na Figura 2.10, onde pode ser visto um dressador de ponta única (Figura 2.10a), um fliese (Figura 2.10b), um conglomerado (Figura 2.10c) e um rotativo (Figura 2.10d).



Figura 2.10 – Exemplos de dressadores (adaptado de JACKSON; DAVIM, 2011).

O dressador de ponta única de diamante é o tipo mais comum, contudo ele apresenta algumas desvantagens em relação ao dressador *fliese* por exemplo. O raio de ponta (r_p) que se desgasta e sofre alteração, que por sua vez influencia na largura efetiva do dressador (b_d) (Figura 2.11). Por isso, é importante o frequente monitoramento do desgaste do diamante ao longo do processo e o ajuste da profundidade de dressagem (a_d). A largura efetiva do dressador de ponta única pode ser obtida através do raio de ponta e da profundidade de dressagem (a_d), conforme mostra a eq. (5).

$$b_d = \sqrt{8 \cdot r_p \cdot a_d} \quad (5)$$

Em que:

b_d é a largura efetiva do dressador [mm];

r_p é o raio de ponta do dressador [mm];

a_d é a profundidade de dressagem [mm];

Outro dressador que vem ganhando cada vez mais espaço nas operações de retificação é o do tipo *fliese*. Além de apresentar maior largura efetiva (b_d), o dressador *fliese* apresenta baixa variação durante a dressagem, devido à sua composição por vários diamantes. Assim, à medida que um diamante desgasta, outro diamante é exposto e compensa tal desgaste. Desta forma, o seu emprego melhora repetibilidade do processo e permite utilizar maior velocidade de dressagem, que por sua vez melhora a produtividade (SAINT-GOBAIN, 2015b).

O mecanismo de dressagem e as variáveis envolvidas no processo de dressagem estático (com dressador *fliese*) estão ilustrados na Figura 2.11.

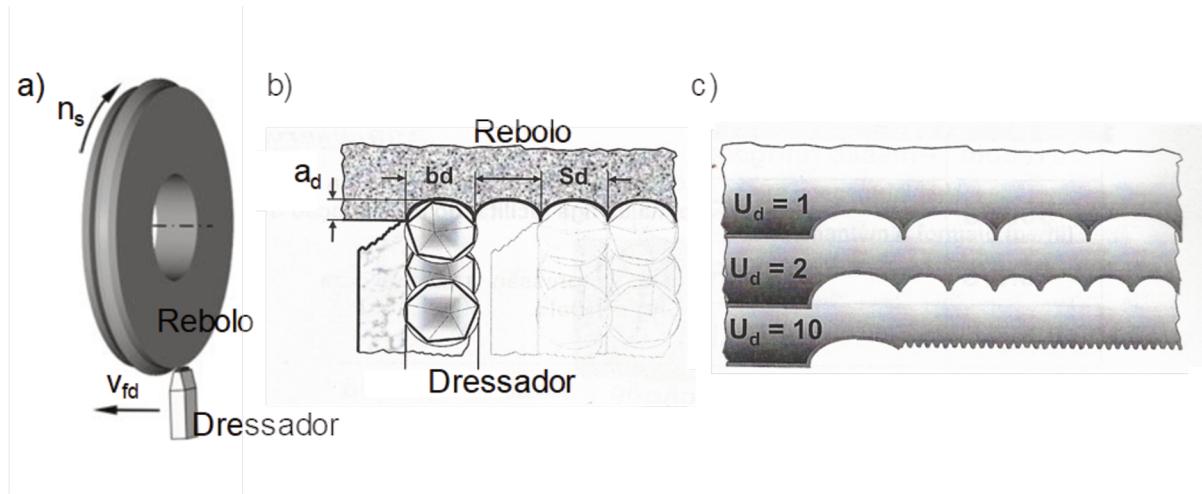


Figura 2.11 – Procedimento e parâmetros de dressagem: (a) Adaptado de Jackson e Davim (2011), (b) e (c) adaptado de Saint-Gobain (2015).

Em que:

v_{fd} é a velocidade de dressagem;

S_d é o passo de dressagem;

U_d é o grau de recobrimento do rebolo.

O passo de dressagem S_d pode ser calculado através da relação da velocidade de dressagem com a rotação do rebolo segundo a eq. (6).

$$S_d = \frac{v_{fd}}{n_s} \quad (6)$$

Em que:

S_d é o passo de dressagem [mm];

v_{fd} é a velocidade de dressagem [mm/min];

n_s é a rotação do rebolo [rpm].

De acordo com Jackson e Davim (2011), os parâmetros mais importantes são a profundidade de dressagem (a_d) e o grau de recobrimento do rebolo (U_d). O grau de recobrimento U_d foi definido por König e Messer (1980) como sendo um parâmetro para o controle da operação mecânica de dressagem e é o quociente da largura efetiva do dressador b_d e o avanço por volta S_d , conforme mostra a eq. (7).

$$U_d = \frac{b_d}{S_d} \quad (7)$$

Em que:

b_d é a largura efetiva do dressador [mm].

Sendo assim, o grau de recobrimento mostra quantas vezes um ponto na face periférica do rebolo é tocado pelo dressador. O limite inferior permitido para o U_d é 1,0, com o qual cada ponto periférico da roda é tocado apenas uma vez pelo dressador. O grau de recobrimento tem um efeito decisivo na geração da topografia do rebolo. U_d mais alto resulta numa topografia do rebolo mais fina, por conseguinte, à medida que o U_d aumenta, as forças de retificação aumentam e a rugosidade da peça diminui (JACKSON; DAVIM, 2011).

De acordo com Saint-Gobain (2015), recomenda-se a determinação do U_d de acordo com a granulometria (mesh) do rebolo por meio da eq. (8).

$$U_d = \frac{\text{Granulometria mesh \#}}{15} \quad (8)$$

2.2.6. Fluidos de corte utilizados no processo de retificação

Os fluidos de corte são aplicados na usinagem dos materiais com o propósito de reduzir o calor na região de corte através da refrigeração, e também de reduzir pela função de lubrificação que o óleo proporciona, como também dos efeitos resultantes dos mecanismos tribológicos que estão sempre presentes na superfície de contato entre a peça e a ferramenta (PAWLAK et al., 2005).

De acordo com Sales et al. (2001), existem muitas formas de se classificar fluido de corte, uma vez que não há ainda padronização estabelecida. Segundo Diniz et al. (2014), os fluidos de corte, de uma forma geral, podem ser classificados como miscíveis em água e não miscíveis em água, entretanto pesquisas têm sido realizadas com partículas sólidas dispersas nos fluidos de corte, chamados de fluidos híbridos ou nanofluidos, resultando assim na classificação mostrada na Figura 2.12.

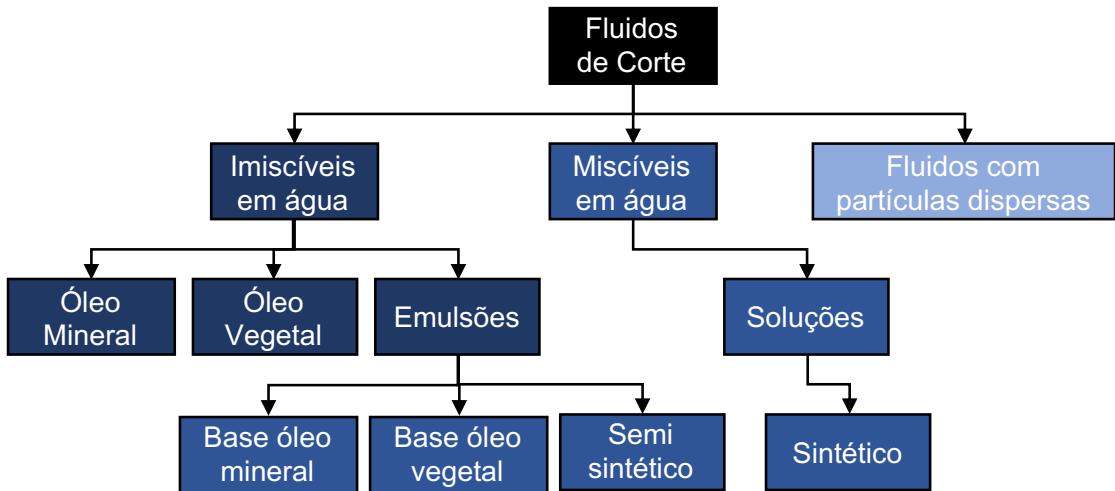


Figura 2.12 – Classificação dos fluidos de corte aplicados em retificação (adaptado de DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

Além de fluidos, de acordo com Bianchi et al. (2004), também podem ser aplicados lubrificantes sólidos, como grafite e bissulfeto de molibdênio, por exemplo.

No processo de retificação, o fluido de corte possui três funções principais: a refrigeração da peça, a lubrificação do contato peça/ferramenta e a retirada dos cavacos gerados no processo, promovendo a limpeza do rebolo. Esses benefícios gerados pelo fluido de corte são reconhecidos em todo setor industrial há alguns anos (EBBRELL et al., 2000).

Embora o uso de fluido de corte ofereça muitas vantagens à usinagem em geral, há uma série de problemas com sua utilização, problemas esses relacionados ao impacto causado ao meio ambiente, ao impacto econômico e à saúde do operador (TAWAKOLI; HADAD; SADEGHI, 2010), fazendo assim a otimização do uso dos mesmos uma realidade. Assim o uso de técnicas alternativas e de partículas sólidas dispersas no fluido de corte vem ganhando cada vez mais espaço entre os pesquisadores.

Irani et al. (2005), em seu trabalho de revisão sobre fluidos de corte na retificação apresenta um quadro comparativo de alguns tipos de fluidos de corte classificando cada com notas de 1 a 4 para cada um dos quesitos, sendo 4 melhor e 1 pior. Esse quadro está apresentado na Tabela 2.7. Nesta tabela pode ser observado que o óleo emulsionável, assim com o óleo semissintético, apresentam um maior equilíbrio entre lubrificação e refrigeração. É possível observar ainda que o óleo mineral é muito eficiente em lubrificação, enquanto o fluido sintético se sobressai na função de refrigeração. Do ponto de vista de custos e ambiental, a melhor opção é o fluido sintético seguido pelo semissintético, óleo emulsionável e óleo integral.

Tabela 2.7 – Algumas propriedades e características dos fluidos de corte na retificação (adaptado de IRANI; BAUER; WARKENTIN, 2005).

	Óleo integral	Óleo emulsionável	Semissintético	Sintético
Remoção de calor	1	2	3	4
Lubricidade	4	3	2	1
Manutenção	4	1	2	3
Filtrabilidade	1	2	3	4
Meio ambiente	1	2	3	4
Custo	1	2	3	4
Vida do rebolo	4	3	2	1

Quando se aplica fluido de corte no processo de retificação, além do tipo de fluido, o tipo e a posição do bocal, como também a vazão e pressão de aplicação são parâmetros que influenciam na qualidade da peça, desgaste do rebolo e, consequentemente, na produtividade do processo (BRINKSMEIER; HEINZEL; WITTMANN, 1999). Atentando-se para estes fatores, Webster et al. (1995) apresentaram uma geometria otimizada para bocais de aplicação de fluido de corte em retificação que resultou em uma melhoria para lubri-refrigeração do sistema. Mais tarde essa geometria foi patenteada nos Estados Unidos da América por Webster (2003). A técnica utilizada por ele foi apresentada no trabalho de revisão de Irani et al. (2005), chamada de jato coerente, e considerada a melhor opção para utilização nas indústrias, que empregam retificação, dentre as técnicas analisadas em seu trabalho.

Desde então, os bocais baseados na geometria otimizada apresentada no trabalho de Webster et al. (1995) vêm sendo utilizados e alguns deles passaram por aprimoramento. Um exemplo deste bocal foi utilizado no trabalho de Damasceno et al. (2017) durante a retificação do aço ABNT 4340, onde, dentre outras, os autores compararam a técnica convencional de lubri-refrigeração com a técnica otimizada, ambas com o mesmo fluido (sintético solúvel) aplicados com a mesma vazão (27,5 L/min). Os autores constataram redução na energia específica de retificação, menor taxa de desgaste do rebolo e em superfície da peça com tensões residuais mais compressivas quando foi empregado o bocal otimizado.

Outra alternativa à técnica convencional de lubri-refrigeração que também vem recebendo cada vez mais atenção dos pesquisadores, principalmente na retificação de ligas é a adição de partículas sólidas no fluido de corte (fluidos híbridos) aplicados via técnica da mínima quantidade de lubrificante (MQL). De acordo com Hadad et al. (2012), uma das formas de aprimorar as propriedades do fluido de corte (condutividade térmica e lubricidade) é adicionando partículas sólidas. Assim, diversos tipos de partículas podem ser adicionados ao fluido de corte, dentre elas, metálicas (ex. Fe, Cu, Ag), não metálicas (ex. diamante), óxidos (ex. Al_2O_3 , SiO_2 , ZrO_2), carbono (ex. nanotubos de carbono, grafeno), sulfetos (ex. MoS_2)

(WANG et al., 2016a). A seguir são apresentados alguns dos principais trabalhos com resultados sobre aplicação destas partículas em fluidos durante retificação de ligas.

Zhang et al. (2015) testaram nanotubos de carbono (CNT do inglês carbon nanotubes), bissulfeto de molibdênio (MoS_2) e uma mistura dos tipos de nanopartículas dispersas em óleos sintético durante a retificação do Inconel 718. Os autores concluíram que o fluido com CNT puro apresentou um desempenho inferior ao fluido com MoS_2 puro no que diz respeito ao efeito de lubrificação. Entre as seis razões de mistura preparadas, a mistura (2: 1) resultou no menor coeficiente de atrito (isto é, $\mu = 0,2757$) e o Ra mais baixo (isto é, $\text{Ra} = 0,294 \mu\text{m}$).

Wang et al. (2016) utilizaram nanopartículas de óxido de alumínio (Al_2O_3) dispersas em óleo vegetal durante a retificação do Inconel 718. A concentração de nano partículas dispersas no fluido exerceu uma influência importante no desempenho do processo de retificação. O coeficiente de atrito e a energia específica de retificação variaram com a concentração, atingindo o mínimo com concentração de 1,5% vol.

Sinha et al. (2017) compararam o uso de nanopartículas de prata (Ag) e de óxido de zinco (ZnO) dispersos em água deionizada e aplicados via a técnica de lubri-refrigeração convencional utilizando óleo emulsionado em água (1:30). Os resultados indicaram que a aplicação dos fluidos com partículas de óxido de zinco resultou em menores forças de retificação, menor atrito, e superfícies da peça com melhor acabamento. Os autores atribuíram os resultados à melhor lubrificação proporcionada pela presença das partículas sólidas, para tal, mediu-se também a condutividade térmica e a viscosidade dinâmica onde obtiveram um aumento na condutividade térmica e na viscosidade com a adição das nanopartículas.

Em trabalho recente, De Oliveira (2017) realizou um estudo sobre a retificação de Inconel 718 com diferentes atmosferas de usinagem, dentre elas aquela que multicamadas de grafeno foram dispersas no fluido de corte semissintético em duas concentrações (0,05 e 0,10% em peso) aplicados via a técnica da mínima quantidade de lubrificante (MQL) a 240 mL/h. A autora ainda comparou os resultados com a técnica convencional de lubri-refrigeração utilizando fluido semissintético emulsionável em água (1:9) em uma vazão de 8,7 L/min e observou que a presença do grafeno, principalmente em uma menor concentração sobressaiu-se à técnica convencional em termos de rugosidade da superfície, menor variação na dureza da peça abaixo da superfície retificada, como também na potência de retificação.

2.3. Retificabilidade

Antes da usinagem de um material específico, é desejável ter uma estimativa da facilidade com que o material pode ser usinado, isto é, a usinabilidade. Contudo, a usinabilidade é um termo que ainda leva a discussões entre os profissionais da área porque não existe um consenso sobre quais os parâmetros que devem ser utilizados para avaliá-la.

Até certo ponto, a energia específica de corte poderia ser usada como uma indicação de usinabilidade, já que é uma indicação da resistência do material ao corte. No entanto, a resistência ao corte é apenas um fator que influencia a usinabilidade. A facilidade de usinagem também pode ser classificada em termos de: vida esperada da ferramenta, acabamento de superfície atingível, grau de controle dimensional, sensibilidade a mudanças nas condições de corte (velocidade, profundidade de corte, etc) ou força e energia necessárias (BEDDOES; BIBBY, 2003).

Assim, uma das definições de usinabilidade mais aceitas é como uma grandeza tecnológica que expressa, por meio de um índice comparativo, um conjunto de propriedades de usinagem de um metal, em relação a outro tomado como padrão (FERRARESI, 1977). Portanto, entende-se por propriedades de usinagem aquelas que expressam seu efeito sobre grandezas mensuráveis inerentes ao processo.

Na Tabela 2.8 é apresentado o índice de usinabilidade de alguns metais apresentados por Beddoes e Bibby (2003) tomando como referência (índice de usinabilidade 1) o aço ABNT 1112. Da Tabela 2.8, observa-se que as ligas de Mg apresentam a maior usinabilidade dentre os materiais apresentados, enquanto que o Inconel, foco do estudo deste trabalho, apresenta o pior índice de usinabilidade dentre os mesmos materiais.

Tabela 2.8 – Índices aproximados de usinabilidade de alguns metais (adaptado de BEDDOES; BIBBY, 2003).

Material	Índice de Usinabilidade
Ligas de Mg	5,00 – 10,00
Ligas de Cu	2,00
Aço ABNT 1112	1,00
Aço ABNT 4140	0,70
Aço ABNT 1020	0,60
Aço Inoxidável 304	0,25
Inconel	0,10 – 0,20

Em relação à usinagem com ferramenta de geometria definida, a retificação apresenta diferenças processuais claras que afetam a usinabilidade dos materiais. Durante a retificação, várias arestas (grão abrasivos) entram em contato com a peça, com um ângulo de saída preferencialmente negativo do grão, o que, em relação ao processo com geometria definida, gera um maior atrito e deformações, que resultam em uma maior conversão de energia durante o processo (KLOCKE, 2009).

Assim, têm-se o conceito de usinabilidade voltado para o processo de retificação com o termo retificabilidade. Desta forma, todos os componentes, ou seja, o rebolo (especificação e

preparação), parâmetros de corte e a lubri-refrigeração, devem ser ajustados para o respectivo material e requisitos dos componentes.

Diferente de usinabilidade, onde se têm um índice, não há referências de um índice de retificabilidade, porém a mesma é avaliada também em termos comparativos (em relação a uma referência) das variáveis de saída do processo. A camada superficial da peça retificada (influências térmicas e mecânicas), a formação de cavacos, bem como as forças de retificação, rugosidade da peça e possível empastamento e desgaste do rebolo podem ser utilizadas como critérios para a avaliação da retificabilidade (KLOCKE, 2009).

Patil et al. (2007) avaliaram a retificabilidade do Inconel 718 com diferentes tipos de rebolos de cBN tomando como referência o aço para rolamento SAE 52100. Os autores avaliaram a retificabilidade em termos das forças de retificação e da energia específica de retificação e em seguida concluíram que o Inconel 718 requer uma maior energia específica e forças de retificação em relação ao aço para rolamento.

Mandal et al. (2014) avaliaram o uso de barreira pneumática, que atuava como um defletor, para auxiliar na lubri-refrigeração a fim de melhorar a retificabilidade do Inconel 600 e utilizaram como parâmetros de saída as forças de retificação, rugosidade da superfície e desgaste do rebolo. A referência adotada foi a usinagem do mesmo material com a técnica convencional de lubri-refrigeração e os autores observaram uma melhora na retificabilidade do Inconel 600 com o uso dessa barreira.

Em um trabalho recente conduzido por Qian et al. (2018), os autores realizaram um estudo de retificabilidade do Inconel 718 em relação ao K4125 (liga a base de níquel) em termos de forças de retificação, energia específica, temperatura de retificação, degaste do rebolo, análise de elementos na superfície retificada e rugosidade. Eles constaram que o K4125 apresentou pior retificabilidade que o Inconel 718 em termos de forças de retificação, energia específica, temperatura de retificação, desgaste do rebolo e rugosidade.

Xi et al. (2018) avaliaram a retificabilidade das ligas de titânio Ti_2AlNb e $Ti-6Al-4V$ e do Inconel 718 utilizando como parâmetros as forças de retificação, a energia específica de retificação e a relação G do rebolo (volume de material removido em relação ao volume de rebolo gasto). Os autores concluíram que o Inconel 718 apresentou os maiores valores de forças de retificação e energia específica, o que representa pior retificabilidade entre as ligas testadas, contudo o Ti_2AlNb apresentou um menor valor de relação G.

Com isso, nota-se que não há uma padronização nos parâmetros utilizados para avaliar a retificabilidade de dois materiais, sendo utilizados os principais parâmetros de saída de um processo de retificação. Além disso, não foi encontrada na literatura específica menção a retificabilidade do Inconel 625, razão pela qual foi desenvolvido este trabalho.

2.3.1. *Principais parâmetros para avaliar a retificabilidade*

Em geral, são utilizados para avaliar a retificabilidade as variáveis medidas durante o processo, através de sistemas de monitoramento, ou na peça retificada. A retificabilidade está relacionada com os eventos ocorridos durante o processo de retificação, eventos estes que podem apresentar relação direta com os parâmetros de entrada do processo. Assim, nesse tópico são apresentados e descritos alguns dos principais parâmetros de saída do processo de retificação plana tangencial utilizados neste trabalho para avaliar a retificabilidade: rugosidade da peça, microureza na superfície e abaixo dela, forças de retificação, energia específica de retificação e temperatura na zona de retificação.

2.3.1.1. *Rugosidade da peça*

A rugosidade é definida como o desvio da forma geométrica ideal da superfície, ou seja, um conjunto de irregularidades (erros micro geométricos) encontradas na peça (MARINESCU et al., 2007).

Em uma pesquisa recente sobre a utilização dos parâmetros de avaliação de textura da superfície, segundo a norma ISO 4287 (1998), por 179 empresas ao redor do mundo, Todhunter et al. (2017) compararam os dados dos anos 2016 e de 1999 e mostraram que em 2016 o parâmetro de rugosidade média ou desvio aritmético médio do perfil avaliado, conhecido apenas como parâmetro R_a , era ainda o parâmetro mais empregado, seguido pelo parâmetro R_z (altura máxima do perfil) em termos percentuais (Figura 2.13a). Os autores ainda separam os resultados da pesquisa por percentual de empresas que utilizam cada parâmetro de rugosidade por setor (Figura 2.13b). Desta figura é possível observar que para a indústria aeroespacial (principal consumidora dos materiais utilizados neste trabalho), os parâmetros mais utilizados são, respectivamente R_a e R_z .

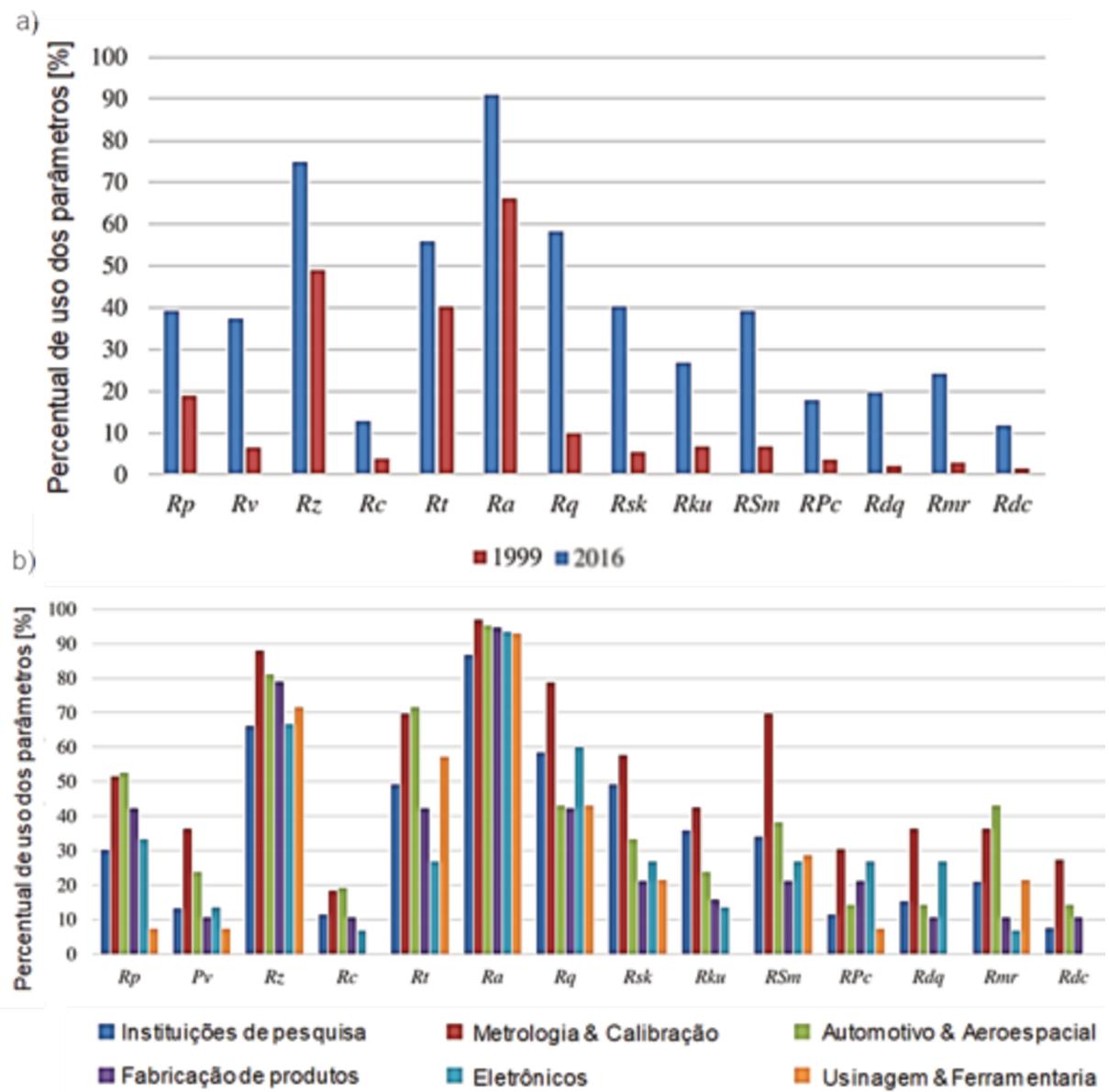


Figura 2.13 – Percentual do número total de participantes que utilizam cada parâmetro de rugosidade a) geral e b) por setor individual (adaptado de TODHUNTER et al., 2017).

Em geral, a rugosidade gerada na superfície retificada depende da combinação de três fatores: o rebolo, o processo de dressagem e o processo de retificação (PUERTO et al., 2013). Sendo assim, essa variável é influenciada pelos principais parâmetros de corte ((penetração de trabalho, velocidades de corte e da peça), tipo de lubri-refrigeração, tipo de grão abrasivo e diâmetro do rebolo, a estrutura do rebolo, das condições de dressagem como tipo de dressador e grau de recobrimento (U_d)), características estruturais e dinâmicas da máquina, (SHAJI; RADHAKRISHNAN, 2003). De acordo com Puerto et al. (2013) e com Machado et al. (2015), o processo de retificação é recomendado especialmente para operações de

acabamento em materiais endurecidos a fim de se obter baixas rugosidades superficiais ($R_a = 0,1 \mu\text{m}$ a $1,6 \mu\text{m}$) e estreitas tolerâncias dimensionais (IT-06-03).

Devido às propriedades das ligas de níquel, como a baixa condutividade térmica (que eleva a temperatura), a alta ductilidade (que gera grande área de contato cavaco ferramenta) e a capacidade de manter suas propriedades mecânicas a altas temperaturas (alta dureza) (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014), em geral, elas apresentam valores de rugosidade R_a maiores que os obtidos para os aços.

Sinha et al. (2017) conduziram um trabalho com retificação de Inconel 718, empregando $v_s = 18 \text{ m/s}$, $a_e = 0,010 \text{ mm}$, $v_w = 6000 \text{ mm/min}$ e rebolo de óxido de alumino (granulometria mesh #80), os autores testaram o uso de nano partículas de prata (Ag) e óxido de zinco (ZnO) dispersas em água deionizada e aplicada via técnica MQL e a retificação a seco. Após 10 passes de retificação os valores de rugosidade R_a obtidos variaram entre $0,40 \mu\text{m}$ (a seco) e $0,53 \mu\text{m}$ (com ZnO). Em outro trabalho de retificação de Inconel 718, Pavan et al. (2017), utilizaram v_s de 25 m/s , v_w de 15000 m/min e a_e de $0,025 \text{ mm}$ e testaram o uso de grafeno disperso em um fluido emulsionável (5% em água) aplicados via MQL e retificação a seco. Os autores notaram que a concentração de 0,3% de grafeno resultou nos melhores resultados de rugosidade entre $0,4 \mu\text{m}$ (0,3% de grafeno) e $0,9 \mu\text{m}$ (a seco).

Na pesquisa realizada por Todhunter et al. (2017), eles relataram que a medição de rugosidade por contato (*stylus*) ainda era a mais empregada, e cerca de 34% das empresas cujos funcionários foram entrevistados afirmaram utilizar apenas esse equipamento, enquanto 42% delas afirmaram utilizar esse mesmo equipamento junto com outro óptico, enquanto apenas 25% informaram utilizar somente o equipamento óptico.

2.3.1.2. *Microdureza na superfície e perfil de microdureza*

A propriedade mecânica denominada dureza é largamente utilizada na especificação de materiais, em estudos, pesquisas e na comparação de materiais. Para a engenharia mecânica, dureza é definida como a resistência à penetração de um material duro no outro. Desta forma os ensaios são conduzidos por penetração (a dureza por penetração é a mais utilizada e citada em especificações técnicas). As principais durezas por penetração são: Brinell, Rockwell, Vickers e Knoop (SOUZA, 1982).

Como as impressões produzidas pela dureza Vickers, assim como a Knoop, são microscópicas quando se emprega cargas menores que 1 kgf, elas são chamadas de microdureza. A microdureza Vickers, assim como a Knoop apresentam uma escala contínua, impressões extremamente pequenas, precisão na medida, aplicação para qualquer material e possibilidade de medir dureza superficial (SOUZA, 1982). Por esse motivo, elas são empregadas para a avaliação das superfícies retificadas. A mais utilizada, em trabalhos de

retificação, é a microdureza Vickers, como por exemplo os trabalhos de Yao et al. (2013), Zeng et al. (2015) e De Oliveira (2017), todos para liga de níquel.

A norma ASTM E92-16 (2016) define a metodologia padrão para a medição da dureza Vickers e Knoop. Entretanto, em alguns trabalhos de pesquisa, ela não é contemplada totalmente, pela necessidade de se avaliar a dureza abaixo das superfícies usinadas, porém próximo da mesma, sendo que a norma define a distância mínima como 2,5x a diagonal da impressão, assim são empregadas menores cargas afim de diminuir a impressão ou ainda extrapolada essa distância mínima.

Assim, há divergências quanto ao modo de conduzir as medidas de microdureza. Por exemplo, Yao et al. (2013) e Zeng et al. (2015) avaliaram a microdureza das superfícies utilizando a metodologia de um plano inclinado (cerca de 3º com a superfície retificada). Eles realizaram as medidas de 100 em 100 μm neste plano para obter diferentes profundidades abaixo da superfície retificada. Já De Oliveira (2017) utilizou um plano perpendicular à superfície retificada, iniciando as medidas 20 μm abaixo da superfície e respeitando 40 μm entre as impressões.

Alterações na microestrutura podem ser geradas pelas altas temperaturas atingidas na superfície durante o processo ou pelas deformações plásticas sofridas na superfície do mesmo. Quando a temperatura durante o processo não exceder a temperatura de recristalização do material pode ocorrer o fenômeno do encruamento, ou seja, o aumento na resistência e dureza pelas deformações (CALLISTER; RETHWISCH, 2012). O fenômeno do encruamento é muito comum em ligas quando submetidas aos processos de usinagem (BRADLEY, 1988).

O dano térmico é um dos principais fatores que afeta a qualidade superficial e a produtividade no processo de retificação. Assim, a maioria dos danos na retificação tem origem térmica devido às altas temperaturas que causam transformações internas (MALKIN; GUO, 2008). Para os aços, por exemplo, quando a temperatura na interface de corte da retificação excede 600°C, pode ocorrer a queima de retificação. Com isso, o aumento da temperatura de retificação causa o acúmulo de óxidos não ferrosos na superfície, caracterizando uma queda de dureza em aços temperados pelo super-revenimento. Quando a temperatura passa dos 800°C, há o fenômeno da retempera, onde podem ocorrer trincas e consequentemente um aumento na dureza da superfície (LIN et al., 2018).

Materiais envelhecidos também podem sofrer uma queda na dureza superficial com a temperatura, como mostrado por Yao et al. (2013) ao realizarem ensaios experimentais de retificação do Inconel 718 no estado envelhecido. Os autores observaram uma queda na dureza da superfície e atribuíram este fato ao crescimento da fase γ' na fase γ , ou seja, há uma relação estreita com o tratamento térmico prévio e a camada afetada chegou a 80 μm . Queda na dureza superficial do Inconel 718 também foi observada por Zeng et al. (2015),

sendo que os autores encontraram uma camada afetada de até 200 μm quando utilizaram $a_e = 0,040 \text{ mm}$. De Oliveira (2017), por outro lado, observou um aumento da dureza em uma camada de até 140 μm quando empregou $a_e = 0,020 \text{ mm}$ e queda de dureza quando utilizou $a_e = 0,040 \text{ mm}$. Assim, pelos resultados apresentados na literatura, têm-se enfatizada a importância do monitoramento desta variável.

2.3.1.3. Forças de retificação

Durante o processo de retificação, forças são desenvolvidas entre o rebolo e a peça e que dependem de alguns parâmetros de corte tais como, penetração de trabalho, velocidade da peça, velocidade de corte, tipo de fluido de corte utilizado, técnica de lubri-refrigeração, operação de dressagem, tipo de rebolo, friabilidade dos grãos, dentre outros que afetam os aspectos tribológicos, de forma que o seu monitoramento é de grande importância para a eficiência do processo (TSO, 1995; TAWAKOLI et al., 2009; HADAD; SADEGHI, 2012; MANDAL et al., 2014). Para o processo de retificação plana tangencial, como ilustrado na Figura 2.14, a força total exercida pela peça contra o rebolo pode ser separada em duas componentes: uma componente tangencial, F_t , e uma componente normal, F_n . Conforme mostra a Figura 2.14, para pequenas penetrações de trabalho, a componente F_t fica orientada próxima à direção horizontal e F_n próxima da direção vertical. Contudo, em operações *creep feed*, está aproximação não pode ser realizada, uma vez que o valor de a_e é relativamente alto e a linha de força seria movida ao longo do comprimento de contato (l_c) (MALKIN; GUO, 2008).

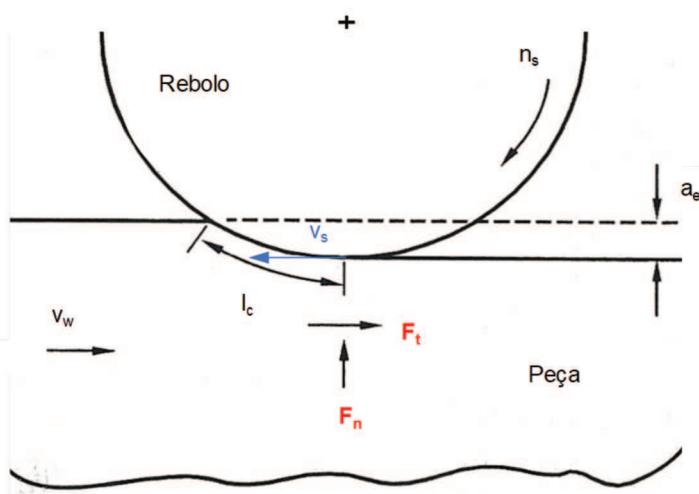


Figura 2.14 – Ilustração das componentes da força no processo de retificação plana tangencial (adaptado de MALKIN; GUO, 2008).

Associada à força tangencial de corte está a potência de corte, ou potência de retificação (P) que, de acordo com Malkin e Guo (2008), pode ser obtida pela eq. (9).

$$P = F_t \cdot v_s \quad (9)$$

Em que:

P é a potência de corte ou potência de retificação (W);

F_t é a componente tangencial da força de retificação (N).

A força de retificação apresenta uma relação direta com a penetração de trabalho (a_e) e com a profundidade de corte (a_p), contudo pode ser alterada pela friabilidade dos grãos abrasivos, bem como pelos parâmetros de dressagem, sendo que quanto maior a friabilidade dos grãos menores serão as forças (MALKIN; GUO, 2008). Para comparar os resultados de forças obtidos com diferentes valores de (a_p), utiliza-se o conceito de força específica, onde se tem a força por mm de (a_p), assim valores de força específica tangencial e normal para diferentes materiais estão ilustrado na Tabela 2.9, em que forças específicas é a força por unidade de largura de contato peça-ferramenta ou profundidade de corte (a_p).

Tabela 2.9 – Alguns exemplos distintos de faixas de valores forças específicas (tangencial e normal) encontrados na literatura.

Referência	Abrasivo utilizado	Material retificado	a_e (mm)	F_t (N/mm)	F_n (N/mm)
Shen et al.(2008)	Al_2O_3	Ferro fundido nodular	0,010	1,02 – 2,32	6,38 – 9,67
Alberts et al. (2009)	Al_2O_3	Aço ferramenta D2	0,050	1,08 – 2,46	4,62 – 7,67
Setti et al. (2012)	SiC	Ti-6Al-4V	0,010	1,66 – 6,62	1,86 – 7,25
Mao et al. (2012)	Al_2O_3	ABNT 52100	0,010	1,92 – 2,68	6,61 – 6,87
Pavan et al. (2017)	Al_2O_3	Inconel 718	0,025	4,64 – 6,80	8,48 – 12,12

A faixa apresentada na Tabela 2.9 se deve a variações na técnica de lubri-refrigeração, evidenciando assim a grande influência dela nos valores obtidos de forças. Também da Tabela 2.9 pode-se perceber que em geral, mesmo com uma penetração de trabalho menor, o Inconel 718 exigiu maiores forças em relação ao aço ferramenta D2.

2.3.1.4. Energia específica de retificação

De acordo com Malkin e Guo (2008), um parâmetro fundamental usado para avaliar a eficiência do processo é a energia específica (U) e tanto quanto maior é U menos eficiente é o processo. Ela é definida como sendo a energia gasta por unidade de material removida. O significado deste parâmetro está no fato de que qualquer mecanismo de interação abrasivo-peça proposto deve satisfazer um balanço energético que possa explicar a magnitude da energia específica e sua dependência das condições de processamento. A energia específica de retificação pode ser obtida da eq (10):

$$U = \frac{P}{Q_w} \quad (10)$$

Em que:

U é a energia específica de retificação (J/mm^3).

Assim, substituído na eq. (6) as eq. (2) e (9), a energia específica pode ser obtida ainda pela eq. (11).

$$U = \frac{v_s \cdot F_t}{a_e \cdot v_w \cdot b} \quad (11)$$

Na literatura pode-se verificar que energia específica apresenta uma grande variação, assim, na Tabela 2.10 estão apresentadas algumas faixas de valores apresentadas para a retificação do respectivo material e a referência que obteve esses resultados.

Tabela 2.10 – Alguns exemplos de faixas de valores de energia específica encontrados na literatura.

Referência	Abrasivo utilizado	Material retificado	Faixa de valores de U (J/mm^3)
Shen et al.(2008)	Al_2O_3	Ferro fundido nodular	76 – 174
Alberts et al. (2009)	Al_2O_3	Aço ferramenta D2	43 – 98
Setti et al. (2012)	SiC	Ti-6Al-4V	36 – 144
Mao et al. (2012)	Al_2O_3	ABNT 52100	133 – 168
Pavan et al. (2017)	Al_2O_3	Inconel 718	190 – 275

Como pode ser visto na Tabela 2.10, embora em outras referências diferentes faixas possam ser obtidas variando o processo, o Inconel 718 apresentou os maiores valores de energia específica.

De acordo com a eq. (10), a energia específica é inversamente proporcional à taxa de remoção de material, ou seja, aos parâmetros a_e e v_w . Chen et al. (2015) verificou essa tendência ao retificar Inconel 718 com rebolo de cBN. Patil et al. (2007) também conduziram experimentos de retificação em Inconel 718 e verificaram a relação direta da energia específica com a força tangencial de retificação.

