

LUCAS MELO QUEIROZ BARBOSA

**TORNEAMENTO DE AÇO ENDURECIDO ABNT -
D6 COM FERRAMENTA DE PCBN
REFRIGERADA ATRAVÉS DE GALERIAS
INTERNAS**



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

2021

LUCAS MELO QUEIROZ BARBOSA

**TORNEAMENTO DE AÇO ENDURECIDO ABNT - D6 COM
FERRAMENTA DE PCBN REFRIGERADA ATRAVÉS DE
GALERIAS INTERNAS**

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

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Álisson Rocha Machado

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Sérgio Martins

UBERLÂNDIA– MG

2021

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

B238	Barbosa, Lucas Melo Queiroz, 1995-
2021	<p>Torneamento de aço endurecido ABNT - D6 com ferramenta de PCBN refrigerada através de galerias internas [recurso eletrônico] / Lucas Melo Queiroz Barbosa. 2021.</p> <p>Orientador: Álisson Rocha Machado. Coorientador: Paulo Sérgio Martins. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Mecânica. Modo de acesso: Internet. Disponível em: http://doi.org/10.14393/ufu.di.2021.282 Inclui bibliografia.</p> <p>1. Engenharia mecânica. I. Machado, Álisson Rocha, 1956-, (Orient.). II. Martins, Paulo Sérgio, 1976-, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.</p> <p style="text-align: right;">-CDU: 621</p>

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Bloco 1M, Sala 212 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
Telefone: (34) 3239-4282 - www.posgrad.mecanica.ufu.br - secposmec@mecanica.ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Mecânica				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, nº 586, COPEM				
Data:	29/06/2021	Hora de início:	14:00	Hora de encerramento:	17:00
Matrícula do Discente:	11922EMC006				
Nome do Discente:	Lucas Melo Queiroz Barbosa				
Título do Trabalho:	Torneamento de aço endurecido ABNT D6 com ferramenta de PCBN refrigerada através de galerias internas				
Área de concentração:	Materiais e Processos de Fabricação				
Linha de pesquisa:	Processos de Fabricação (Usinagem e Soldagem)				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Desenvolvimento, aplicação e validação de uma nova técnica de refrigeração interna do inserto de metal duro vai galerias internas produzidas por EDM, na usinagem de materiais metálicos				

Reuniu-se por meio de webconferência a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Professores Doutores: Márcio Bacci da Silva- FEMEC/UFU; Ricardo Diego Torres - PUC/PR; Paulo Sérgio Martins (Co-orientador) - UNA e Álisson Rocha Machado - FEMEC/UFU, orientador do candidato. Ressalta-se que os Profs. Álisson Rocha Machado e Márcio Bacci da Silva e o Discente participaram da defesa por meio de webconferência desde a cidade de Uberlândia/MG, Prof. Paulo Sérgio Martins desde a cidade de Belo Horizonte/MG, e Prof. Ricardo Diego Torres desde a cidade de Curitiba/PR em atendimento a Portaria nº 36, de 19 de março de 2020, da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Dr. Álisson Rocha Machado, 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.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) 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 Mestre.

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 **ALISSON ROCHA MACHADO, Usuário Externo**, em 29/06/2021, às 17:25, 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 **Paulo Sérgio Martins, Usuário Externo**, em 29/06/2021, às 17:26, 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 **Marcio Bacci da Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 29/06/2021, às 17:26, 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 **Ricardo Diego Torres, Usuário Externo**, em 05/07/2021, às 13:06, 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 **2861689** e o código CRC **7C64A816**.

“Só há uma coisa pior do que formar colaboradores e eles partirem, é não formar e eles permanecerem”.

Henry Ford

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por iluminar meu caminho e deixar que eu conclua esta nova etapa na minha vida.

Agradeço minha família, sobretudo aos meus pais, Márcio Barbosa e Lísia de Melo Queiroz, por todo o apoio, ensinamentos e suporte oferecido durante toda a vida.

Agradeço o meu orientador Prof. Dr. Alisson Rocha Machado e ao coorientador Prof. Dr. Paulo Sérgio Martins, pela ajuda e disponibilidade ao responder dúvidas que surgiram ao longo deste trabalho. Agradeço também o Prof. Dr. Wisley Falco Sales (*in memoriam*), o qual foi meu primeiro orientador do mestrado e aos Prof. Dr. Éder Silva Costa e Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva pela ajuda com os ensaios experimentais.

Agradeço aos alunos de Mestrado Pedro Henrique Pires França e Augusto César Santos Peixoto e ao aluno de doutorado Gustavo Henrique Nazareno Fernandes pela parceria no desenvolvimento do projeto das ferramentas refrigeradas.

Agradeço a todas as pessoas do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU-UFU), alunos, professores e técnicos, os quais ajudaram a ensinar e manter a qualidade do laboratório, durante todo o tempo que estive presente. Em especial ao aluno de pós-doutorado Leonardo da Silva, e os alunos de mestrado Felipe dos Anjos e Felipe Chagas.

Agradeço a empresa MAPAL do Brasil a qual contribuiu pela produção dos insertos e a Walter Tools pelo fornecimento do porta-ferramentas, o qual foi modificado pela Nipo-Tec Ferramentas Industriais.

Agradeço a Villares Metal S.A., a qual forneceu o material usinado neste trabalho, aço endurecido D6.

Agradeço as agências de fomento: Capes, CNPq e FAPEMIG pelo suporte oferecido através de bolsas de pesquisa.

Agradeço também a todos os outros professores e alunos da Universidade Federal de Uberlândia, os quais contribuíram para a minha formação.

BARBOSA, L.M.Q. Torneamento de aço endurecido ABNT D6 com ferramenta de PCBN refrigerada através de galerias internas. 2021. 134p. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.

RESUMO

A usinagem é um dos processos de fabricação mais utilizados no mundo, e se baseia na retirada de material da peça. De toda energia mecânica gerada pelo motor da máquina-ferramenta, mais de 95% são convertidas em calor no momento do corte. Devido a essas condições, a temperatura na ferramenta de corte pode alcançar valores de 1200 °C, como na usinagem de aços endurecidos, o que resulta em menor vida útil da ferramenta de corte. Os fluidos de corte são o meio mais utilizado com fins de refrigeração nas indústrias, sendo em muitas situações não sustentáveis, devido ao custo, difícil descarte e riscos aos operadores, além de não serem recomendáveis em algumas ocasiões. Este trabalho tem como objetivo projetar e testar um sistema de refrigeração interna em ferramentas de Nitreto Cubico de Boro Policristalino (PCBN), o qual circula uma mistura de água com etileno glicol em circuito fechado, o qual será utilizado no torneamento de aço endurecido ABNT D6 e comparado com a usinagem a seco. Foi realizado um planejamento fatorial com dois níveis e três variáveis: método de refrigeração (usinagem a seco e com ferramentas refrigeradas internamente - FRI), avanço e velocidade de corte, com a profundidade de corte constante em todos os testes. As variáveis de saída consideradas foram a vida da ferramenta, a temperatura de corte, a força de corte e a rugosidade da peça. O sistema FRI proporcionou uma redução significativa na temperatura da superfície de saída da ferramenta, mensurada por meio de uma câmera termográfica, apesar de ser a variável menos significativa na temperatura máxima. Nos ensaios de vida, o sistema FRI aumentou a vida da ferramenta em todas as situações analisadas em relação a usinagem a seco, apesar da velocidade de corte apresentar maior significância. As variáveis mais influentes na análise de força foram o avanço, devido a área, e a refrigeração, no qual o sistema FRI apresentou maiores valores, devido a diminuição da temperatura. A rugosidade teve como único fator significativo a condição da geometria de aresta, na qual a ferramenta gasta proporcionou melhor acabamento superficial. Os tipos de desgastes ocorridos foram os de flanco e cratera, sendo que esta apresentou maior profundidade na usinagem a seco, devido a maior temperatura. Os principais mecanismos de desgaste encontrados foram a abrasão e a difusão.

Palavras-chaves: usinagem, torneamento, aço endurecido, refrigeração interna da ferramenta, torneamento duro.

BARBOSA, L.M.Q. Turning of ABNT D6 hardened steel with cooled PCBN tool through internal galleries. 2021. 134 p. Master's dissertation. Faculty of Mechanical Engineering. Federal University of Uberlandia. Uberlandia, MG, Brazil.

ABSTRACT

Machining is one of the most used manufacturing processes in the world and is based on the removal of material from the part. Of all the mechanical energy generated by the engine of the machine tool, more than 95% is converted into heat during the cut. Due to these conditions, the temperature in the cutting tool can reach values of 1200 °C, as when machining of hardened steels, which results in a shorter tool life. Cutting fluids are the most used means for cooling the machining region in industries, but they are not sustainable due to their cost, difficult disposal, and risks to operators, in addition to not being recommended on some occasions. This work aims to design and test an internal cooling system in Polycrystalline Cubic Boron Nitride (PCBN) tools, which circulates a closed-circuit mixture of water and ethylene glycol, which is used in the turning operation of hardened steel ABNT D6 and comparison with dry machining. A factorial design was used with two levels and three variables: cooling method (dry machining and internally cooled tool - ICT), feed rate and cutting speed, with depth of cut constant in all the tests. Tool life, cutting temperature, cutting force and workpiece surface roughness was the output variables considered. The ICT system provided a significant reduction in the temperature of the tool rake surface, measured using a thermographic camera, despite being the least significant variable in the maximum temperature. In the tool life tests, the FRI system increased the tool life in all situations analyzed compared to dry machining, despite the cutting speed being more significant. The most influential variables in the cutting force were feed rate, due to increased area of cutting; and cooling, in which the FRI system showed higher values, due to a decrease in temperature. The only significant factor for roughness was the condition of the edge geometry, in which the worn tool provided a better surface finish. Both flank and crater wears were observed, with the latter higher for dry machining because of higher cutting temperatures. Abrasion and diffusion were the prevailing wear mechanisms.