2.3.1.5. *Temperatura na zona de retificação*

Como a maior parte dos danos gerados pelo processo de retificação estão relacionados com as elevadas temperaturas atingidas durante o processo, a medição deste parâmetro se torna uma valiosa ferramenta para monitorar e identificar danos térmicos nas peças como também nos mecanismos de desgastes de rebolos. Neste sentido, na literatura já existem vários métodos para o monitoramento da temperatura durante a retificação de diversos materiais e, dentre eles, destacam-se o método do termopar inserido na peça (RAZUK et al., 2016) e o método do arco entre o rebolo e a peça apresentado por Kuriyagawa et al. (2003), ilustrado na Figura 2.15a, e utilizada por outros pesquisadores como Chen et al. (2015) e Li et al. (2015). No caso do trabalho de Chen et al. (2015), os autores testaram diferentes taxas de remoção de material específica (Q_w') e registraram temperaturas de até 800 °C na interface entre o rebolo e a peça durante a retificação do Inconel 718. Alguns dos resultados obtidos por eles estão apresentados na Figura 2.15b.

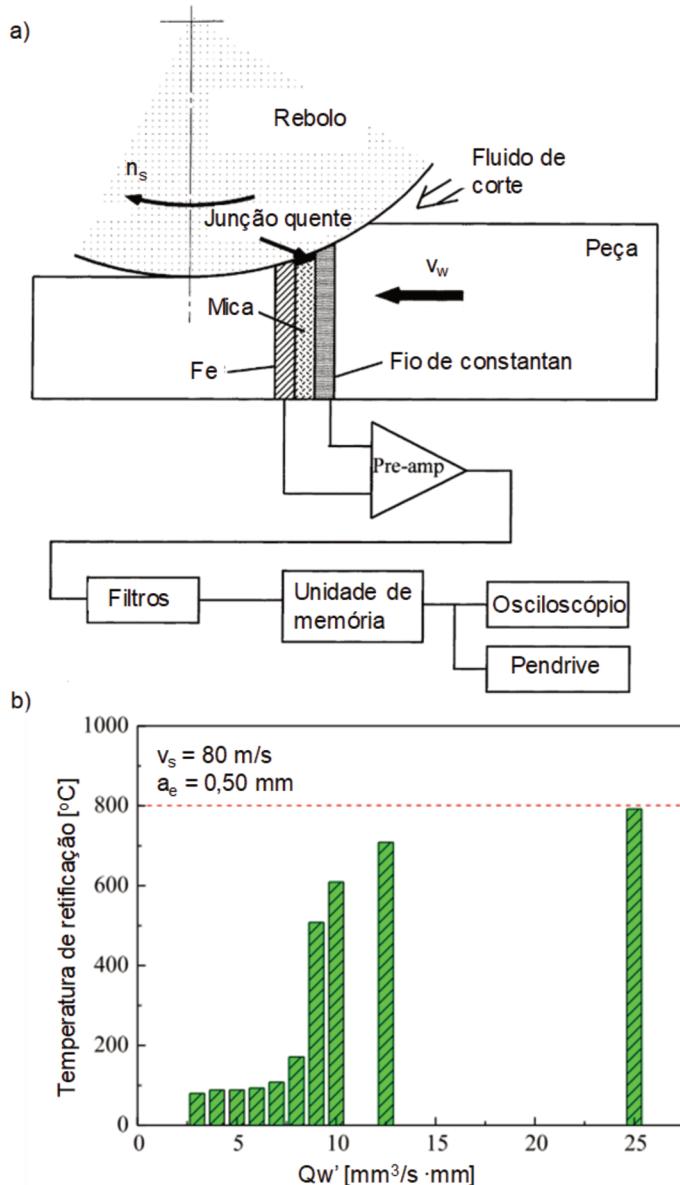


Figura 2.15 – a) Metodologia do arco entre o rebolo e a peça apresentado por Kuriyagawa et al. (2003) e b)Temperatura de retificação em função da taxa de remoção de material específico durante a retificação do Inconel 718 (CHEN et al., 2015).

2.4. Retificação de ligas à base de níquel

Segundo o site Aero Magazine (KLOTZEL, 2019), a Airbus completou em 2018 o 16º ano consecutivo de recordes de produção, ultrapassando a marca de 800 aeronaves, enquanto a Boeing superou a marca e entregou 806 aviões em 2018, superando os 763 de 2017 (CEDEÑO, 2019). Assim, o aumento constante na produção de aviões, bem como o aumento na exploração de petróleo offshore (dutos para transporte de óleo e gás) e de reatores nucleares fez com que aumentasse também a produção dos componentes fabricados

principalmente em Inconel (625 e 718) e impulsionou as operações de usinagem, principalmente de retificação.

De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2014), a alta ductilidade, resistência e dureza em altas temperatura, alta taxa de encruamento, presença de carbonetos duros na matriz, baixa estabilidade química e baixa condutividade térmica tornam as ligas de níquel excelentes para aplicações aéreas, porém dificultam na usinagem. Pusavec et al. (2014) destacaram também, em seu trabalho sobre usinagem sustentável do Inconel 718, que as propriedades desta liga que por um lado impulsionam sua aplicação, por outro tornam-se desafios durante a sua usinagem. Dentre as propriedades destacadas por eles estão: a tendência a encruamento, abrasividade da liga, baixa condutividade térmica, alta resistência mecânica e alta ductilidade. A seguir uma relação entre as principais propriedades com a retificabilidade destas ligas:

- **Alta ductilidade:** a matriz CFC das ligas de níquel possui alta ductilidade, que acarreta em uma maior área de contato cavaco-ferramenta e maior atrito entre eles (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014). O processo de retificação de materiais com características dúcteis sofre com o fenômeno do empastamento do rebolo com os cavacos gerados no processo que resultam em uma deterioração da superfície. De acordo com Sinot et al. (2006), as ligas utilizadas na indústria aeroespacial são conhecidas como materiais difíceis de retificar devido às partículas do metal, que quando são comprimidas, aderem no espaço entre os grãos, causando assim o empastamento do rebolo.

- **Resistência e dureza em alta temperatura:** como já comentado, apesar de não apresentarem uma dureza tão elevada em temperatura ambiente (quando comparada com o aço temperado por exemplo), estas ligas mantêm estas durezas em altas temperaturas (700 °C) (SPECIAL METALS, 2008). Isso faz com que seja necessária alta energia para formar o cavaco e remover o material, aumentando os esforços e a potência (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014). Patil et al. (2007) em seu estudo sobre retificabilidade do Inconel 718 comparando ao aço para rolamento obtiveram valores de força similares no primeiro passe de retificação para ambos os materiais, contudo, em temperatura ambiente a dureza do Inconel 718 é aproximadamente 30% menor.

- **Alta taxa de encruamento:** encruamento consiste no aumento da densidade de discordâncias no material por meio de deformações em temperaturas abaixo da de recristalização do material (a frio). Assim, a alta taxa de encruamento das ligas de níquel faz com que o material apresente rebarbas bastante duras (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014) e que a dureza na superfície aumente consideravelmente entre os passes de retificação, aumentando os esforços de corte e a energia específica. Patil et al. (2007) realizaram um estudo sobre monitoramento das forças de retificação do Inconel 718 com rebolos de cBN com diferentes tamanhos de grãos. Eles notaram que as forças de retificação,

assim como a energia específica, apresentaram uma tendência de aumento com o número de passes de retificação, e concluíram que o material, assim como esperado apresentou encruamento durante o processamento.

- **Presença de carbonetos na matriz:** a presença de carbonetos de elevada dureza na matriz do material torna as ligas de níquel abrasivas, o que acelera o desgaste das ferramentas utilizadas (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014), no caso da retificação, do rebolo.

- **Baixa estabilidade química:** as ligas de níquel apresentam afinidade química com a maioria das ferramentas de corte disponíveis, o que faz com que ocorra um desgaste difusivo da ferramenta e dificulta o acabamento (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

- **Condutividade térmica:** na Tabela 2.11 são mostrados os valores desta propriedade para alguns metais. Como pode ser visto, a condutividade térmica do Inconel está muito abaixo da condutividade térmica de outros metais o que dificulta o seu processamento, principalmente em termos de retificação com abrasivos convencionais, pois haverá dificuldade de dissipação de calor tanto pelo rebolo quanto pela peça e, com isso, causando elevação da temperatura na zona de corte durante a usinagem. Diferentemente do níquel puro, que apresenta condutividade térmica da ordem de 89 W/m.K, superior a do ferro puro (72 W/m.K), de acordo com Resende et al. (2009), as ligas de níquel, devido à adição de muitos elementos de liga em elevados teores, apresenta uma condutividade térmica da ordem de 9 W/m.K (~15% da condutividade térmica do aço).

Tabela 2.11 – Condutividade térmica de alguns materiais (adaptado de ÇENGEL; GHAJAR, 2012; KOMANDURI, 1982; SPECIAL METALS, 2008)

Materiais	Condutividade térmica (W/m.K)
Liga de Al (2024-T6)	875
Ouro	317
Alumínio (puro)	237
Aço ABNT 1010	63,9
Aço Inox 304	14,9
Inconel 718	11,4
Inconel 625	9,8
Ti-6Al-4V	7,3

Como já é conhecido da teoria de usinagem, a correta seleção das condições de corte determina a eficiência do processo. E mais especificamente no processo de retificação o cuidado deve ainda ser maior, pois o número de parâmetros do processo é maior e por causa da retificação ser em geral uma das últimas operações na cadeia de produtiva. Assim,

qualquer erro nesta fase poderá acarretar danos irreversíveis e prejuízos. Por isso, quando se trata de uma liga a faixa de parâmetros de corte que é indicada de forma geral para aços e ferros fundidos não se aplica. Por exemplo, os valores de penetração de trabalho empregados, Marchi et al. (2015) mostram para o aço ABNT 1020 que até o $a_e = 0,070$ mm, não houveram danos na peça, enquanto para o Inconel 718 os valores adotados são menores como mostra o trabalho de De Oliveira (2017) (0,020 mm e 0,040 mm) e de Sinha et al. (2019) (0,010, 0,015 e 0,020 mm). Considerando as peculiaridades do processo de retificação, tais como as propriedades dos abrasivos convencionais e a pequena seção do cavaco, a maior parcela do calor gerado vai para a peça e este pode determinar mudanças estruturais na superfície, por isso, existe a necessidade de utilização de meio lubri-refrigerante de maneira eficiente durante o processo (MARINESCU et al., 2007), o que torna-se ainda mais imprescindível durante a retificação de ligas de níquel.

Neste sentido, a seguir serão apresentados, em ordem cronológica, alguns dos principais trabalhos em retificação de ligas de níquel que abordaram como os parâmetros de corte e de lubri-refrigeração influenciaram nas principais variáveis de saída mais comumente empregadas. A maior parte dos trabalhos foram realizados no Inconel 718 e alguns no Inconel 600, contudo, resultados obtidos para a retificação do Inconel 625 até então não foram encontrados na literatura.

Tso (1995) conduziu um trabalho experimental de retificação plana tangencial do Inconel 718, onde foram testados três tipos de rebolos (óxido de alumínio branco, carboneto de silício verde e nitreto cúbico de boro – cBN), duas velocidades de corte (v_s), duas velocidades da peça (v_w), duas profundidades de corte (a_e) e o sentido de retificação (concordante e discordante). A partir dos resultados, o autor concluiu que a rugosidade aumentou com v_w e com a_e , como esperado, e que a rugosidade na retificação concordante foi melhor do que na discordante. O rebolo superabrasivo de cBN superou os demais em todas as variáveis, exceto no custo.

Zhong, Ramesh e Yeo (2001) realizaram retificação plana de peças de Inconel 718 e de cerâmicas com rebolos de diamante em diferentes condições de corte (dentre elas velocidades de corte que variaram entre 40 m/s até 160 m/s). Os autores concluíram que em altas velocidades de corte, porém sem avanço lateral, ambos os materiais testados apresentaram um bom acabamento, mesmo quando foram empregados elevados valores de penetração de trabalho (0,4 mm), o que os autores confirmaram por meio da avaliação da textura da peça, na qual observaram que as marcas deixadas pelos grãos abrasivos durante a passagem do rebolo, que eles relataram serem bem definidas e sem a presença de interrupções (Figura 2.16).

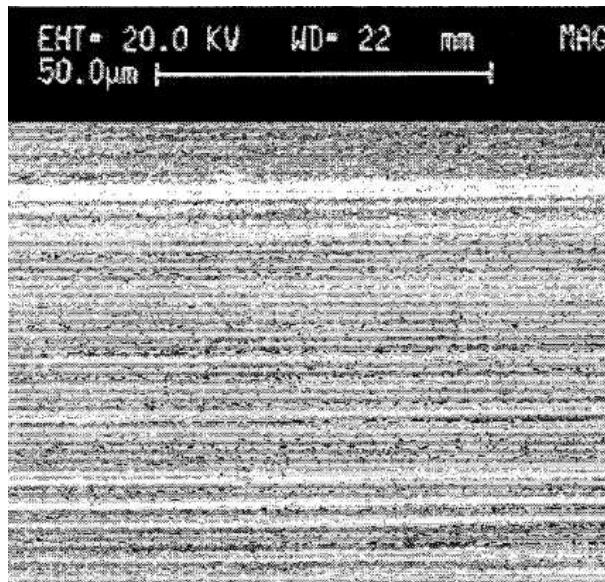


Figura 2.16 – Imagem de MEV da superfície de Inconel 718 após a retificação com rebolo de cBN utilizando $v_s = 160$ m/s, $v_w = 200$ mm/min e $a_e = 0,050$ mm (ZHONG; RAMESH; YEO, 2001).

Patil et al. (2007) também investigaram a retificabilidade do Inconel 718 com rebolo de cBN, variando a velocidade de corte de 40 m/s a 180 m/s, a velocidade da peça de 200 mm/min a 3000 mm/min e a penetração de trabalho de 0,020 mm a 0,300 mm e com diferentes atmosferas de usinagem (fluido solúvel (1:100) e óleo sem água). Os autores concluíram que, embora o Inconel 718 apresente baixa retificabilidade considerando o processo com rebolos convencionais, essa retificabilidade é razoável com rebolos de cBN (condutividade térmica aproximadamente 10x maior que o SiC) em altas velocidades. Foi observado menor empastamento do rebolo para altas velocidades de corte e uma melhor refrigeração com o óleo solúvel. Os autores apontaram ainda que o Inconel 718 requer uma maior energia específica que aços para rolamento devido à sua resistência a altas temperaturas.

Yao et al. (2013) realizaram um estudo sobre a integridade superficial do Inconel 718 durante a retificação com rebolos de óxido de alumínio monocristalino (SA) e de cBN. Os autores variaram a velocidade de corte de 15 a 35 m/s, a_e de 0,005 a 0,025 mm e v_w de 8000 a 43000 mm/min e observaram que as peças apresentaram tensões residuais de tração e queda de microdureza na superfície, conforme pode ser visto na Figura 2.17a-b. Eles ainda relataram que penetração de trabalho foi o parâmetro que exerceu o maior efeito na força de corte e na temperatura na zona de retificação, conforme pode ser visto na Figura 2.17c-d. Com o aumento da penetração de trabalho, aumenta-se a espessura de corte equivalente e, consequentemente, mais material da peça é deformado. Com isso o atrito nas interfaces cavaco/peça, cavaco/abrasivo e peça/abrasivo se torna mais acentuado, o que resulta em aumento das forças de corte e elevação da temperatura na zona de corte. O melhor

acabamento ($R_a = 0,11 \mu\text{m}$) foi obtido usando o rebolo de óxido de alumínio monocristalino ($a_e = 0,005 \text{ mm}$, $v_w = 16000 \text{ mm/min}$ e $v_s = 25 \text{ m/s}$), condições que os autores consideram como sendo a mais adequada para retificação de Inconel 718.

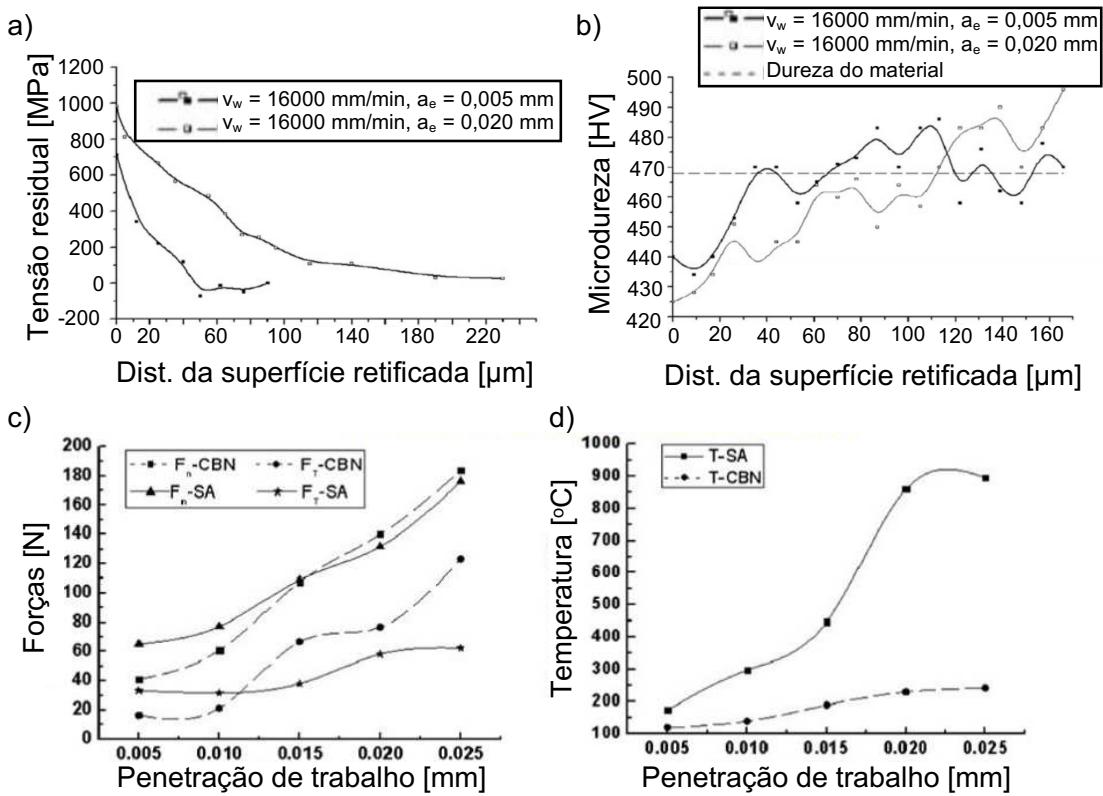


Figura 2.17 – Resultados apresentados no trabalho de Yao et al. (2013), a) Tensão residual em função da distância da superfície; b) Microdureza abaixo da superfície; c) Forças de retificação em função da penetração de trabalho e d) Temperatura em função da penetração de trabalho.

Mandal et al. (2014) estudaram a retificabilidade do Inconel 600, com foco na técnica de aplicação de fluido de corte. Os autores utilizaram v_s de 30 m/s, a_e de 0,010 mm e v_w de 7000 mm/min. Os autores apresentaram uma técnica de aplicação de fluido com o uso de uma barreira pneumática pra auxiliar e os resultados mostraram uma melhora no acabamento da superfície, contudo os valores de R_a obtidos ainda ficaram acima de 1 μm , conforme pode ser observado na Figura 2.18.

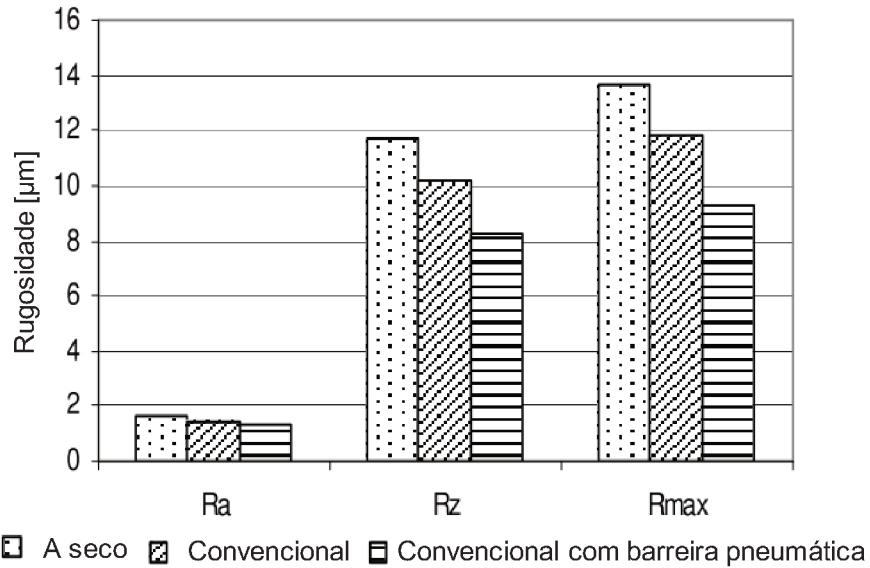


Figura 2.18 – Valores de rugosidade obtidas no Inconel 600 obtidos após a retificação com diferentes condições de lubri-refrigeração (MANDAL et al., 2014).

Alguns dos danos provenientes do processo de retificação em ligas também vêm sendo relatados na literatura, como mostra o trabalho de Zeng et al. (2015), onde os autores observaram a presença de trincas nas peças de GH4169 (propriedades e composição similar ao Inconel 718) após a retificação com rebolo de óxido de alumínio utilizando a_e de 0,04 mm, conforme mostrado na Figura 2.19. As trincas, assim como perda da microdureza, tensões residuais de tração e distorções são as alterações mais comuns em peças retificadas provenientes da elevação do calor e temperatura de usinagem (EZUGWU; TANG, 1995).

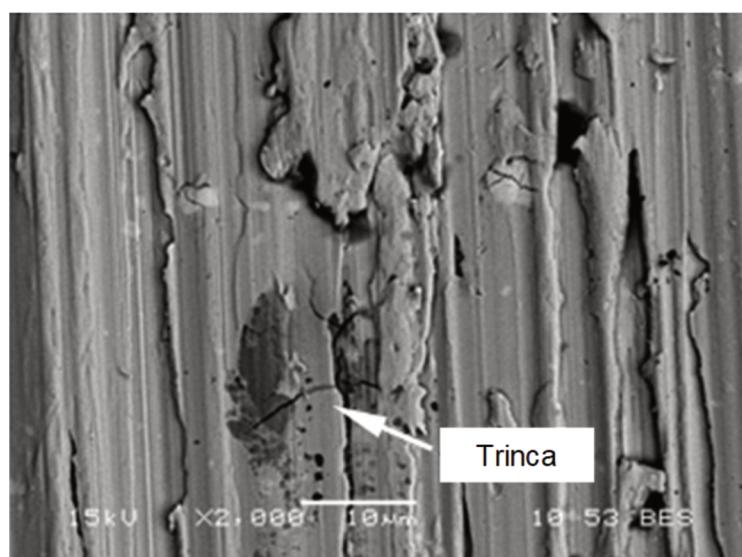


Figura 2.19 – Imagem de microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície de liga de níquel (GH4169) retificada com $a_e = 0,04$ mm (ZENG et al., 2015).

Chen et al. (2015) em seu trabalho sobre retificação de Inconel 718 com rebolo de cBN, constataram a tendência de a energia específica de retificação diminuir com o aumento na taxa de remoção de material específica, assim como ocorre na retificação de materiais ferrosos. Os autores utilizaram $v_s = 80$ m/s e $a_e = 0,5$ mm e e velocidades da peça v_w entre 60 e 3000 mm/min.

Sinha et al. (2016) avaliaram a integridade da superfície de Inconel 718 com diferentes materiais de rebolos (SiC e Al_2O_3) e nos seus resultados observaram que várias superfícies apresentavam queima de retífica, o que foi evidenciado pela diferença entre as colorações da superfície de uma peça com queima e uma peça sem queima (Figura 2.20). Estes mesmos autores, a fim de confirmar que a com a coloração diferente (Figura 2.20a) de fato houve queima, dano de origem térmica, utilizaram a técnica de espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDX) e observaram o aumento na concentração de oxigênio na superfície com queima, caracterizando a formação de óxidos na superfície, conforme mostra a Figura 2.21.

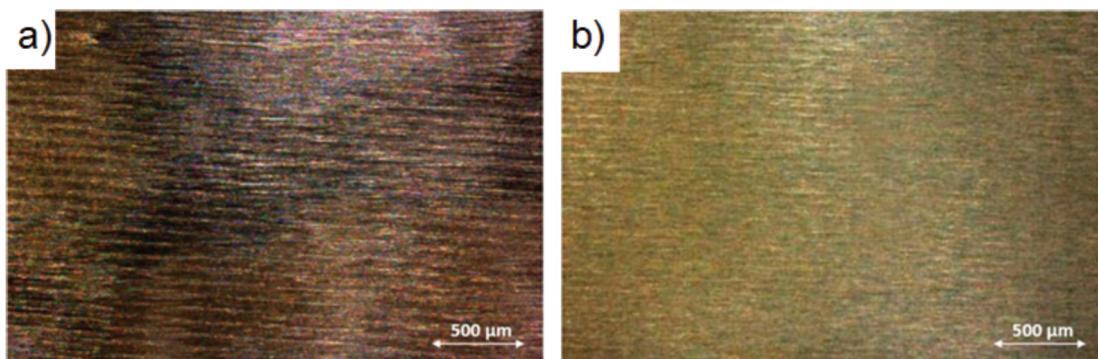


Figura 2.20 – Imagens de microscópio óptico das superfícies de Inconel 718 após a retificação com rebolo de SiC. a) Superfície com queima e b) Superfície sem queima (SINHA et al., 2016).

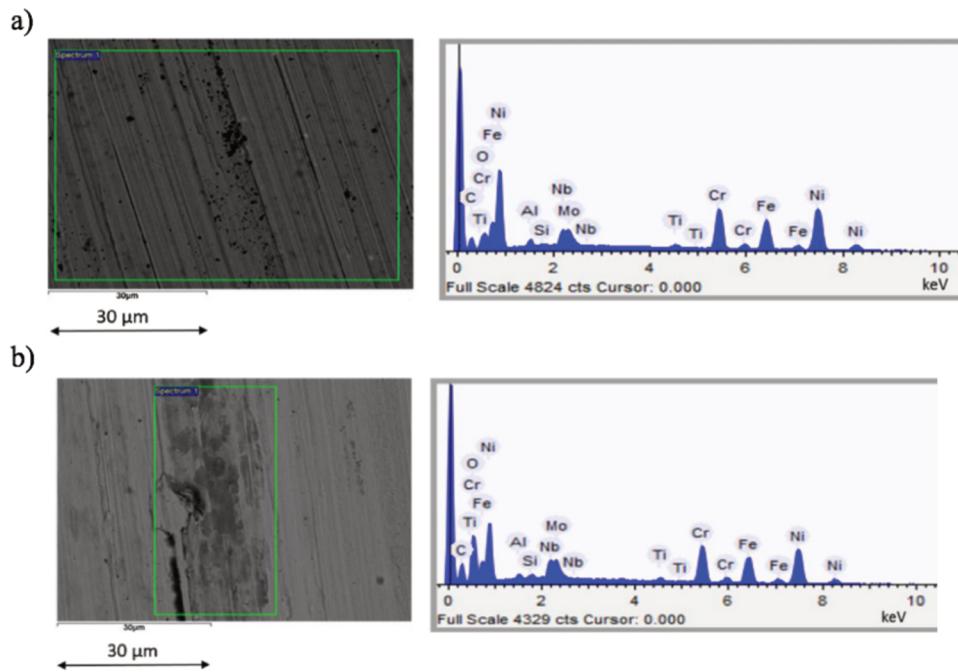


Figura 2.21 – Analise EDX das superfícies de Inconel 718 após a retificação com rebolo de SiC: a) sem queima e b) com queima (SINHA et al., 2016).

Ainda no mesmo trabalho, Sinha et al. (2016) observaram que a rugosidade (R_a) obtida para a superfície com queima foi sempre maior que a obtida para a superfície sem queima. Eles observaram ainda que, independente da presença de queima, a velocidade de corte apresentou maior influência nos valores de rugosidade, sendo maior quando empregado o maior valor de v_w (15 m/min). Ainda na Figura 2.22, pode ser observado que os valores de rugosidade (R_a) obtidos para o Inconel 718 variaram entre 0,4 e 1,0 μm , independente da ocorrência de queima na superfície.

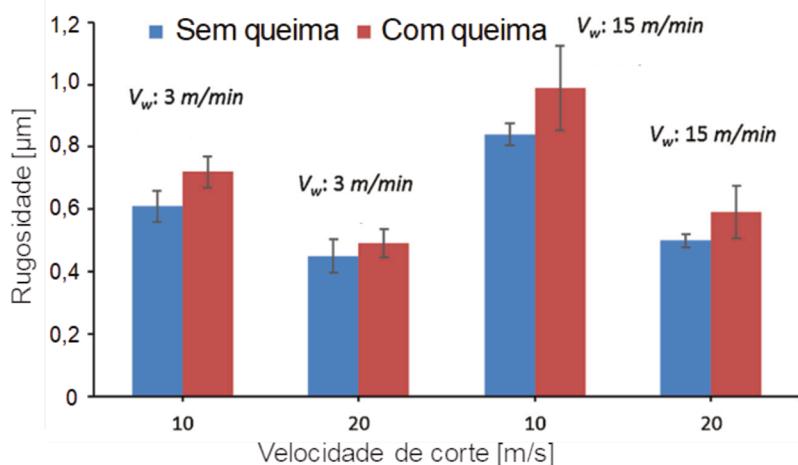


Figura 2.22 – Valores de rugosidade do Inconel 718 pós a retificação com $a_e = 0,015 \text{ mm}$ em diferentes condições de corte, com e sem a presença de queima (SINHA et al., 2016).

Grande parte das pesquisas em retificação de Inconel ocorre em técnicas e condições de lubri-refrigeração, sendo que diversas delas já foram testadas. Atualmente, trabalhos vêm sendo realizados buscando a aplicação de nanopartículas dispersas no fluido de corte a fim de melhorar as propriedades do mesmo e otimizar a lubri-refrigeração. Como exemplo, pode-se citar o trabalho de retificação de Inconel 718 desenvolvido por Zhang et al. (2016) no qual foram empregados nanotubos de carbono (CNT) e nanopartículas de bissulfeto de molibdênio (MoS_2) dispersos em diferentes concentrações em um fluido base e aplicados via técnica MQL a uma vazão de 50 ml/h. Os autores utilizaram as seguintes condições de corte $v_s = 30$ m/s, $a_e = 0,01$ mm e $v_w = 3000$ mm/min e avaliaram, dentre outros parâmetros, a rugosidade Ra . Eles observaram que a mistura de nanotubos de carbono com bissulfeto de molibdênio apresentou o melhor resultado e que a rugosidade aumentou com a concentração das partículas, sendo que os melhores resultados foram obtidos para a concentração de 2% em peso, conforme pode ser visto na Figura 2.23. Ainda nesta figura, pode ser observado que utilizando a mistura de nanopartículas, com a concentração de 2%, foi obtido um valor de rugosidade (Ra) de 0,284 μm para o Inconel 718.

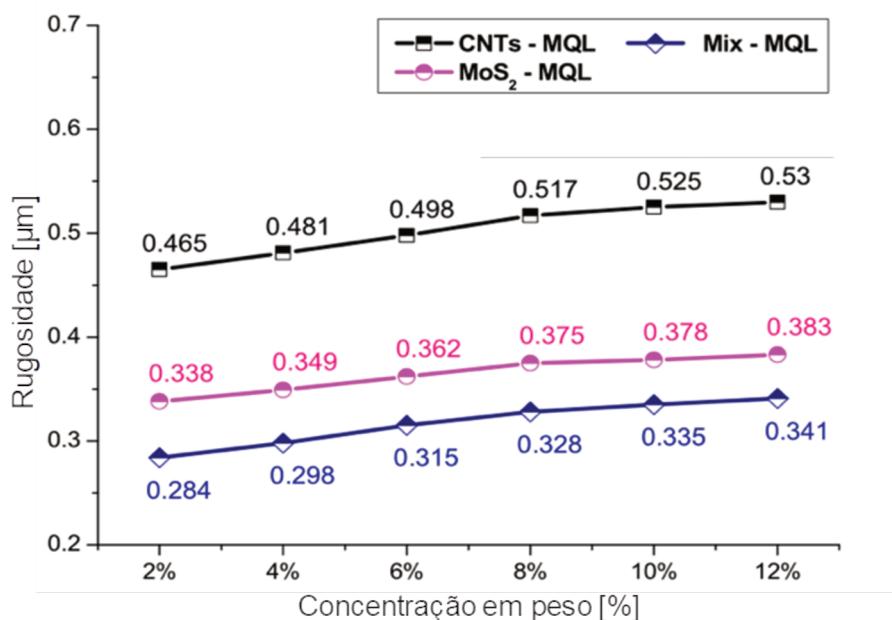


Figura 2.23 – Rugosidade Ra do Inconel 718 em função da concentração de nano partículas (ZHANG et al., 2016).

Em outro trabalho recente, Pavan et al. (2017) empregaram diferentes concentrações de nanoplaças de grafeno (0,1, 0,2, 0,3, 0,4 e 0,5% em peso) dispersas em fluido de corte durante a retificação de Inconel 718. As nano placas de grafeno foram dispersas em um fluido emulsionável (5% em água) e aplicados via MQL com vazão de 150 ml/h nas seguintes condições de corte: v_s de 25 m/s, v_w de 1,5 m/min e a_e de 0,025 mm. Os resultados foram

comparados com a retificação a seco e com o MQL convencional (sem nano partículas) e os autores notaram que a concentração de 0,3% de grafeno resultou nos melhores resultados de rugosidade superficial para o Inconel 718 e menores forças de retificação. A maior área específica ($750 \text{ mm}^2/\text{g}$) resultou em melhores resultados de rugosidade (Ra) e força tangencial. Os valores de força tangencial variaram entre 115 e 170 N, enquanto a rugosidade (Ra) virou de 0,4 a 0,9 μm .

Recentemente, De Oliveira (2017) realizou um estudo sobre a influência da concentração de multicamadas de grafeno dispersas em fluido de corte aplicado via a técnica da mínima quantidade de lubrificante (MQL) na integridade da superfície de Inconel 718 envelhecido e na potência de retificação com rebolo de SiC e dois valores de penetração de trabalho (0,020 mm e 0,040 mm). A autora constatou que o menor valor de rugosidade (Ra = 0,25 μm) foi obtido após a usinagem com a técnica MQL com grafeno na concentração intermediária (0,05 % em peso) e na condição de corte mais severa, com $a_e = 0,040 \text{ mm}$. Além disso, a autora relatou que houve micro trincas em todas as superfícies retificadas, mas que na peça cuja condição que foi encontrada a menor rugosidade, o número de trincas foi reduzido. A autora atribuiu o melhor resultado de rugosidade e redução das trincas à presença do grafeno no fluido de corte que favoreceu as condições tribológicas.

Alguns trabalhos envolvendo outros tipos de nano partículas também já estão disponíveis na literatura, como por exemplo, nos resultados do trabalho de Sinha et al. (2017), em que os autores utilizaram nano partículas de prata (Ag) e óxido de zinco (ZnO) dispersas em água deionizada e aplicada via técnica MQL durante a retificação do Inconel 718 e compararam os resultados com a retificação a seco. As condições de corte empregadas foram: $v_s = 18 \text{ m/s}$, $a_e = 0,010 \text{ mm}$, $v_w = 6000 \text{ mm/min}$ e rebolo de óxido de alumino (granulometria #80). Os autores observaram que menores valores de rugosidade foram obtidos para a condição a seco (Ra = 0,17 μm após 40 passes), seguido pela técnica MQL com Ag (Ra = 0,38 μm) e pela técnica MQL com ZnO (Ra = 0,42 μm). No entanto, as superfícies que foram retificadas na condição a seco apresentaram danos, enquanto as superfícies retificadas com a técnica MQL com nanopartículas dispersas no fluido não apresentaram danos.

Sinha, Ghosh e Paruchuri (2017) realizaram testes experimentais para determinar a energia específica da retificação do Inconel 718 e empregando apenas um único grão abrasivo de alumina em diferentes condições de corte ($v_s = 5, 10 \text{ e } 15 \text{ m/s}$, $a_e = 0,005, 0,010 \text{ e } 0,015 \text{ mm}$ e $v_w = 6000, 9000 \text{ e } 12000 \text{ mm/min}$). Alguns dos resultados obtidos por eles são mostrados na Figura 2.24. Eles relataram que o material da peça sofreu intensa deformação plástica (Figura 2.24a), além de abaulamento, fluxo lateral de material junto com o acúmulo de material (Figura 2.24b), aderência do cavaco na superfície da peça (Figura 2.24c) e fratura do abrasivo (Figura 2.24d). Os autores atribuíram o abaulamento do material e o fluxo lateral à compressão da camada superior da peça ao intenso campo de tensão induzido durante a

retificação. Eles atribuíram a aderência dos cavacos à natureza de forte adesão do Inconel 718, particularmente em temperaturas mais altas, enquanto a fratura de partículas de alumina se mostrou um fenômeno recorrente no caso da retificação do Inconel 718.

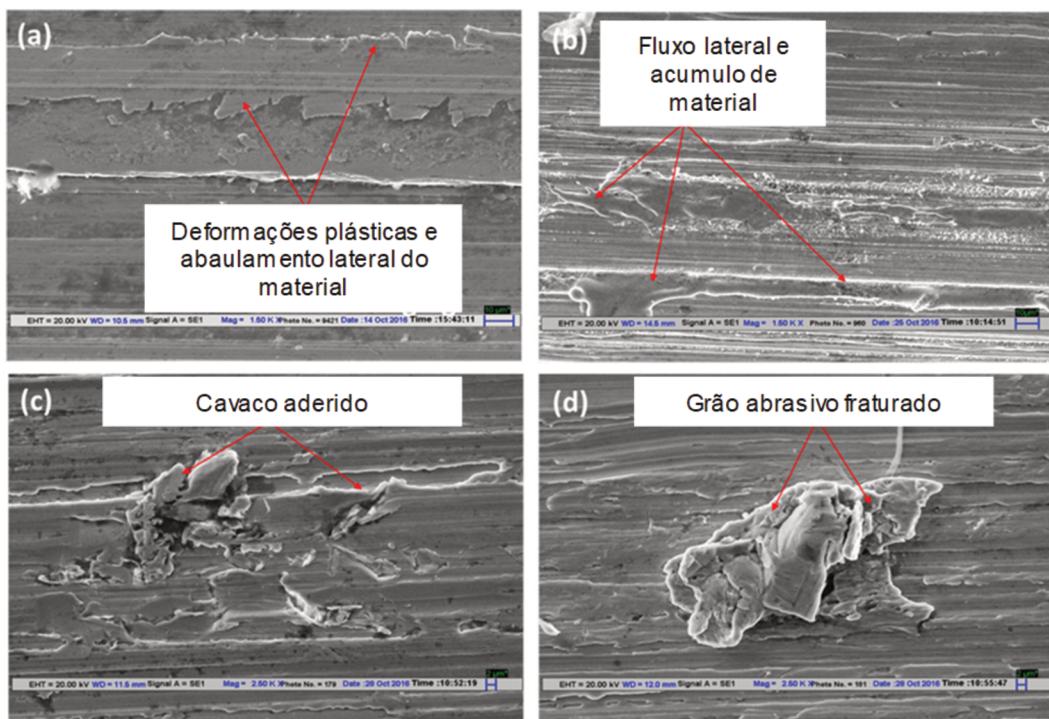


Figura 2.24 – Imagens de MEV das superfícies de Inconel 718 após a retificação com um único abrasivo de Al_2O_3 (SINHA; GHOSH; PARUCHURI, 2017).

Biswas et al. (2018) realizaram um trabalho sobre a retificação do Inconel 600 com diferentes valores de penetração de trabalho (0,010, 0,020 e 0,030 mm), $v_s = 30 \text{ m/s}$, $v_w = 7500 \text{ mm/min}$ e com diferentes atmosferas de usinagem (na presença de óleo solúvel (1:20) com uma vazão de 1,5 L/min e a seco). Os autores observaram que o empastamento do rebolo aumentou com a penetração de trabalho, independente do uso de lubri-refrigeração e registraram este problema por meio de fotos de seções da superfície de corte do rebolo (Figura 2.25a-d).

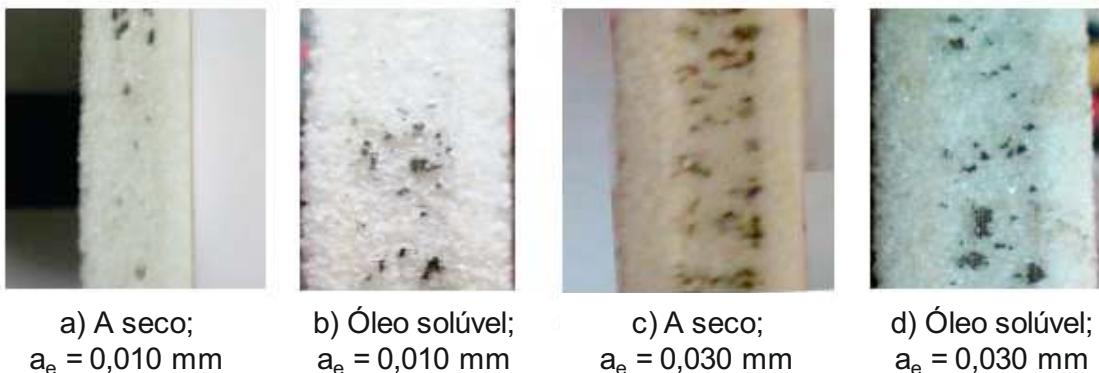


Figura 2.25 – Imagens da superfície de corte do rebolo de alumina com evidência de empastamento após a retificação de Inconel 600 em diferentes condições operacionais (BISWAS et al., 2018).