Keywords: machining, turning, hardened steel, internally cooled tool, hard turning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Processos de fabricação, adaptado de (MACHADO et al., 2015)	6
Figura 2.2 – Região de contato na interface cavaco-ferramenta, adaptado de (TRENT; WRIGHT, 2000)	8
Figura 2.3 – Mecanismo da formação do cavaco (Machado et al., 2015).....	10
Figura 2.4 – Zonas de cisalhamento e o fluxo de calor	13
Figura 2.5 – Temperatura no torneamento da liga de alumínio 7075-T6 em função da velocidade de corte e avanço (SANTOS et al., 2017).....	14
Figura 2.6 – Distribuição de temperatura no processo de torneamento de aço endurecido AISI D2, adaptado de (TANG; HUANG; XIE, 2011)	15
Figura 2.7 – Temperatura máxima em função da velocidade de corte e da profundidade de corte, no torneamento do aço endurecido AISI D2, adaptado de (TANG; HUANG; XIE, 2011)	15
Figura 2.8 – Formas de desgaste, adaptado de (DEARNLEY; TRENT, 1982).....	22
Figura 2.9 – Curva característica do desgaste de flanco (ASTAKHOV; DAVIM, 2008)	22
Figura 2.10 – Mecanismos de desgaste (KÖNIG; KLOCKE, 2002; apud MACHADO et al., 2015)	23
Figura 2.11 – Mecanismos de desgaste, adaptado de (TRENT; WRIGHT, 2000)	24
Figura 2.12 – Regiões de desgaste (ISO 3685, 1993)	25
Figura 2.13 – Perfil de rugosidade (NBR ISO 4287, 2002)	26
Figura 2.14 – Classificação dos tipos de fluido de corte, adaptado de (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2003; GONÇALVES, 2019)	30
Figura 2.15 – Instalação do <i>heat pipe</i> no porta-ferramentas (CHIOU et al., 2003)	33
Figura 2.16 – Esquema do porta-ferramenta utilizado por Ingraci Neto et al., (2016) (adaptado).	34
Figura 2.17 – Ferramenta com micro canais para a passagem de nitrogênio líquido (LN ₂), a) micro canais, b) calço modificado, adaptado de (ROZZI; SANDERS; CHEN, 2011)	35
Figura 2.18 – Ferramenta com galeria interna de refrigeração proposta por Ferri et al. (2014), adaptado.	35
Figura 2.19 – a) Ciclo de refrigeração por compressão de vapor, adaptado de (ALTINKAYNAK, 2021), b) diagrama de temperatura e entropia de um ciclo de refrigeração, adaptado de (ÇENGEL; BOLES, 2013).....	36

Figura 2.20 – Ciclo de refrigeração com fluido secundário (BENITO, 2012).....	38
Figura 2.21 – Fluidos de refrigeração secundária e temperatura de congelamento (FREITAS, 2009).....	39
Figura 2.22 – Viscosidade cinemática em função da temperatura para líquidos de refrigeração secundário, (FREITAS, 2009)	39
Figura 3.1 – Fluxograma dos experimentos	40
Figura 3.2 – Subsistemas de refrigeração e usinagem.....	42
Figura 3.3 – Desenho CAD do subsistema da ferramenta.....	43
Figura 3.4 – a) Ferramentas utilizadas, b) detalhe do chanfro (dimensões em mm).....	44
Figura 3.5 – Configuração das galerias na ferramenta do sistema FRI.....	44
Figura 3.6 – Detalhes do porta-ferramentas DSSNR2525X12-P, adaptado de (WALTER TOOLS, 2021)	45
Figura 3.7 – Alterações no porta-ferramenta, grampo e parafuso	46
Figura 3.8 – Desenho CAD do subsistema de refrigeração.....	47
Figura 3.9 – Bomba do circuito secundário.....	48
Figura 3.10 – Torno CNC ROMI Multiplic 35D com o subsistema de refrigeração	51
Figura 3.11 – Montagem do tarugo na castanha.....	52
Figura 3.12 – a) Termocâmera Flir A325 na caixa protetora, b) posicionamento da câmera no torno.....	53
Figura 3.13 – Ferramenta com a face superior pintada e montada no porta-ferramentas	54
Figura 3.14 – Temperatura máxima em cada quadro do vídeo para a condição a seco, avanço de 0,15 mm/rev e velocidade de corte de 160 m/min	55
Figura 3.15 – a) Dinamômetro, b) amplificador de sinais e placa de aquisição de sinais.....	56
Figura 3.16 – Exemplo da medição das forças de corte para a condição a seco, avanço de 0,10 mm/rev e velocidade de corte de 240 m/min.....	57
Figura 3.17 – Rugosímetro Surtronic-S128 montado sobre o suporte para medição da rugosidade da peça no torno	58
Figura 3.18 – Perfil de rugosidade para segunda medição para a condição a seco, avanço de 0,15 mm/rev e velocidade de corte de 160 m/min.....	58
Figura 3.19 – Microscópio ferramenteiro ‘SZ6145TR – OLYMPUS’	59
Figura 3.20 – Desgaste da ferramenta para a segunda réplica da condição FRI, avanço de 0,15 mm/rev e velocidade de corte de 160 m/min.....	60
Figura 3.21 – Exemplo das curvas de vida para a condição FRI, avanço de 0,15 mm/rev e velocidade de corte de 240 m/min	61