Sinha et al. (2019) testaram diferentes atmosferas de corte na retificação de Inconel 718 e constataram que os menores valores de forças de usinagem e de rugosidade foram obtidos com a aplicação de nitrogênio líquido (LN_2) e em relação a retificação com as outras atmosferas testadas: a seco, com a técnica convencional e com a técnica MQL. Os autores ainda notaram que o uso do nitrogênio líquido auxiliou na prevenção de danos na superfície retificada e diminuiu o empastamento do rebolo. Os autores relataram que o nitrogênio líquido formou um filme sobre a superfície de corte do rebolo e que reduziu o coeficiente de atrito entre o rebolo e a peça. Além disso a presença do nitrogênio auxiliou na retenção das arestas dos abrasivos por um tempo mais longo.

CAPÍTULO III

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo estão apresentados os materiais e equipamentos utilizados para o desenvolvimento deste trabalho, bem como a metodologia utilizada para a execução dos experimentos e os equipamentos e parâmetros utilizados para a medição das variáveis de saída. Essas informações estão apresentadas no organograma da Figura 3.1.

Primeiramente, foram definidos e mantidos constantes para todos os experimentos: o equipamento (máquina-ferramenta), a atmosfera lubri-refrigerante e as condições de dressagem.

A primeira etapa consistiu na utilização de um experimento fatorial fracionário para identificação da influência dos principais parâmetros de entrada (sentido de retificação, granulometria do rebolo, velocidade de corte, velocidade da peça e penetração de trabalho) sobre as principais variáveis de saída (rugosidade, imagens da superfície via MEV, forças de retificação e energia específica) do processo de retificação do Inconel 625.

A segunda etapa consistiu em realizar os ensaios de retificação com o Inconel 625 e com o Inconel 718 a fim de comparar a retificabilidade das duas ligas de níquel. Para tanto, foram realizados os testes de fator único a fim de verificar o comportamento das principais variáveis de saída (rugosidade, imagens da superfície via MEV, microdureza na superfície retificada e abaixo da mesma, forças de retificação, energia específica e temperatura na zona de retificação) para a variação de cada um dos parâmetros de entrada (granulometria do rebolo, velocidade de corte, penetração de trabalho e velocidade da peça).

Nas próximas seções estão caracterizados os materiais utilizados neste trabalho, a metodologia utilizada nas duas etapas experimentais, bem como os equipamentos e parâmetros utilizados para a medição das variáveis de saída.

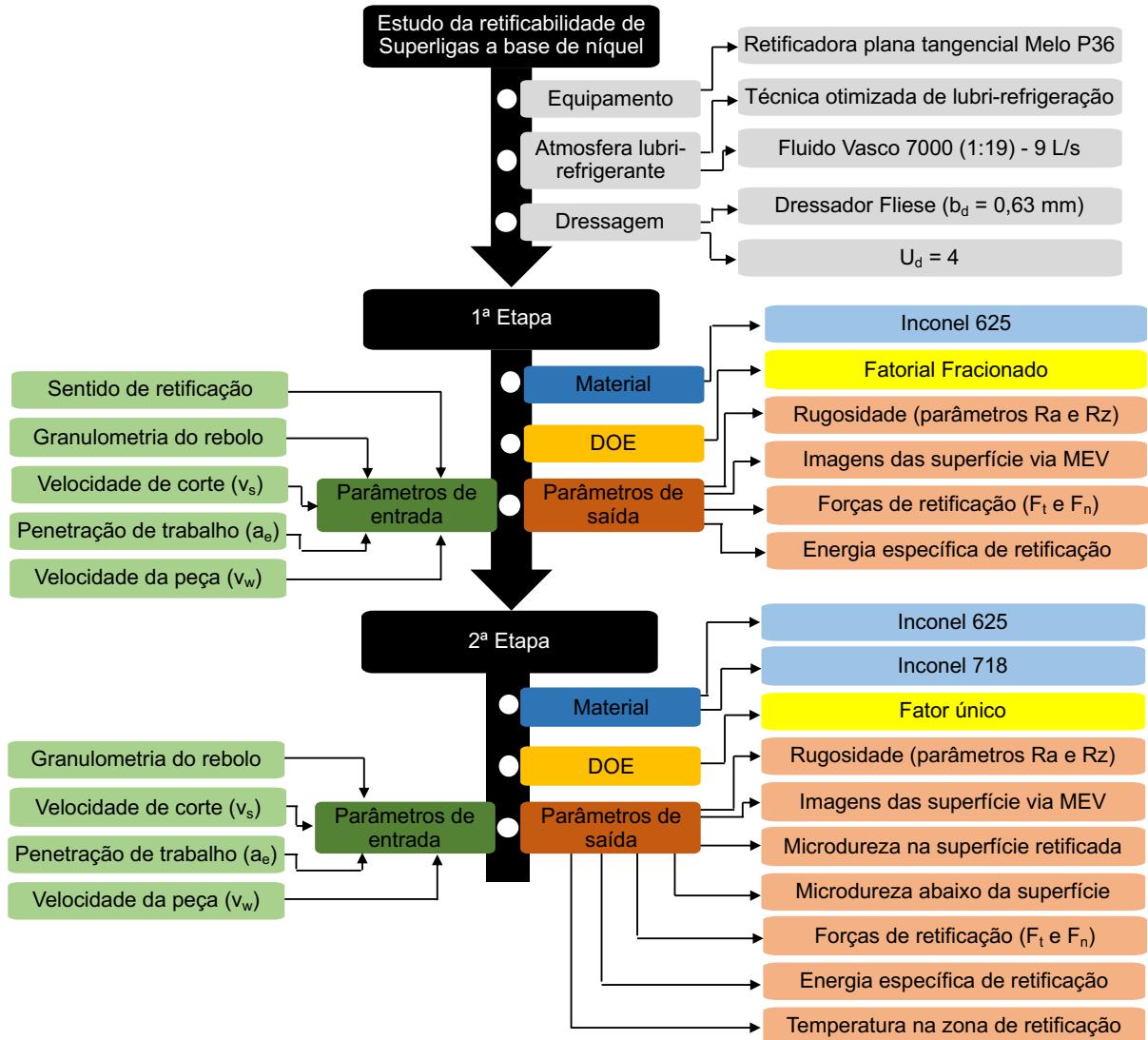


Figura 3.1 – Organograma das etapas para o desenvolvimento deste trabalho.

3.1. Materiais e equipamentos utilizados

Os materiais utilizados no trabalho foram as ligas à base de níquel Inconel 625 e Inconel 718. Inicialmente as amostras foram usinadas por eletro erosão a fio e na sequência elas passaram por lixamento e polimento. Em seguida foram realizadas as medições de microdureza, resultando nos seguintes valores $294 \pm 10 \text{ HV}_{0,2}$ (Inconel 625) e $513 \pm 10 \text{ HV}_{0,5}$ (Inconel 718).

Além disso foi feita a caracterização microestrutural das amostras. A análise metalográfica do Inconel 625 foi realizada após um ataque químico na amostra do material com *aqua regia* por aproximadamente 15 s, a micrografia obtida está apresentada na

Figura 3.2a, onde podem ser observados os grãos e contornos de grão característicos do material. Para isso foram utilizados um microscópio ótico Olympus, modelo BX51, e um microscópio eletrônico de varredura (MEV) da marca TESCAN, modelo VEGA 3. Também foi

utilizado o equipamento de espectroscopia de energia dispersiva (EDS) da marca Oxford, modelo X-act.

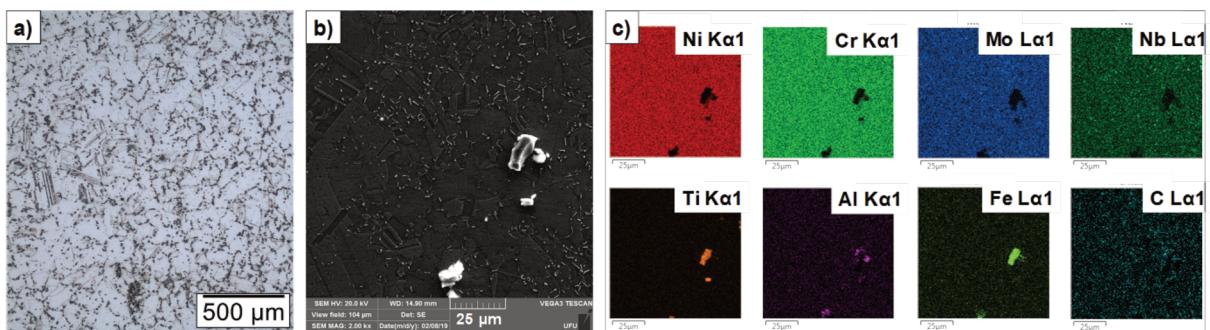


Figura 3.2 – Microestrutura do Inconel 625 após ataque com *aqua regia* e observada em diferentes equipamentos: a) microscopia ótica da amostra atacada mostrando os grãos e contornos de grão, b) imagem de MEV (Elétron secundário) e c) mapa de análise de EDS identificando os principais elementos.

Na

Figura 3.2b pode ser observada a presença de uma segunda fase precipitada na matriz. Do mapa de EDS (

Figura 3.2c) podem ser observados os precipitados que são compostos principalmente por Titânio (Ti), Ferro (Fe) e Alumínio (Al). De acordo com Bradley (1988), esta é uma fase cúbica (MN) insolúvel em temperaturas abaixo do ponto de fusão que apresentam forma retangular. A matriz, como esperado, é composta pela fase γ (CFC).

A composição química e microestrutura do Inconel 625 estão apresentadas, respectivamente, na Tabela 3.1 e

Figura 3.2, enquanto que as mesmas propriedades do Inconel 718 estão apresentadas, respectivamente, na Tabela 3.2 e Figura 3.3. Na Tabela 3.1, assim como na Tabela 3.2, estão apresentadas a composição química dos materiais de acordo com o resultado da análise do mapa de EDS realizado na região apresentadas na

Figura 3.2b e na Figura 3.3b, respectivamente. Os mapas de EDS para o Inconel 625 e Inconel 718 estão apresentados na

Figura 3.2c e na Figura 3.3c, respectivamente.

Tabela 3.1 – Composição química do Inconel 625 de acordo com o mapa de EDS.

Elementos	Ni	Cr	Mo	Nb	Ti	Al	Fe	C
% em peso	65,8	24,2	8,0	3,5	0,5	0,2	0,9	0,7

Em relação à análise metalográfica do Inconel 718, ela foi realizada após um ataque químico na amostra do material com o reagente Kalling's N.2 por aproximadamente 10 s e a imagem adquirida está apresentada na Figura 3.3a. Desta figura podem ser observados os grãos e contornos de grão característicos do material. A segunda fase precipitada (composta por carbonetos) com uma orientação coerente, originada do processo de envelhecimento, também são vistas nesta figura. No mapa de EDS, Figura 3.3c, é mostrada a composição dos precipitados orientados (Thellaputta; Chandra, Rao, 2017) mostrados na Figura 3.3b, como sendo, principalmente, nióbio, molibdênio e Titânio, circundados pela matriz gama (γ) (Li; Zeng; Chen, 2006; Thellaputta; Chandra; Rao, 2017), composta principalmente por níquel, cromo e ferro.

Tabela 3.2 – Composição química do Inconel 718 de acordo com o mapa de EDS.

Elementos	Ni	Cr	Fe	Nb	Mo	Ti	Al	Co	C
% em peso	52,2	19,2	17,8	6,71	2,65	1,25	-	-	-

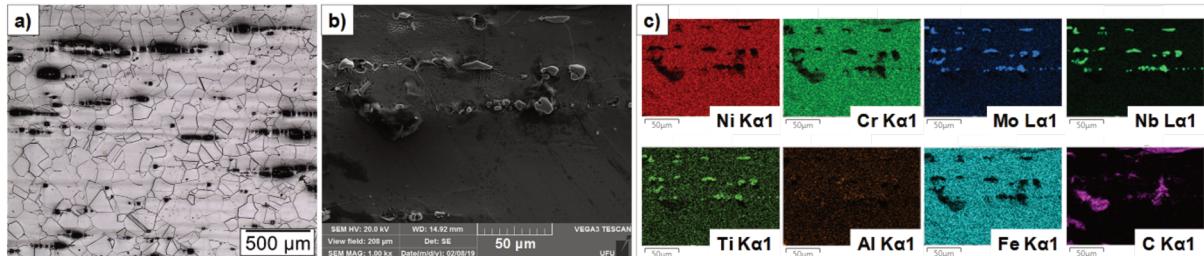


Figura 3.3 – Microestrutura do Inconel 718 após ataque com Kalling's N.2 e observada em diferentes equipamentos: a) microscopia ótica da amostra atacada mostrando os grãos e contornos de grão, b) imagem de MEV (Elétron secundário) e c) mapa de análise de EDS identificando os principais elementos.

As propriedades físicas dos materiais (Inconel 625 e Inconel 718), assim como as suas propriedades mecânicas, estão apresentadas na Tabela 3.3 e na Tabela 3.4, respectivamente.

Tabela 3.3 – Algumas propriedades físicas do Inconel 625 e do Inconel 718 (SPECIAL METALS, 2008).

Material	Intervalo de fusão (°C)	Densidade (g/cm ³)	Calor específico (J/kg.°C)	Coeficiente de expansão (μm/m.K)	Condutividade térmica (W/m.K)
Inconel 625	1290 - 1350	8,44	410	12,8	9,8
Inconel 718	1260 - 1336	8,19	435	13,0	11,4

Na Tabela 3.4, pode-se ainda observar que ambas as ligas (Inconel 625 e Inconel 718) apresentam a característica de manter suas respectivas (resistência) a altas temperaturas, com já era esperado segundo o que é relatado na literatura específica (BRADLEY, 1988).

Tabela 3.4 – Principais propriedades mecânicas do Inconel 625 e do Inconel 718 (BRADLEY, 1988).

Material	Temperatura (°C)	Resistência à tração (MPa)	Tensão de escoamento (MPa)	Alongamento (%)
Inconel 625	21	855	490	50
	540	745	405	50
	650	710	420	35
	760	505	420	42
	870	285	475	125
Inconel 718	21	1430	1190	21
	540	1280	1060	18
	650	1230	1020	19
	760	950	740	25
	870	340	330	88

Para a realização dos testes de usinagem foi utilizada uma retificadora plana tangencial semi-automática, do fabricante MELLO, modelo P36, com rotação máxima do rebolo igual a 2400 rpm (Figura 3.4). Essa máquina ferramenta possui uma potência de 2,2 kW e resolução no eixo que contém o nônio que regula a penetração do rebolo igual a 5 µm. Ela também foi equipada com um inversor de frequência que possibilitou a variação na rotação do rebolo.



Figura 3.4 – Máquina com o *setup* utilizado para a realização dos experimentos.

Durante os testes foram utilizados três (3) rebolos convencionais de carbeto de silício verde (39C) de especificação 39C60KVK, 39C80KVK e 39C100KVK, com as respectivas granulometrias mesh: #60, #80 e #100. Todos os rebolos apresentavam as mesmas dimensões: 254,0 mm de diâmetro externo, 25,4 mm de espessura e 76,0 mm de diâmetro interno.

O dressador selecionado para realização da operação de dressagem foi do tipo fliese; pela razão de este permitir a largura de dressagem (b_d) constante ao longo da operação de dressagem e com isso reduzir a frequência de monitoramento do desgaste do dressador e maior produtividade (SAINT-GOBAIN, 2015b).

Todos os testes de usinagem foram realizados com o mesmo fluido de corte, assim como para a operação de dressagem. O fluido de corte é de base vegetal e semissintético, Vasco 7000, fabricado pela empresa Blaser Swisslube, diluído em água na proporção de 1:19 (5 %). Após a diluição, foi realizada uma caracterização do respectivo fluido quanto às viscosidades (dinâmica e cinemática) e a massa específica em quatro (4) temperaturas (25°C, 40°C, 55°C e 70°C). Foram realizadas quatro (4) medições destas propriedades para cada temperatura e em seguida foi calculada a média e desvio padrão. Para a realização destas medidas, foi utilizado o viscosímetro da marca Anton Pear, modelo SVM 3000 e os resultados estão apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Viscosidades e massa específica do fluido de corte utilizado (semissintético 1:19 em água).

Temperatura (°C)	Viscosidade dinâmica (mPa.s)	Viscosidade cinemática (mm ² /s)	Massa específica (g/cm ³)
25	1,0804	1,0835	0,9971
40	0,8162	0,8233	0,9915
55	0,6342	0,6463	0,9846
70	0,5109	0,5233	0,9764

Também foram medidas a condutividade e difusividade térmica do fluido de corte com o auxílio de um medidor da marca Linseis, modelo THB-1. Foram realizadas 10 medidas na temperatura de 25 °C e calculada a média e desvio padrão, conforme mostram os resultados apresentados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Condutividade e difusividade térmica do Fluido de corte utilizado (semissintético 1:19 em água).

Medição	Condutividade térmica (W/m.K)	Difusividade térmica (mm ² /s)
1	0,3137	0,4689
2	0,3144	0,4721
3	0,3137	0,4676
4	0,3134	0,4679
5	0,3139	0,4717
6	0,3135	0,4687
7	0,3135	0,4675
8	0,3136	0,4688
9	0,3134	0,4680
10	0,3137	0,4680
Média	0,3137	0,4689
Desvio Padrão	0,00032	0,00175

Para os ensaios de retificação e de dressagem o fluido de corte foi aplicado via a técnica convencional (abundância) a vazão de 9 L/min, a qual foi mantida constante durante todos os testes e operação de dressagem. Um bocal foi especialmente projetado de acordo com a geometria proposta por Webster et al. (1995) e fabricado em Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) pelo processo conhecido como FDM (Modelagem por Deposição de Fundido do inglês

Fused Deposition Modelling), e revestido com uma camada de resina para laminação (poliéster) a fim de vedar sua porosidade (Figura 3.5). Por esta razão, neste trabalho, foi adotado o termo “técnica de lubri-refrigeração otimizada” para fazer a referência a técnica convencional de aplicação de fluido com bocal de geometria otimizada.

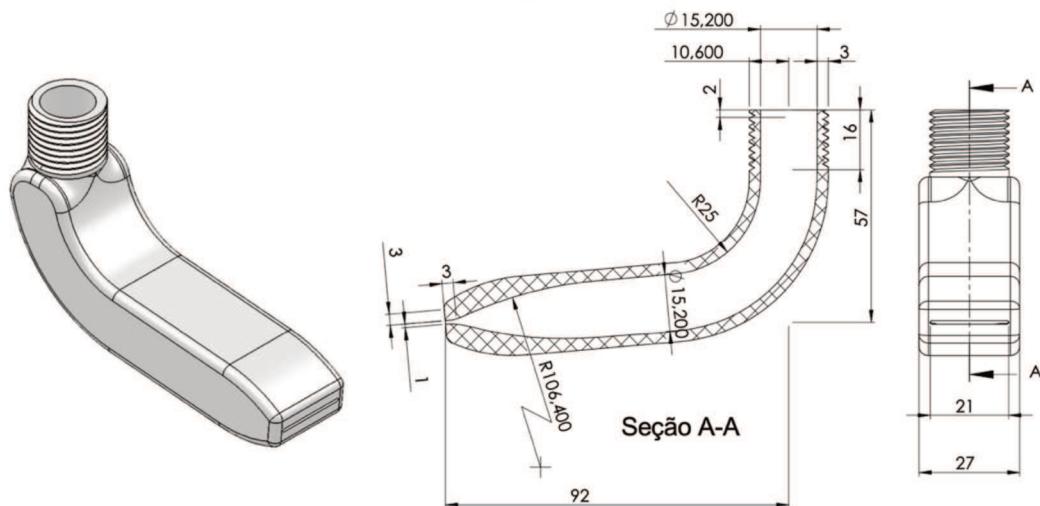


Figura 3.5 – Bocal otimizado para aplicação do fluido de corte (próprio autor).

3.2. Metodologia utilizada

As amostras das ligas de níquel foram cortadas por eletroerosão a fio (WEDM) de modo que ficaram com as seguintes dimensões: 40 mm de comprimento x 7 mm de espessura x 17 mm de altura (Figura 3.6). As superfícies retificadas foram as de 40 mm x 7 mm, exceto nos testes onde se mediu temperatura em que foram retificadas as superfícies de 17 mm x 7 mm de duas amostras que foram montadas paralelamente em uma morsa.

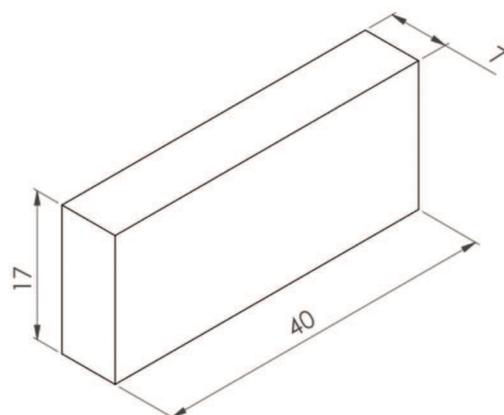


Figura 3.6 – Dimensões de amostra de Inconel 625 e de Inconel 718 utilizada para os testes de retificação (dimensões em mm).

Para os ensaios de retificação, cada amostra foi previamente preparada na mesma retificadora com condições de corte consideradas mais brandas possível para esta máquina: penetração de trabalho, $a_e = 5 \mu\text{m}$ ou $0,005 \text{ mm}$, velocidade da mesa, $v_w = 7000 \text{ mm/min}$, velocidade de corte, $v_s = 30 \text{ m/s}$ e com o mesmo fluido de corte e técnica de aplicação utilizados nos ensaios definitivos. Com isso, procurou-se garantir o menor desvio de paralelismo possível entre as suas faces inferior e superior e, consequentemente entre a face superior (que seria retificada) e a mesa da máquina. Assim, após preparadas as amostras apresentaram uma rugosidade inicial (R_a) de $0,46 \pm 0,05 \mu\text{m}$ e $0,39 \pm 0,02 \mu\text{m}$, para os materiais Inconel 625 e Inconel 718, respectivamente.

A operação de dressagem do rebolo foi realizada sempre antes de cada teste, utilizando uma rotação do rebolo constante de 2400 rpm , grau de recobrimento (U_d) igual a 4 e profundidade de dressagem (a_d) igual a $20 \mu\text{m}$, condição que assegura a qualidade de semi-acabamento para retificação (MARINESCU et al., 2007). Para assegurar o $U_d = 4$, foi medida a largura efetiva do dressador (b_d), utilizando um estéreo-microscópio da marca Olympus, modelo SZ 61, e o resultado está disposto na Figura 3.7.

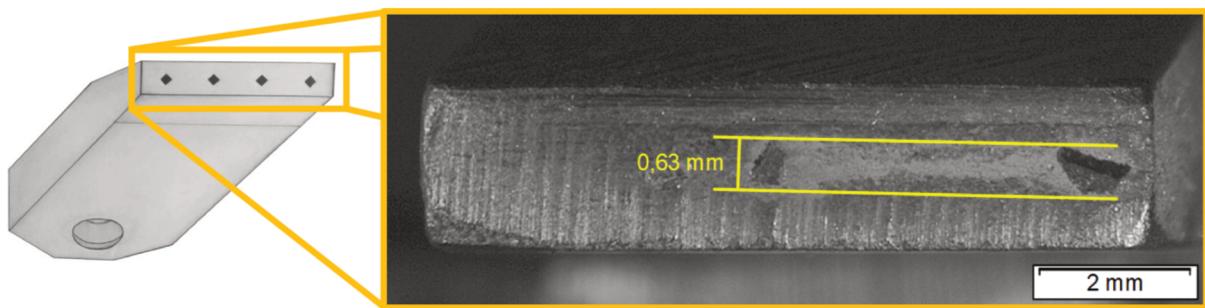


Figura 3.7 – Vista do topo do dressador do tipo fliese utilizado no preparo dos rebolos para os testes de retificação.

Por meio da Figura 3.7 obteve-se o valor da largura efetiva do dressador (b_d) que foi igual a $0,63 \text{ mm}$. Pela equação (7) calcula-se o passo de dressagem (S_d), que foi de $0,1575 \text{ mm}$. Na sequência, por meio da equação (6), foi possível determinar a velocidade de dressagem (v_{fd}) que resultou em 378 mm/min ($6,3 \text{ mm/s}$).

Todos os ensaios de retificação foram realizados de forma que uma única passagem do rebolo em cheio sobre a peça fosse realizada, sem que ocorresse o retorno do rebolo (*sparkout* ou centelhamento) a fim de evitar a influência deste no processo.

Os ensaios de retificação foram realizados em duas etapas. A primeira consistiu em levantar informações sobre o processo de retificação do Inconel 625, que até a elaboração deste trabalho, eram praticamente escassas. A segunda etapa consistiu em realizar ensaios de retificação nas duas ligas, Inconel 625 e o Inconel 718, e poder comparar os resultados

entre elas, consequentemente determinar a retificabilidade para o Inconel 625, já que ainda não há dados de retificação para ele disponível até o momento.

3.2.1. Primeira etapa de ensaios

Na primeira etapa, foram realizados apenas ensaios com o Inconel 625, a fim de avaliar as variáveis com maior influência (mais significativas) no processo de retificação desta liga, seguindo um planejamento fatorial fracionado.

Os parâmetros de entrada que foram variados nessa etapa e seus respectivos valores estão dispostos na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Parâmetros de entrada avaliados nos testes da etapa 1 para o Inconel 625.

Parâmetro	Valor
Velocidade de corte (m/s)	15
	30
Granulometria mesh do Rebolo de (SiC)	#60
	#80
Penetração de trabalho (mm)	0,010
	0,030
Velocidade da peça (mm/min)	5 000
	7 500
Sentido de retificação	Concordante
	Discordante

O planejamento fatorial utilizado foi fracionário de resolução VI, ou seja, $2^{k-p} = 2^{5-1}$, onde $(5 - 1)$ significa um planejamento com 5 variáveis independentes em fatorial fracionário ($p = 1$), sendo assim, foram realizados experimentos em 16 condições. Na Tabela 3.8 está disposto o planejamento descrito com a codificação dos valores. Cada experimento foi realizado com uma réplica para aumentar a confiabilidade dos resultados.

Tabela 3.8 - Planejamento factorial fracionário dos testes da etapa 1 (Inconel 625).

Nível	Variáveis independentes				
	v_s (m/s)	Granulometria (Mesh)	a_e (mm)	v_w (mm/min)	Sentido
-1	15	# 60	0,010	5000	Concordante
1	30	# 80	0,030	7500	Discordante
<i>Geradores</i>		A	B	C	D
<i>Testes</i>		E - ABCD			
1	30	60	0,030	5000	Discordante
2	30	60	0,030	7500	Concordante
3	30	60	0,010	7500	Discordante
4	30	60	0,010	5000	Concordante
5	30	80	0,030	7500	Discordante
6	30	80	0,030	5000	Concordante
7	30	80	0,010	7500	Concordante
8	30	80	0,010	5000	Discordante
9	15	60	0,010	5000	Discordante
10	15	60	0,010	7500	Concordante
11	15	60	0,030	5000	Concordante
12	15	60	0,030	7500	Discordante
13	15	80	0,010	5000	Concordante
14	15	80	0,010	7500	Discordante
15	15	80	0,030	5000	Discordante
16	15	80	0,030	7500	Concordante

As variáveis de saída utilizadas para esta etapa foram: os parâmetros de rugosidade R_a e R_z , imagens das superfícies retificadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), as forças de retificação (componentes F_n e F_t) e a energia específica de retificação.

3.2.2. Segunda etapa de ensaios

Nesta etapa, os ensaios foram realizados nos dois materiais, Inconel 625 e Inconel 718 a fim de avaliar a retificabilidade do Inconel 625 com base no Inconel 718. Para isso, foi definido um planejamento de experimento utilizando fator único, onde foi variado apenas um fator de cada vez de modo que a influência de cada nas variáveis de saída pudesse ser estudada separadamente. Os valores avaliados foram definidos com base nos ensaios realizados na primeira etapa. Desta forma, todos os ensaios desta etapa foram realizados com o sentido de retificação discordante, condição que foi detectada influência significativa nos resultados de rugosidade e forças de corte conforme será mostrada na seção de resultados.

Assim, utilizando $v_w = 7500$ mm/min, $v_s = 30$ m/s e rebolo mesh #80, foram avaliados três valores de penetração de trabalho (0,010 mm, 0,020 mm e 0,030 mm). Empregando $a_e = 0,010$ mm, $v_s = 30$ m/s e rebolo mesh #80 e dois valores de velocidade da peça foram testados (5000 mm/min e 10000 mm/min). Três valores de velocidade de corte (10 m/s, 20 m/s e 30 m/s) também foram avaliados combinados com $a_e = 0,010$ mm, $v_w = 7500$ mm/min e rebolo mesh #80. Por fim, utilizando: $a_e = 0,010$ mm, $v_w = 7500$ mm/min e $v_s = 30$ m/s foram avaliadas ainda duas granulometrias mesh do rebolo (#60 e #100). A descrição resumo dos parâmetros de corte utilizados nesta etapa está disposto na Tabela 3.9. Em todas as condições, foram realizados teste e réplica para os dois materiais testados (Inconel 625 e Inconel 718), totalizando 36 testes.

Tabela 3.9 – Parâmetros de corte utilizados na segunda etapa.

Material	v_s (m/s)	a_e (mm)	v_w (mm/min)	Granulometria (mesh)
Inconel 625	30	0,010		
		0,020	7500	#80
		0,030		
	30	0,010	500	#80
			10000	
	Inconel 718	10		
		20	7500	#80
		30		
	30	0,010	7500	#60
				#100

As variáveis de saída utilizadas para esta etapa foram: os parâmetros de rugosidade R_a e R_z , microtureza na superfície retificada, microtureza abaixo da superfície retificada, imagens das superfícies retificadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), as forças de retificação (componentes F_n e F_t), a energia específica de retificação e a temperatura na zona de retificação. Um resumo dos parâmetros avaliados para cada condição testada está apesentado na Tabela 3.10, sendo que todas as análises realizadas para o Inconel 625 também foram realizadas para o Inconel 718.

Tabela 3.10 – Variáveis de saída analisadas para as condições testadas na segunda etapa.

Parâmetros de corte				Variáveis de saída								
v_s (m/s)	a_e (mm)	v_w (mm/min)	Gran. (Mesh)	Ra	Rz	MEV	$HV_{Sup.}$	$HV_{Sub.}$	F_n	F_t	U	T
30	0,010	7500	#80	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	0,020			X	X	X	X	X	X	X	X	X
	0,030			X	X	X	X	X	X	X	X	X
30	0,010	5000	#80	X	X	X	X		X	X	X	
		10000		X	X	X	X		X	X	X	
10				X	X	X	X	X	X	X	X	X
20	0,010	7500	#80	X	X	X	X	X	X	X	X	X
30				X	X	X	X	X	X	X	X	X
30	0,010	7500	#60	X	X	X	X		X	X	X	
			#100	X	X	X	X		X	X	X	

3.3. Equipamentos e parâmetros para medição das variáveis de saída

Para obtenção dos resultados de rugosidade foram realizadas medições com o perfilômetro de contato do fabricante Taylor Hobson®, modelo Form Talysurf Intra 50, com raio de ponta de diamante do apalpador de 2 μm . Em cada amostra, foram adquiridos três (3) perfis de 4 mm de comprimento no sentido perpendicular ao de retificação. Após a aquisição dos perfis, os mesmos foram processados através do software MountainsMap e na sequência foram calculados os parâmetros, bem como a média e o desvio padrão. Para a obtenção de ambos parâmetros (Ra e Rz) foi utilizado filtro gaussiano e comprimento de amostragem (cut-off) de 0,8 mm.

Para a avaliação das superfícies das amostras retificadas utilizou-se um microscópio eletrônico de varredura (MEV) da marca HITACHI, modelo TM3000, com a seguinte configuração: aumento de 2000x, tensão de aceleração de 5 kV e modo de imagem COMPO.

As medições de microdureza na superfície retificada foram realizadas em um microdurmômetro Vickers Shimadzu, modelo HMV-G, com uma carga de 1,961 N ($HV_{0,2}$) por 10 segundos. A metodologia utilizada foi a mesma apresentada por Da Silva et al. (2018), onde os autores observaram uma boa correlação entre a microdureza na superfície e os danos térmicos encontrados nas superfícies de aço N2711 retificadas. Assim, foram realizadas as medições em nove pontos da superfície retificada (Figura 3.8a) e os resultados foram plotados em um mapa de distribuição, interpolando as medidas, através do software Matlab®. Já as medidas de microdureza abaixo da superfície retificada foram no mesmo microdurmômetro, porém com uma carga de 980,7 mN ($HV_{0,1}$) por 10 segundos. Foram realizadas medições em 5 posições abaixo da superfície retificada, distantes dela em, respectivamente, 20, 40, 60, 80

e 100 μm (Figura 3.8b). Em cada posição realizou-se três medidas onde foi feita a média e o desvio padrão dos valores medidos. A medições foram realizadas seguindo as recomendações na norma ASTM E92-16 (2016). A avaliação da microtureza antes do processo de retificação foi realizada com a amostra preparada por WEDM, lixada e polida, utilizando o mesmo equipamento com uma carga de 980,7 mN ($\text{HV}_{0,1}$) por 10 segundos, onde foram realizadas 10 medições em pontos distintos.

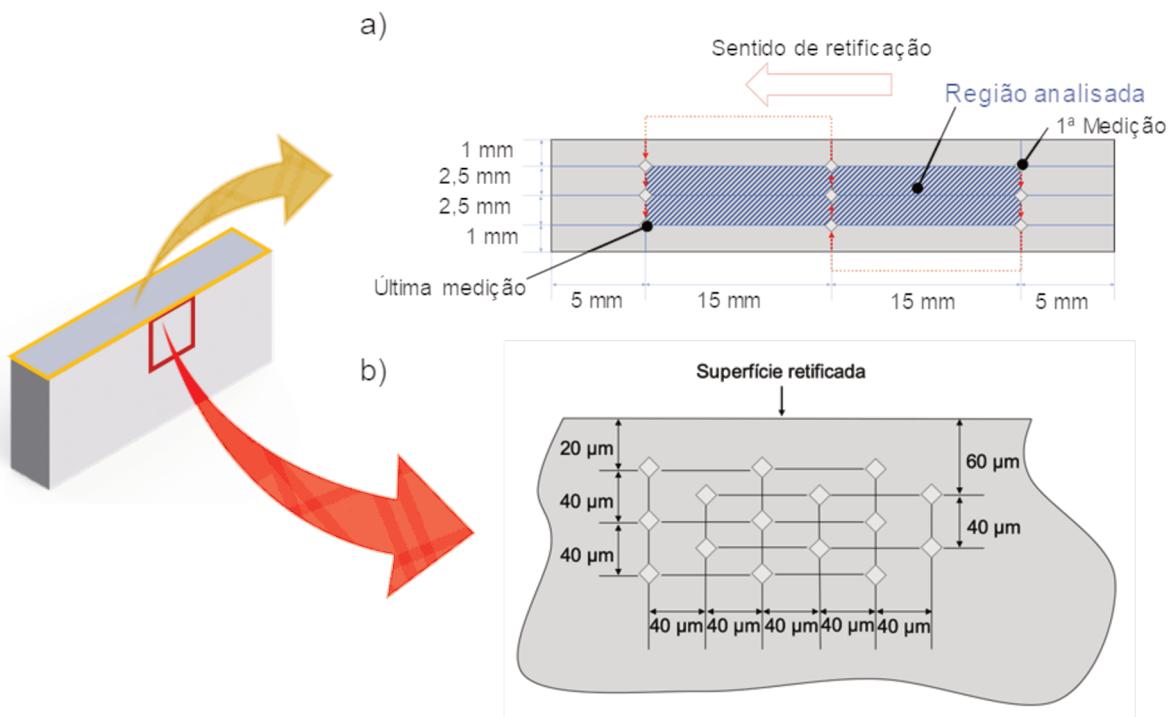


Figura 3.8 – Metodologia utilizada para a medição de microtureza: a) na superfície retificada; b) abaixo da superfície.

Durante o processo, a morsa com a peça foi fixada sobre o dinamômetro de bancada (Kistler, modelo 9443B) conforme mostra a Figura 3.9 de modo a possibilitar a medida das forças de retificação (F_n e F_t).

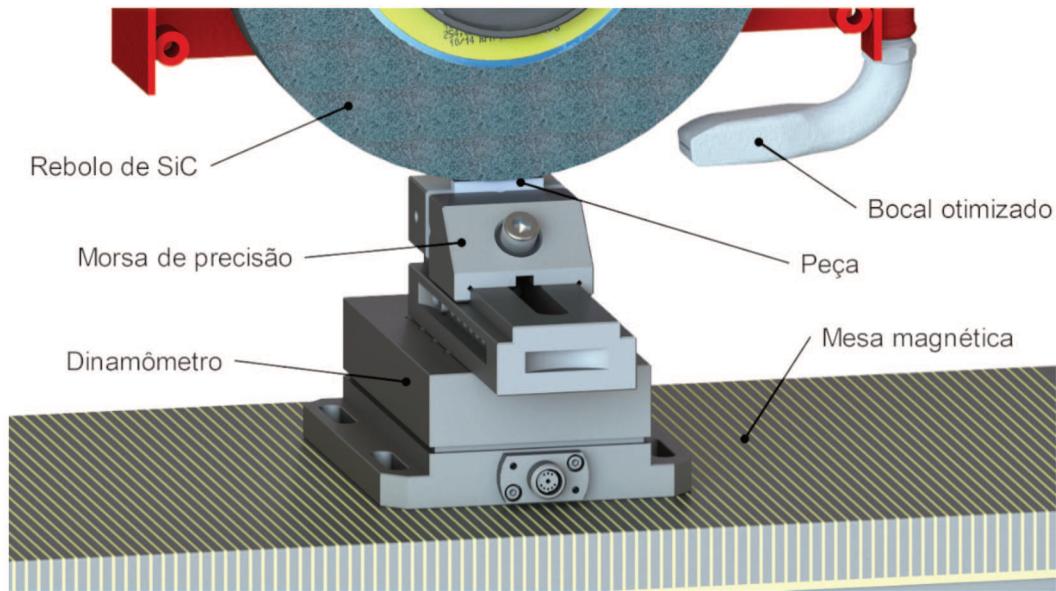


Figura 3.9 – *Setup* utilizado para a realização dos ensaios.

Para a aquisição dos sinais de força, o dinamômetro foi ligado a um amplificador, também da marca Kistler, modelo 5070, que estava conectado a uma placa de aquisição de dados do fabricante National Instruments, modelo 6001. A placa por sua vez estava conectada a um microcomputador. Este por sua vez contava com software Labview® que possibilitou a aquisição dos sinais a uma taxa de 4 kHz. Na Figura 3.10 é ilustrada a montagem do sistema de aquisição dos dados de força. Após a aquisição dos dados, eles foram processados utilizando o software Matlab®, onde o valor da força considerado para o respectivo ensaio foi obtido pela média dos 200 pontos centrais do sinal adquirido durante o processo.



Figura 3.10 – Sistema utilizado para a aquisição dos dados de força.

A energia específica de retificação foi obtida por meio da equação (10), pelo quociente da potência de corte pela taxa de remoção de material. A potência de corte (P) pode ser calculada por meio da equação (9), pelo produto entre a força tangencial (F_t) pela velocidade de corte (v_s). Já a taxa de remoção de material (Q_w) é calculada pela equação (2).

A temperatura na zona de retificação foi medida utilizando uma metodologia baseada no trabalho experimental conduzido por Kuriyagawa et al. (2003). Utilizou-se para tal um termopar do tipo K (cromel/alumel) que é recomendado para medição na faixa de temperatura entre -200 °C e 1370 °C. Os fios de cada um dos materiais foram separados por uma folha de mica, assim como também foram adicionadas folhas de mica entre cada fio e o material da peça, de acordo com o detalhe apontado na Figura 3.11. O termopar utilizado apresenta cada fio com diâmetro de $0,25$ mm, e cada folha de mica apresenta espessura de $0,318$ mm. Como pode ser visto ainda na Figura 3.11, para a aquisição da temperatura, foi utilizado um amplificador e condicionador de sinal Keysight, modelo 34970A, acoplado a um computador com o software do equipamento. A taxa de aquisição utilizada para obtenção da temperatura foi de 10 Hz e o valor de temperatura considerado para o respectivo ensaio foi o primeiro valor adquirido, uma vez que na condição inicial as extremidades do termopar estavam isoladas pela mica e somente o processo que fechou o contato.

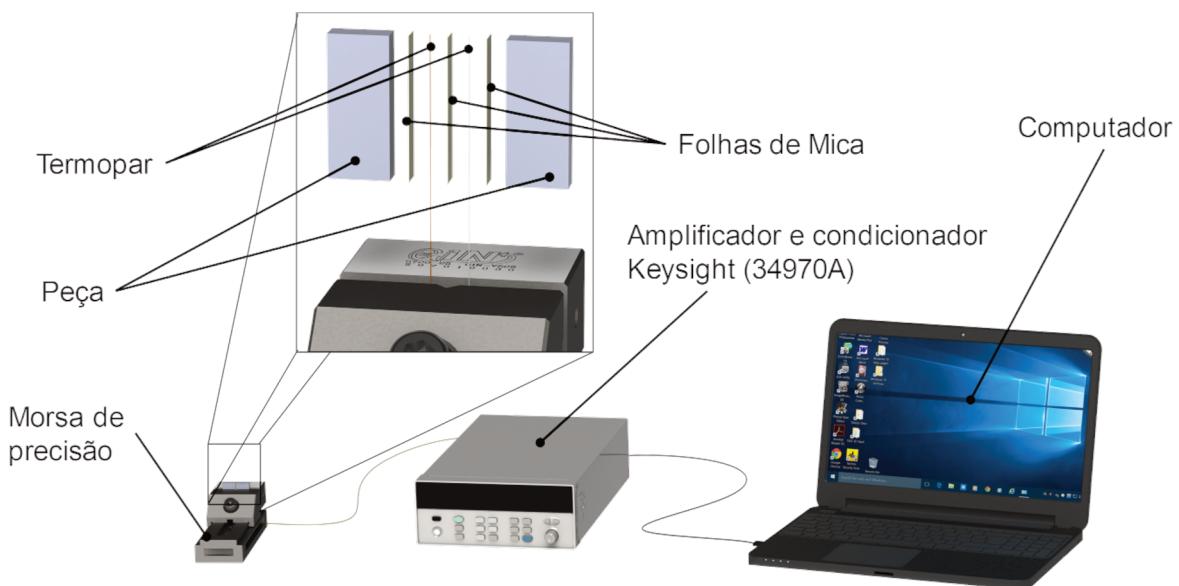


Figura 3.11 – Metodologia utilizada para a medição de temperatura.

Um exemplo de resultado obtido de temperatura está disposto na Figura 3.12, onde têm-se os valores obtidos nos três testes realizados com $a_e = 0,010$ mm, $v_w = 7500$ mm/min e $v_s = 20$ m/s para o Inconel 625.

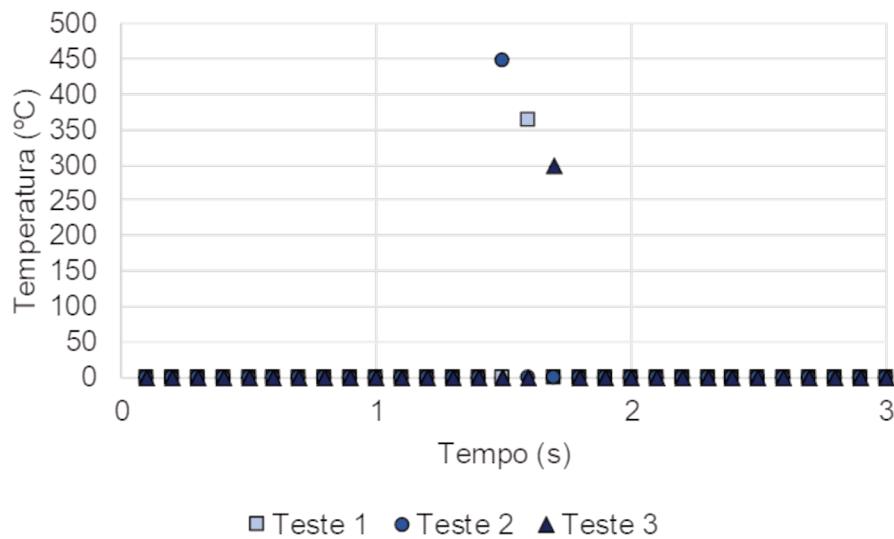


Figura 3.12 – Valores de temperatura medidos para a condição $a_e = 0,010$ mm, $v_w = 7500$ mm/min e $v_s = 20$ m/s.

Todos os tratamentos estatísticos, como os testes de ANOVA da segunda etapa, assim como o processamento do DOE (Planejamento Experimental do inglês Design of Experiments) fatorial fracionário da primeira etapa, foram realizados com o auxílio do software Minitab®.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo estão apresentados os resultados obtidos após a retificação do Inconel 625 e do Inconel 718 para todas as variáveis de saída analisadas nas duas etapas do trabalho informadas previamente na seção metodologia, bem como as respectivas discussões.

4.1. Resultados da primeira etapa (retificação do Inconel 625)

Os resultados obtidos na primeira etapa para as variáveis de saída analisadas (rugosidade Ra e Rz, imagens de MEV das superfícies retificadas, forças de retificação F_t e F_n e energia específica de retificação) estão apresentados a seguir.

4.1.1. *Rugosidade (parâmetros Ra e Rz)*

Primeiramente, para a análise dos parâmetros de maior influência na rugosidade do Inconel 625 (parâmetro Ra) foi realizada a análise de variância que está apresentada na Tabela 4.1. A interpretação do quadro ANOVA é realizada baseando-se no Valor-P (probabilidade). O intervalo de confiança adotado de 95% indica a probabilidade de 5% ($\alpha = 0,05$) de significância nas diferenças dos resultados. Desta forma, Valores-P menores que este previamente estabelecido indicam que a hipótese inicial de variâncias iguais para esses casos foi rejeitada, ou seja, os parâmetros onde o Valor-P é menor que 0,05 apresentam diferenças estatisticamente significativas.

Conforme pode ser observado da Tabela 4.1, foram considerados no modelo termos de até ordem 2 e foram estatisticamente significativos para a rugosidade (Ra) a velocidade de corte (v_s), a granulometria do rebolo e interação entre estas duas variáveis. Os demais parâmetros não foram estatisticamente significativos para o intervalo de confiança adotado.

Tabela 4.1 – Análise de variância (ANOVA) para rugosidade (Ra) do Inconel 625 em função dos diversos parâmetros de entrada testados.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P	% de contribuição
Modelo	15	0,311456	0,020764	2,51	0,039	
Linear	5	0,205956	0,041191	4,97	0,006	
v_s	1	0,118341	0,118341	14,29	0,002	26,6
Granulometria	1	0,041328	0,041328	4,99	0,040	9,3
a_e	1	0,032896	0,032896	3,97	0,064	
v_w	1	0,001378	0,001378	0,17	0,689	
Sentido	1	0,012012	0,012012	1,45	0,246	
Interações de 2 fatores	10	0,105500	0,010550	1,27	0,321	
$v_s * Granulometria$	1	0,052326	0,052326	6,32	0,023	11,8
$v_s * a_e$	1	0,000561	0,000561	0,07	0,798	
$v_s * v_w$	1	0,003003	0,003003	0,36	0,556	
$v_s * Sentido$	1	0,019012	0,019012	2,30	0,149	
Granulometria* a_e	1	0,001953	0,001953	0,24	0,634	
Granulometria* v_w	1	0,003916	0,003916	0,47	0,502	
Granulometria*Sentido	1	0,001152	0,001152	0,14	0,714	
$a_e * v_w$	1	0,003486	0,003486	0,42	0,526	
$a_e * Sentido$	1	0,003528	0,003528	0,43	0,523	
$v_w * Sentido$	1	0,016562	0,016562	2,00	0,177	
Erro	16	0,132528	0,008283			
Total	31	0,443984				

De forma semelhante ao parâmetro Ra, também foi realizada a análise de variância para o parâmetro de rugosidade Rz e os resultados estão apresentados na Tabela 4.2. Da Tabela 4.2, pode-se observar que somente a penetração de trabalho (a_e) e a velocidade de corte (v_s) influenciaram, de forma significativa, o parâmetro Rz.

Tabela 4.2 – Análise de variância (ANOVA) para rugosidade (Rz) das amostras de Inconel 625 em função dos parâmetros de entrada informados na Tabela 3.7.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P	% de contribuição
Modelo	15	11,2168	0,74779	2,73	0,028	
Linear	5	9,4035	1,88071	6,85	0,001	
v_s	1	3,7401	3,74011	13,63	0,002	24
Granulometria	1	0,8321	0,83205	3,03	0,101	
a_e	1	4,1328	4,13281	15,06	0,001	26,5
v_w	1	0,0545	0,05445	0,20	0,662	
Sentido	1	0,6441	0,64411	2,35	0,145	
Interações de 2 fatores	10	1,8133	0,18133	0,66	0,744	
$v_s^* \text{Granulometria}$	1	0,7320	0,73205	2,67	0,122	
$v_s^* a_e$	1	0,0055	0,00551	0,02	0,889	
$v_s^* v_w$	1	0,1922	0,19220	0,70	0,415	
$v_s^* \text{Sentido}$	1	0,2850	0,28501	1,04	0,323	
Granulometria* a_e	1	0,2521	0,25205	0,92	0,352	
Granulometria* v_w	1	0,0000	0,00001	0,00	0,995	
Granulometria*Sentido	1	0,0242	0,02420	0,09	0,770	
$a_e^* v_w$	1	0,0265	0,02645	0,10	0,760	
$a_e^* \text{Sentido}$	1	0,0780	0,07801	0,28	0,601	
$v_w^* \text{Sentido}$	1	0,2178	0,21780	0,79	0,386	
Erro	16	4,3906	0,27441			
Total	31	15,6074				

Para analisar o efeito de cada parâmetro de entrada (Tabela 3.7 na seção de metodologia) isolado na rugosidade (parâmetros Ra e Rz), foram construídos os gráficos de efeitos principais para os parâmetros significativos (de acordo com as análises de variância Tabela 4.1 e Tabela 4.2), para os parâmetros Ra e Rz respectivamente nas Figura 4.1a e Figura 4.1b.

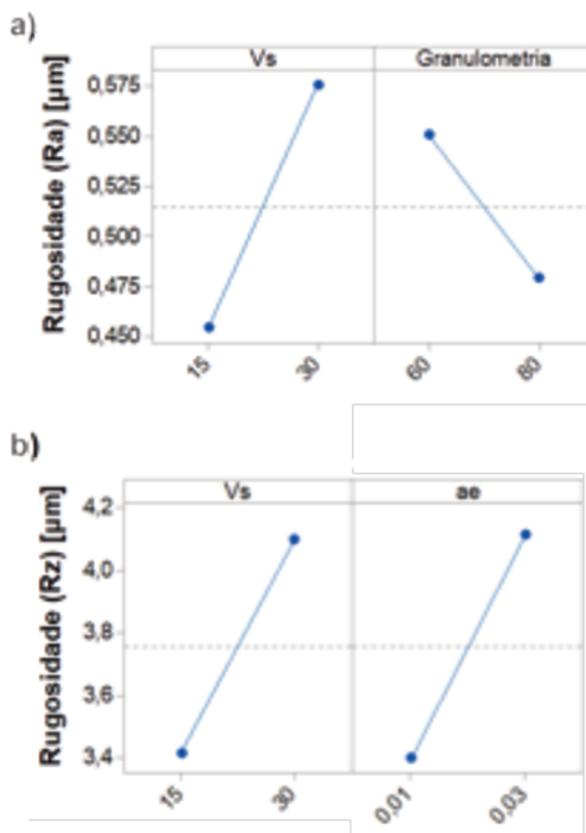


Figura 4.1 – Gráficos de efeitos principais dos parâmetros significativos para os parâmetros de rugosidade do Inconel 625: a) Ra e b) Rz.

Por meio da Figura 4.1a, pode ser visto que todos os valores de rugosidade (Ra) ficaram compreendidos em uma faixa entre 0,4 μm e 0,6 μm , faixa que por sua vez está compreendida entre 0,2 μm e 1,6 μm a qual é apresentada na literatura como referência para processo de retificação na condição de acabamento e semi-acabamento (MACHADO et al., 2015).

Como pode ser observado na Figura 4.1, para ambos os parâmetros de rugosidade analisados, o valor da rugosidade aumentou com o aumento da velocidade de corte. De acordo com os modelos propostos por Malkin e Guo (2008), uma tendência oposta era esperada, uma vez que nestes modelos a rugosidade é inversamente proporcional à velocidade de corte. Entretanto, estes modelos não consideram as particularidades do material que está sendo retificado. De acordo com Donachie (2002), as ligas (incluindo as ligas de níquel e de titânio) apresentam características especiais que afetam diretamente a usinabilidade destes materiais, como, por exemplo, a baixa condutividade térmica, tendência ao encruamento durante a usinagem e a capacidade de manter a resistência a altas temperaturas. Desta forma, ao aumentar a velocidade de corte v_s , maiores temperaturas são alcançadas na zona de corte. Contudo, se essas temperaturas forem menores que a de recristalização do material da peça, ocorrerão mais deformações plásticas que deteriorarão o acabamento da superfície, ou seja, contribuindo para a elevação dos valores de rugosidade,

como também da microdureza na superfície da peça por encruamento. Comportamento similar ao encontrado neste trabalho foi reportado por Hood et al. (2007) quem, em seu trabalho de retificação, constataram que os valores de rugosidade das peças de alumínio de titânio aumentaram com a velocidade de corte de $v_s = 25$ m/s para 35 m/s.

De acordo com a Figura 4.1a, a rugosidade da peça, parâmetro Ra, diminuiu com o tamanho do grão abrasivo utilizado. Esta relação já era esperada uma vez que com a diminuição do tamanho do grão, há mais arestas de corte removendo uma menor quantidade de material por passagem do rebolo sobre a peça, o que resulta em sulcos mais estreitos e consequentemente rasos. Resultados similares foram obtidos por Kannappan e Malkin (1972) ao realizarem estudo na retificação do aço ABNT 1095 sob diferentes condições de corte, utilizando rebolos de óxido de alumínio (32A) com granulometrias #30, #46, #80 e #120.

Pela Tabela 4.2, pode-se observar que o parâmetro de rugosidade Rz apresentou uma maior sensibilidade à variação da penetração de trabalho a_e quando comparado ao parâmetro Ra. De acordo com Gadelmawla (2002), o parâmetro Rz é mais sensível a ocasionais picos altos ou vales profundos que o parâmetro Ra devido à sua definição pela ISO 4287 (1998) como sendo a média da diferença entre os cinco picos mais altos e vales mais profundos ao longo do comprimento de avaliação. Assim, pela Figura 4.1b, pode-se observar que a rugosidade Rz aumentou com a penetração de trabalho, pois aumentando o a_e , sulcos mais profundos são formados na superfície, o que promove o aumento da diferença entre os picos e vales e, consequentemente, o valor de Rz.

De acordo com a análise de ANOVA (Tabela 4.1), a única interação estatisticamente significativa para o parâmetro Ra de rugosidade foi entre velocidade de corte e granulometria do rebolo. Assim, está interação está disposta na Figura 4.2, onde pode-se observar que para a granulometria mesh #60, a velocidade de corte apresentou uma influência maior que para a granulometria mesh #80, mas para ambas granulometrias, a rugosidade Ra apresentou a tendência de aumentar com a velocidade de corte. Uma hipótese que pode ser confirmada pelas análises das imagens obtidas via MEV (Figura 4.3) é que com o emprego da velocidade de corte de 30 m/s gerou deformação plástica na superfície da peça. Entretanto, observou-se que ao empregar o rebolo com menor tamanho de grão (mesh #80) houve menor redução do número deformações em relação à mesh #60. Já para o parâmetro Rz de rugosidade, de acordo com a Tabela 4.2, não houve nenhuma interação estaticamente significativa.

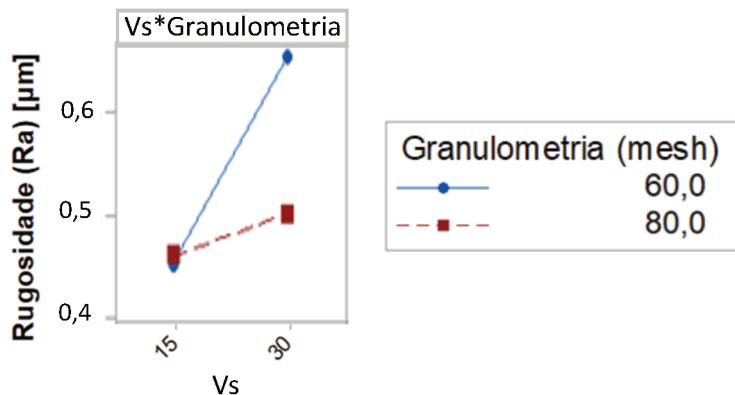


Figura 4.2 – Gráfico da interação significativa para a rugosidade parâmetro Ra para o Inconel 625.

4.1.2. Análise da superfície por microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Após uma ampla análise das superfícies retificadas no MEV, foram adquiridas imagens que demonstrassem a condição geral predominante de cada superfície. Assim, as imagens obtidas das superfícies do Inconel 625 retificadas sob diferentes condições de corte estão apresentadas na Figura 4.3. A partir dessa figura, no geral, pode-se observar que o aumento da velocidade de corte (v_s) modificou o comportamento tribológico na interface rebolo/peça, o que foi confirmado pela textura da peça usinada que, independente da granulometria do rebolo, apresentou mais deformações plásticas com $v_s = 30$ m/s. Observa-se ainda que o mecanismo de desgaste predominante de micro-corte (Figura 4.3a, b, e, f, i, j, m, n) foi alterado para micro-sulcamento ao aumentar a velocidade de corte (v_s) (Figura 4.3c, d, g, h, k, l, o, p).

Ainda na Figura 4.3, pode-se observar que a quantidade de material deformado aderido na superfície diminuiu com o uso do menor tamanho de abrasivo (granulometria mesh #80), independente da velocidade de corte utilizada, porém sendo mais pronunciado com o $v_s = 30$ m/s, quando comparado com o maior tamanho de abrasivo (mesh #60).

De modo geral, também se pode observar na Figura 4.3 que o uso do sentido de retificação concordante gerou superfícies com sulcos mais regulares, o que foi benéfico para o parâmetro de rugosidade Rz , como mostrado na Figura 4.1b. Já nas superfícies retificadas com sentido discordante com a maior velocidade de corte (30 m/s), pode-se observar uma maior deterioração das superfícies, como mostrado na Figura 4.3g e k.

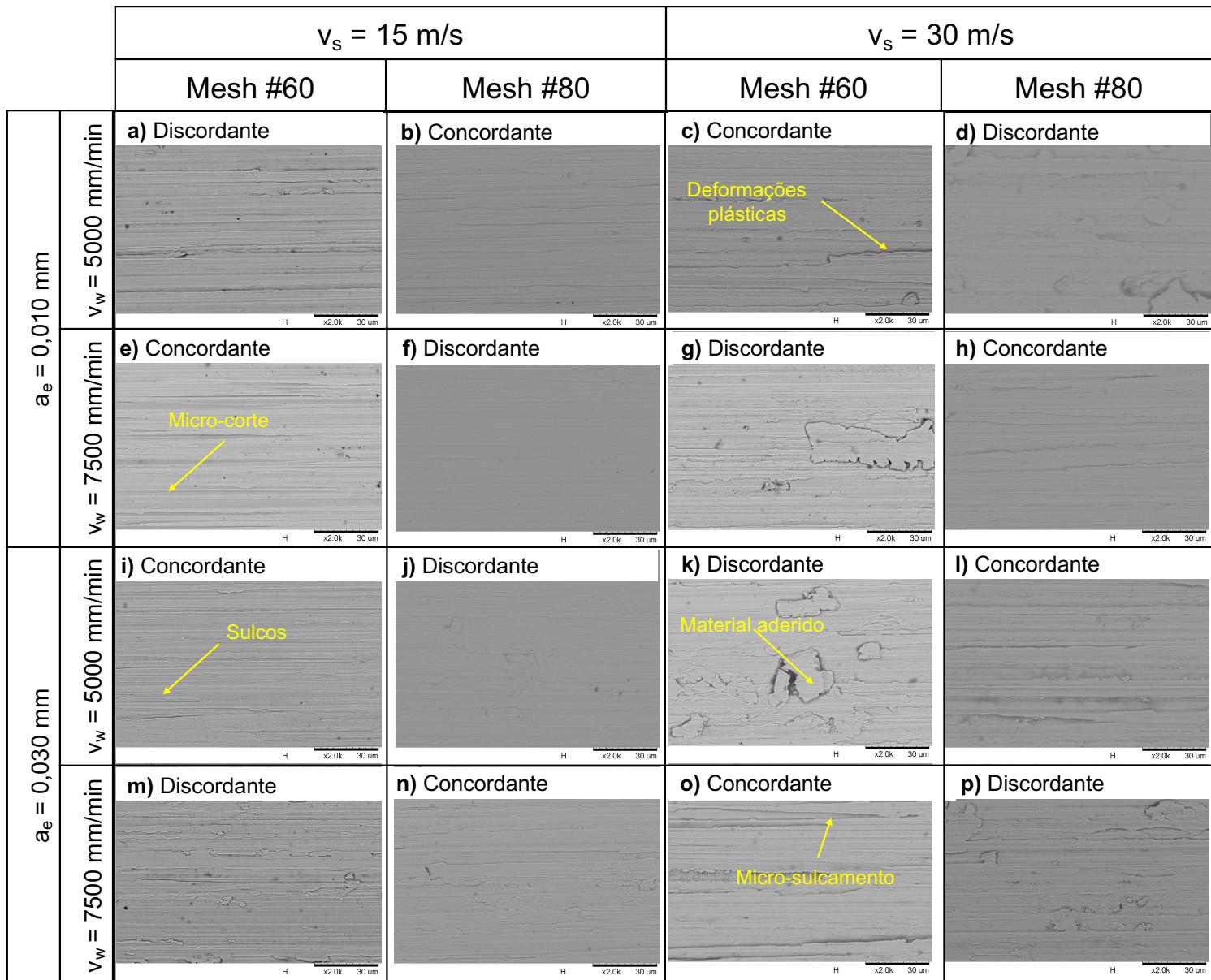


Figura 4.3 – Imagens de MEV das superfícies de Inconel 625 retificadas com rebolos de SiC em diferentes condições de corte.

4.1.3. Forças de retificação no Inconel 625

A seguir estão apresentados resultados das forças de retificação, componente tangencial (F_t) e normal (F_n), obtidos durante a retificação do Inconel 625 em diferentes condições de corte. De maneira similar ao procedimento utilizado para a análise dos parâmetros de maior influência na rugosidade do Inconel 625, também foi realizada a análise de variância para a força tangencial, cujos resultados estão na Tabela 4.3.

Para as forças também foram considerados no modelo os termos de até ordem 2. Através da Tabela 4.3, para a força tangencial os parâmetros de entrada estatisticamente significativos, na respectiva ordem de significância, foram: a velocidade de corte (v_s), a penetração de trabalho (a_e) e o sentido de retificação. Também se notou que a interação entre a velocidade de corte e a penetração de trabalho foi significativa. Todos os demais parâmetros e interações não foram estatisticamente significativos na força tangencial.

Tabela 4.3 – Análise de variância (ANOVA) para força tangencial de retificação (F_t) versus os parâmetros de entrada.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P	% de contribuição
Modelo	15	16595,9	1106,39	26,77	0,000	
Linear	5	16322,4	3264,47	78,99	0,000	
v_s	1	9078,2	9078,20	219,66	0,000	52,6
Granulometria	1	182,3	182,32	4,41	0,052	
a_e	1	6477,8	6477,83	156,74	0,000	37,5
v_w	1	39,2	39,24	0,95	0,344	
Sentido	1	544,8	544,77	13,18	0,002	3,15
Interações de 2 fatores	10	273,6	27,36	0,66	0,743	
v_s *Granulometria	1	3,5	3,52	0,09	0,774	
v_s * a_e	1	202,7	202,69	4,90	0,042	1,2
v_s * v_w	1	1,1	1,10	0,03	0,872	
v_s *Sentido	1	9,1	9,13	0,22	0,645	
Granulometria* a_e	1	0,7	0,66	0,02	0,901	
Granulometria* v_w	1	22,3	22,31	0,54	0,473	
Granulometria*Sentido	1	1,2	1,17	0,03	0,868	
a_e * v_w	1	13,1	13,10	0,32	0,581	
a_e *Sentido	1	11,1	11,06	0,27	0,612	
v_w *Sentido	1	8,8	8,80	0,21	0,651	
Erro	16	661,3	41,33			
Total	31	17257,2				

Em relação a componente da força normal (F_n), também foi realizada a análise de variância, onde foram considerados termos de até segunda ordem, e os resultados da mesma estão dispostos na Tabela 4.4.

Através da Tabela 4.4, pode-se observar que para a força normal os parâmetros de entrada estatisticamente significativos, na respectiva ordem de significância, foram: a velocidade de corte (v_s), a penetração de trabalho (a_e) e o sentido de retificação, mesma ordem observada para a força tangencial. Também foi significativa para a componente normal da força de retificação a interação entre a velocidade de corte e a penetração de trabalho. Todos os demais parâmetros e interações não foram estatisticamente significativos na força normal. Como pode ser observado, não houve diferença em relação aos parâmetros de influência na força tangencial, assim como interações.

Tabela 4.4 – Análise de variância (ANOVA) para força normal de retificação (F_n) versus os parâmetros de entrada.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P	% de contribuição
Modelo	15	193322	12888,2	17,30	0,000	
Linear	5	187576	37515,2	50,36	0,000	
v_s	1	92452	92451,6	124,12	0,000	45
Granulometria	1	305	305,5	0,41	0,531	
a_e	1	88412	88412,2	118,70	0,000	43
v_w	1	1365	1365,1	1,83	0,195	
Sentido	1	5042	5041,6	6,77	0,019	2,5
Interações de 2 fatores	10	5747	574,7	0,77	0,654	
v_s *Granulometria	1	195	194,6	0,26	0,616	
v_s * a_e	1	4772	4772,0	6,41	0,022	2,3
v_s * v_w	1	7	7,3	0,01	0,922	
v_s *Sentido	1	93	92,9	0,12	0,729	
Granulometria* a_e	1	45	44,6	0,06	0,810	
Granulometria* v_w	1	375	375,2	0,50	0,488	
Granulometria*Sentido	1	4	3,7	0,00	0,945	
a_e * v_w	1	19	19,0	0,03	0,875	
a_e *Sentido	1	26	25,9	0,03	0,854	
v_w *Sentido	1	211	211,4	0,28	0,602	
Erro	16	11918	744,9			
Total	31	205240				

Para analisar o efeito de cada parâmetro de entrada significativo isolado nas forças (tangencial – F_t e normal – F_n), foram construídos os gráficos de efeitos principais, os quais estão ilustrados nas Figura 4.4a e b para as componentes das forças F_t e F_n , respectivamente.

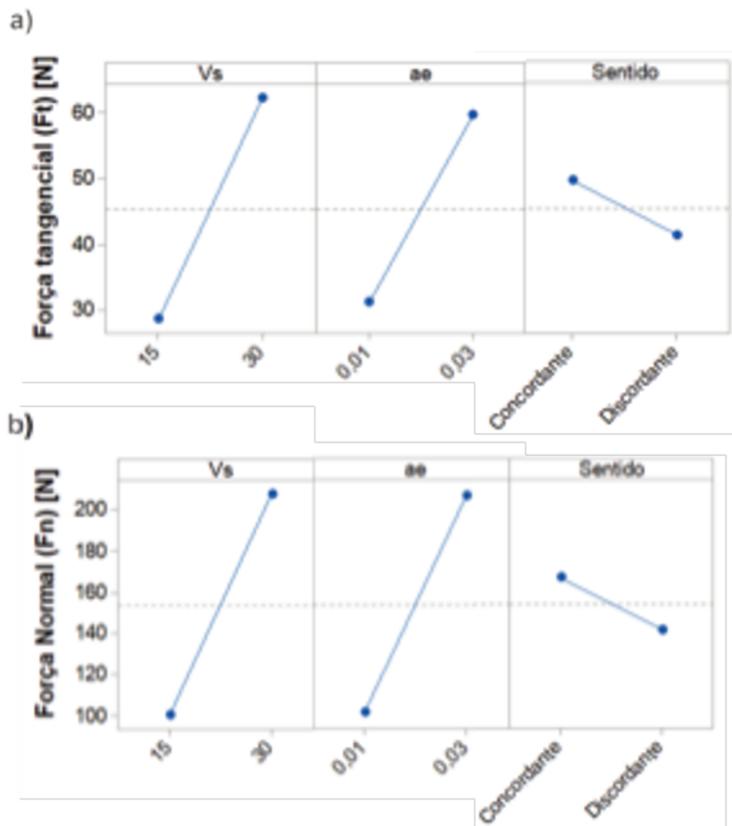


Figura 4.4 – Gráficos de efeitos principais dos parâmetros significativos para as forças de retificação: a) tangencial e b) normal.

Como pode ser observado na Figura 4.4, independentemente da condição de corte, a componente tangencial da força (F_t) foi muito menor que a componente normal (F_n) (Figura 4.4b), o que já era esperado para o processo de retificação (MALKIN; GUO, 2008). Para ambas as componentes da força, a velocidade de corte (v_s) foi o parâmetro de maior relevância. O aumento da velocidade de corte, v_s , fez com que ambas as componentes da força (F_t e F_n) também aumentassem de 28 para 63 N e de 100 para 210 N, respectivamente. Contudo, uma tendência oposta era esperada de acordo com estudos anteriores, por exemplo, como aquele trabalho de retificação conduzido por Tawakoli et al. (2009), em que os autores encontraram para o aço endurecido e para o aço macio, uma tendência de ambos componentes da força de retificação diminuírem com o aumento de v_s . No entanto, na retificação de ligas, como o Inconel 625 por exemplo, segundo Donachie e Donachie (2002), apresentam um tendência ao encruamento durante a usinagem, o que pode levar a um aumento da dureza superficial e, consequentemente, exigir mais esforço para ser usinada, o

que implica no aumento da força de corte. A partir das imagens de MEV mostradas na Figura 4.3 pode-se observar que as superfícies retificadas com $v_s = 30$ m/s apresentaram uma maior concentração de deformações plásticas em relação às aquelas retificadas com $v_s = 15$ m/s, o que indica uma maior ocorrência de encruamento, confirmada pelo maiores valores obtidos de força.

O segundo parâmetro mais significativo para as forças foi a penetração de trabalho (a_e). Como esperado, o aumento do a_e resultou em um aumento de ambas as componentes da força. Segundo Malkin e Guo (2008), a taxa de remoção de material (Q_w) é diretamente proporcional à profundidade de corte. Desta forma, ao aumentar o a_e , há um aumento do Q_w , ou seja, há um aumento na quantidade de material sendo removida por unidade de tempo, o que leva a um aumento nos esforços de corte.

O sentido de retificação, de acordo com a ANOVA (Tabela 4.3 e Tabela 4.4), também foi significativo para as forças de retificação (F_t e F_n). Assim, a partir da Figura 4.4, pode ser notado que ambas componentes da força foram maiores ao se utilizar o sentido de retificação concordante. Resultado semelhante foi encontrado por Tso (1995) em seu trabalho com retificação de Inconel 718 com rebolo de SiC com os sentidos de corte concordante e discordante, $v_s = 17,5$ m/s, $v_w = 4000$ mm/min e $a_e = 0,010$ mm, que dentre outros parâmetros de saída mediram a força de retificação. O autor atribuiu maior força de retificação no sentido concordante à maior força de atrito. Malkin e Guo (2008) dividiram a força de retificação em força de corte, F_c e força de atrito F_{sl} e, segundo eles, a força de corte permanece constante enquanto a força de atrito aumenta com o desgaste dos abrasivos. Assim, de acordo com Tso (1995), como a retificação discordante produz um comprimento de cavaco mais curto e uma grande espessura de cavaco não deformada, a força de corte é maior que a força de atrito, enquanto a retificação no sentido concordante resulta em uma força de retificação maior devido à maior força de atrito, principalmente pela maior área de abrasivos que entram em contato com a peça e que vai decrescendo à medida que o rebolo deixa a peça.

Para a componente tangencial da força, a partir da Tabela 4.3, têm-se que a única interação estatisticamente significativa foi entre a velocidade de corte e a penetração de trabalho. Assim, esta interação está disposta na Figura 4.5a, onde pode-se observar que o valor da força tangencial aumentou com a penetração de trabalho para ambas velocidades de corte, como também aumentou com a velocidade de corte para ambas profundidades de corte. Entretanto, pode-se observar que a penetração de trabalho exerceu uma influência maior para a velocidade de corte de 30 m/s. Este comportamento pode ser atribuído ao encruamento sofrido pelo material da peça que levou a um aumento da dureza superficial, principalmente quando se utiliza a maior velocidade de corte, $v_s = 30$ m/s. Assim, com a maior dureza superficial, o efeito de aumentar a profundidade de corte foi maior. Para a componente normal da força (F_n), a partir da Tabela 4.4, têm-se que, assim como observado para a força

tangencial, a única interação que foi estatisticamente significativa foi entre a velocidade de corte (v_s) e a penetração de trabalho (a_e). Assim, esta interação está disposta na Figura 4.5b, onde pode-se observar que esta interação apresentou o mesmo comportamento que para a força tangencial (Figura 4.5a).

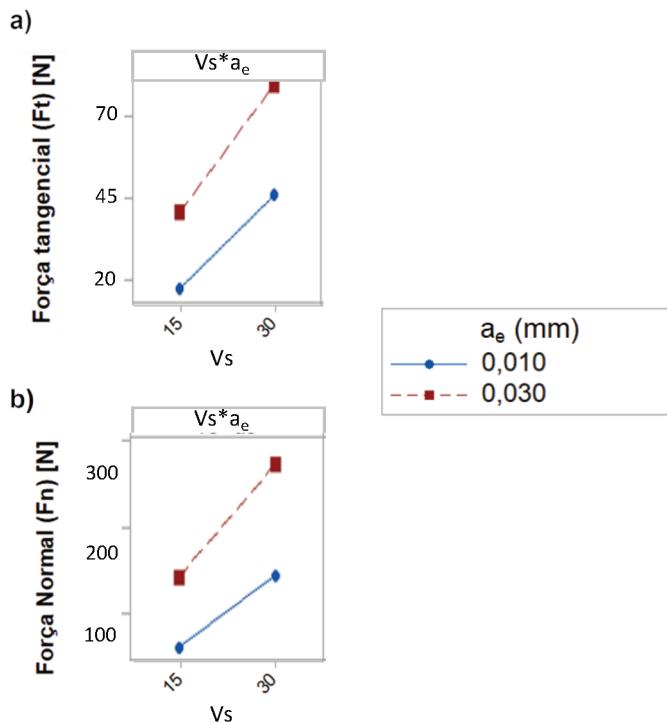


Figura 4.5 – Gráfico da interação significativa para as forças tangencial (a) e normal (b) durante a retificação do Inconel 625 em diferentes condições de corte.

4.1.4. Energia específica de retificação do Inconel 625

Considerando os valores calculados de energia específica de retificação para cada condição testada, foi realizada a análise de variância dos valores encontrados para identificar os parâmetros de maior influência. Para a ANOVA, foram considerados no modelo termos de até ordem 2 e foi adotado o intervalo de confiança de 95%, que indica a probabilidade de 5% ($\alpha = 0,05$). Os resultados da análise de variância estão dispostos na Tabela 4.5.

Conforme pode ser observado na Tabela 4.5, foram estatisticamente significativos para a energia específica de retificação todas as variáveis de entrada, ou seja, a velocidade de corte (v_s), a granulometria do rebolo, a penetração de trabalho (a_e), a velocidade da peça (v_w) e o sentido de retificação. Também foram significativos para a energia específica de retificação as interações entre v_s e a_e e entre a velocidade de corte (v_s) e a velocidade da peça (v_w). As

demais interações de segunda ordem não foram estatisticamente significativas nos valores obtidos de energia específica de retificação.

Tabela 4.5 – Análise de variância (ANOVA) para a energia específica versus os parâmetros de entrada.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P	% de contribuição
Modelo	15	158599	10573	58,35	0,000	
Linear	5	142577	28515	157,37	0,000	
v_s	1	116576	116576	643,37	0,000	72,2
Granulometria	1	1078	1078	5,95	0,027	0,7
a_e	1	15121	15121	83,45	0,000	9,4
v_w	1	7417	7417	40,93	0,000	4,6
Sentido	1	2384	2384	13,16	0,002	1,5
Interações de 2 fatores	10	16022	1602	8,84	0,000	
v_s *Granulometria	1	448	448	2,47	0,135	
v_s * a_e	1	10348	10348	57,11	0,000	6,4
v_s * v_w	1	3200	3200	17,66	0,001	2,0
v_s *Sentido	1	715	715	3,95	0,064	
Granulometria* a_e	1	552	552	3,04	0,100	
Granulometria* v_w	1	12	12	0,06	0,802	
Granulometria*Sentido	1	202	202	1,12	0,306	
a_e * v_w	1	30	30	0,17	0,688	
a_e *Sentido	1	511	511	2,82	0,113	
v_w *Sentido	1	5	5	0,03	0,870	
Erro	16	2899	181			
Total	31	161498				

Para analisar o efeito de cada parâmetro de entrada isolado na energia específica, foram construídos os gráficos de efeitos principais que estão ilustrados na Figura 4.6. Da Tabela 4.5 pode-se observar que a velocidade de corte foi o parâmetro de maior influência na energia específica. Assim, observando os resultados apresentados na Figura 4.6 pode-se notar que o aumento da velocidade de corte (v_s) resultou em um aumento na energia específica. Esta relação já era esperada pois de acordo com a eq. (11) proposta por Malkin e Guo (2008), tem-se que energia específica é diretamente proporcional à força tangencial e à velocidade de corte. A partir da Figura 4.4a, já foi visto que o aumento do v_s causou um aumento em F_t , assim, era esperado um aumento da energia específica (U) com o v_s . Patil et al. (2007) realizaram testes de retificação com Inconel 718 e aço de rolamento e encontraram a mesma

tendência encontrada neste presente trabalho, ou seja, o aumento de v_s leva ao aumento da força de retificação e à energia específica, para ambos os materiais. Eles também descobriram que F_t , F_n e U aumentaram continuamente com o número de passes de retificação para o Inconel 718, o que atribuíram ao encruamento.

Para a granulometria do rebolo, assim como para o sentido de retificação, pode ser observada uma tendência nos valores de energia específica similar àquela observada para a força tangencial (Figura 4.4a). A energia específica aumentou com a diminuição do tamanho dos grãos abrasivos, como também foi maior para a retificação concordante. Isso já era esperado, uma vez que esses parâmetros (F_t e U) são diretamente proporcionais, de acordo com a equação (7).

Como esperado, o aumento de a_e , assim como de v_w , causaram uma diminuição nos valores da energia específica de retificação (U). De acordo com Malkin e Guo (2008), a energia específica é inversamente proporcional à taxa de remoção de material (Q_w), conforme expresso na eq. (10). Em seu trabalho experimental em retificação de Inconel 718, com diferentes abrasivos e em diferentes condições de corte, Tso (1995), encontrou a mesma tendência de diminuição específica de energia com aumento da taxa de remoção de material.

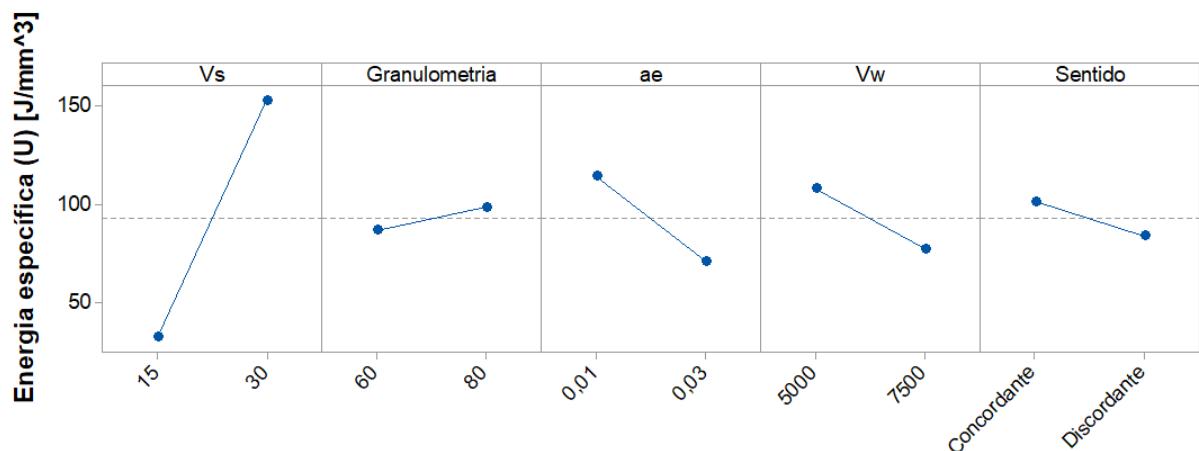


Figura 4.6 – Gráficos de efeitos principais para a energia específica durante a retificação do Inconel 625.