Figura 3.22 – a) MEV TM300, b) posicionamento dos insertos no MEV	62
Figura 4.1 – Imagem termográfica sem usinagem da superfície de saída da ferramenta, com escala em °C, a) sistema de refrigeração desligado, b) sistema de refrigeração ligado	64
Figura 4.2 – Mapa de temperatura da região de corte para as diversas condições testadas	65
Figura 4.3 – Temperaturas médias encontradas nos pontos “A” e “B” na superfície de saída da ferramenta (conforme figura 3.13) para as diversas condições testadas.....	66
Figura 4.4 – Diagrama de Pareto para a temperatura no ponto ‘A’	68
Figura 4.5 – Diagrama de Pareto para a temperatura no ponto ‘B’	68
Figura 4.6 – Resíduos brutos em função dos valores preditos para a temperatura no ponto ‘A’	69
Figura 4.7 – Resíduos brutos em função dos valores preditos para a temperatura no ponto ‘B’	69
Figura 4.8 – Resultados da medição de temperatura	70
Figura 4.9 – Diagrama de Pareto para as médias das maiores temperaturas dos quadros.....	72
Figura 4.10 – Resíduos brutos em função dos valores preditos para as médias das maiores temperaturas dos quadros.....	72
Figura 4.11 – Resultados do teste de força em cada componente	73
Figura 4.12 – Diagrama de Pareto para o teste de força de corte	75
Figura 4.13 – Resíduos brutos em função dos valores preditos para a força de corte.....	76
Figura 4.14 – Diagrama de Pareto para a força de usinagem	77
Figura 4.15 – Resíduos brutos em função dos valores preditos para a força de usinagem	77
Figura 4.16 – Resultados para a rugosidade R_a para a ferramenta nova e gasta	78
Figura 4.17 – Resultados para a rugosidade R_q para a ferramenta nova e gasta.....	79
Figura 4.18 – Resultados para a rugosidade R_z para a ferramenta nova e gasta.....	79
Figura 4.19 – Diagrama de Pareto para a rugosidade R_a	82
Figura 4.20 – Diagrama de Pareto para a rugosidade R_q	83
Figura 4.21 – Diagrama de Pareto para a rugosidade R_z	83
Figura 4.22 – Cavaco formado na condição a seco, avanço de 0,15 mm/rev e velocidade de corte de 240 m/min, a) aresta nova, b) aresta gasta	84
Figura 4.23 – Resíduos brutos em função dos valores preditos para a rugosidade R_a	84
Figura 4.24 – Resíduos brutos em função dos valores preditos para a rugosidade R_q	85
Figura 4.25 – Resíduos brutos em função dos valores preditos para a rugosidade R_z	85
Figura 4.26 – Resultados do ensaio de vida da ferramenta	86
Figura 4.27 – Diagrama de Pareto para o ensaio de vida da ferramenta	87

Figura 4.28 – Resíduos brutos em função dos valores preditos para o ensaio de vida da ferramenta	88
Figura 4.29 – MEV da superfície de folga principal com ampliação de 300 vezes	90
Figura 4.30 – MEV da superfície de folga principal com ampliação de 300 vezes	91
Figura 4.31 – MEV da superfície de folga principal com ampliação de 300 vezes	92
Figura 4.32 – MEV da superfície de folga principal com ampliação de 300 vezes	93
Figura 7.1 – Vista lateral da ferramenta; onde o corte A-A é mostrado na figura 7.2, e a lista de referência dos números mostrado na tabela 7.1	108
Figura 7.2 – Corte A-A da ferramenta.....	109
Figura 7.3 – Vista da superfície de saída da ferramenta.....	110

LISTAS DE TABELAS

Tabela 3.1 – Composição química do aço VC131 (VILLARES METALS, 2009)	41
Tabela 3.2 – Parâmetros utilizados por outros autores	49
Tabela 3.3 – Parâmetros dos ensaios	49
Tabela 3.4 – Parâmetros estatísticos nos testes	50
Tabela 4.1 – Análise de variância para a temperatura no ponto ‘A’	66
Tabela 4.2 – Análise de variância para a temperatura no ponto ‘B’	67
Tabela 4.3 – Análise de variância para a temperatura média	70
Tabela 4.4 – Análise de variância preliminar para a força de corte com todos os fatores	74
Tabela 4.5 – Análise de variância preliminar para a força de usinagem com todos os fatores	76
Tabela 4.6 – Análise de variância preliminar para a rugosidade R_a com todos os fatores	80
Tabela 4.7 – Análise de variância preliminar para a rugosidade R_q com todos os fatores	80
Tabela 4.8 – Análise de variância preliminar para a rugosidade R_z com todos os fatores	81
Tabela 4.9 – Análise de variância preliminar para a vida da ferramenta com todos os fatores	86
Tabela 7.1 – Referência para o número dos componentes da figura 7.1	109
Tabela 7.2 – Resultados do teste de temperatura na ferramenta no ponto ‘A’	111
Tabela 7.3 – Resultados do teste de temperatura na ferramenta no ponto ‘B’	111
Tabela 7.4 – Resultados do teste da média das temperaturas máximas	112
Tabela 7.5 – Resultados do teste de força	112
Tabela 7.6 – Resultados do teste de rugosidade R_a	113
Tabela 7.7 – Resultados do teste de rugosidade R_q	114
Tabela 7.8 – Resultados do teste de rugosidade R_z	115
Tabela 7.9 – Resultados do teste de vida da ferramenta	115

LISTAS DE SÍMBOLOS

A	Area da seção transversal de corte
a_p	Profundidade de corte
A_α	Superfície de folga principal
A'_α	Superfície de folga secundária
A_γ	Superfície de saída
d	Diâmetro
f	Avanço (mm/rev)
h	Espessura de corte
h'	Espessura do cavaco
f	Avanço de corte
F	Distribuição F de Fisher
F_{ap}	Força de apoio
F_c	Força de corte
F_f	Força de avanço
F_N	Força normal
F_p	Força passiva
F_t	Força ativa
F_u	Força de usinagem
i	Indicador de contagem
L_f	Comprimento usinado
n	Rotação
N_c	Potência de corte
P_m	Potência medida
N_r	Potência real
N_u	Potência de usinagem.
Q	Taxa de remoção de material

T_c	Tempo de corte
S	Aresta principal de corte
S'	Aresta secundária de corte
VB_B	Desgaste de flanco médio
VB_{Bmax}	Desgaste de flanco máximo
V_c	Velocidade de corte
V_e	Velocidade efetiva de corte
V_f	Velocidade de avanço
V_r	Volume de material removido
η	Rendimento do motor.

LISTAS DE ABREVIACOES

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	Análise de variância
APC	Aresta postiça de corte
CAD	Desenho assistido por computador (<i>computer aided design</i>)
CBN	Nitreto Cúbico de Boro
CNC	Comando numérico computadorizado
FRI	Ferramenta refrigerada internamente
G.L.	Graus de liberdade
LEPU	Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem
MEG	Monoetilenoglicol
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MQL	Mínima quantidade de lubrificante
PCBN	Nitreto Cúbico de Boro Policristalino
Q.M.	Quadrados médios
s	Entropia
S.Q.	Soma dos quadrados
T	Temperatura
UFU	Universidade Federal de Uberlândia

SUMÁRIO

CAPÍTULO I.....	1
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. OBJETIVOS.....	3
1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO.....	4
CAPÍTULO II.....	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1. USINAGEM.....	5
2.2. FERRAMENTAS DE CORTE.....	18
2.3. INTEGRIDADE SUPERFICIAL E RUGOSIDADE.....	25
2.4. USINAGEM DE AÇOS ENDURECIDOS.....	27
2.5. MÉTODOS DE REDUÇÃO DE TEMPERATURA DE CORTE.....	29
2.6. SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO.....	36
CAPÍTULO III.....	40
3. METODOLOGIA.....	40
3.1. MATERIAL UTILIZADO.....	40
3.2. SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO E SEUS COMPONENTES.....	41
3.3. PARÂMETROS DE CORTE E ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	48
3.4. EQUIPAMENTOS E MÉTODOS UTILIZADOS.....	50
CAPÍTULO IV.....	63
4. RESULTADOS E DICUSSÕES.....	63
4.1. ANÁLISE TERMOGRÁFICA.....	63
4.2. FORÇAS AVALIADAS NO PROCESSO DE USINAGEM.....	73

4.3. RUGOSIDADE AVALIADA NA SUPERFÍCIE USINADA.....	78
4.4. ANÁLISE DA VIDA DA FERRAMENTA	85
4.5. MECANISMO DE DESGASTE.....	88
CAPÍTULO V	94
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	94
5.1. CONCLUSÕES.....	94
5.2. PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS.....	95
CAPÍTULO VI.....	97
6. REFERÊNCIAS	97
CAPÍTULO VII.....	108
7. APÊNDICES	108
7.1. APÊNDICE I - DESENHO TÉCNICO DAS GALERIAS.....	108
7.2. APÊNDICE II - TABELAS DE RESULTADOS.....	111

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

A usinagem é um dos processos de fabricação mais utilizados no mundo, e se baseia na retirada material de uma peça por uma ou mais ferramentas de corte através de um movimento relativo aplicando uma força sobre um corpo com menor dureza. Devido a forças cisalhantes e ao atrito, a temperatura na interface cavaco-ferramenta é elevada, sendo que a principal variável do processo responsável pelo aumento da temperatura é a velocidade de corte (KARAGUZEL; BUDAK, 2018). Mesmo com a evolução dos materiais utilizados em ferramentas de corte, permitindo utilizar maiores velocidades, as temperaturas elevadas podem ocasionar redução na vida útil da ferramenta, devido a efeitos da redução a resistência ao desgaste, além da perda da qualidade dimensional e possíveis problemas na integridade da superfície da peça (NING; LIANG, 2019). Dessa forma, são usadas diversas técnicas para resfriamento das ferramentas de corte, e a aplicação de fluidos de corte é a medida mais eficiente, normalmente na forma de jorro ou por MQL, mínima quantidade de lubrificante.

De acordo com Krolczyk et al. (2019) a manufatura sustentável, mais especificamente a usinagem, atualmente caminha para tecnologias verdes, economicamente justificadas, como o prolongamento da vida útil da ferramenta de corte, métodos e condição de refrigeração e lubrificação sustentável, além de determinação e parâmetros funcionais de manufaturados. Roca e Searcy (2012) dizem que a sustentabilidade é a capacidade de se auto sustentar ou de se auto manter. Koho, Tapaninaho e Torvinen (2012) e Rokhmawati, Sathye e Sathye (2015) acrescentam que a sustentabilidade é o desenvolvimento de medidas as quais suprem as necessidades atuais sem comprometer as necessidades de gerações futuras. Diversas empresas do setor industrial passaram a avaliar seu desempenho em termos financeiros, sociais e de dimensões ambientais, através de um método proposto por Elkington (1997), conhecido como tripé da sustentabilidade.

Fluidos de corte são, portanto, os principais meios utilizados pela indústria a fim de reduzir as temperaturas e prolongar a vida da ferramenta, mas são graves entraves na tendência atual de manufatura sustentável, ao entrar em conflito com os três pilares do tripé da sustentabilidade. Ambientalmente os fluidos de corte são de difícil descarte e gerenciamento, devido à presença de derivados de petróleo e contaminantes. O problema se agrava pelo enorme volume de fluido utilizado na indústria, segundo Debnath et al. (2014), no ano de 2005 foram utilizados 38 mega toneladas, número que cresce anualmente. Além disso são gastos milhões de toneladas de água para a limpeza das peças (PARK et al., 1988), comprometendo ainda mais a sustentabilidade. Na esfera social, os fluidos de corte são maléficos a saúde humana, devido a adição de fungicidas que causam alergias aos operadores. Pelo lado econômico, o uso de fluidos de corte pode ser responsável por um montante entre 7 % a 17 % do custo total da usinagem (KING et al., 2001).