As interações significativas entre duas variáveis para a energia específica estão dispostas na Figura 4.7. A partir da Tabela 4.5 têm-se que são significativas as interações entre v_s e a_e e entre v_s e v_w . Assim, observando estas interações na Figura 4.7, pode-se verificar que para a menor penetração de trabalho ($a_e = 0,010$ mm), a velocidade de corte apresentou uma influência maior que para a penetração de trabalho de 0,030 mm. Contudo, para ambas profundidades de corte a energia específica apresentou a tendência de aumentar

com a velocidade de corte. Para a interação entre v_s e v_w , pode-se observar a mesma tendência observada para a interação entre v_s e a_e .

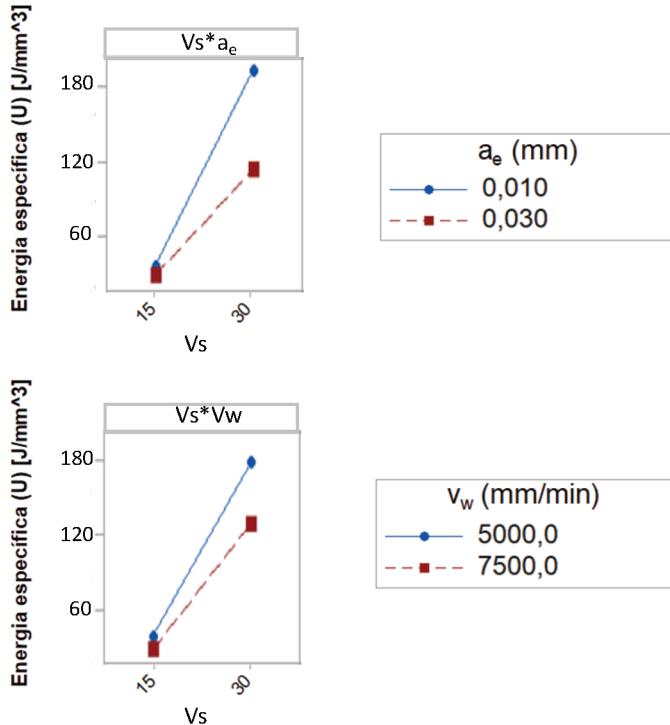


Figura 4.7 – Gráficos das interações significativas para a energia específica durante a retificação do Inconel 625.

4.2. Resultados da segunda etapa: comparação entre a retificação do Inconel 625 e do Inconel 718

Com resultados obtidos na primeira etapa, foram determinados os parâmetros de corte aqui utilizados. Assim, foram considerados 3 (três) níveis para a penetração de trabalho e para a velocidade de corte (parâmetros de maior influência) e 2 (dois) níveis para a velocidade da peça e para a granulometria do rebolo (com um intervalo maior entre os níveis em relação à primeira etapa), conforme já descrito na seção de metodologia.

Desta forma, nesta seção, são apresentados os resultados obtidos na segunda etapa relacionados à comparação da retificação do Inconel 625 e do Inconel 718. As variáveis de saída analisadas são: rugosidade Ra e Rz e imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) das superfícies retificadas, microdureza nas superfícies retificadas e abaixo delas, forças de retificação F_t e F_n , energia específica de retificação e temperatura na zona de retificação).

4.2.1. *Rugosidade (parâmetros Ra e Rz)*

Os resultados obtidos para os parâmetros de rugosidade Ra e Rz, após a retificação do Inconel 625 e do Inconel 718 em função da penetração de trabalho, velocidade da peça, velocidade de corte e granulometria do rebolo estão apresentados na Figura 4.8, Figura 4.9, Figura 4.10 e Figura 4.11, respectivamente.

Os valores de rugosidade obtidos após a retificação das duas ligas analisadas em função da penetração de trabalho (a_e) utilizada estão apresentados na Figura 4.8. Para auxiliar na análise dos resultados apresentados na Figura 4.8, foi realizada uma análise de variância (ANOVA) de fator único (a_e) que está apresentada na Tabela 4.6. De acordo com os resultados de ANOVA (Tabela 4.6), pode-se observar que, com uma confiança de 95% (valor-P menor que 0,05), a penetração de trabalho foi estatisticamente significativa nos valores de rugosidade (Ra e Rz) apenas para o Inconel 625. Ao comparar os resultados obtidos para o Inconel 625 parâmetros Ra (Figura 4.8a) e Rz (Figura 4.8b), nota-se que houve uma tendência de aumento da rugosidade com o a_e . Esse comportamento já era esperado, uma vez que, de acordo com Marinescu et al. (2007), aumentando a penetração de trabalho, maior é a penetração de cada grão abrasivo na superfície da peça, ou seja, maior é a taxa de remoção de material, o que aumenta a severidade do processo e faz com que a rugosidade aumente.

Ainda na Figura 4.8, comparando os resultados de rugosidade obtidos para as duas ligas de níquel, é possível observar que o Inconel 718, para todos os valores analisados de a_e , apresentou os menores valores de rugosidade (Ra e Rz). De acordo com as propriedades dos respectivos materiais (apresentadas na Tabela 3.4) o Inconel 625 apresenta um percentual de alongamento cerca de 50% maior que o do Inconel 718, indicando um comportamento mais dúctil, o que, de acordo com Marinescu et al.(2004), favorece a ocorrência do mecanismo de micro-sulcamento, onde o material é deslocado lateralmente e para cima pelo grão abrasivo.

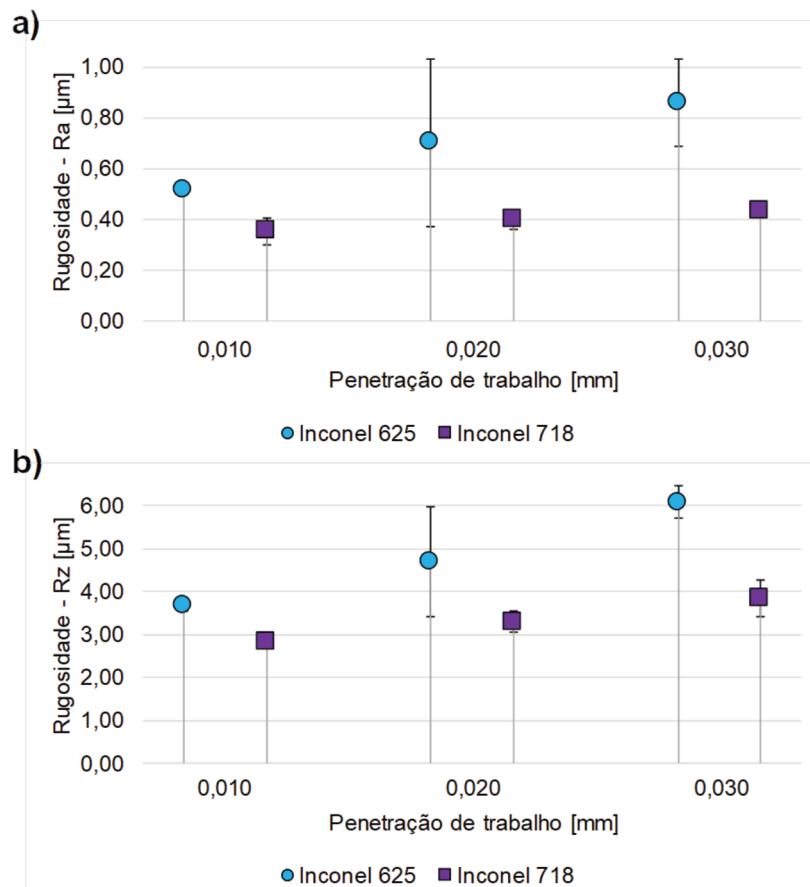


Figura 4.8 – Rugosidade das superfície de Inconel 625 e de Inconel 718 em função da penetração de trabalho após os ensaios de retificação: a) parâmetro Ra e b) parâmetro Rz.

Tabela 4.6 – Teste de ANOVA de fator único para a penetração de trabalho e os parâmetros de rugosidade (Ra e Rz) das superfície de Inconel 625 e de Inconel 718 retificadas.

Material	Variável	Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Inconel 625	Ra	a_e	2	0,1186	0,059299	17,29	0,023
		Erro	3	0,01029	0,003429		
		Total	5	0,12889			
	Rz	a_e	2	58593	29296	11,65	0,039
		Erro	3	0,7546	0,2515		
		Total	5	66139			
Inconel 718	Ra	a_e	2	0,006289	0,003144	2,01	0,279
		Erro	3	0,004693	0,001564		
		Total	5	0,010981			
	Rz	a_e	2	10516	0,52582	6,57	0,080
		Erro	3	0,2402	0,08008		
		Total	5	12919			

Os valores de rugosidade obtidos após a retificação das duas ligas analisadas em função da velocidade da peça (v_w) utilizada estão apresentados na Figura 4.9 e a análise de variância (ANOVA) de fator único (v_w), dos respectivos resultados, está apresentada na Tabela 4.7. Pelos resultados de ANOVA apresentados na Tabela 4.7 pode-se observar que a velocidade da peça não apresentou influência significativa nos resultados de rugosidade (R_a e R_z) para nenhuma das ligas analisadas. Na Figura 4.9 observa-se que, embora tenha ocorrido uma ligeira tendência de aumento da rugosidade com o aumento de v_w , essa tendência não foi significativa, uma vez que o desvio padrão dos resultados obtidos é em alguns casos maior que o aumento. Contudo, essa ligeira tendência está de acordo com o que foi relatado pelos autores Malkin e Guo (2008) e Marinescu et al.(2004) em que o aumento da velocidade da peça, v_w , implica no aumento na quantidade de material sendo removido por cada abrasivo, alterando a cinemática do processo. Ainda segundo estes autores, o aumento da velocidade da peça também implica no aumento na espessura de corte equivalente (h_{eq}) que pode ser obtida pela eq. (4).

Pela Figura 4.9 pode-se ainda observar que, embora a rugosidade de ambos materiais tenham apresentado a mesma tendência, os resultados de rugosidade (R_a e R_z) obtidos para o Inconel 625 ($R_a \approx 0,65 \mu\text{m}$) foram maiores que os obtidos para o Inconel 718 ($R_a \approx 0,40 \mu\text{m}$), independente da condição testada, assim como observado na também para os resultados que analisaram a influência da penetração de trabalho (Figura 4.8).

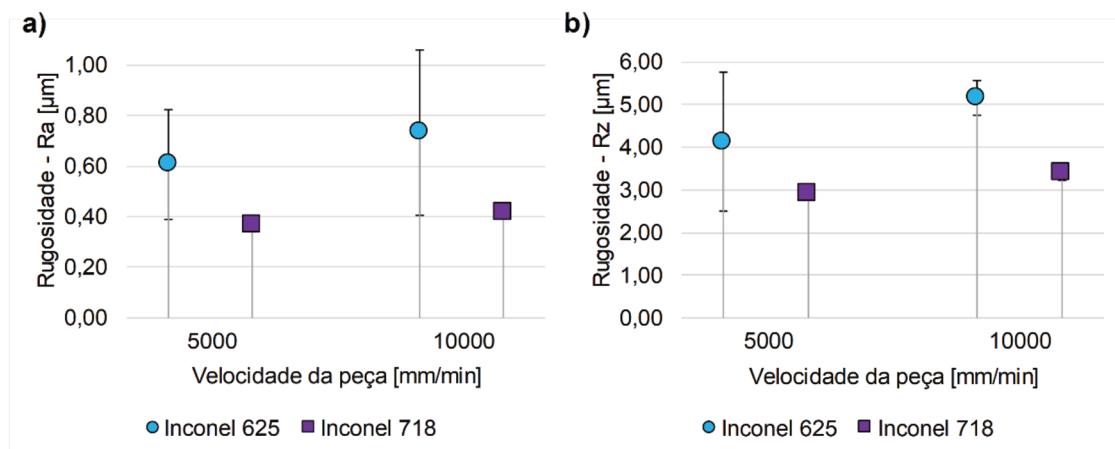


Figura 4.9 – Rugosidade das superfície de Inconel 625 e de Inconel 718 em função da velocidade da peça após os ensaios de retificação: a) parâmetro R_a e b) parâmetro R_z .

Tabela 4.7 – Teste de ANOVA de fator único para a velocidade da peça (v_w) e os parâmetros de rugosidade (Ra e Rz) das superfícies de Inconel 625 e de Inconel 718 retificadas.

Material	Variável	Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Inconel 625	Ra	v_w	1	0,01600	0,01600	0,21	0,693
		Erro	2	0,15385	0,07692		
		Total	3	0,16985			
	Rz	v_w	1	1082	1082	0,77	0,473
		Erro	2	2813	1407		
		Total	3	3895			
	Inconel 718	v_w	1	0,002601	0,002601	4,74	0,161
		Erro	2	0,001098	0,000549		
		Total	3	0,003699			
	Rz	v_w	1	0,22563	0,22563	8,57	0,100
		Erro	2	0,05265	0,02632		
		Total	3	0,27827			

Com relação aos resultados de rugosidade (Ra e Rz) obtidos após a retificação das duas ligas de níquel com diferentes velocidade de corte (v_s), eles estão dispostos na Figura 4.10. A análise de variância (ANOVA) de fator único (v_s), dos respectivos resultados graficamente na Fig. 4.17 está apresentada na Tabela 4.8. Da Tabela 4.8, pode-se observar que, com intervalo de confiança de 95%, a velocidade de corte apresentou influência significativa, nos parâmetros Ra e Rz, apenas para o Inconel 625, o que está também evidenciado na Figura 4.10. Os maiores valores de rugosidade (Ra $\approx 1,00 \mu\text{m}$) foram obtidos com a menor velocidade de corte (10 m/s). Ao aumentar a velocidade de 10 m/s para 20 m/s os valores de rugosidade diminuíram aproximadamente 50%, o que era esperado de acordo com a literatura. No trabalho conduzido por Sinha et al. (2016), os autores, ao retificar Inconel 718 com rebolo de SiC com $a_e = 0,105 \text{ mm}$ e $v_w = 15000 \text{ mm/min}$, observaram que os valores de rugosidade (Ra) diminuíram aproximadamente 70% ao aumentar a velocidade de corte de 10 m/s para 20 m/s. No entanto, os menores valores de rugosidade foram observados ao usinar com a velocidade 20 m/s, ou seja, quando a velocidade de corte foi aumentada para 30 m/s, os resultados de rugosidade aumentaram aproximadamente 15% (de 0,45 para 0,52 μm). Este comportamento está relacionado com as propriedades do Inconel 625, assim como já visto nos resultados da primeira etapa (Figura 4.1). Os valores de rugosidade obtidos para o Inconel 718, embora, de acordo com a ANOVA (Tabela 4.8), não tenham sofrido influência significativa da velocidade de corte, na Figura 4.10, pode-se observar uma discreta tendência de diminuição dos valores de rugosidade (Ra e Rz) com o aumento da velocidade de corte, apresentando assim um comportamento de acordo com o esperado pela literatura (MALKIN; GUO, 2008; SINHA et al., 2016).

Ao fazer uma comparação geral entre os resultados de rugosidade para os dois materiais em função dos diferentes parâmetros de corte, pode-se notar que, de forma semelhante às influências da penetração de trabalho (Figura 4.8) e velocidade da peça (Figura 4.9), os valores de rugosidade obtidos para o Inconel 718 foram menores que os obtidos para o Inconel 625, exceto para $v_s = 20$ m/s, onde não houve diferença nos resultados obtidos para as duas ligas.

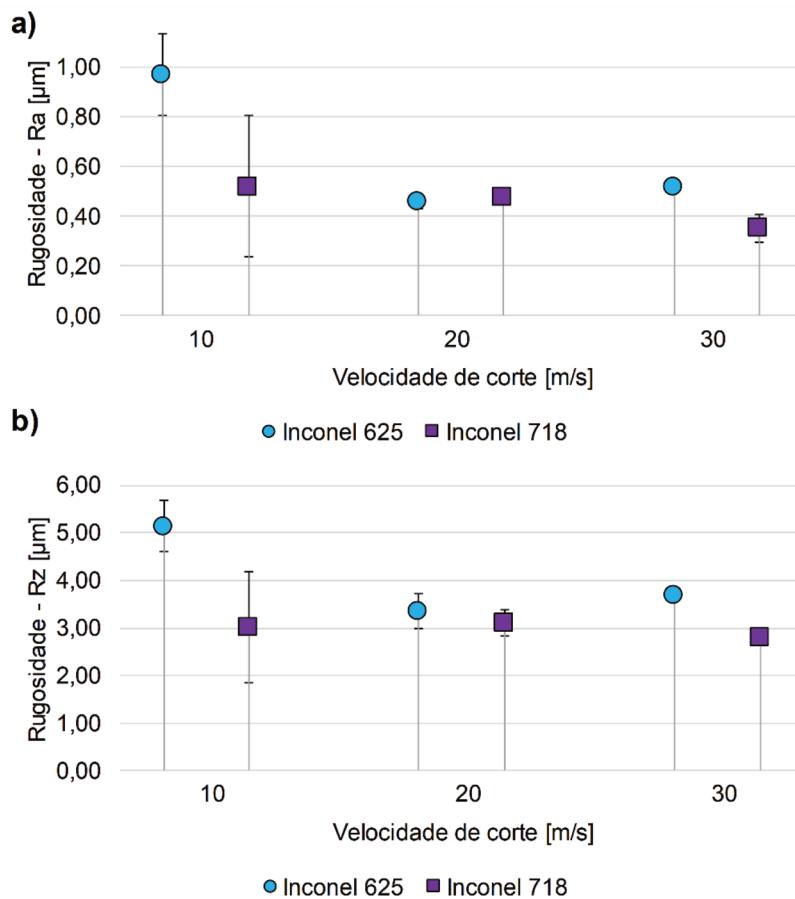


Figura 4.10 – Rugosidade das superfície de Inconel 625 e de Inconel 718 em função da velocidade de corte após os ensaios de retificação: a) parâmetro Ra e b) parâmetro Rz.

Tabela 4.8 – Teste de ANOVA de fator único para a velocidade de corte (v_s) e os parâmetros de rugosidade (Ra e Rz) das superfícies de Inconel 625 e de Inconel 718 retificadas.

Material	Variável	Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Inconel 625		v_s	2	0,31506	0,157530	16,47	0,024
		Ra	Erro	3	0,02870	0,009567	
		Total	5	0,34376			
Inconel 718		v_s	2	36656	18328	12,54	0,035
		Rz	Erro	3	0,4384	0,1461	
		Total	5	41041			
		v_s	2	0,03049	0,01524	0,53	0,635
		Ra	Erro	3	0,08622	0,02874	
		Total	5	0,11671			
		v_s	2	0,08493	0,04247	0,09	0,918
		Rz	Erro	3	143975	0,47992	
		Total	5	152468			

Por fim, os resultados de rugosidade (Ra e Rz) em função da granulometria do rebolo estão dispostos na Figura 4.11 e a análise de variância (ANOVA) de fator único (granulometria), dos respectivos resultados, está apresentada na Tabela 4.9. Pelos resultados de ANOVA apresentados na Tabela 4.9, pode-se observar que, com intervalo de confiança de 95%, a granulometria do rebolo apresentou influência significativa somente para o parâmetro Ra e apenas para o Inconel 625. Na Figura 4.11, observa-se para o Inconel 718 que mesmo não tendo influência significativa de acordo com o teste de ANOVA, os parâmetros de rugosidade Ra e Rz diminuíram com a diminuição do tamanho grão abrasivo, ou seja, com o aumento da granulometria mesh. Tal comportamento já era esperado conforme o que é relatado na literatura, pois quanto menor for tamanho do abrasivo, mais estreitos serão os sulcos e, consequentemente, mais rasos (Marinescu et al., 2004). Resultados similares apresentados na primeira etapa (Figura 4.1) onde ao passar de mesh #60 para #80 os valores de rugosidade melhoraram para o Inconel 625.

Já para o Inconel 718 pode-se observar que os valores de rugosidade (Figura 4.11) aumentaram ao diminuir o tamanho do abrasivo do rebolo de mesh #60 para mesh #100. Uma tendência oposta era esperada de acordo com os resultados obtidos na primeira etapa (Figura 4.1). Por outro lado, um dos fatores destacados por Marinescu et al. (2004) de influência na rugosidade é o empastamento do rebolo durante a retificação. Como a ductilidade do Inconel 625 é maior que a do Inconel 718 (alongamento aproximadamente 80% a 650 °C), o rebolo estará mais propenso à ocorrência de empastamento do rebolo. O fenômeno do empastamento do rebolo também foi observado por Biswas et al. (2018), que conduziram um estudo de retificação do Inconel 600 (liga com ductilidade próxima do Inconel 625), utilizando

rebolo de Al_2O_3 com granulometria mesh #54, $v_s = 30 \text{ m/s}$, $v_w = 7500 \text{ mm/min}$ e variando a penetração de trabalho de 0,010 a 0,030 mm. Assim, ao reduzir o tamanho do grão abrasivo (maior granulometria mesh) e mantendo a estrutura do rebolo constante, há uma diminuição no tamanho dos poros e consequentemente no espaço disponível para alojar os cavacos gerados. Desta forma, o pior acabamento (maior valor de rugosidade) gerado pelo rebolo de menor tamanho de abrasivo pode ser justificado pela falta de espaço para alojamento dos cavacos gerados, ou seja, ocorrência do empastamento do mesmo.

Ao comparar os resultados de rugosidade obtidos para as duas ligas de níquel, de modo geral, observa-se que o Inconel 718 apresentou os menores valores de rugosidade em relação ao Inconel 625. E esta diferença ainda foi maior quando os ensaios foram realizados com o rebolo de menor tamanho de grão abrasivo (granulometria #100), condição em que a rugosidade Ra foi aproximadamente 50% menor (Figura 4.11a).

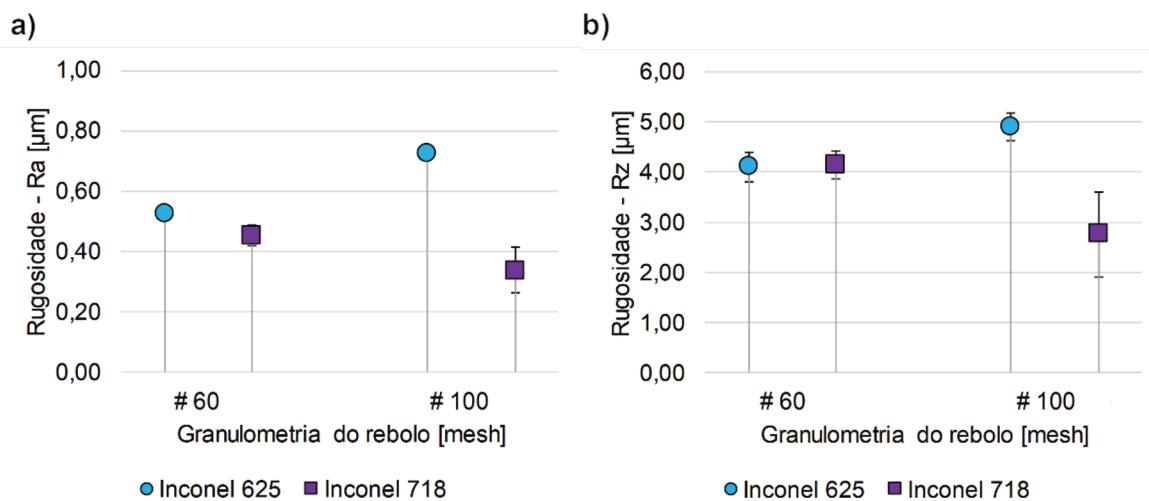


Figura 4.11 – Rugosidade das superfícies de Inconel 625 e de Inconel 718 em função da granulometria do rebolo após os ensaios de retificação: a) parâmetro Ra e b) parâmetro Rz.

Tabela 4.9 – Teste de ANOVA de fator único para a granulometria do rebolo e os parâmetros de rugosidade (Ra e Rz) das superfícies de Inconel 625 e de Inconel 718 retificadas.

Material	Variável	Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Inconel 625	Ra	Granulometria	1	0,038220	0,038220	205,21	0,005
		Erro	2	0,000372	0,000186		
		Total	3	0,038593			
	Rz	Granulometria	1	0,6480	0,64802	7,90	0,107
		Erro	2	0,1640	0,08202		
		Total	3	0,8121			
	Inconel 718	Granulometria	1	0,012996	0,012996	3,67	0,195
		Erro	2	0,007082	0,003541		
		Total	3	0,020078			
	Ra	Granulometria	1	19460	19460	4,99	0,155
		Erro	2	0,7802	0,3901		
		Total	3	27263			

De modo geral, pode-se observar que em todas as condições investigadas os valores de rugosidade (Ra) ficaram abaixo de 1 μm , para ambos os materiais analisados (Inconel 625 e Inconel 718), estando assim dentro da faixa de 0,1 μm a 1,6 μm apresentada por Machado et al.(2015) e da faixa de 0,1 μm a 2 μm apresentada por Puerto et al. (2013) como referência para o processo de retificação.

Um resumo com o efeito de cada parâmetro de corte testado na rugosidade (parâmetros Ra e Rz) para as duas ligas testadas (Inconel 625 e Inconel 718) está apresentado na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Efeitos dos parâmetros de entrada na rugosidade (Ra e Rz) das superfícies de Inconel 625 e de Inconel 718 retificadas.

Variável	Material	Valor médio	a_e [mm]		v_w [mm/min]	v_s [m/s]		Gran. [mesh]
			0,010	0,020		10	20	
			↓ 0,020	↓ 0,030		↓ 20	↓ 30	
Ra	Inconel 625	0,68	↑ 36%	↑ 22%	↑ 21%	↓ -53%	↑ 13%	↑ 37%
	Inconel 718	0,42	↑ 13%	↑ 8%	↑ 14%	↓ -9%	↓ -26%	↓ -25%
Rz	Inconel 625	4,58	↑ 28%	↑ 30%	↑ 25%	↓ -35%	↑ 10%	↑ 20%
	Inconel 718	3,26	↑ 17%	↑ 16%	↑ 16%	↑ 2%	↓ -9%	↓ -34%

4.2.2. Análise da superfície por microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A seguir estão apresentadas as imagens das superfícies do Inconel 625 e do Inconel 718 obtidas com microscópio eletrônico de varredura (MEV) após o processo de retificação em função dos parâmetros de entrada analisados: penetração de trabalho (Figura 4.12), velocidade da peça (Figura 4.13), velocidade de corte (Figura 4.14) e granulometria do rebolo (Figura 4.15).

Nas Figura 4.12a-f estão as imagens das superfícies do Inconel 625 (Figura 4.12a; c; e) e do Inconel 718 (Figura 4.12b; d; f) retificadas em função da penetração de trabalho utilizada. Das Figura 4.12a; c; e (Inconel 625), nota-se que a quantidade de material deformado plasticamente aderido à peça aumentou com o aumento do a_e (aumento do mecanismo de desgaste por micro-sulcamento), devido aumento da taxa de remoção de material com a penetração de trabalho. Tal comportamento também pode ser verificado pelos resultados obtidos de rugosidade (Figura 4.8). Já para o Inconel 718 (Figura 4.12b; d; f), não pode ser observada a mesma tendência, uma vez que as superfícies estão com textura bastante semelhante. Com base nos resultados de rugosidade apresentados na Figura 4.8, uma tendência similar era esperada, uma vez que o a_e não foi estatisticamente significativo para a rugosidade do Inconel 718.

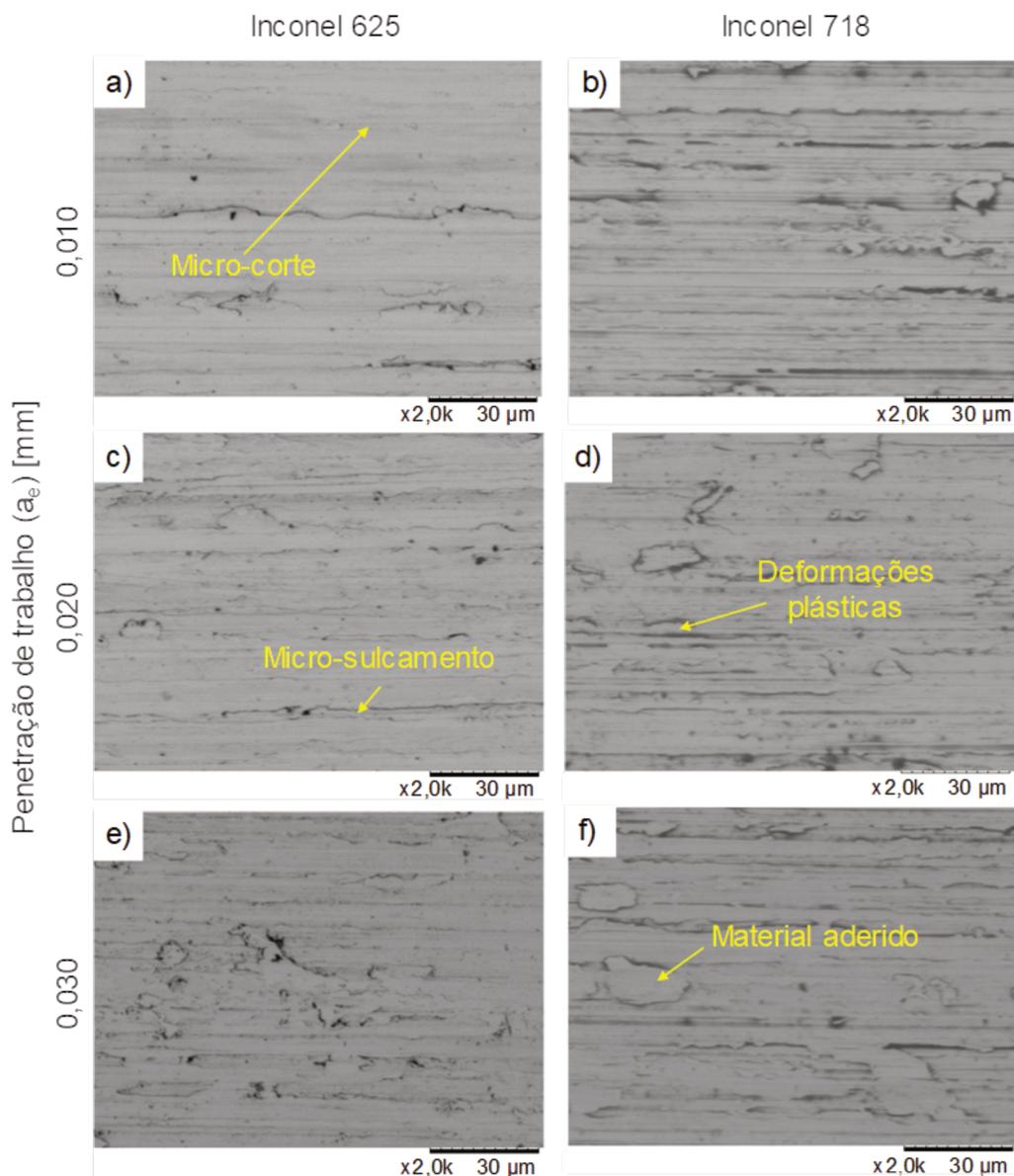


Figura 4.12 – Imagens de MEV das superfícies do Inconel 625 e Inconel 718 retificadas em função da penetração de trabalho ($v_s = 30$ m/s; $v_w = 7500$ mm/min; #80).

As imagens de MEV das superfícies retificadas em função da velocidade da peça (v_w) estão apresentadas na Figura 4.13. Conforme já esperado pelo que foi observado pelos resultados de rugosidade apresentados na Figura 4.9 e o teste de ANOVA dos mesmos apresentados na Tabela 4.7, das imagens na Figura 4.13 é possível observar que não houve modificações significativas nas características das superfícies retificadas com a alteração da velocidade da peça, independente do material analisado.

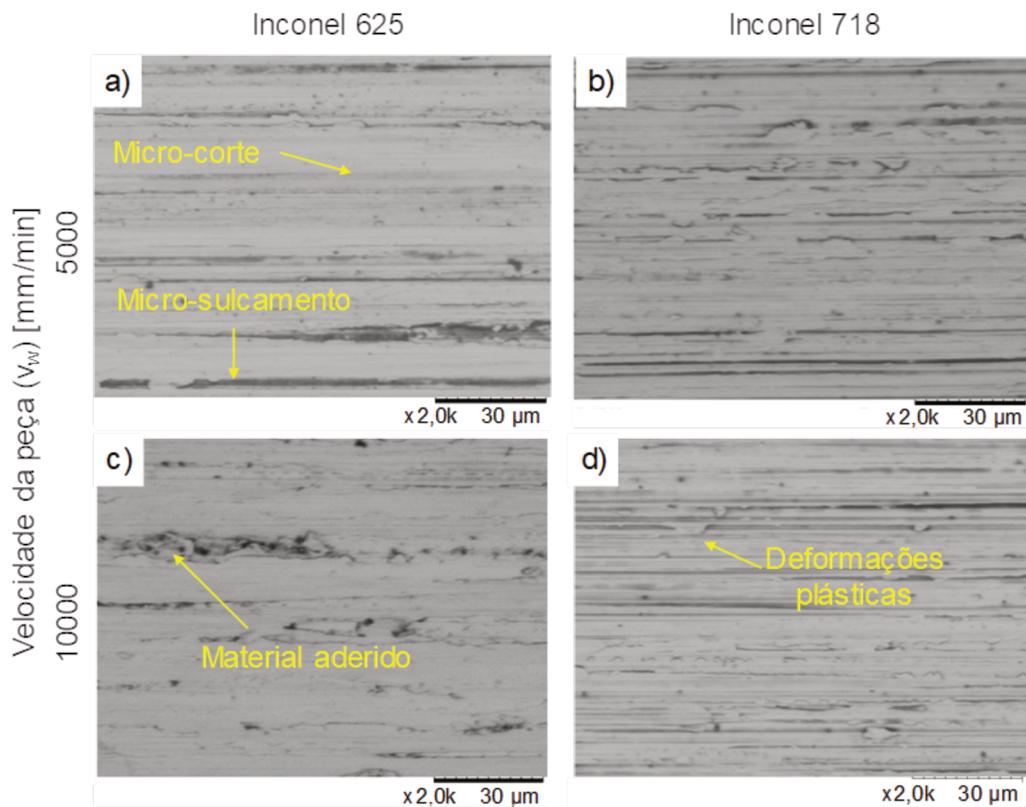


Figura 4.13 – Imagens de MEV das superfícies de Inconel 625 e Inconel 718 retificadas em função da velocidade da peça ($a_e = 0,010 \text{ mm}$; $v_s = 30 \text{ m/s}$; #80).

Na Figura 4.14 são apresentadas as imagens das superfícies do Inconel 625 (Figura 4.14a; c; e) e do Inconel 718 (Figura 4.14b; d; f) retificadas em função da velocidade de corte (v_s). Para ambos os materiais é possível observar que as deformações plásticas (mecanismo de micro-sulcamento) se intensificaram com o aumento da velocidade de corte. Os valores de rugosidade, no entanto, não apresentaram a mesma tendência (Figura 4.10), com exceção do Inconel 625 variando a velocidade de corte de 20 m/s para 30 m/s. Os maiores valores de rugosidade para a menor velocidade de corte se devem ao fato da maior espessura de corte equivalente que deixam sulcos maiores. Contudo, ao empregar a menor velocidade de corte, também pôde-se observar que a presença de deformações plásticas na superfície foi menor.

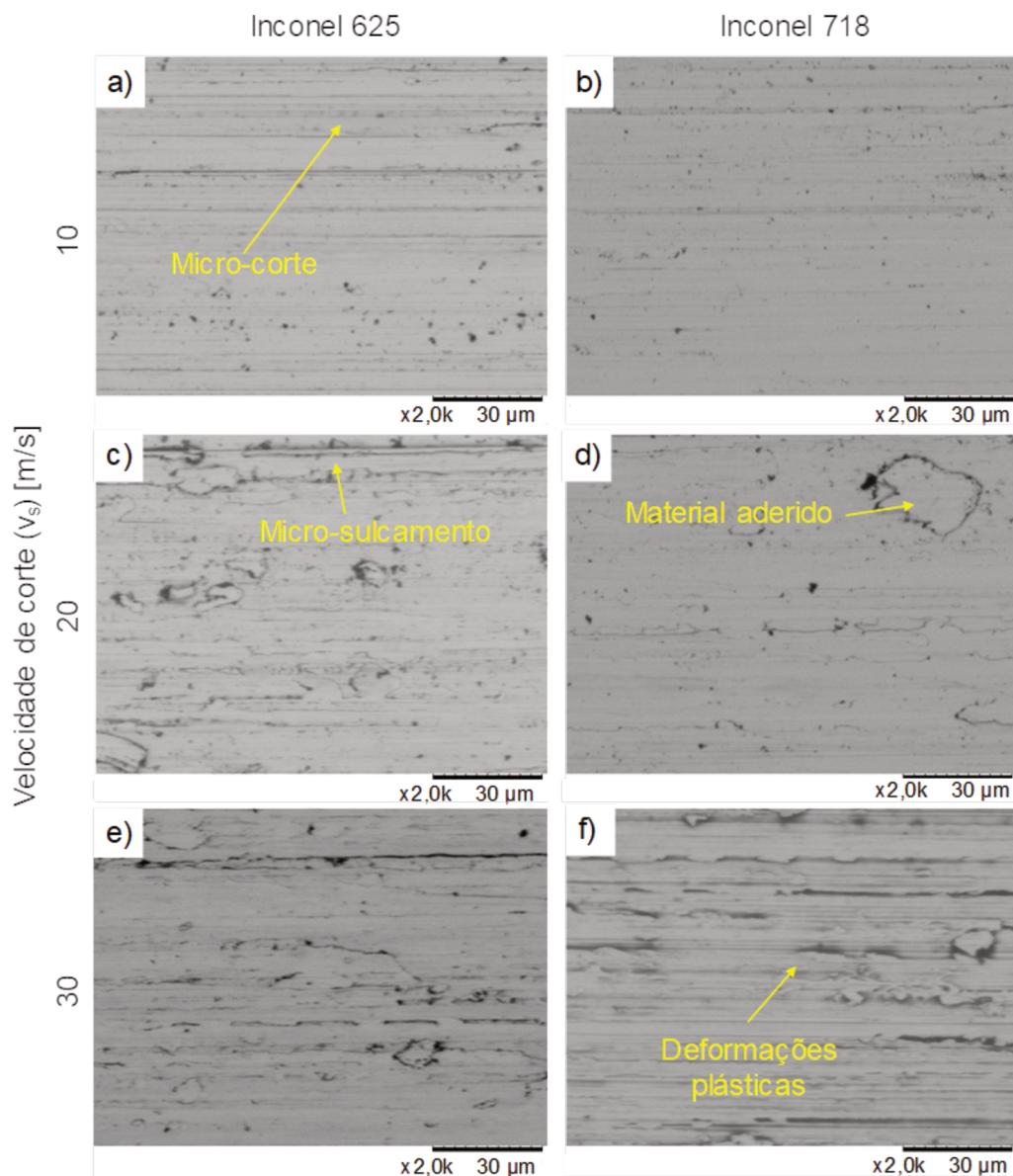


Figura 4.14 – Imagens de MEV das superfícies de Inconel 625 e Inconel 718 retificadas em função da velocidade de corte ($a_e = 0,010 \text{ mm}$; $v_w = 7500 \text{ mm/min}$; #80).

As imagens de MEV das superfícies de Inconel 625 e Inconel 718 retificadas em função da granulometria do rebolo estão apresentadas na Figura 4.15. Para o Inconel 625 cujas imagens estão na Figura 4.15a e c, nota-se que a quantidade de material deformado plasticamente aderido à peça aumentou com a diminuição do tamanho do abrasivo, ou seja, com o aumento do mesh de #60 para #100, tendência essa que está de acordo com o esperado com base nos resultados de rugosidade (Figura 4.11). O aumento na quantidade de material aderido na superfície retificada com rebolo de granulometria mesh #100 (Figura 4.15c), em relação à retificada com o rebolo mesh #60, confirma a hipótese de que o rebolo estava com espaço limitado para alojar os cavacos gerados no processo, ou seja, ocorreu o fenômeno do empastamento já relatado nos ensaios de retificação realizados por Liu et al.

(2007), onde os autores retificaram Inconel 718 com três tipos de abrasivos (Al_2O_3 , cBN e diamante) e observaram que, devido à menor porosidade, os rebolos superabrasivos testados sofreram com o empastamento.

Para o Inconel 718 (Figura 4.15b; d), uma diferente tendência foi observada em relação a textura do Inconel 625. As texturas das superfícies (topografia) apresentaram-se bastante semelhantes em relação à quantidade de material aderido à mesma, independente da granulometria do rebolo. Assim, os menores valores de rugosidade obtidos para o Inconel 718 com rebolo de granulometria mesh #100 em relação ao de granulometria mesh #60 se devem ao menor tamanho do abrasivo que resultou em sulcos mais estreitos na superfície e consequentemente mais rasos, o que contribuir para a manutenção de um bom acabamento.

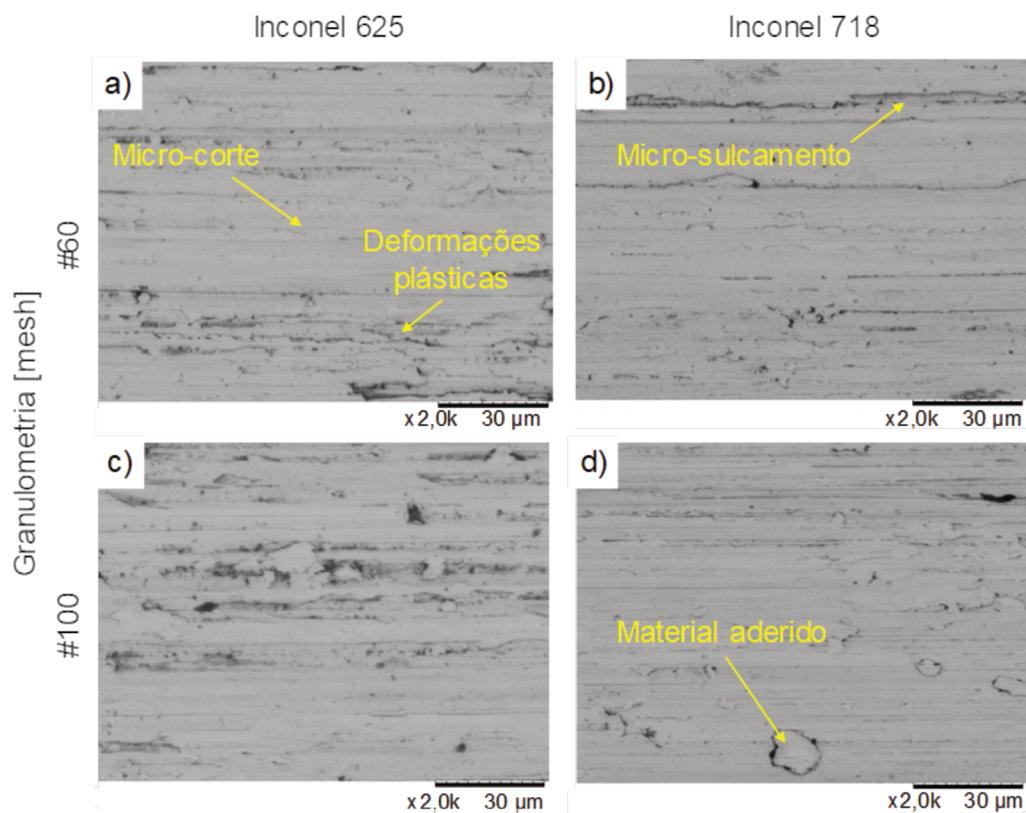


Figura 4.15 – Imagens de MEV das superfícies de Inconel 625 e Inconel 718 retificadas em função da granulometria do rebolo ($a_e = 0,010 \text{ mm}$; $v_s = 30 \text{ m/s}$; $v_w = 7500 \text{ mm/min}$).

4.2.3. Microtureza na superfície retificada

Conforme mencionado na metodologia, foram realizadas medições para cada amostra em região não retificada, ou seja, região que não há influência do processo de retificação, para servirem como referência para as comparações com aquela obtidas após os testes de retificação. Em seguida foram feitos os cálculos da média e desvio padrão para todas as

medidas de todas as amostras nesta região. Os resultados foram 294 ± 10 HV_{0,2} e 458 ± 16 HV_{0,2} para o Inconel 625 e Inconel 718, respectivamente.

Os resultados da microdureza medida nas superfícies do Inconel 625 retificadas em função da penetração de trabalho estão dispostos na Figura 4.16, onde podem ser observados os mapas de microdureza nas superfícies retificadas (Figura 4.16a) e um gráfico de barras com a média e o desvio padrão dos valores medidos nas respectivas superfícies (Figura 4.16b). Para auxiliar na análise destes resultados, calculou-se a ANOVA de fator único (a_e) para os valores de microdureza obtidos nas superfícies retificadas, cujos resultados estão apresentados na Tabela 4.11. De acordo com os resultados de ANOVA, a penetração de trabalho não exerceu uma influência significativa, considerando um nível de confiança de 95%, nos valores de microdureza obtidos nas superfícies retificadas. De acordo com os resultados apresentados na Figura 4.16, é possível confirmar que, independente da penetração de trabalho, após a retificação foram obtidos valores de microdureza de aproximadamente 430 HV_{0,2}. Entretanto, este valor é cerca de 40% maior que o valor da microdureza do material. Este aumento de dureza na superfície pode ser atribuído ao fenômeno do encruamento, de acordo com Donachie and Donachie (2002), ligas como o Inconel 625 são susceptíveis ao encruamento durante o processo de usinagem. Ren and Liu (2016) relataram que o mecanismo de endurecimento primário durante a usinagem do Inconel 718 pode ser atribuído aos ciclos de rápido aquecimento e de resfriamento, enquanto o endurecimento secundário está relacionado às deformações mecânicas.

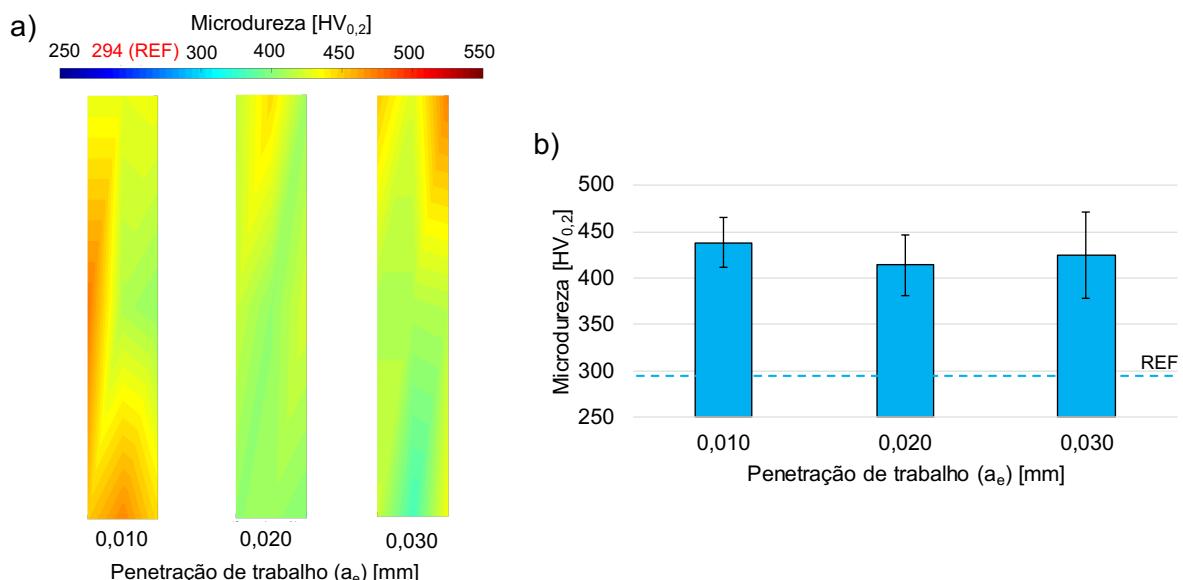


Figura 4.16 – Microdureza na superfície do Inconel 625 retificada em função da penetração de trabalho (a_e): a) Mapa de microdureza nas superfícies e b) valor médio para cada superfície.

Tabela 4.11 – Teste de ANOVA de fator único para a microdureza na superfície retificada em função da penetração de trabalho para o Inconel 625.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
a_e	2	702	351	2,14	0,264
Erro	3	491,5	163,8		
Total	5	1193,6			

Os resultados da microdureza medidas nas superfícies do Inconel 718 retificadas em função da penetração de trabalho estão dispostos na Figura 4.17, onde podem ser observados os mapas de microdureza nas superfícies retificadas (Figura 4.17a) e um gráfico de barras com a média e o desvio padrão dos valores medidos nas respectivas superfícies (Figura 4.17b). De forma semelhante ao que foi feito para auxiliar na análise dos resultados obtidos para o Inconel 625, calculou-se a ANOVA de fator único (a_e) para os valores de microdureza obtidos nas superfícies do Inconel 718 retificadas do, cujos resultados estão apresentados na Tabela 4.12. De acordo com os resultados de ANOVA, assim como observado para o Inconel 625 (Tabela 4.11), a penetração de trabalho não exerceu uma influência significativa, considerando uma confiança de 95%, nos valores de microdureza obtidos nas superfícies do Inconel 718 retificadas. De acordo com os resultados apresentados na Figura 4.17, é possível confirmar que, independente da penetração de trabalho, após a retificação foram obtidos valores de microdureza de aproximadamente $456 \text{ HV}_{0,2}$. Diferentemente do comportamento observado para a microdureza do Inconel 625 (Figura 4.16), os valores de microdureza nas superfícies do Inconel 718 após o processo de retificação, para todos os valores de a_e analisados, não sofreram variações em relação ao valor de microdureza da matriz, adotados como referência, indicando que não houve a ocorrência do fenômeno do encruamento.

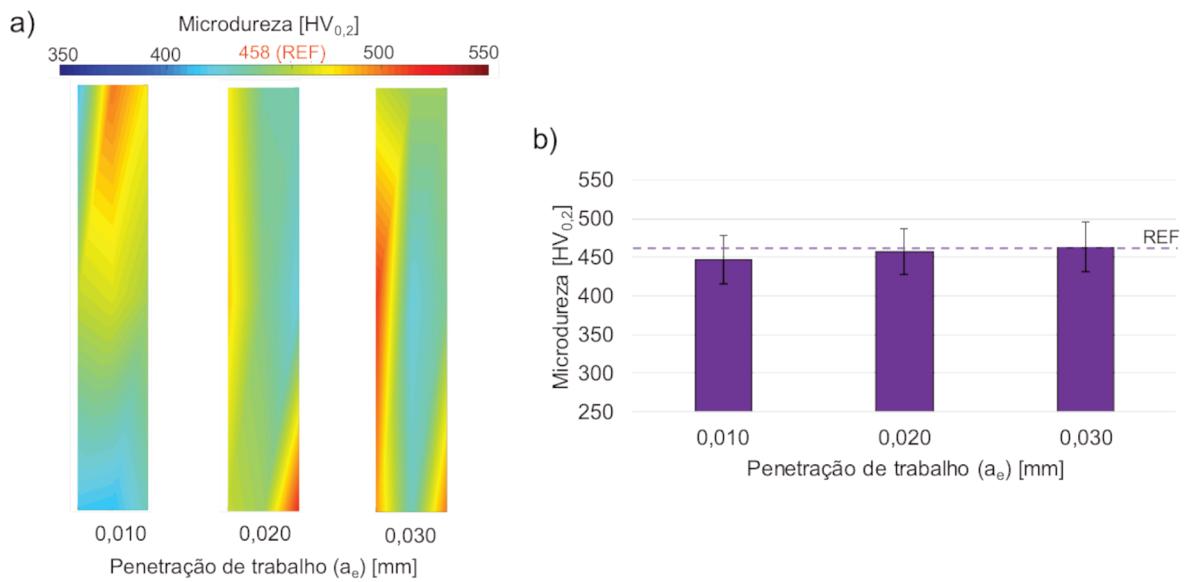


Figura 4.17 – Microdureza na superfície do Inconel 718 retificada em função da penetração de trabalho (a_e): a) Mapa de microdureza nas superfícies e b) valor médio para cada superfície.

Tabela 4.12 – Teste de ANOVA de fator único para a microdureza na superfície retificada em função da penetração de trabalho para o Inconel 718.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
a_e	2	547,7	273,9	1,34	0,383
Erro	3	612,1	204		
Total	5	1159,8			

Os resultados da microdureza medidas nas superfícies do Inconel 625 retificadas em função da velocidade da peça estão dispostos na Figura 4.18 e a respectiva análise de variância de fator único (v_w) dos resultados está disposta na Tabela 4.13. De acordo com os resultados de ANOVA, a velocidade da peça, assim como a penetração de trabalho, não exerceram uma influência significativa nos valores de microdureza obtidos nas superfícies de Inconel 625 retificadas, considerando uma confiança de 95%, e de acordo com os resultados apresentados na Figura 4.18, é possível confirmar que, independente da velocidade da peça, após a retificação foram obtidos valores de microdureza de aproximadamente 440 HV_{0,2}. Assim como observado para os testes variando a penetração de trabalho (Figura 4.16), também houve um aumento na microdureza da superfície de aproximadamente 49% que também pode ser atribuído à ocorrência do fenômeno do encruamento.

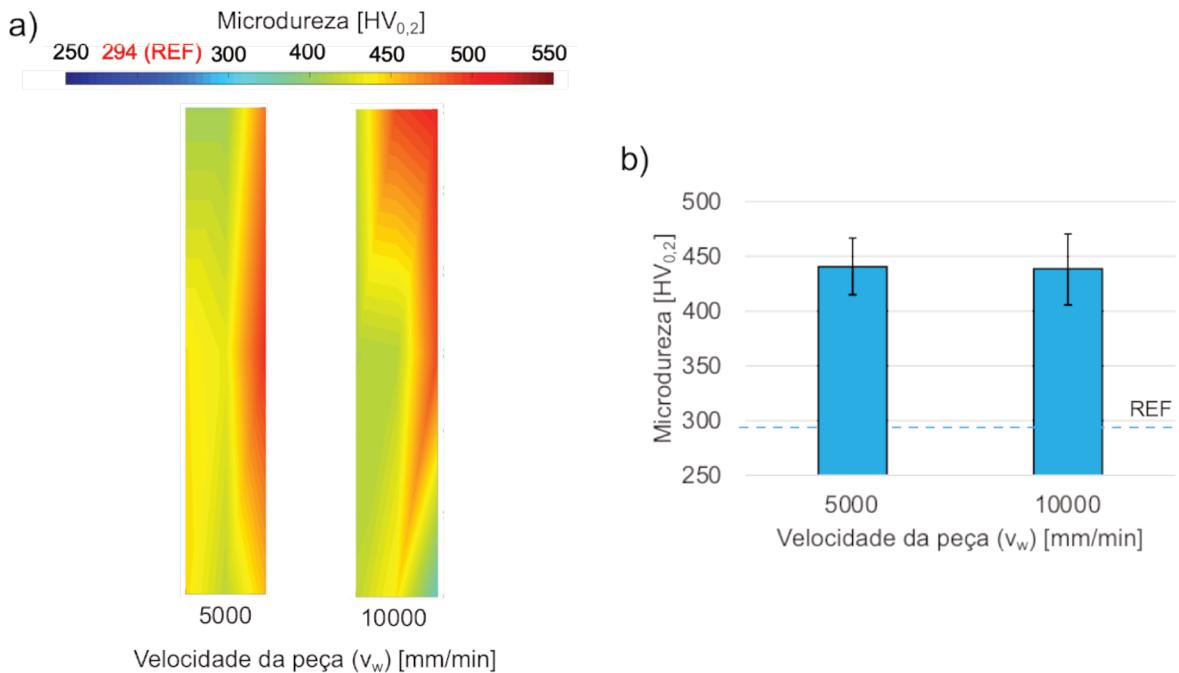


Figura 4.18 – Microdureza na superfície do Inconel 625 retificada em função da velocidade da peça (v_w): a) Mapa de microdureza nas superfícies e b) valor médio para cada superfície.

Tabela 4.13 – Teste de ANOVA de fator único para a microdureza na superfície retificada em função da velocidade da peça para o Inconel 625.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
v_w	1	0,25	0,25	0	0,979
Erro	2	542,812	271,406		
Total	3	543,062			

Os resultados da microdureza medidas nas superfícies do Inconel 718 retificadas em função da velocidade da peça estão dispostos na Figura 4.19 e a respectiva análise de variância de fator único (v_w) dos resultados está disposta na Tabela 4.14. De acordo com os resultados de ANOVA, a velocidade da peça, assim como a penetração de trabalho, não exerceu uma influência significativa, considerando uma confiança de 95%, nos valores de microdureza obtidos nas superfícies de Inconel 718 retificadas. De acordo com os resultados apresentados na Figura 4.19, é possível confirmar que, independente da velocidade da peça, após a retificação foram obtidos valores de microdureza próximos aos da matriz (458 HV_{0,2}), indicando mais uma vez que não houve a ocorrência do fenômeno do encruamento para o Inconel 718 nestas condições.

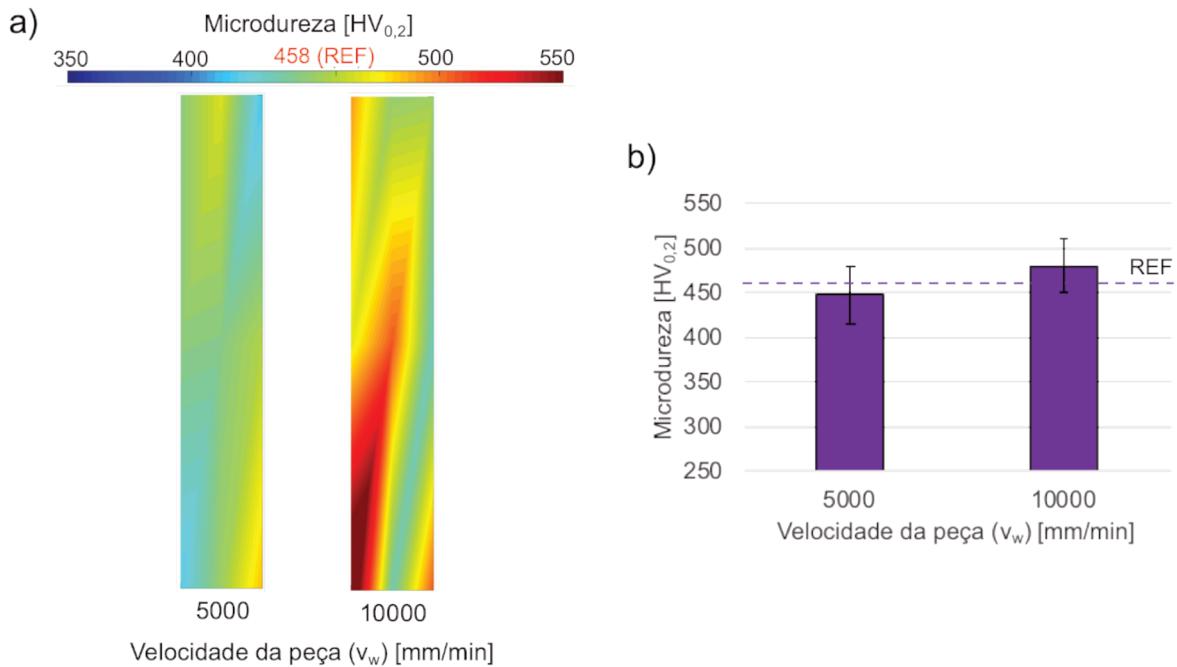


Figura 4.19 – Microdureza na superfície do Inconel 718 retificada em função da velocidade da peça (v_w): a) Mapa de microdureza nas superfícies e b) valor médio para cada superfície.

Tabela 4.14 – Teste de ANOVA de fator único para a microdureza na superfície retificada em função da velocidade da peça para o Inconel 718.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
v_w	1	819,4	819,4	5,51	0,143
Erro	2	297,5	148,8		
Total	3	1116,9			

Os resultados da microdureza medidas nas superfícies do Inconel 625 retificadas em função da velocidade de corte (v_s) estão dispostos na Figura 4.20, onde podem ser observados os mapas de microdureza nas superfícies retificadas (Figura 4.20a) e um gráfico de barras com a média e o desvio padrão dos valores medidos nas respectivas superfícies (Figura 4.20b). Na Tabela 4.15 é apresentada uma análise de variância de fator único (v_s) para os valores de microdureza obtidos nas superfícies de Inconel 625 retificadas. De acordo com os resultados de ANOVA, a velocidade de corte exerceu uma influência significativa nos valores de microdureza obtidos nas superfícies retificadas. De acordo com os resultados apresentados na Figura 4.20, é possível observar que, embora para todas as condições tenha ocorrido um aumento na microdureza superficial, quando utilizados $v_s = 10$ m/s e $v_s = 20$ m/s, o aumento de dureza foi muito menos significativo (aproximadamente 15%) que o apresentado para o $v_s = 30$ m/s (aproximadamente 49%). Este comportamento pode ser

justificado pela temperatura na zona de retificação que foi maior para a velocidade de corte de 30 m/s, porém ainda menor que a temperatura de recristalização, favorecendo assim as deformações plásticas e consequentemente o encruamento conforme pôde ser visto na Figura 4.14, onde é possível confirmar que o emprego da velocidade de corte de 30 m/s resultou em maior número de deformações plásticas na superfície retificada. Os resultados de temperatura estão apresentados adiante, no item 4.2.7.

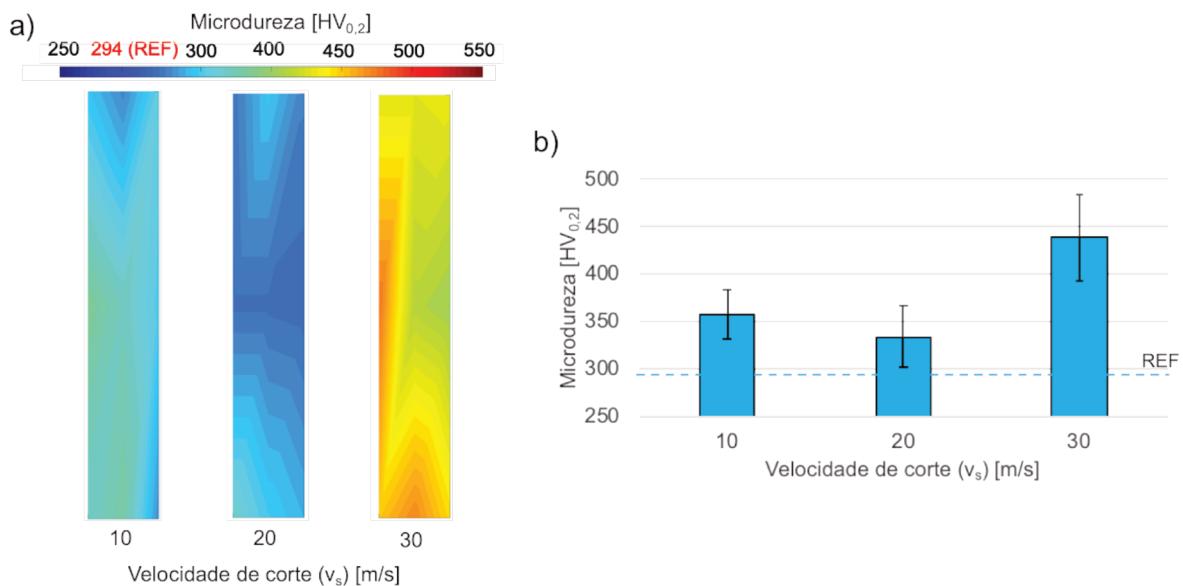


Figura 4.20 – Microdureza na superfície do Inconel 625 retificada em função da velocidade de corte (v_s): a) Mapa de microdureza nas superfícies e b) valor médio para cada superfície.

Tabela 4.15 – Teste de ANOVA de fator único para a microdureza na superfície retificada em função da velocidade de corte para o Inconel 625.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
v_s	2	12763,1	6381,57	164,42	0,001
Erro	3	116,4	38,81		
Total	5	12879,6			

Os resultados da microdureza medidas nas superfícies do Inconel 718 retificadas em função da velocidade de corte (v_s) estão apresentados na Figura 4.21 e a análise de variância de fator único (v_s) para os valores de microdureza obtidos nas superfícies do Inconel 718 retificadas estão apresentados na Tabela 4.16. De acordo com os resultados de ANOVA, a velocidade de corte não foi significativa para os valores de microdureza obtidos nas superfícies do Inconel 718 retificadas. Contudo, de acordo com os resultados apresentados na Figura 4.21, para as velocidade de 10 m/s e 20 m/s pode ser observada uma queda nos

valores de microdureza na superfície retificada. Resultado similar de queda de dureza na superfície de Inconel 718 retificada foi observado por Yao et al.(2013) utilizando $v_s = 25$ m/s ($a_e = 0,005$ mm e $0,020$ mm) e os autores atribuíram a suavização da dureza ao crescimento da fase γ' na fase γ , ou seja, a uma relação estreita com o tratamento térmico prévio. Para a velocidade de 30 m/s não ocorreu nenhuma variação significativa nos valores de microdureza na superfície.

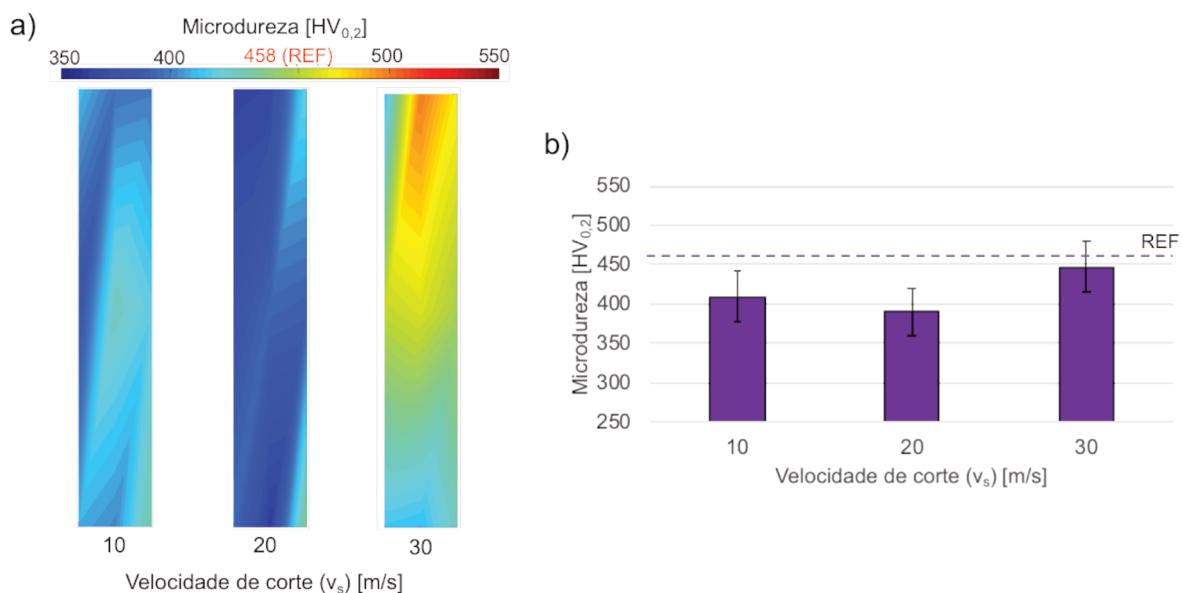


Figura 4.21 – Microdureza na superfície do Inconel 718 retificada em função da velocidade de corte (v_s): a) Mapa de microdureza nas superfícies e b) valor médio para cada superfície.

Tabela 4.16 – Teste de ANOVA de fator único para a microdureza na superfície retificada em função da velocidade de corte para o Inconel 718.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
v_s	2	3199,6	1599,8	5,4	0,101
Erro	3	888,1	296		
Total	5	4087,6			

Os resultados da microdureza medidas nas superfícies do Inconel 625 retificadas em função da granulometria do rebolo estão dispostos na Figura 4.22 e a respectiva análise de variância de fator único (granulometria) dos resultados está disposta na Tabela 4.17. De acordo com os resultados de ANOVA, a granulometria do rebolo, assim como a penetração de trabalho e a velocidade da peça, não exerceu uma influência significativa, considerando uma confiança de 95%, nos valores de microdureza obtidos nas superfícies de Inconel 625 retificadas. De acordo com os resultados apresentados na Figura 4.22, é possível observar

que embora seja leve, houve uma certa tendência da microdureza na superfície retificada com o rebolo com menor tamanho de grão (mesh #100) apresentar uma menor elevação nos valores de microdureza. Essa tendência pode ser atribuída ao fato de que com o menor tamanho de abrasivo, os sulcos formados na superfície da peças são mais estreitos e rasos (MARINESCU et al., 2004), ou seja, há menos deformações plásticas e consequentemente menor efeito do encruamento. Ainda assim, foi observado um aumento de aproximadamente 33% na microdureza com o rebolo mesh #100 enquanto para o rebolo mesh #60 foi observado um aumento de aproximadamente 41%.

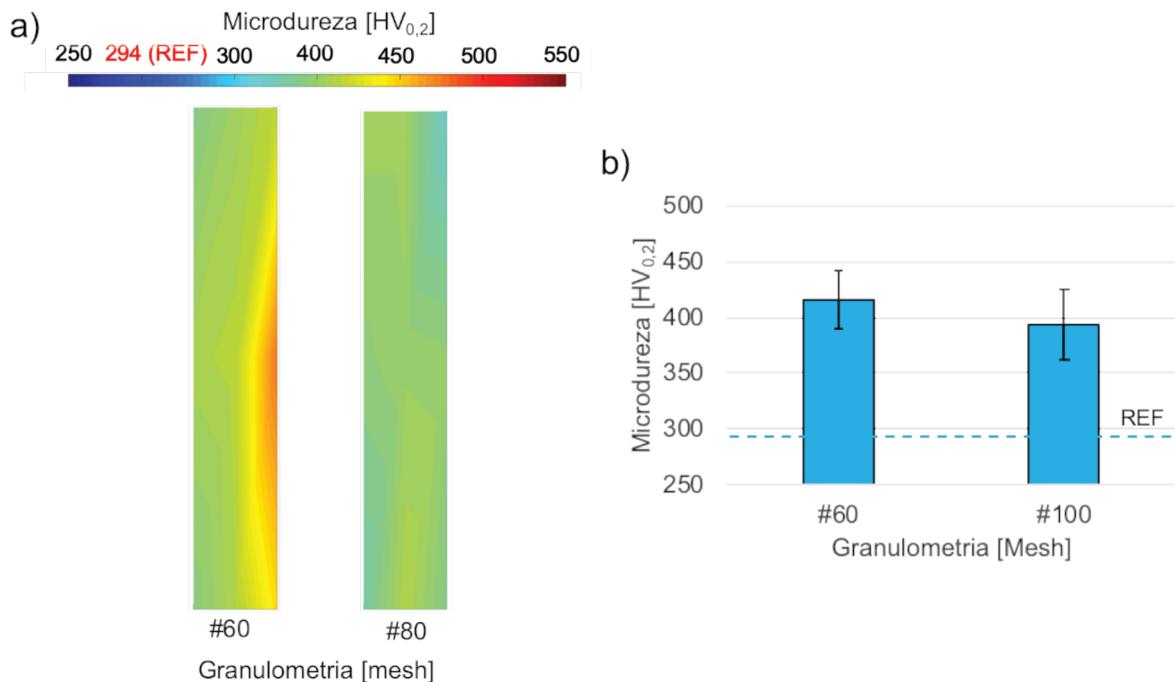


Figura 4.22 – Microdureza na superfície do Inconel 625 retificada em função da granulometria do rebolo: a) Mapa de microdureza nas superfícies e b) valor médio para cada superfície.

Tabela 4.17 – Teste de ANOVA de fator único para a microdureza na superfície retificada em granulometria do rebolo para o Inconel 625.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Granulometria	1	582	582	3,12	0,219
Erro	2	373,3	186,6		
Total	3	955,3			

Os resultados da microdureza medidas nas superfícies do Inconel 718 retificadas em função da granulometria do rebolo estão dispostos na Figura 4.23 e a respectiva análise de variância de fator único (granulometria) dos resultados está disposta na Tabela 4.18. De

acordo com os resultados de ANOVA, a granulometria do rebolo, assim como a penetração de trabalho e velocidade da peça, não exerceu uma influência significativa, considerando uma confiança de 95%, nos valores de microdureza obtidos nas superfícies de Inconel 718 retificadas. De acordo com os resultados apresentados na Figura 4.19, é possível confirmar que, os valores de microdureza obtidos estão próximos àquele da matriz (458 HV_{0,2}), independente da velocidade da peça, o que ajuda a reforçar que não houve alterações na microdureza superficial para o Inconel 718 nestas condições.

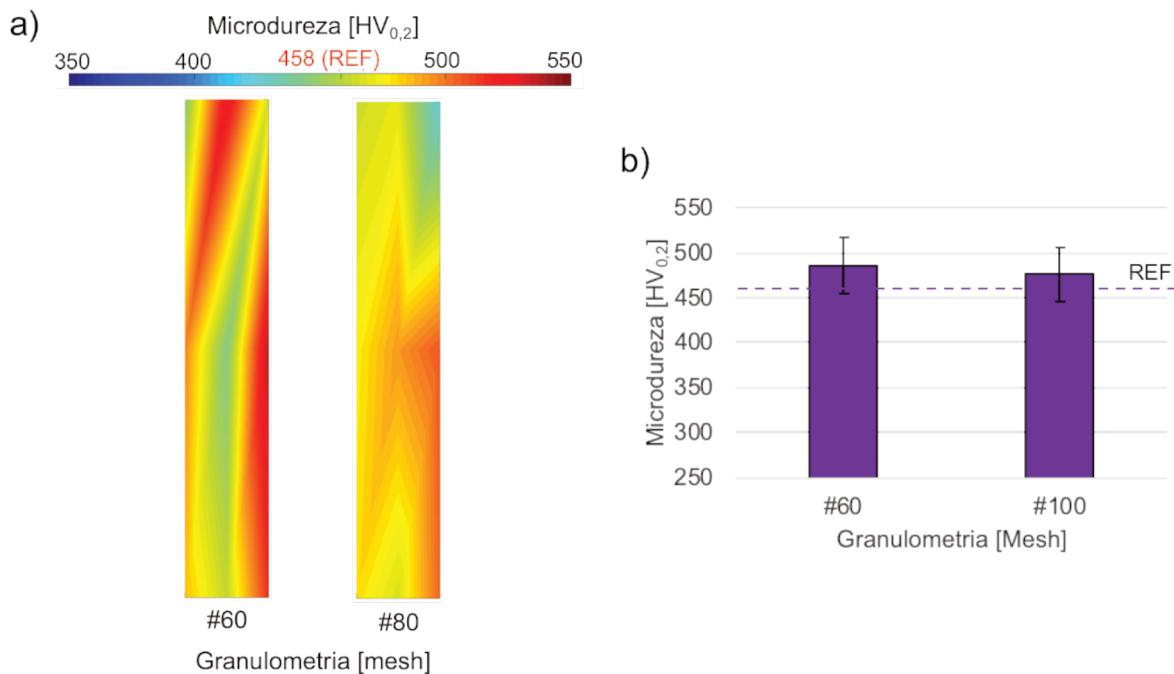


Figura 4.23 – Microdureza na superfície do Inconel 718 retificada em função da granulometria do rebolo: a) Mapa de microdureza nas superfícies e b) valor médio para cada superfície.

Tabela 4.18 – Teste de ANOVA de fator único para a microdureza na superfície retificada em granulometria do rebolo para o Inconel 718.

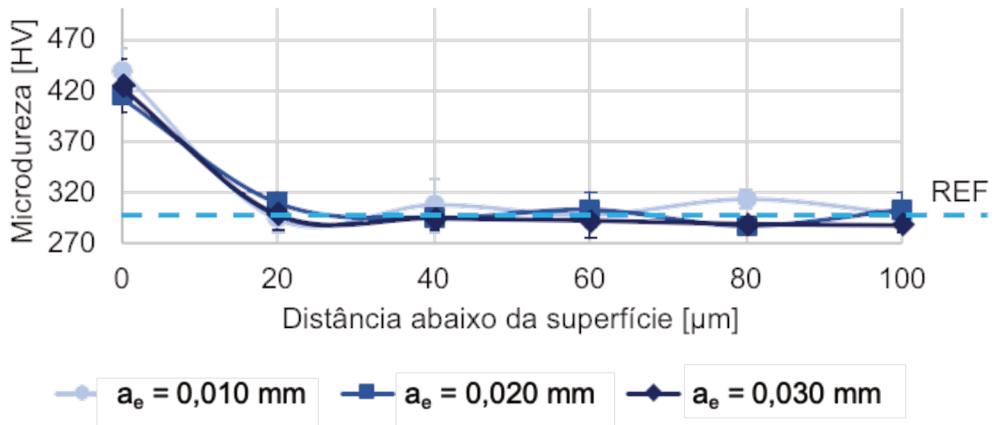
Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Granulometria	1	324	324	1,1	0,404
Erro	2	589,1	294,5		
Total	3	913,1			

4.2.4. Perfil de microdureza (abaixo da superfície retificada)

Como os resultados obtidos para a microdureza na superfície retificada do Inconel 625 e do Inconel 718 apresentaram a mesma tendência em função dos parâmetros penetração de trabalho, a velocidade da peça e a granulometria do rebolo, optou-se por analisar a microdureza abaixo da superfície retificada somente para os testes que foram realizados em função da penetração de trabalho (a_e) e a velocidade de corte (v_s) e assim verificar se houve alguma alteração significativa ou não na dureza abaixo da superfície retificada.

Os resultados da microdureza medidas abaixo da superfície retificada do Inconel 625 e do Inconel 718 para as três penetrações de trabalho testadas em função da distância abaixo da superfície retificada estão dispostos nas Figura 4.24a e b, respectivamente. Observando os resultados obtidos para o Inconel 625 (Figura 4.24a), nota-se que a 20 μm abaixo da superfície retificada (primeira medição abaixo da superfície), os valores de microdureza medidos coincidem com o da matriz do material, independente da penetração de trabalho utilizada, portanto não sendo possível afirmar que houve o fenômeno do encruamento nesta região abaixo da região retificada, ao contrário do que ocorreu na superfície da peça. Assim, todas as medidas realizadas abaixo da superfície retificada resultaram em valores de microdureza próximo aqueles da matriz do material, indicando que não houve modificações na microdureza. Com relação aos resultados obtidos para o Inconel 718 (Figura 4.24b), pode-se observar que, de forma semelhante ao que ocorreu na superfície retificada, abaixo da superfície também não houve alterações na microdureza do material, o que pode ser confirmado pelos valores de microdureza das peças retificadas que se situam em torno da média que o material apresentou antes do processo de retificação.

a) Inconel 625



b) Inconel 718

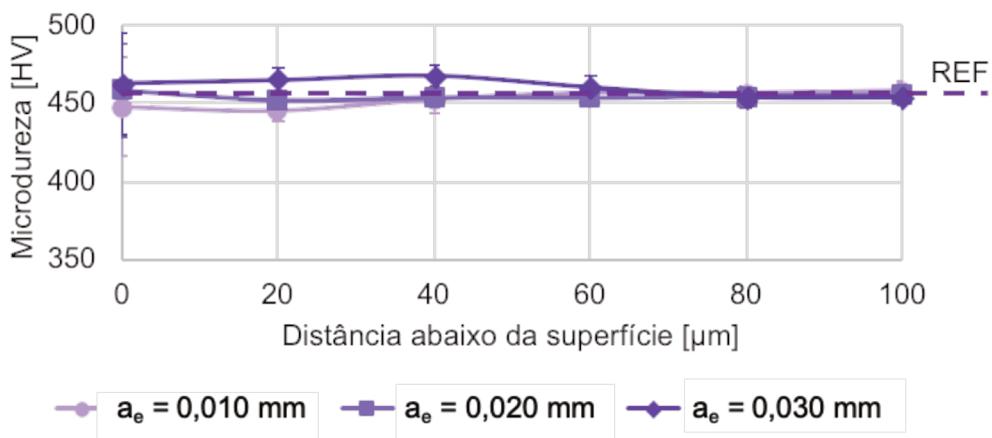


Figura 4.24 – Microdureza abaixo da superfície retificada para as três penetrações de trabalho testadas: a) Inconel 625 e b) Inconel 718 ($v_s = 30\text{ m/s}$; $v_w = 7500\text{ mm/min}$, #80).

Na Figura 4.25 a e b são apresentados os resultados da microdureza medidas abaixo da superfície retificada do Inconel 625 e do Inconel 718, respectivamente, em função da distância abaixo da superfície retificada para as três velocidades de corte testadas. Observando os resultados obtidos para o Inconel 625 (Figura 4.25a), nota-se que, independente da velocidade de corte utilizada, a $20\text{ }\mu\text{m}$ abaixo da superfície retificada (primeira medição abaixo da superfície) os valores de microdureza medidos coincidem com o da matriz do material, portanto não sendo possível afirmar também que houve o fenômeno do encruamento nesta região abaixo da região retificada, ao contrário do que ocorreu na superfície da peça. Assim como já mostrado na Figura 4.24a, para todas as velocidades de corte testadas (Figura 4.25a), as medidas realizadas abaixo da superfície retificada resultaram em valores de microdureza iguais à matriz do material indicando que não houve modificações na microdureza. Dos resultados obtidos para o Inconel 718 (Figura 4.25b), observa-se que a queda de dureza que ocorreu nas superfícies retificadas com v_s de 10 m/s e de 20 m/s modificaram a dureza abaixo da superfície até uma profundidade de aproximadamente

100 μm , onde a microdureza atingiu o valor de referência da matriz do material. Já para a velocidade de corte de 30 m/s, ela não causou variações nos valores de microdureza.