Por outro lado, há situações em que o fluido de corte atrapalha o processo de usinagem, como na usinagem de materiais com alta dureza, os quais são necessárias altas temperaturas a fim de diminuir a dureza do material (BONFÁ, 2013). Também há situações em que o fluido de corte é proibitivo, como na usinagem de componentes da área médica, para evitar contaminação. Outra situação em que a usinagem deve ocorrer a seco é na usinagem com ferramentas cerâmicas, que apresentam baixa resistência ao choque térmico.

Segundo a Villares Metals (2009), aços ferramentas possuem elevadas propriedades mecânicas, sendo ideais para a aplicações como matrizes de estampagem, corte e facas de alto desempenho. Devido a dureza que podem ultrapassar 60 HRc, aços endurecidos são materiais de baixa usinabilidade, devido a sua constituição e tratamento térmico, os quais acarretam no desgaste excessivo na ferramenta de corte.

Como na usinagem desses materiais a recomendação é usinar a seco, para que o processo se favoreça com a redução da resistência do material, a ferramenta se sacrifica, trabalhando a elevadas temperaturas. Nesse caso, a saída é utilizar um sistema para redução da temperatura apenas da ferramenta de corte, utilizando ferramentas refrigeradas internamente, sendo o primeiro estudo nessa direção realizado por Jeffries e Zerkle (1970), no qual modelaram numericamente um fluido que mudava de fase ao aquecer dentro da ferramenta, o qual conseguiu reduzir a temperatura dela. Rozzi et al. (2011) utilizaram uma ferramenta com micro canais a fim de circular nitrogênio líquido e retirar calor da ferramenta no ao tornear aço inox AISI 416, aumentando consideravelmente a vida útil da ferramenta em relação a usinagem a seco. Ferri et al. (2014) também obtiveram resultados melhores do que a usinagem a seco ao

tornear alumínio AA6082-T6 com ferramentas de refrigeração interna, utilizando água em circuito fechado.

Outra forma de amenizar o problema de elevadas temperaturas da ferramenta é através da utilização da refrigeração indireta do porta-ferramentas, na qual a ferramenta é resfriada pelo contato. Ingraci Neto et al. (2016) utilizaram um porta-ferramenta modificado como evaporador de um sistema de refrigeração e conseguiu reduzir a temperatura em 10 % em comparação a usinagem a seco, ao tornear aço AISI 1045.

Segundo Machado e Diniz (2017), os aços endurecidos eram frequentemente usados por retificação com rebolos cerâmicos desde os anos 1970, mas com o desenvolvimento de ferramentas cerâmicas e de PCBN, o processo de torneamento ganhou destaque.

Trabalhos como o de Bonfá et al. (2019) e Suarez et al. (2019) estudaram o efeito da utilização da mínima MQL na usinagem de aços endurecidos AISI D6, sendo que o último utilizou o lubrificante sólido bissulfeto de molibdênio, apresentando resultados promissores na maioria das situações.

Este trabalho se justifica pelo fato da contribuição das alternativas ao problema de altas temperaturas da ferramenta na usinagem de aços endurecidos, buscando estudar a utilização do método de ferramentas refrigeradas internamente, no torneamento do aço endurecido ABNT D6, a fim de reduzir a temperatura na ferramenta de corte, com menor impacto na temperatura da peça e do cavaco.

1.1. OBJETIVOS

Frente aos problemas enfrentados pela baixa usinabilidade do aço endurecido ABNT D6, incluindo altas temperaturas na ferramenta, e considerando que os fluidos de corte na forma de jorro não são recomendados para esta aplicação, além de serem nocivos aos operadores, com grande impacto ambiental, e de alto custo, foi proposto este estudo. Pretendeu-se utilizar um método de redução da temperatura apenas da ferramenta, sem refrigerar a peça e o cavaco, por meio de circulação de fluido de resfriamento no interior da ferramenta de corte no torneamento do aço ABNT D6. Água com etileno glicol com temperatura inferior à 0 °C é bombeada para a ferramenta de corte, circulando em seu interior através de galerias, em um sistema fechado. Desta forma, os objetivos gerais e específicos são apresentados seguir.

1.1.1. OBJETIVO GERAL

Desenvolver, projetar, fabricar e testar um sistema de refrigeração para ferramentas de PCBN refrigeradas por fluido interno são utilizadas na usinagem do aço endurecido ABNT D6.

1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos são:

- Projetar e fabricar um sistema de refrigeração adaptado para ferramentas especiais de torneamento, fixadas em um porta-ferramenta, constituído de galerias internas de refrigeração que permitem circulação do fluido refrigerante em temperaturas próximas a de 0 °C.
- Realizar um estudo comparativo desse sistema, ferramentas refrigeradas internamente (FRI), com a usinagem a seco, avaliando as variáveis: vida da ferramenta e seus mecanismos de desgaste; força de corte usinagem; rugosidade R_a , R_q e R_z ; além da medição da temperatura da ferramenta de corte, através da análise termográfica.