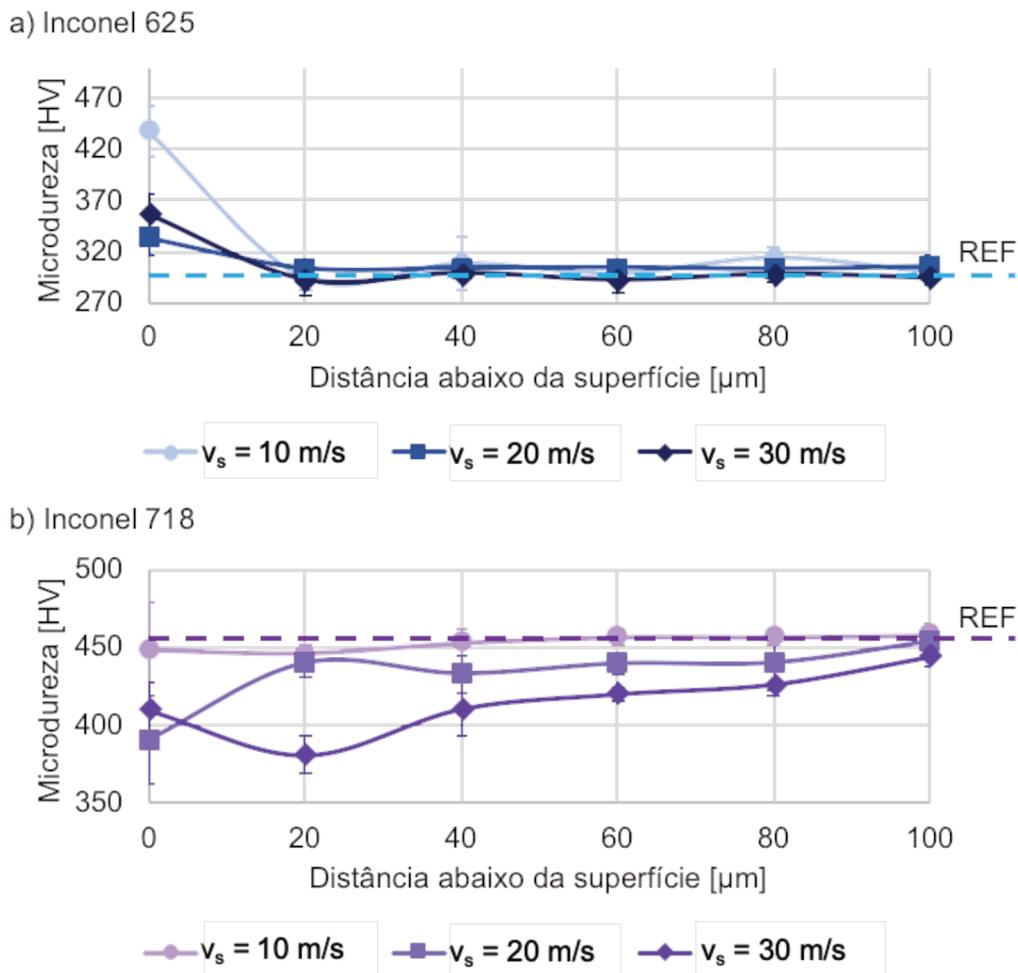


Figura 4.25 – Microdureza abaixo da superfície retificada para as três velocidades de corte testadas: a) Inconel 625 e b) Inconel 718 ($a_e = 0,010 \text{ mm}$; $v_w = 7500 \text{ mm/min}$, #80).

4.2.5. Forças de retificação

Os resultados obtidos para as componentes tangencial (F_t) e normal (F_n) durante o processo de retificação do Inconel 625 e do Inconel 718, estão apresentados a seguir.

Os valores da força de retificação obtidos durante a retificação das duas ligas analisadas em função da penetração de trabalho (a_e) utilizada estão apresentados na Figura 4.26. Para auxiliar na análise destes resultados, foi realizada uma análise de variância (ANOVA) de fator único (a_e) que está apresentada na Tabela 4.19. De acordo com os resultados de ANOVA (Tabela 4.19), pode-se observar que, com uma confiança de 95% (valor-P menor que 0,05), a penetração de trabalho foi estatisticamente significativa para as duas ligas analisadas e para ambas as componentes da força (F_t e F_n). Na Figura 4.26, pode-se observar que em todas as

condições analisadas a componente normal (F_n) foi maior que a tangencial (F_t), independente do material ou da penetração de trabalho utilizada o que é condizente com o processo de retificação. Ainda pela Figura 4.26, observa-se que para a retificação do Inconel 718, a variação da penetração de trabalho de 0,010 mm para 0,030 mm causou uma variação na componente tangencial de 46 para 99 N e na componente normal de 139 para 393 N. Pavan et al. (2017), obtiveram valores próximos para as forças de retificação ao conduzirem seu trabalho com Inconel 718, utilizando v_s de 25 m/s, v_w de 1,5 m/mim e a_e de 0,025 mm, variando a atmosfera de corte, os valores das componentes das forças variaram entre 116 e 170 N e entre 211 e 304 N, para as componentes F_t e F_n , respectivamente.

Na Figura 4.26, observa-se ainda que para ambas as ligas, as duas componentes da força apresentam a mesma tendência de aumentar com o aumento de a_e , o que já era esperado. De acordo com Malkin e Guo (2008), a penetração de trabalho está diretamente relacionada com a taxa de remoção de material (Q_w) e a espessura de corte equivalente (h_{eq}), assim, quanto maior o valor de a_e , maiores serão os esforços de corte. Yao et al. (2013), ao retificar Inconel 718 observaram uma tendência semelhante para as forças de retificação, ao aumentar a penetração de trabalho de 0,005 mm para 0,025 mm, ambas as componentes da força de retificação aumentaram, sendo que a componente tangencial apresentou uma variação de 14 para 122 N e a componente normal de 65 para 180 N.

Comparando os dois materiais, é possível observar que para a penetração de trabalho de 0,010 mm não causou diferenças significativas nos valores de forças adquiridos. No entanto, para as penetrações de trabalho de 0,020 mm e 0,030 mm, os esforços apresentados durante a retificação do Inconel 718 (forças F_n e F_t) foram maiores que os apresentados durante a retificação do Inconel 625. Esse comportamento já era esperado uma vez que a dureza da matriz do Inconel 718 é cerca de 50% maior que a do Inconel 625, assim quanto maior a taxa de remoção de material, maior se espera que seja a diferença entre os esforços de corte.

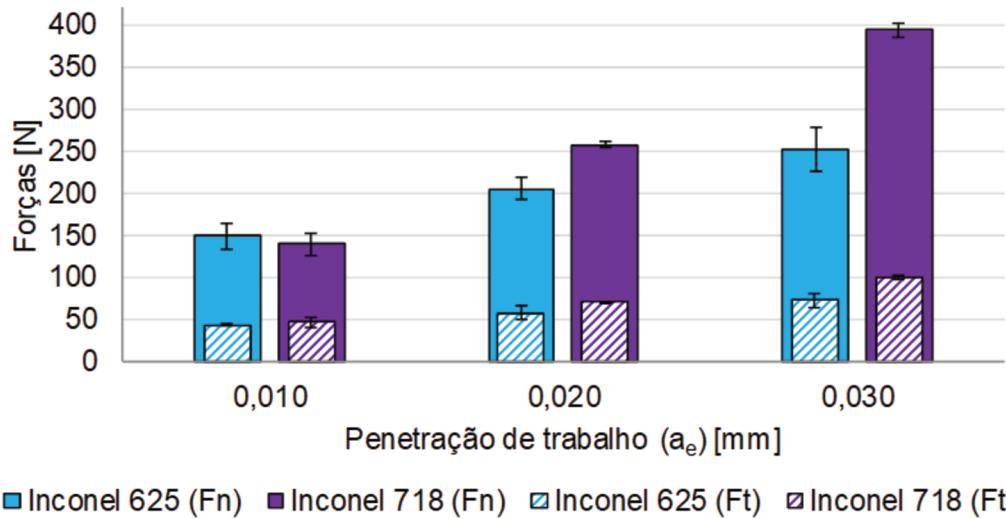


Figura 4.26 – Forças de retificação (tangencial e normal) em função da penetração de trabalho (a_e) após a retificação das ligas Inconel 625 e Inconel 718 com rebolo de SiC.

Tabela 4.19 – Teste de ANOVA de fator único para a penetração de trabalho (a_e) e as forças de retificação (F_t e F_n) do Inconel 625 e do Inconel 718.

Material	Variável	Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Inconel 625	F _t	a _e	2	844,66	422,33	19,33	0,019
		Erro	3	65,53	21,84		
		Total	5	910,19			
	F _n	a _e	2	10557	5278,4	13,41	0,032
		Erro	3	1181	393,6		
		Total	5	11738			
Inconel 718	F _t	a _e	2	2774,16	1387,08	68,97	0,003
		Erro	3	60,33	20,11		
		Total	5	2834,49			
	F _n	a _e	2	64884	32442,2	53,86	0,004
		Erro	3	1807	602,4		
		Total	5	66692			

Os resultados das forças de retificação (F_t e F_n) em função da velocidade da peça (v_w) obtidos durante a retificação do Inconel 625 e do Inconel 718 estão dispostos na Figura 4.27 e a análise de variância (ANOVA) de fator único (v_w), dos respectivos resultados, está apresentada na Tabela 4.20. Pelos resultados de ANOVA apresentados na Tabela 4.20 pode-se observar que, com a confiança de 95%, apenas a componente normal (F_n) obtida para o Inconel 718 foi influenciada pela velocidade da peça. Ao aumentar a velocidade da peça há um aumento na taxa de remoção de material, com isso era esperado um aumento nos

esforços de corte. Observando a Figura 4.27, nota-se nenhuma das componentes da força sofreu grandes variações com o aumento da velocidade da peça, evidenciando assim a baixa influência do v_w também nas forças de corte durante a retificação destas ligas. Mesmo a F_n para o Inconel 718, que se apresentou como um parâmetro significativo segundo a ANOVA (Tabela 4.20), não apresentou grandes variações, apenas uma leve tendência de aumentar com v_w , conforme esperado. Yao et al. (2013), ao conduzir seu trabalho de retificação de Inconel 718 com rebolo de cBN, observaram uma tendência semelhante para a variação da velocidade da peça, aumentando a v_w de 8000 mm/min para 12000 mm/min as componentes F_t e F_n da força de retificação aumentaram 6,8% e 11%, respectivamente.

Na Figura 4.27, pode-se também observar que em todas as condições analisadas, a componente normal (F_n) foi maior que a tangencial (F_t).

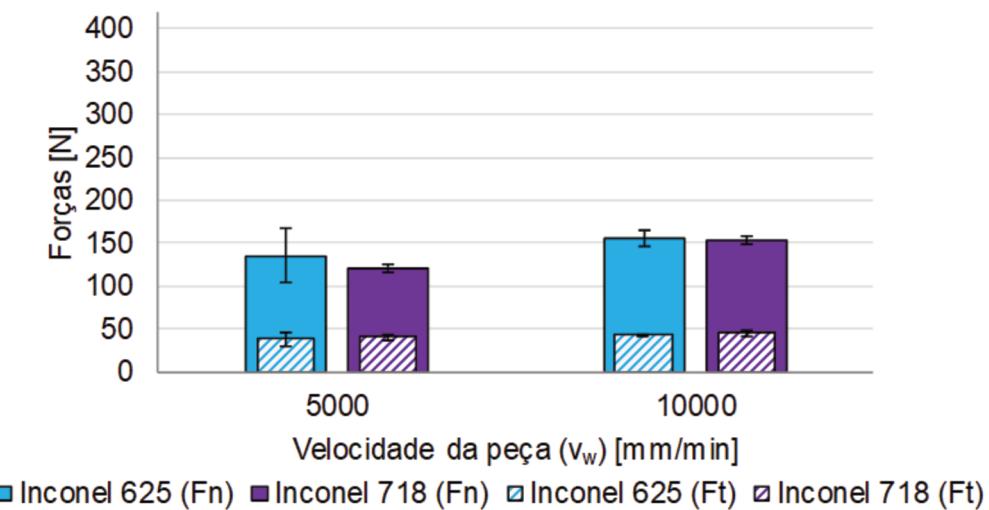


Figura 4.27 – Forças de retificação (tangencial e normal) em função da velocidade da peça (v_w) após a retificação das ligas Inconel 625 e Inconel 718.

Tabela 4.20 – Teste de ANOVA de fator único para a velocidade da peça (v_w) e as forças de retificação (F_t e F_n) do Inconel 625 e do Inconel 718.

Material	Variável	Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Inconel 625	F_t	v_w	1	38,09	38,09	0,99	0,424
		Erro	2	76,6	38,3		
		Total	3	114,69			
	F_n	v_w	1	394,5	394,5	0,73	0,482
		Erro	2	1075,1	537,5		
		Total	3	1469,5			
	F_t	v_w	1	22,79	22,79	2,08	0,286
		Erro	2	21,87	10,93		
		Total	3	44,65			
Inconel 718	F_n	v_w	1	1007,28	1007,28	46,96	0,021
		Erro	2	42,9	21,45		
		Total	3	1050,17			

Os resultados de forças de retificação (F_t e F_n) em função da velocidade de corte (v_s) obtidos durante a retificação do Inconel 625 e do Inconel 718 estão dispostos na Figura 4.28 e a análise de variância (ANOVA) de fator único (v_s), dos respectivos resultados, está apresentada na Tabela 4.21. Pelos resultados de ANOVA apresentados na Tabela 4.21 pode-se observar que, com nível de confiança de 95%, a velocidade de corte foi estatisticamente significativa para as duas ligas analisadas e para ambas as componentes da força (F_t e F_n).

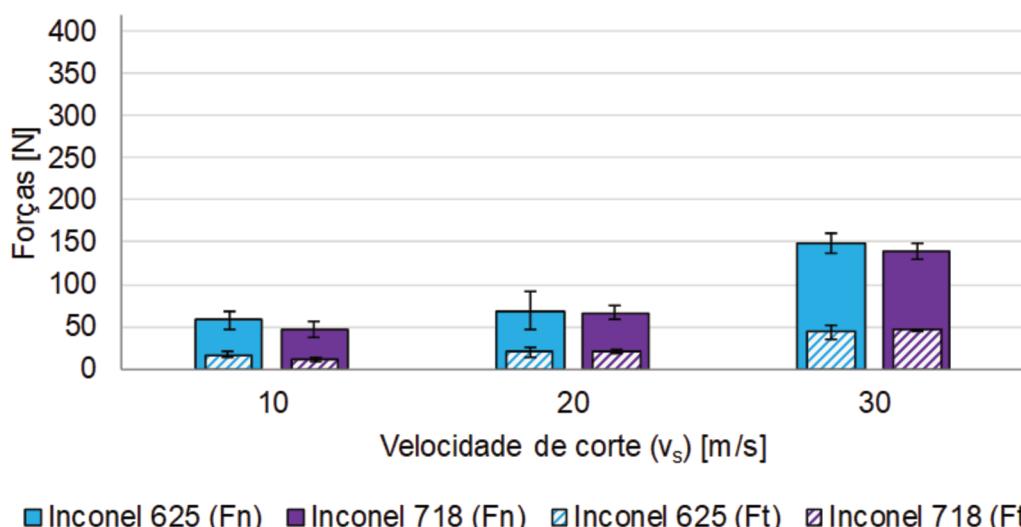


Figura 4.28 – Forças de retificação (tangencial e normal) em função da velocidade de corte (v_s) após a retificação das ligas Inconel 625 e Inconel 718.

Tabela 4.21 – Teste de ANOVA de fator único para a velocidade de corte (v_s) e as forças de retificação (F_t e F_n) do Inconel 625 e do Inconel 718.

Material	Variável	Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Inconel 625	v_s	F_t	2	879	439,49	12,54	0,035
		Erro	3	105,1	35,05		
		Total	5	984,1			
Inconel 718	F_t	v_s	2	9932,4	4966,2	20,09	0,018
		Erro	3	741,7	247,2		
		Total	5	10674,1			
Inconel 718	F_n	v_s	2	1305,9	652,949	186,32	0,001
		Erro	3	10,51	3,504		
		Total	5	1316,41			
Inconel 718	F_n	v_s	2	9445,1	4722,54	51,24	0,005
		Erro	3	276,5	92,17		
		Total	5	9721,6			

Na Figura 4.28, pode-se observar que a força normal foi maior que a tangencial em todas as condições analisadas, conforme era esperado. Observa-se ainda que as duas ligas analisadas (Inconel 625 e Inconel 718) apresentaram resultados similares para F_t e F_n , independente da velocidade de corte utilizada. Ainda na Figura 4.28, observa-se que houve uma tendência de as forças de retificação aumentarem com o aumento da velocidade de corte. Esse comportamento não era esperado, contudo, como já discutido anteriormente, para o Inconel 625 (Figura 4.20), o aumento da velocidade de corte implicou no aumento na microdureza da superfície devido ao encruamento, o que exigiu maiores esforços de corte. Para o Inconel 718 (Figura 4.21) observou-se uma diminuição na dureza da superfície com a diminuição na velocidade de corte.

Os resultados das forças de retificação (F_t e F_n) em função da granulometria do rebolo obtidos durante a retificação do Inconel 625 e do Inconel 718, estão dispostos na Figura 4.29 e a análise de variância (ANOVA) de fator único (granulometria), dos respectivos resultados, está apresentada na Tabela 4.22. Pelos resultados de ANOVA apresentados na Tabela 4.22 pode-se observar que, com a confiança de 95%, apenas a componente normal (F_n) obtida para o Inconel 625 foi influenciada pela granulometria do rebolo. Entretanto, a componente normal (F_n) obtida para o Inconel 718 apresentou um valor P de 0,07. Assim como visto para todas as condições já analisadas, a componente normal (F_n) da força de retificação foi sempre maior que a componente tangencial (F_t) também para os resultados apresentados na Figura 4.29.

Observando os resultados apresentados na Figura 4.29, nota-se que ambos materiais exigiram esforços de corte (F_n e F_t) bem semelhantes, independente da granulometria do

rebolo, o que era esperado de acordo com os resultados de microdureza na superfície retificada do Inconel 625 (Figura 4.22) e do Inconel 718 (Figura 4.23), onde a diferença de microdureza entre os materiais foi de aproximadamente 10%. A componente tangencial da força (F_t) não sofreu alterações com a variação da granulometria do rebolo, no entanto a componente normal (F_n), para ambos materiais, apresentou uma leve tendência de diminuir com a diminuição no tamanho dos abrasivos.

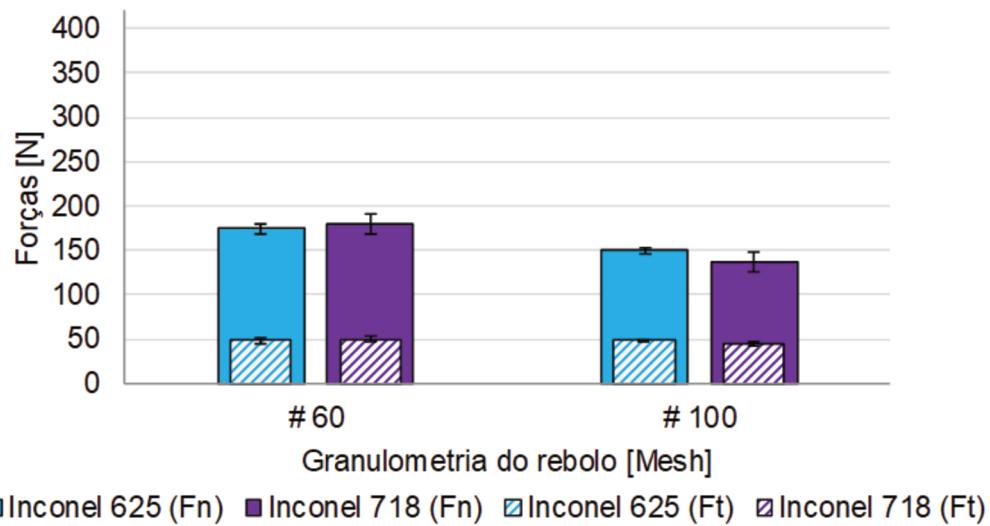


Figura 4.29 – Forças de retificação (tangencial e normal) em função da granulometria do rebolo após a retificação das ligas Inconel 625 e Inconel 718.

Tabela 4.22 – Teste de ANOVA de fator único para a granulometria do rebolo e as forças de retificação (F_t e F_n) do Inconel 625 e do Inconel 718.

Material	Variável	Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor P
Inconel 625	F_t	Granulometria.	1	0,1296	0,1296	0,03	0,877
		Erro	2	8,3998	4,1999		
		Total	3	8,5294			
	F_n	Granulometria	1	621,06	621,06	25,67	0,037
		Erro	2	48,39	24,19		
		Total	3	669,45			
Inconel 718	F_t	Granulometria	1	20,28	20,277	2,72	0,241
		Erro	2	14,91	7,455		
		Total	3	35,19			
	F_n	Granulometria	1	1840,8	1840,8	12,88	0,07
		Erro	2	285,8	142,9		
		Total	3	2126,6			

Um resumo com o efeito de cada parâmetro de corte testado na força de retificação (componentes F_t e F_n) para as duas ligas testadas (Inconel 625 e Inconel 718) está apresentado na Tabela 4.23.

Tabela 4.23– Efeitos dos parâmetros de entrada na força de retificação (F_t e F_n) do Inconel 625 e do Inconel 718.

Variável	Material	Valor médio	a_e [mm]		v_w [mm/min]		v_s [m/s]		Gran. [mesh]
			0,010	0,020	5000	10	20	#60	
			↓ 0,020	↓ 0,030	↓ 10000	↓ 20	↓ 30	↓ #100	
F_t	Inconel 625	43,3	↑ 31%	↑ 27%	↑ 16%	↑ 16%	↑ 123%	↑ 1%	
	Inconel 718	47,8	↑ 53%	↑ 39%	↑ 12%	↑ 67%	↑ 131%	↓ -9%	
F_n	Inconel 625	149,7	↑ 38%	↑ 22%	↑ 15%	↑ 20%	↑ 116%	↓ -14%	
	Inconel 718	165,9	↑ 85%	↑ 53%	↑ 26%	↑ 42%	↑ 109%	↓ -24%	

4.2.6. Energia específica de retificação

Os valores de energia específica de retificação (U), calculada a partir da força tangencial de retificação e da taxa de remoção de material para cada condição testada, do Inconel 625 e do Inconel 718, são apresentados a seguir.

Os valores da energia específica de retificação para as duas ligas analisadas em função da penetração de trabalho (a_e) utilizada estão apresentados na Fig. 4.30. Para auxiliar na análise destes resultados, foi realizada uma análise de variância (ANOVA) de fator único (a_e) que está apresentada na Tabela 4.24. De acordo com os resultados de ANOVA (Tabela 4.24), pode-se observar que a penetração de trabalho foi estatisticamente significativa para os valores de energia específica obtidos para o Inconel 625 assim como para o Inconel 718. A partir da Fig. 4.30, pode-se observar que, assim como era esperado, a energia específica de retificação diminuiu com o aumento da penetração de trabalho para ambos os materiais analisados, o que era esperado uma vez que a energia específica é inversamente proporcional à taxa de remoção de material (MALKIN; GUO, 2008). Tendência similar também foi observada por Sinha et al. (2017) ao desenvolverem um modelo para o cálculo da energia específica de retificação do Inconel 718. Os autores utilizaram $v_s = 15$ m/s e $v_w = 6000$ mm/min e notaram que ao variar a penetração de trabalho de 0,005 mm para 0,015 mm a energia específica diminuiu.

Na Fig. 4.30, pode-se observar que para todos os valores de penetração de trabalho, a energia específica de retificação foi menor para o Inconel 625 que para o Inconel 718, o que já era esperado, uma vez que a energia específica é diretamente proporcional à força tangencial de retificação (F_t), assim, como o Inconel 625 apresentou menores valores de F_t ,

eram esperados, para mesma taxa de remoção de material (Q_w), valores menores de U . Conforme já apresentado na seção de revisão bibliográfica (Tabela 2.10), os valores obtidos de energia específica de retificação do Inconel 718 ficaram próximos dos resultados apresentados por Pavan et al. (2017) (190 – 275 J/mm³) e acima do valor encontrado por Shen et al. (2008) para o ferro fundido (76 – 174 J/mm³) e por Alberts et al. (2009) para o aço ferramenta D-2 (43 – 98 J/mm³).

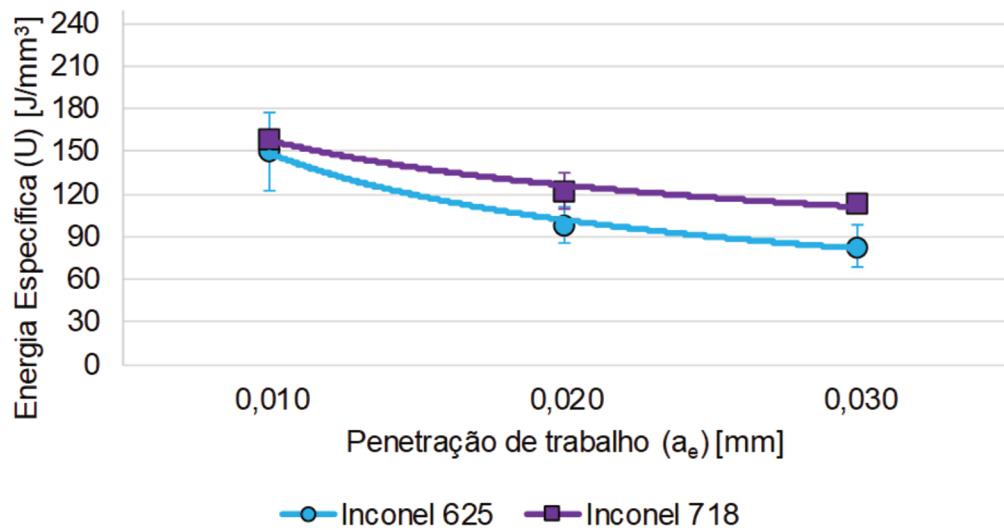


Fig. 4.30 – Energia específica de retificação do Inconel 625 e do Inconel 718 em função da penetração de trabalho.

Tabela 4.24 – Teste de ANOVA de fator único para a energia específica de retificação (U) do Inconel 625 e do Inconel 718 em função da penetração de trabalho.

Material	Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Inconel 625	a_e	2	4923,6	2461,8	22,69	0,015
	Erro	3	325,5	108,5		
	Total	5	5249,1			
Inconel 718	a_e	2	2429,1	1214,56	20,02	0,018
	Erro	3	182	60,67		
	Total	5	2611,1			

Os resultados da energia específica de retificação, do Inconel 625 e do Inconel 718, em função da velocidade da peça (v_w) estão dispostos na Figura 4.31 e a análise de variância (ANOVA) de fator único (v_w), dos respectivos resultados, está apresentada na Tabela 4.25. Pelos resultados de ANOVA apresentados na Tabela 4.25, com I.C. de 95%, pode-se observar que a velocidade da peça foi estatisticamente significativa para os valores de energia

específica, independente da liga usinada. Assim como era esperado, nota-se na Figura 4.31 que, independente do material usinado, a energia específica diminuiu com o aumento da velocidade da peça, ou seja, a energia específica diminuiu com o aumento de Q_w . Entre as duas ligas analisadas, para uma mesma condição, não foram observadas diferenças significativas nos valores de energia específica. Tal comportamento já era esperado uma vez que a força tangencial (F_t) não apresentou diferenças significativas para os dois materiais em função de v_w (Figura 4.27), assim para uma mesma taxa de remoção de material, já era esperado valores similares de U .

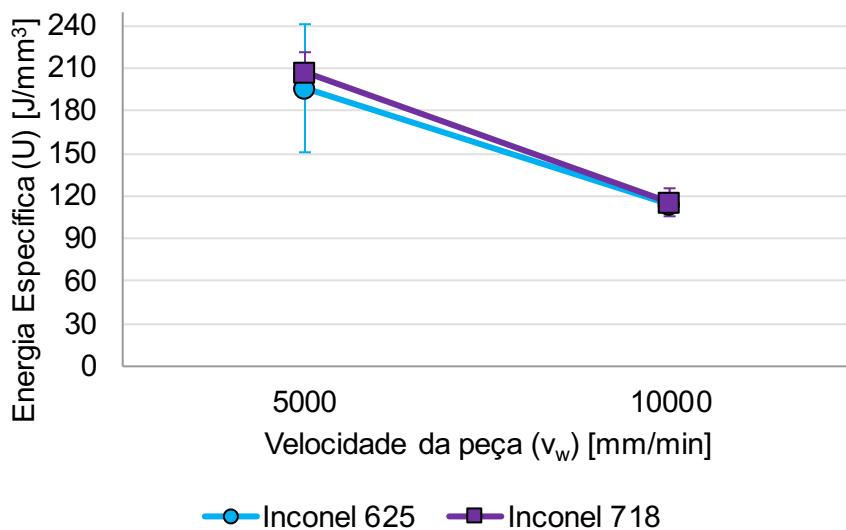


Figura 4.31 – Energia específica de retificação em função da velocidade da peça para os ensaios realizados no Inconel 625 e no Inconel 718.

Tabela 4.25 – Teste de ANOVA de fator único para a energia específica de retificação (U) do Inconel 625 e do Inconel 718 em função da velocidade da peça.

Material	Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Inconel 625	v_w	1	6709,4	6709,4	47,97	0,02
	Erro	2	279,8	139,9		
	Total	3	6989,2			
Inconel 718	v_w	1	8277,7	8277,7	52,32	0,019
	Erro	2	316,4	158,2		
	Total	3	8594,1			

Os resultados da energia específica de retificação, do Inconel 625 e do Inconel 718, em função da velocidade de corte (v_s) estão dispostos na Figura 4.32 e a análise de variância (ANOVA) de fator único (v_s), dos respectivos resultados, está apresentada na Tabela 4.26.

Pelos resultados de ANOVA apresentados na Tabela 4.26 pode-se observar que a velocidade de corte foi estatisticamente significativa para os valores de energia específica obtidos tanto para o Inconel 625 quanto para o Inconel 718. Da teoria de retificação, sabe-se que a taxa de remoção de material não apresenta relação com a velocidade de corte. E como a energia específica de retificação é o quociente da força tangencial pela taxa de remoção de material, já era esperado para a energia específica o mesmo comportamento observado para a F_t (Figura 4.28). Assim, verificando na Figura 4.32, foi observado o mesmo comportamento de F_t , ou seja, a energia específica aumentou com a velocidade de corte para ambos os materiais testados, assim como não houve diferenças significativas entre os dois materiais.

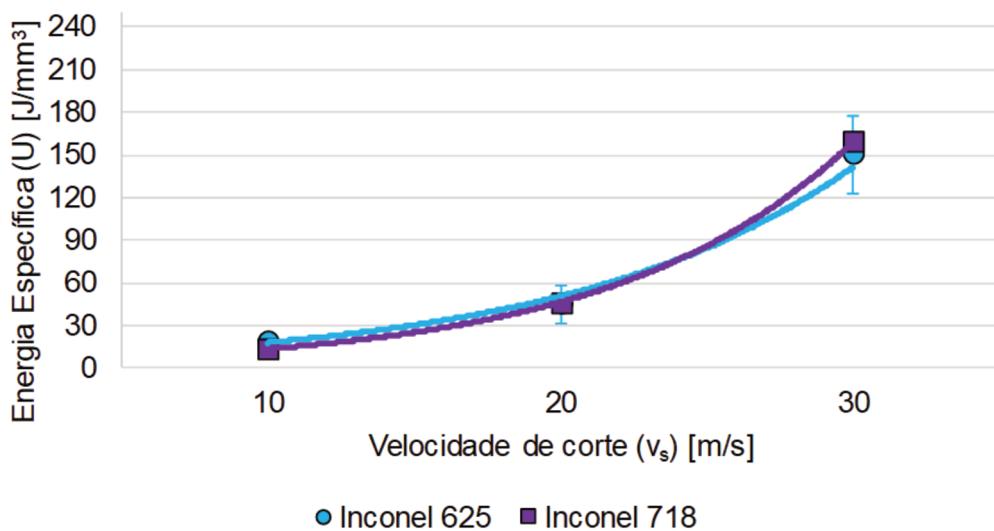


Figura 4.32 – Energia específica de retificação em função da velocidade de corte para os ensaios realizados no Inconel 625 e no Inconel 718.

Tabela 4.26 – Teste de ANOVA de fator único para a energia específica de retificação (U) do Inconel 625 e do Inconel 718 em função da velocidade de corte.

Material	Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Inconel 625	v_s	2	19274,1	9637	31,01	0,01
	Erro	3	932,3	310,8		
	Total	5	20206,3			
Inconel 718	v_s	2	23524	11762	856,14	0
	Erro	3	41,2	13,7		
	Total	5	23565,2			

Com relação aos resultados da energia específica de retificação do Inconel 625 e do Inconel 718 em função da granulometria do rebolo, eles são apresentados na Figura 4.33, enquanto que a análise de variância (ANOVA, com I.C. de 95%) de fator único (granulometria),

dos respectivos resultados, está apresentada na Tabela 4.27. Pelos resultados de ANOVA apresentados na Tabela 4.27 pode-se observar que a granulometria não foi estatisticamente significativa na energia específica de retificação de nenhuma das ligas analisadas. Na Figura 4.33, pode ser observado que a energia específica não apresentou variações significativas com a variação da granulometria do rebolo. Além disso, observa-se que os valores de energia específica das duas ligas de níquel são bem parecidos. De maneira similar ao que ocorreu com a variação do v_w , a força tangencial não sofreu variações com a granulometria do rebolo (Figura 4.29), contudo, a taxa remoção de material também não sofreu variação ao variar a granulometria, assim, pelos resultados já apresentados, era esperado que os resultados de U não sofressem variações com a granulometria do rebolo.

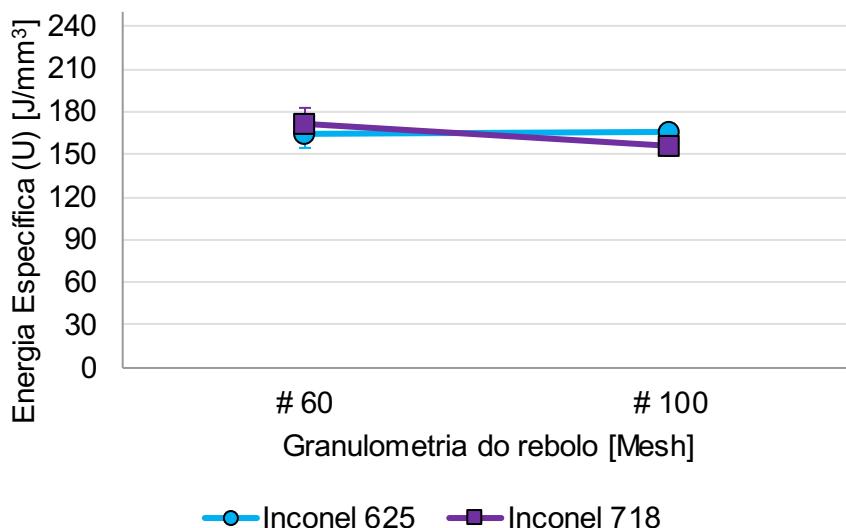


Figura 4.33 – Energia específica de retificação em função da granulometria do rebolo para os ensaios realizados no Inconel 625 e no Inconel 718.

Tabela 4.27 – Teste de ANOVA de fator único para a energia específica de retificação (U) do Inconel 625 e do Inconel 718 em função da granulometria do rebolo.

Material	Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Inconel 625	Granulometria	1	1,523	1,523	0,03	0,877
	Erro	2	98,741	49,37		
	Total	3	100,264			
Inconel 718	Granulometria	1	238,4	238,36	2,72	0,241
	Erro	2	175,3	87,64		
	Total	3	413,6			

Um resumo com o efeito de cada parâmetro de corte testado na energia específica de retificação para as duas ligas testadas (Inconel 625 e Inconel 718) está apresentado na Tabela 4.28.

Tabela 4.28 – Efeitos dos parâmetros de entrada na energia específica de retificação do Inconel 625 e do Inconel 718.

Material	Valor médio	a_e [mm]		v_w [mm/min]		v_s [m/s]		Gran. [mesh]
		0,010	0,020	5000	10	20	#60	
		↓ 0,020	↓ 0,030	↓ 10000	↓ 20	↓ 30	↓ #100	
Inconel 625	115	↓ -34%	↓ -16%	↓ -42%	↑ 133%	↑ 235%	↑ 1%	
Inconel 718	123	↓ -24%	↓ -7%	↓ -44%	↑ 235%	↑ 247%	↓ -9%	

4.2.7. Temperatura durante a retificação do Inconel 625 e do Inconel 718

Conforme mencionado na sessão Metodologia, foram realizadas medições de temperatura na zona de corte durante o processo de retificação do Inconel 625 e do Inconel 718 em função da penetração de trabalho e da velocidade de corte. Os resultados obtidos estão apresentados a seguir.

Os resultados de temperatura obtidos durante a retificação do Inconel 625 e do Inconel 718, em função da penetração de trabalho, estão apresentados na Figura 4.34. Para auxiliar na análise destes resultados, foi realizada uma análise de variância (ANOVA) de fator único (a_e) que está apresentada na Tabela 4.29. De acordo com os resultados de ANOVA (Tabela 4.29), pode-se observar que a penetração de trabalho foi significativa para a temperatura obtida, independente do material analisado. Pela Figura 4.34, pode-se observar que ambas as ligas apresentaram a mesma tendência dos valores de temperatura aumentarem com o aumento do a_e , o que já era esperado pela maior severidade do processo quando se emprega um maior a_e . Resultados similares foram observados por Li et al. (2015) ao realizarem estudo da temperatura de retificação do Inconel 718 com rebolo de cBN utilizando $v_s = 80$ m/s e $v_w = 600$ mm/min, quando a temperatura também aumentou com a penetração de trabalho. No trabalho de medição de temperatura durante a retificação do Inconel 718 com rebolo de cBN e utilizando uma lubri-refrigeração “otimizada”, Chen et al. (2015) também relataram que a temperatura na zona de retificação aumentou com a taxa de remoção de material.

Ainda na Figura 4.34 é possível notar que, independente da penetração de trabalho utilizada, os valores de temperatura obtidos para o Inconel 625 foram superiores aos obtidos para o Inconel 718 na mesma condição (aproximadamente 20% maior). Tal comportamento pode ser atribuído à menor condutividade térmica do Inconel 625 em relação à do Inconel 718, cerca de 15% inferior, conforme pode ser observado na Tabela 3.3.

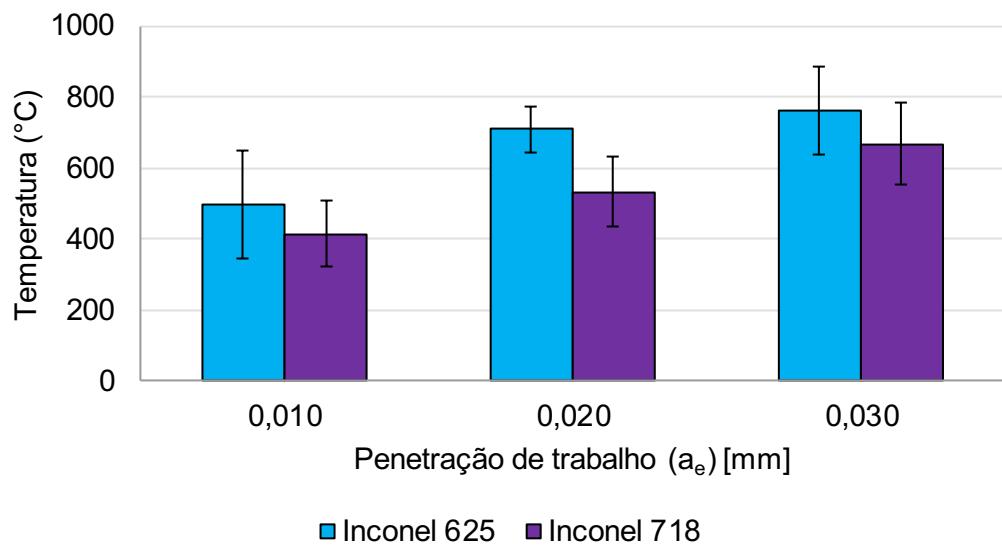


Figura 4.34 – Temperatura na zona de retificação de Inconel em função da penetração de trabalho (a_e).

Tabela 4.29 – Teste de ANOVA de fator único para a temperatura na zona de retificação de Inconel 625 e Inconel 718 em função da penetração de trabalho.

Material	Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Inconel 625	a_e	2	116500	58250	5,78	0,04
	Erro	6	60513	10086		
	Total	8	177014			
Inconel 718	a_e	2	97411	48705	6,54	0,031
	Erro	6	44671	7445		
	Total	8	142082			

Os resultados de temperatura obtidos durante a retificação do Inconel 625 e do Inconel 718, em função da velocidade de corte, estão apresentados na Figura 4.35. Para auxiliar na análise destes resultados, foi realizada uma análise de variância (ANOVA com I.C. de 95%) de fator único (v_s) que está apresentada na Tabela 4.30. De acordo com os resultados de ANOVA (Tabela 4.30), pode-se observar que a velocidade de corte foi significativa para a temperatura obtida, independente do material analisado. Pela Figura 4.35, pode-se observar que ambas as ligas apresentaram a mesma tendência dos valores de temperatura aumentarem com o aumento do v_s , o que já era esperado de acordo com os resultados obtidos de energia específica (Figura 4.32) e forças de retificação (Figura 4.28). Resultados similares foram observados por Li et al. (2015) ao investigarem a temperatura do processo de retificação

do Inconel 718 com rebolo de cBN, utilizando $a_e = 0,2$ mm e $v_w = 600$ mm/min, a temperatura também aumentou com a velocidade de corte.

Pela Figura 4.35, pode-se ainda notar que, independente da velocidade de corte utilizada, os valores de temperatura obtidos para o Inconel 625, assim como mostrado na Figura 4.34, foram superiores aos obtidos para o Inconel 718 na mesma condição (aproximadamente 20% maior). É importante ressaltar que o material com propriedades mecânicas inferiores (menor condutividade térmica) apresentou os maiores valores de temperatura. Ainda na Figura 4.35, pode-se observar que a dispersão entre os valores obtidos para a mesma condição de corte para o Inconel 625 foi maior que a obtida para o Inconel 718.

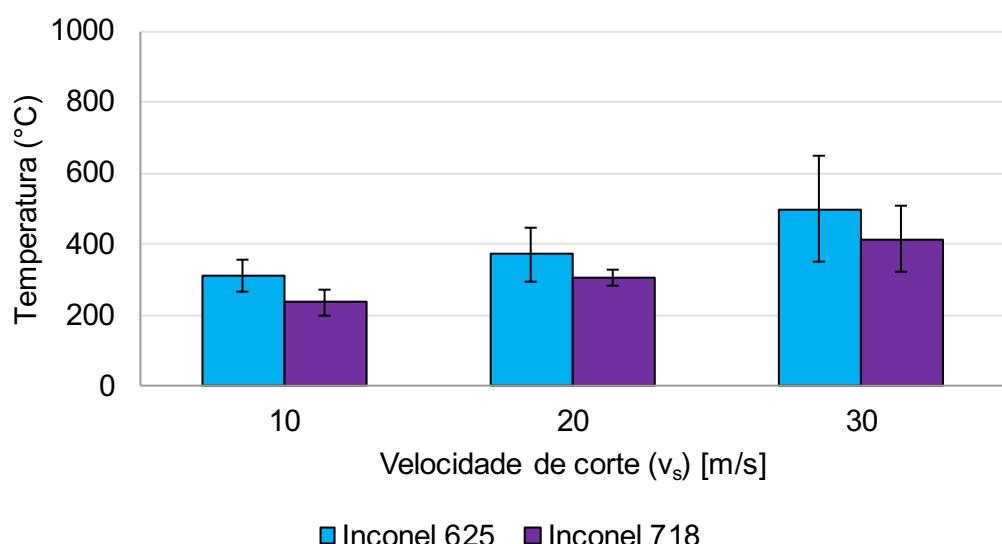


Figura 4.35 – Temperatura na zona de retificação em função da velocidade de corte (v_s).

Tabela 4.30 – Teste de ANOVA de fator único para a temperatura na zona de retificação em função da velocidade de corte.

Material	Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Inconel 625	v_s	2	54998	27499	5,14	0,05
	Erro	6	32070	5345		
	Total	8	87068			
Inconel 718	v_s	2	48746	24373	6,94	0,027
	Erro	6	21066	3511		
	Total	8	69812			

Um resumo com o efeito de cada parâmetro de corte testado na temperatura na zona de retificação para as duas ligas testadas (Inconel 625 e Inconel 718) está apresentado na Tabela 4.31.

Tabela 4.31– Efeitos dos parâmetros de entrada na temperatura na zona de retificação do Inconel 625 e do Inconel 718.

Material	Valor médio	a _e [mm]		v _s [m/s]	
		0,010	0,020	10	20
		↓ 0,020	↓ 0,030	↓ 20	↓ 30
Inconel 625	530	↑ 42%	↑ 7%	↑ 19%	↑ 35%
Inconel 718	432	↑ 29%	↑ 25%	↑ 30%	↑ 35%

4.2.8. Considerações sobre a retificabilidade do Inconel 625 em relação ao Inconel 718

Após a análise de todas as variáveis de saída da segunda etapa, foi calculada a média de todos os valores obtidos de cada uma das variáveis (com exceção da microdureza) para cada um dos materiais (Inconel 625 e Inconel 718). Em seguida, todas as médias foram normalizadas com base no maior valor medido para cada uma das variáveis de saída e foram plotadas no gráfico de barras apresentado na Figura 4.36a. Para a microdureza na superfície retificada, foi calculada a variação percentual da dureza na superfície e realizada uma média de todas as variações para cada uma das ligas estudadas, assim o valor médio dessa variação também foi plotado no gráfico da Figura 4.36a. Os dados apresentados no gráfico da Figura 4.36a foram ainda dispostos em um gráfico radar (Figura 4.36b) para melhor visualizar a comparação geral dos dois materiais.

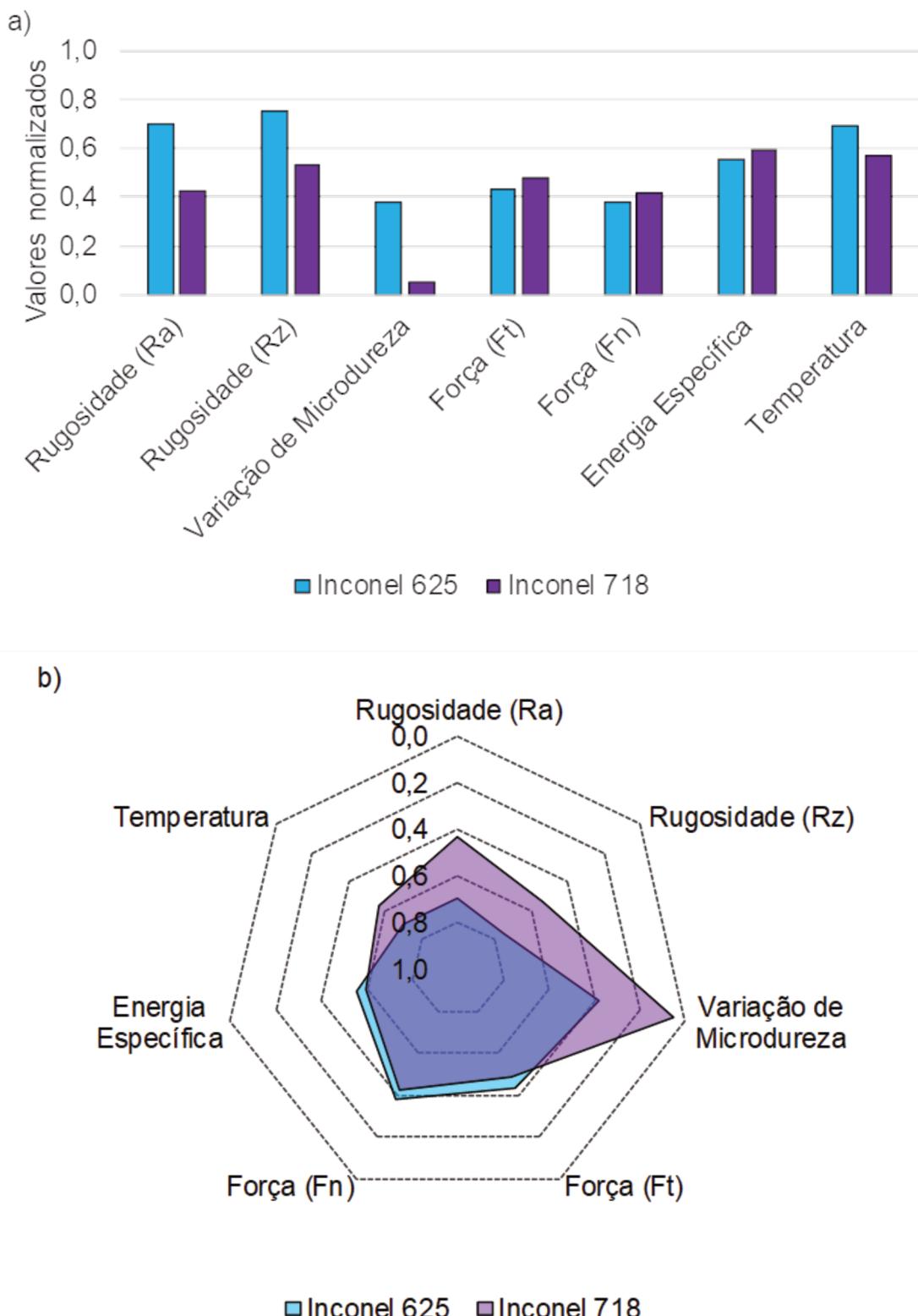


Figura 4.36 – Média dos valores normalizados das variáveis de saída: rugosidade (Ra e Rz), forças de retificação (Ft e Fn), variação de microdureza na superfície, energia específica de retificação e temperatura na zona de retificação para o Inconel 625 e para o Inconel 718:a) gráfico de colunas e b) gráfico radar.

Observando os resultados apresentados na Figura 4.36, pode-se notar que, em geral, as superfícies do Inconel 625 retificadas apresentaram um pior acabamento (em termos de Ra e Rz) e uma maior variação na dureza superficial quando comparadas com aquelas obtidas para o Inconel 718. Estes resultados evidenciam do ponto de vista da superfície a ser retificada que a manutenção de um bom acabamento e da integridade superficial do Inconel 625 se torna mais difícil relação ao Inconel 718, caracterizando como de pobre retificabilidade.

Para Wenfeng et al. (2010), a retificabilidade tem como principais índices as forças de retificação, temperatura e energia específica de retificação, ou seja variáveis ligadas ao processo. Assim, observando a Figura 4.36, do ponto de visto somente do processo, têm-se que o Inconel 718 apresentou maiores valores de forças (F_t e F_n) e de energia específica de retificação, destacada por Qian et al. (2018) como um dos principais índices de retificabilidade, do que o Inconel 625, contudo os valores foram bem próximos. Somente a temperatura alcançada na zona de retificação que foi em média 22% maior para o Inconel 625.

Assim, de modo geral, fica evidenciado que o Inconel 625 apresenta maiores dificuldades para ser retificado que o Inconel 718 como também uma maior tendência ao empastamento do rebolo e ao encruamento da superfície, o que afeta negativamente o acabamento da peça. Há ainda de se destacar que ele possui menor condutividade térmica que resultou em maiores temperaturas na zona de retificação quando comparado ao Inconel 718.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Após a realização dos testes de retificação do Inconel 625 em diversas condições operacionais utilizando rebolos de SiC (1^a Etapa), as seguintes conclusões puderam ser extraídas:

- No geral, a velocidade de corte (v_s) foi o parâmetro de corte que exerceu a influência mais forte e, de forma diretamente proporcional, nos parâmetros de saída analisados tanto em relação aos parâmetros de integridade da peça (rugosidade – Ra e Rz e textura das superfícies) quanto aqueles do processo de retificação (forças de retificação);
- A granulometria mesh do rebolo exerceu influência somente na rugosidade da superfície (Ra), sendo que a usinagem com menor tamanho de grão (#80) gerou menores valores de rugosidade;
- A penetração de trabalho (a_e) e a velocidade de corte exerceram influência em todos os parâmetros de saída analisados, sendo que o aumento do a_e fez com que a rugosidade (Ra e Rz), e as duas componentes da força (F_t e F_n) aumentassem. Por outro lado, a energia específica de retificação diminuiu com o aumento do a_e ;
- A velocidade da peça (v_w) foi o parâmetro que exerceu a influência menos significativa nas variáveis de saída analisadas, exceto na energia específica de retificação, em que o aumento do v_w levou à redução da energia específica;
- Quanto ao sentido de retificação, esta variável exerceu influência nas forças de retificação, sendo que ambas componentes da força (normal e tangencial) foram menores no sentido discordante.
- Pelas imagens de MEV das superfícies retificadas não foi possível observar a presença de nenhum dano de origem térmica, contudo notou-se que uma maior

concentração de deformações plásticas foi observada nas superfícies que foram usinadas com $v_s = 30$ m/s.

Com a realização da 2^a etapa dos testes de retificação do Inconel 625 e Inconel 718 nas condições investigadas, as seguintes conclusões puderam ser extraídas:

- De modo geral, pode-se observar que em todas as condições investigadas os valores de rugosidade (Ra) ficaram abaixo de 1 μm , para ambos os materiais analisados (Inconel 625 e Inconel 718) e os valores obtidos para o Inconel 718 foram menores do que os obtidos para o Inconel 625;
- O Inconel 718 apresentou uma tendência de diminuir a rugosidade Ra de aproximadamente 32% com o aumento da velocidade de corte de 10 para 30 m/s. Para o Inconel 625, os maiores valores de rugosidade (Ra $\approx 1,00$ μm) foram obtidos com a menor velocidade de corte (10 m/s). Ao aumentar a velocidade de 10 m/s para 20 m/s os valores de rugosidade diminuíram aproximadamente 50%. Portanto, os menores valores de rugosidade foram observados ao usinar com a velocidade 20 m/s. Porém, quando a velocidade de corte foi aumentada para 30 m/s, os resultados de rugosidade aumentaram aproximadamente 15% (de 0,45 para 0,52 μm);
- O aumento da velocidade da peça (de 5000 mm/min para 10000 mm/min), assim como o aumento da penetração de trabalho (de 0,010 mm para 0,020 mm ou de 0,020 mm para 0,030 mm) fez com que os valores de rugosidade (Ra e Rz) para ambas as ligas apresentassem uma tendência de aumento. Contudo, para o Inconel 625 a influência do a_e foi mais forte;
- Os valores de rugosidade obtidos para o Inconel 625 e para o Inconel 718 apresentaram uma tendência inversa quanto à variação do tamanho do abrasivo, para o Inconel 718, diminuindo tamanho do grão, os valores de rugosidade (Ra e Rz) diminuíram, enquanto que para o Inconel 625 eles aumentaram;
- Em geral, as superfícies de Inconel 625 após o processo de retificação, apresentaram um valor de microdureza cerca de 40% maior que o valor da microdureza da matriz do material antes do processo de retificação. Este aumento de dureza na superfície pode ser atribuído ao fenômeno do encruamento.
- Ao empregar menores velocidades de corte, as superfícies retificadas do Inconel 625 apresentaram uma menor variação nos valores de microdureza, ou seja, um menor aumento na microdureza. Por outro lado, as superfícies do Inconel 718 apresentaram uma queda nos valores de microdureza obtidos para as menores velocidade de corte;

- Para ambos os materiais analisados, todas as medidas de microdureza realizadas abaixo da superfície retificada resultaram em valores de microdureza próximo àqueles da matriz do respectivo material, indicando que não houve modificações na microdureza abaixo na superfície em nenhuma das condições analisadas;
- Para os dois materiais testados, em todas as condições analisadas, a força tangencial foi sempre menor que a normal, sendo que o quociente F_t/F_n variou em torno de 0,30;
- De modo geral, as forças (F_n e F_t), obtidas durante a retificação do Inconel 718 foram maiores que as apresentadas durante a retificação do Inconel 625, comportamento que já era esperado uma vez que a dureza da matriz do Inconel 718 é cerca de 50% maior que a do Inconel 625;
- A penetração de trabalho e a velocidade de corte foram estatisticamente significativas para as duas ligas analisadas e para ambas as componentes da força (F_t e F_n). Para ambas as ligas, as duas componentes da força apresentam a mesma tendência de aumentar com o aumento de a_e , e com o aumento de v_s ;
- A velocidade da peça, v_w , apresentou baixa influência nas forças de corte durante a retificação destas ligas;
- A granulometria do rebolo não apresentou influência significativa na força tangencial (F_t), contudo, para ambas as ligas, a diminuição no tamanho do abrasivo fez com que a força normal também diminuisse, aumentando o valor do quociente F_t/F_n ;
- Em geral, a energia específica de retificação foi menor para o Inconel 625 que para o Inconel 718, uma vez que a energia específica é diretamente proporcional à força tangencial de retificação (F_t) e o Inconel 625 apresentou menores valores de F_t , para mesma taxa de remoção de material (Q_w), consequentemente, os valores de U foram menores. O aumento da energia específica com a velocidade de corte e a não alteração dos valores com a variação da granulometria do rebolo também estão associados com a força tangencial, uma vez que a taxa de remoção de material não apresentou alteração;
- O aumento da penetração de trabalho reduziu a energia específica de retificação para as duas ligas analisadas, ao passo que aumentou a taxa de remoção de material e velocidade da peça, embora não se mostrou significativa para outros parâmetros, foi estatisticamente significativa para os valores de energia específica. Independente da liga usinada, a energia específica diminuiu com o aumento da taxa de remoção de material, ou seja, com o aumento do v_w ;

- A temperatura na zona de retificação apresentou a mesma tendência para as duas ligas analisadas, ela aumentou com a penetração de trabalho e com a velocidade de corte;
- De modo geral, independente da condição de corte analisada, os valores de temperatura obtidos para o Inconel 625 foram superiores aos obtidos para o Inconel 718 na mesma condição (aproximadamente 20% maior), o que está associado a sua menor condutividade térmica (aproximadamente 15% menor);
- No geral, o Inconel 625 apresenta maiores dificuldades para ser retificado que o Inconel 718 como também uma maior tendência ao empastamento do rebolo e ao encruamento da superfície, o que afeta negativamente o acabamento da peça, além de possuir menor condutividade térmica e maior ductilidade que resultou em maiores temperaturas na zona de retificação quando comparado ao Inconel 718. Embora o Inconel 718 apresentou maiores valores de F_n , F_t e U .

5.1. Sugestões para trabalhos futuros

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

- I. Verificar a influência de partículas sólidas (grafeno, nanotubos de carbono, diamante e óxido de alumínio) dispersas no fluido de corte aplicado via técnica MQL na integridade da superfície do Inconel 625. Na revisão da literatura pode-se observar uma grande quantidade de pesquisas na área de retificação voltadas para o emprego de partículas sólidas dispersas nos fluidos de corte. Contudo, até o momento não há informações sobre o desempenho das mesmas durante a retificação do Inconel 625.
- II. Testar rebolos de óxido de alumínio monocristalino e de grão cerâmicos (Seeded Gel) para a retificação do Inconel 625 e do Inconel 718 a fim de verificar o desempenho em relação ao SiC. Existem muitos tipos de rebolos voltados para os mais diversos tipos de materiais, assim é interessante buscar novas opções para a retificação destas ligas;
- III. Monitorar a integridade da superfície do Inconel 625 pelo método de impedância eletromecânica, uma vez que esse método possui característica não destrutiva e tem se mostrado promissor para detectar danos em aços após retificação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERTS, Matthew; KALAITZIDOU, Kyriaki; MELKOTE, Shreyes. An investigation of graphite nanoplatelets as lubricant in grinding. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, [s. l.], v. 49, n. 12–13, p. 966–970, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.06.005>>

ALVES, Manoel Cléber de Sampaio. **Análise da influência da velocidade de mergulho na retificação de aços endurecidos utilizando refrigeração otimizada**. 2005. Universidade Estadual Paulista - UNESP, [s. l.], 2005.

ASM INTERNATIONAL. **ASM HANDBOOK, Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials**. [s.l.] : ASM International, 2000. v. 2 Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=TRadAQAAQAAJ%7D>>

ASTM E92-16. **Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials**. 2016.

BEDDOES, J.; BIBBY, M. J. **Principles of Metal Manufacturing Processes**. Burlington: Elsevier B.H., 2003.

BIANCHI, Eduardo Carlos; AGUIAR, Paulo Roberto; PIUBELI, Bruno Amaral. **Aplicação e utilização dos fluidos de corte nos processos de retificação**. 1ª Edição ed. [s.l.] : Artliber, 2004.

BISWAS, Shishir Kumar et al. Effect of depth of cut on grindability of Inconel 600. In: AIP CONFERENCE PROCEEDINGS 2018, **Anais...** [s.l.: s.n.] Disponível em: <<http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5058245>>

BLACK, J. T.; KOHSER, Ronald A. **Degarmo's Materials and Processes in Manufacturing**. 11. ed. [s.l.] : John Wiley & Sons, Inc, 2012.

BONNEY, John. **High-Speed Machining of Nickel-base, Inconel 718, Alloy with Ceramic and Coated Carbide Cutting Tools using Conventional and High-Pressure Coolant Supplies**. 2004. London South Bank University, [s. l.], 2004.

BRADLEY, Elihu F. **Superalloys; A Technical Guide**. Metals Park, Ohio: ASM International, 1988.

BRINKSMEIER, E.; HEINZEL, C.; WITTMANN, M. Friction, Cooling and Lubrication in Grinding. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 48, n. 2, p. 581–598, 1999.

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. **Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach**. 4th editio ed. [s.l.] : John Wiley & Sons, 2012.

CAMERON, A.; BAUER, R. J.; WARKENTIN, A. An investigation of the effects of wheel-cleaning parameters in creep-feed grinding. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, [s. l.], v. 50, n. 1, p. 126–130, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.08.008>>

CASAGRANDE JÚNIOR, Ivo. **Commonly used Materials in Gas Turbine Engine**, 2015.

CEDEÑO, Karina. **Boeing supera marca e entrega 806 aviões em 2018**. 2019. Disponível em: <https://www.panrotas.com.br/aviacao/empresas/2019/01/boeing-supera-marca-e-entrega-806-avioes-em-2018_161434.html>. Acesso em: 25 jan. 2019.

ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J. **Livro Transferência de Calor e Massa**. 4. ed. Porto Alegre: AMGH Editora, 2012.

CHEN, Z. Z. et al. Grinding temperature during high-efficiency grinding Inconel 718 using porous CBN wheel with multilayer defined grain distribution. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 77, n. 1–4, p. 165–172, 2015.

CIMSA. **Óxido de Aluminio Monocristalino**. 2019. Disponível em: <<http://www.cimsaservicios.com/divisiones/granalla-ecologica/oxido-de-aluminio10.html>>. Acesso em: 26 jan. 2019.

DA SILVA, Rosemar Batista et al. Electromechanical impedance (EMI) technique as alternative to monitor workpiece surface damages after the grinding operation. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 98, n. 9–12, p. 2429–2438, 2018. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s00170-018-2390-2>>

DAMASCENO, Ricardo Fernando et al. Performance evaluation of various cooling-lubrication techniques in grinding of hardened AISI 4340 steel with vitrified bonded CBN wheel. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 92, n. 9–12, p. 3795–3806, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s00170-017-0434-7>>

DE OLIVEIRA, Deborah. **Retificação de Inconel 718 com Multicamadas de Grafeno Dispersas em Fluido de Corte Aplicado via Técnica MQL**. 2017. Universidade Federal de Uberlândia - MG, [s. l.], 2017.

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 9^a Ed. ed. São Paulo: Artliber, 2014.

DONACHIE, Matthew J.; DONACHIE, Stephen J. **Superalloys: A Technical Guide** **ASM International, 2008**. Second Edi ed. Materials Park, OH: ASM International, 2002.

EBBRELL, S. et al. The effects of cutting fluid application methods on the grinding process. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, [s. l.], v. 40, n. 2, p. 209–223, 2000.

ELFUSA. **Abrasivos**. 2019. Disponível em: <<http://www.elfusa.com.br/pt/produtos/abrasivos/bt>>. Acesso em: 26 jan. 2019.

EZUGWU, E. O.; BONNEY, J.; YAMANE, Y. An overview of the machinability of aeroengine alloys. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 134, n. 2, p. 233–253, 2003.

EZUGWU, E. O.; TANG, S. H. Surface abuse when machining cast iron (G-17) and nickel-base superalloy (Inconel 718) with ceramic tools. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 55, n. 2, p. 63–69, 1995. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0924013695017860>>

EZUGWU, E. O.; WANG, Z. M.; MACHADO, A. R. The machinability of nickel-based alloys: a review. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 86, n. 1–3, p. 1–16, 1999. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013698003148>>

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo: Blucher, 1977.

GADELMAWLA, E. S. et al. Roughness parameters. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 123, n. 1, p. 133–145, 2002. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013602000602>>

HADAD, M. J. et al. Temperature and energy partition in minimum quantity lubrication-MQL grinding process. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, [s. l.], v. 54–55, p. 10–17, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.11.010>>

HADAD, Mohammadjafar; SADEGHI, Banafsheh. Thermal analysis of minimum quantity lubrication-MQL grinding process. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, [s. l.], v. 63, p. 1–15, 2012. Disponível em:

<<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.07.003>>

HEINZEL, C.; BLEIL, N. The use of the size effect in grinding for work-hardening. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 56, n. 1, p. 327–330, 2007.

HOOD, R.; ASPINWALL, D. K.; VOICE, W. Creep feed grinding of a gamma titanium aluminide intermetallic alloy using SiC abrasives. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 191, n. 1–3, p. 210–214, 2007. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013607002762>>

IRANI, R. A.; BAUER, R. J.; WARKENTIN, A. A review of cutting fluid application in the grinding process. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, [s. l.], v. 45, n. 15, p. 1696–1705, 2005.

ISO, International Organisation for Standardization. **Geometrical product specifications (GPS) - Surface texture: Profile Method - Terms, Definitions and Surface Texture Parameters**, ISO 4287, 1998.

JACKSON, M. J. et al. Laser cleaning and dressing of vitrified grinding wheels. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 185, n. 1–3, p. 17–23, 2007.

JACKSON, Mark J.; DAVIM, J. Paulo. **Machining with Abrasives**. Boston, MA: Springer US, 2011. v. 1 Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-1-4419-7302-3>>

KANNAPPAN, S.; MALKIN, S. Effects of Grain Size and Operating Parameters on the Mechanics of Grinding. **Journal of Engineering for Industry**, [s. l.], v. 94, n. 3, p. 833–842, 1972.

KLOCKE, Fritz. **Manufacturing Processes 2**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-3-540-92259-9>>

KLOCKE, Fritz et al. Abrasive machining of advanced aerospace alloys and composites. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 64, n. 2, p. 581–604, 2015. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850615001432>>

KLOTZEL, Ernesto. **Airbus entrega 800 aeronaves em 2018**. 2019. Disponível em: <https://aeromagazine.uol.com.br/artigo/airbus-entrega-800-aeronaves-em-2018_4142.html>. Acesso em: 25 jan. 2019.

KOMANDURI, R. Some clarifications on the mechanics of chip formation when machining titanium alloys. **Wear**, [s. l.], v. 76, n. 1, p. 15–34, 1982. Disponível em:

<<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0043164882901132>>

KÖNIG, W.; ARCISZEWSKI, A. Von. Continuous Dressing - Dressing Conditions Determine Material Removal Rates and Workpiece Quality. **Annals of the CIRP**, [s. l.], v. 37, n. 1, p. 303–307, 1988.

KÖNIG, W.; MESSER, J. Planing of Conventional Grinding Disks With Polycrystalline Diamond. **Ind. Anz.**, [s. l.], v. 102, n. 46, p. 35–38, 1980.

KURIYAGAWA, Tsunemoto; SYOJI, Katsuo; OHSHITA, Hideo. Grinding temperature within contact arc between wheel and workpiece in high-efficiency grinding of ultrahard cutting tool materials. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 136, p. 39–47, 2003.

LI, H. Z.; ZENG, H.; CHEN, X. Q. An experimental study of tool wear and cutting force variation in the end milling of Inconel 718 with coated carbide inserts. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 180, n. 1–3, p. 296–304, 2006. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013606006650>>

LI, Z. et al. Grinding temperature and wheel wear of porous metal-bonded cubic boron nitride superabrasive wheels in high-efficiency deep grinding. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, [s. l.], p. 1–11, 2015. Disponível em: <<http://pib.sagepub.com/lookup/doi/10.1177/0954405415617928>>

LIN, B. et al. Influence of grinding parameters on surface temperature and burn behaviors of grinding rail. **Tribology International**, [s. l.], v. 122, p. 151–162, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.02.017>>

LIU, Qiang; CHEN, Xun; GINDY, Nabil. Assessment of Al₂O₃ and superabrasive wheels in nickel-based alloy grinding. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 33, n. 9–10, p. 940–951, 2007. Disponível em: <<https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs00170-006-0519-1.pdf>>. Acesso em: 20 maio. 2019.

MACHADO, Álisson Rocha et al. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2015.

MALKIN, S.; GUO, C. **Grinding Technology: Theory and Application of Machining with Abrasives**. Second Edi ed. New York, NY: Industrial Press, 2008.

MANDAL, Bijoy et al. An Effective Grinding Fluid Delivery Technique To Improve

Grindability of Inconel-600. In: 5TH INTERNATIONAL & 26TH ALL INDIA MANUFACTURING TECHNOLOGY, DESIGN AND RESEARCH CONFERENCE (AIMTDR 2014) 2014, **Anais...** [s.l.: s.n.]

MAO, Cong et al. Investigation of grinding characteristic using nanofluid minimum quantity lubrication. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, [s. l.], v. 13, n. 10, p. 1745–1752, 2012.

MARCHI, Marcelo et al. Grinding process monitoring based on electromechanical impedance measurements. **Measurement Science and Technology**, [s. l.], v. 26, n. 4, p. 045601, 2015. Disponível em: <<http://stacks.iop.org/0957-0233/26/i=4/a=045601?key=crossref.dca0e76b708ba4d508b54e58923dc3ae>>

MARINESCU, Ioan D. et al. **Tribology of Abrasive Machining Processes**. First Edit ed. Norwich, NY: William Andrew, Inc., 2004.

MARINESCU, Ioan D. et al. **Handbook of Machining with Grinding Wheels**. [s.l.] : CRC Press, 2007.

MARINESCU, Ioan D. et al. Abrasive Processes. In: **Handbook of Ceramics Grinding and Polishing**. Second Edi ed. [s.l.] : Elsevier Inc., 2015. p. 67–132.

MILLER, Stewart. Advanced materials mean advanced engines. **Interdisciplinary Science Reviews**, [s. l.], v. 21, n. 2, p. 117–129, 1996. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1179/isr.1995.20.4.117>>

NEUGEBAUER, R. et al. Velocity effects in metal forming and machining processes. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 60, n. 2, p. 627–650, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2011.05.001>>

NGUYEN, T. A.; BUTLER, D. L. Simulation of precision grinding process, part 1: Generation of the grinding wheel surface. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, [s. l.], v. 45, n. 11, p. 1321–1328, 2005.

NUSSBAUM, Guillaume Ch. **Rebolas e abrasivos - tecnologia básica**. [s.l.] : Cone Editora, 1988. v. 3

ÖSTERLE, W.; LI, P. X. Mechanical and thermal response of a nickel-base superalloy upon grinding with high removal rates. **Materials Science and Engineering: A**, [s. l.], v. 238, n. 2, p. 357–366, 1997. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509397004577>>

PATIL, D. V. et al. On grindability of Inconel 718 under high efficiency deep grinding by monolayer cBN wheel. **International Journal of Abrasive Technology**, [s. l.], v. 1, n. 2, p. 173–186, 2007. Disponível em: <<http://www.inderscience.com/link.php?id=15382>>

PAVAN, R. Bhanu et al. Experimental investigation of graphene nanoplatelets-based minimum quantity lubrication in grinding Inconel 718. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, [s. l.], p. 095440541772831, 2017. Disponível em: <<http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0954405417728311>>

PAWLAK, Zenon et al. The tribochemical and micellar aspects of cutting fluids. **Tribology International**, [s. l.], v. 38, n. 1, p. 1–4, 2005.

PUERTO, P. et al. Evolution of surface roughness in grinding and its relationship with the dressing parameters and the radial wear. **Procedia Engineering**, [s. l.], v. 63, n. 1996, p. 174–182, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.181>>

PUSAVEC, Franci et al. Sustainable machining of high temperature Nickel alloy - Inconel 718: Part 1 - Predictive performance models. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 81, p. 255–269, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.06.040>>

QIAN, Ning; DING, Wenfeng; ZHU, Yejun. Comparative investigation on grindability of K4125 and Inconel718 nickel-based superalloys. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 97, n. 5–8, p. 1649–1661, 2018. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s00170-018-1993-y>>

RAZUK, Henrique Cotait et al. Analysis of reverse heat transfer for conventional and optimized lubri-cooling methods during tangential surface grinding of ABNT 1020 steel. **REM - International Engineering Journal**, [s. l.], v. 69, n. 4, p. 435–443, 2016. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2448-167X2016000400435&lng=en&nrm=iso&tlang=en>

REALUM. **UNS N06625 - DIN 2.4856.** 2012. Disponível em: <<http://www.realum.com.br/inconel2.php>>. Acesso em: 22 out. 2018.

REN, Xiaoping; LIU, Zhanqiang. Influence of cutting parameters on work hardening behavior of surface layer during turning superalloy Inconel 718. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 86, n. 5–8, p. 2319–2327, 2016. Disponível

em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s00170-016-8350-9>>

RESENDE, Delton Lustosa De et al. Estudo Do Comportamento Mecânico Da Liga Inconel 718 Em Temperaturas Elevadas. **Anais do 15º Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA**, [s. l.], v. XV ENCITA, 2009.

SAINT-GOBAIN. **Fundamentos en processo de retificação**. Vinhedo-SP: UNIVEN - Universidade de Vendas Saint-Gobain Abrasivos, 2015. a.

SAINT-GOBAIN. **Tecnologia Avançada em Processos de Retificação**. Vinhedo-SP: UNIVEN - Universidade de Vendas Saint-Gobain Abrasivos, 2015. b.

SAINT-GOBAIN. **A Norton revolucionou o mercado em vários momentos ao apresentar inovações nos grãos, que são, como todos sabem, a matéria-prima básica dos abrasivos.** 2019. Disponível em: <<https://www.nortonabrasives.com/pt-br/graos-abrasivos-e-inovacao-nos-processos>>. Acesso em: 25 jan. 2019.

SALES, Wisley Falco; DINIZ, Anselmo Eduardo; MACHADO, Álisson Rocha. Application of cutting fluids in machining processes. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences**, [s. l.], v. 23, n. 2, p. 227–240, 2001. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-73862001000200009&lng=en&tlng=en>. Acesso em: 8 maio. 2019.

SCIENCE DIRECT. **Grinding of Inconel 718**. 2019.

SETTI, D.; GHOSH, S.; RAO, P. V. Application of Nano Cutting Fluid under Minimum Quantity Lubrication (MQL) Technique to Improve Grinding of Ti – 6Al – 4V Alloy. **Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology**, [s. l.], v. 6, n. 10, p. 2107–2111, 2012. Disponível em: <<http://www.waset.org/publications/14178>>

SHAJI, S.; RADHAKRISHNAN, V. Analysis of process parameters in surface grinding with graphite as lubricant based on the Taguchi method. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 141, n. 1, p. 51–59, 2003.

SHEN, Bin et al. Performance of Novel MoS₂ Nanoparticles Based Grinding Fluids in Minimum Quantity Lubrication Grinding. **Transactions of NAMRI/SME**, [s. l.], v. 36, p. 357–364, 2008. Disponível em: <http://career.engin.umich.edu/wp-content/uploads/sites/51/2013/08/08_NAMRCShenMoS2_MQL_grinding.pdf>

SHOEMAKER, L. E. Alloys 625 and 725: Trends in Properties and Applications. In:

SUPERALLOYS 718, 625, 706 AND VARIOUS DERIVATIVES (2005) 2005, **Anais...** : TMS, 2005. Disponível em: <<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-33644859622&partnerID=40&md5=a068901b0b6f8441b40154fc3fbc6756>>

SINHA, Manoj Kumar et al. An investigation on surface burn during grinding of Inconel 718. **Journal of Manufacturing Processes**, [s. l.], v. 21, p. 124–133, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2015.12.004>>

SINHA, Manoj Kumar et al. Application of eco-friendly nanofluids during grinding of Inconel 718 through small quantity lubrication. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 141, p. 1359–1375, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.212>>

SINHA, Manoj Kumar et al. Some investigations in grindability improvement of Inconel 718 under ecological grinding. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, [s. l.], v. 233, n. 3, p. 727–744, 2019. Disponível em: <<http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0954405417752513>>

SINHA, Manoj Kumar; GHOSH, Sudarsan; PARUCHURI, Venkateswara Rao. Modelling of specific grinding energy for Inconel 718 superalloy. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, [s. l.], p. 095440541774151, 2017. Disponível em: <<http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0954405417741513>>

SINOT, O.; CHEVRIER, P.; PADILLA, P. Experimental simulation of the efficiency of high speed grinding wheel cleaning. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, [s. l.], v. 46, n. 2, p. 170–175, 2006.

SOUZA, Sérgio Augusto De. **Ensaios Mecânicos de Materiais Metálicos - Fundamentos teóricos e práticos**. 5 ed. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1982.

SPECIAL METALS. **Product Handbook of High-Performance Alloys**. [s.l.] : Special Metals Corporation, 2008.

SUGAHARA, Tarcila et al. ESTUDO DO COMPORTAMENTO EM FLUÊNCIA DA LIGA INCONEL 718. **Anais do 15º Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA**, [s. l.], v. XV ENCITA, 2009.

TAWAKOLI, T. et al. An experimental investigation of the effects of workpiece and grinding parameters on minimum quantity lubrication-MQL grinding. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, [s. l.], v. 49, n. 12–13, p. 924–932, 2009.

TAWAKOLI, T.; HADAD, M. J.; SADEGHI, M. H. Investigation on minimum quantity lubricant-MQL grinding of 100Cr6 hardened steel using different abrasive and coolant-lubricant types. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, [s. l.], v. 50, n. 8, p. 698–708, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2010.04.009>>

THELLAPUTTA, Gopala Rao; CHANDRA, Pulcharu Subhash; RAO, C. S. P. Machinability of Nickel Based Superalloys: A Review. **Materials Today: Proceedings**, [s. l.], v. 4, n. 2, p. 3712–3721, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.266>>

TODHUNTER, L. D. et al. Industrial survey of ISO surface texture parameters. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, [s. l.], v. NULL, p. 84–92, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cirpj.2017.06.001>>

TSO, Pei-Lum. Study on the grinding of Inconel 718. **Journal of Materials Processing Tech.**, [s. l.], v. 55, n. 3–4, p. 421–426, 1995.

WANG, Yaogang et al. Experimental evaluation of the lubrication properties of the wheel / workpiece interface in MQL grinding with different nanofluids. **Tribiology International**, [s. l.], v. 99, p. 198–210, 2016. a.

WANG, Yaogang et al. Experimental evaluation on tribological performance of the wheel/workpiece interface in minimum quantity lubrication grinding with different concentrations of Al₂O₃ nanofluids. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], 2016. b. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.110>>

WEBSTER, J. A. et al. Grinding Fluid Application System Design. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 44, n. 1, p. 333–338, 1995.

WEBSTER, John A. **COHERENT JET NOZZLES FOR GRINDING APPLICATIONS** 2003.

WENFENG, Ding et al. Grindability and surface integrity of cast nickel-based superalloy in creep feed grinding with brazed CBN abrasive wheels. **Chinese Journal of Aeronautics**, [s. l.], v. 23, n. 4, p. 501–510, 2010. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S1000-9361\(09\)60247-8](http://dx.doi.org/10.1016/S1000-9361(09)60247-8)>

XI, Xinxin et al. Grindability evaluation and tool wear during grinding of Ti₂AlNb intermetallics. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 94, n. 1–4, p. 1441–1450, 2018.

YAO, C. F. et al. Research on surface integrity of grinding Inconel718. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 65, n. 5–8, p. 1019–1030, 2013. Disponível em: <<https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs00170-012-4236-7.pdf>>. Acesso em: 20 maio. 2019.

ZENG, Quanren et al. Investigation into grindability of a superalloy and effects of grinding parameters on its surface integrity. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, [s. l.], v. 229, n. 2, p. 238–250, 2015. Disponível em: <<http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0954405414526384>>

ZHANG, Yanbin et al. Experimental evaluation of the lubrication performance of MoS₂/CNT nanofluid for minimal quantity lubrication in Ni-based alloy grinding. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, [s. l.], v. 99, p. 19–33, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2015.09.003>>

ZHANG, Yanbin et al. Experimental study on the effect of nanoparticle concentration on the lubricating property of nanofluids for MQL grinding of Ni-based alloy. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 232, p. 100–115, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.01.031>>

ZHONG, Zhaowei; RAMESH, Kuppuswamy; YEO, Swee Hock. Grinding of nickel-based super-alloys and advanced ceramics. **Materials and Manufacturing Processes**, [s. l.], v. 16, n. 2, p. 195–207, 2001.

ZUM GAHR, Karl Heinz. **Tribology Series, 10: Microstructure and Wear of Materials.pdf**. New York, NY: Elsevier Science Publishers, 1987.