1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em sete capítulos, dos quais o primeiro refere-se à introdução com objetivos gerais e específicos. O segundo capítulo é composto pela revisão bibliográfica de assuntos diretamente ligados ao tema do estudo. O terceiro apresenta a metodologia adotada para realização dos experimentos, constituído por materiais, equipamentos e procedimentos utilizados. No quarto capítulo são discutidos os resultados obtidos. No quinto capítulo são apresentadas as conclusões deste trabalho além das propostas para trabalhos futuros.

CAPÍTULO II

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é abordada a revisão da literatura com temas relevantes e necessários ao desenvolvimento deste trabalho, como o processo de torneamento, incluindo atrito, desgaste e acabamento superficial, além da necessidade de substituição de fluido de corte e, por fim, sobre refrigeração.

2.1. USINAGEM

Diferente de processos de fabricação como conformação, o qual somente modifica a geometria da peça por deformação; da soldagem que busca a união permanente de materiais; ou da fundição, no qual a forma final provém da solidificação do material líquido em um molde, tem-se a usinagem. A usinagem pode ser definida como um processo de fabricação com o intuito de conferir à peça forma, dimensões e o acabamento desejado, através da remoção de cavaco, o qual corresponde a porção de material retirado da peça. A fim de melhorar os processos e garantir maior competitividade comercial, é necessário compreender os fatores relativos ao corte dos materiais, reduzindo o gasto energético, maximizando a vida da ferramenta e reduzindo os custos de produção, além de aumentar a produtividade, mantendo a qualidade compatível com o projeto (MACHADO et al., 2015).

Dentre os processos de usinagem, existem categorias com relação ao modo de remoção de material. Na usinagem tradicional, no qual o cavaco é retirado através do cisalhamento, é composto tanto por processos de geometria definida como torneamento, fresamento e furação; quanto por processos abrasivos, como retificação e lapidação. Já nos processos de usinagem não convencionais, a remoção de cavaco é feito com outras formas de energia (diferente da

mecânica usada nos convencionais), como eletroquímica, plasma ou feixes de elétrons (SANTOS; SALES, 2007). A figura 2.1 mostra um fluxograma dos principais processos de fabricação com ênfase nos processos de usinagem.

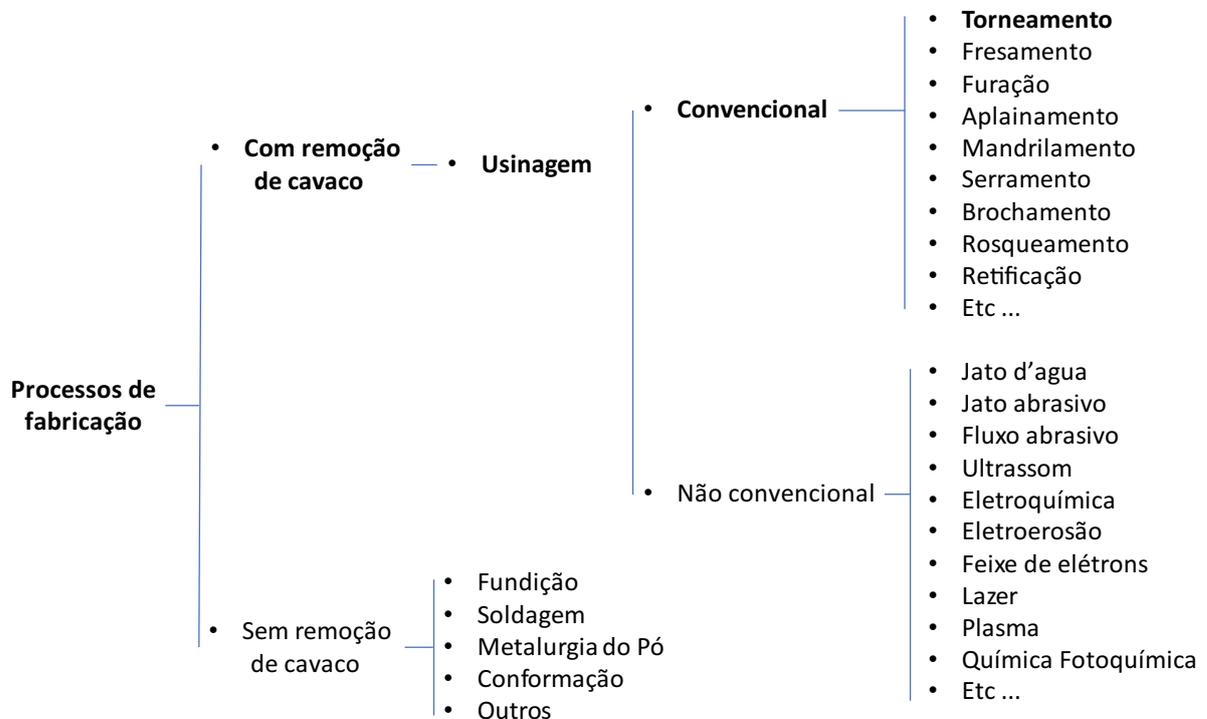


Figura 2.1 – Processos de fabricação, adaptado de (MACHADO et al., 2015)

2.1.1. TORNEAMENTO

Segundo Amorim (2002), o torneamento é um processo contínuo de usinagem em que uma ferramenta cortante retira o material não desejável, produzindo uma superfície com simetria de revolução. Sanches (2011) diz que é possível mensurar o processo de torneamento através de diferentes técnicas, como medição de forças, análise de vibração e da potência da máquinas, sendo estas métricas complementares entre si. Assim, os resultados de monitoramento dessas grandezas podem ser analisados para determinar relações entre os parâmetros de corte e variáveis de saída, como forças de usinagem, danos na superfície usinada, desgaste de ferramenta e rugosidade.

Neste processo, as velocidades de corte, de avanço e efetiva podem ser calculadas usando as seguintes relações.

$$V_c = \frac{\pi * d * n}{1000} \quad (2.1)$$

$$V_f = f * n \quad (2.2)$$

$$V_e = \sqrt{V_c^2 + \left(\frac{V_f}{1000}\right)^2} \quad (2.3)$$

Onde:

- d = diâmetro (mm)
- f = avanço (mm/rev)
- n = rotação (rpm)
- V_c = velocidade de corte (m/min)
- V_e = velocidade efetiva de corte (m/min)
- V_f = velocidade de avanço (mm/min)

Além das velocidades de corte, também é importante frisar outras características referentes ao processo de torneamento, como a área da seção de corte (A), equação 2.4; comprimento usinado (L_f), equação 2.5; taxa de remoção de material (Q), equação 2.6; e volume de material removido (V_r), equação 2.7.

$$A = f * a_p \quad (2.4)$$

$$L_f = V_f * t_c = f * n * t_c = \frac{f * t_c * 1000 * V_c}{\pi * d} \quad (2.5)$$

$$Q = A * V_c = f * a_p * V_c \quad (2.6)$$

$$V_r = L_f * A = Q * t_c \quad (2.7)$$

Onde:

- A = seção transversal de corte (mm²)
- A_p = profundidade de corte (mm)
- d = diâmetro (mm)
- f = avanço (mm/rev)
- L_f = comprimento usinado

- n = rotação (rpm)
- Q = taxa de remoção (mm^3/min)
- t_c = tempo de corte (min)
- V_c = velocidade de corte (m/min)
- V_r = volume de material removido (mm^3)

2.1.2. INTERFACE CAVACO-FERRAMENTA

De acordo com Trent e Wright (2000), na zona de contato do cavaco com a ferramenta, existe uma região de aderência, próxima a aresta de corte, com o movimento do cavaco gerado por cisalhamento, e depois uma zona de deslizamento, conforme figura 2.2. Na primeira região, o contato ocorre integralmente, na área total, e no segundo somente nos picos das irregularidades. Existem dificuldades no estudo da interface cavaco-ferramenta, pois são poucas observações significativas obtidas durante a operação de corte em andamento, se reduzindo a informações sobre tensão, deformação e temperatura; além de métodos posteriores ao fim do procedimento, através da microscopia ótica ou eletrônica, principalmente da análise de amostras de *quick-stop*, o qual consiste na retração rápida da ferramenta de corte, proporcionando as amostras da raiz do cavaco.

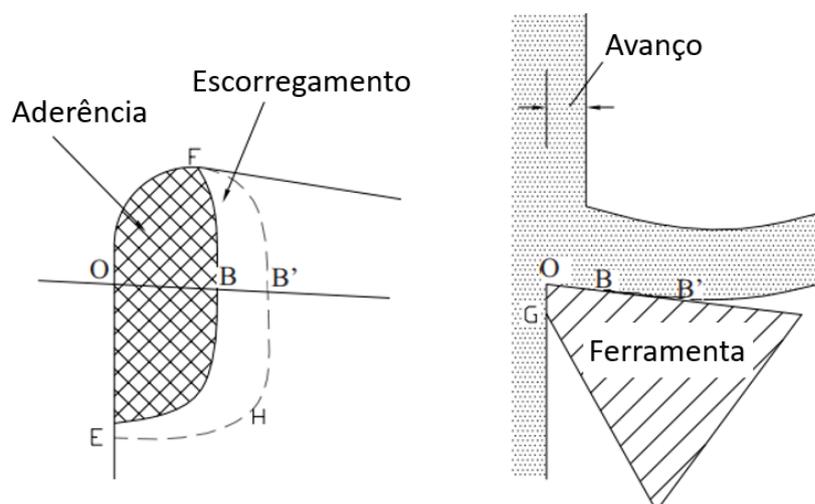


Figura 2.2 – Região de contato na interface cavaco-ferramenta, adaptado de (TRENT; WRIGHT, 2000)

Haglund, Kishawy e Rogers (2008), as condições de contato entre o cavaco e a ferramenta é crítico devido ao seu efeito direto no desempenho da ferramenta . A interface cavaco-ferramenta é difícil de avaliar experimentalmente por causa das altas temperaturas, gradientes de temperatura elevados, bem como altas deformações e taxas de deformação que ocorrem em uma região muito pequena. Portanto, os pesquisadores geralmente fazem suposições com base em estudos experimentais realizados em tensões e temperaturas muito mais baixas. Apesar da grande variedade de modelos existentes, nenhum reproduz com fidelidade as variáveis do processo.

2.1.2.1. Formação de cavaco

Para Machado et al. (2015), o estudo do processo de formação do cavaco contribui para a melhoria dos processos de usinagem por meio do aperfeiçoamento da geometria das ferramentas de corte, em especial a aresta de corte e o quebra-cavacos.

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2013), o corte de um metal acontece devido ao cisalhamento ao longo do plano de cisalhamento primário, figura 2.3. A resistência de corte aumenta de maneira inversa ao ângulo de cisalhamento, o qual é definido como o ângulo entre a direção de corte e o plano de cisalhamento, resultando em uma maior espessura do cavaco (h'), frente a espessura de corte (h).

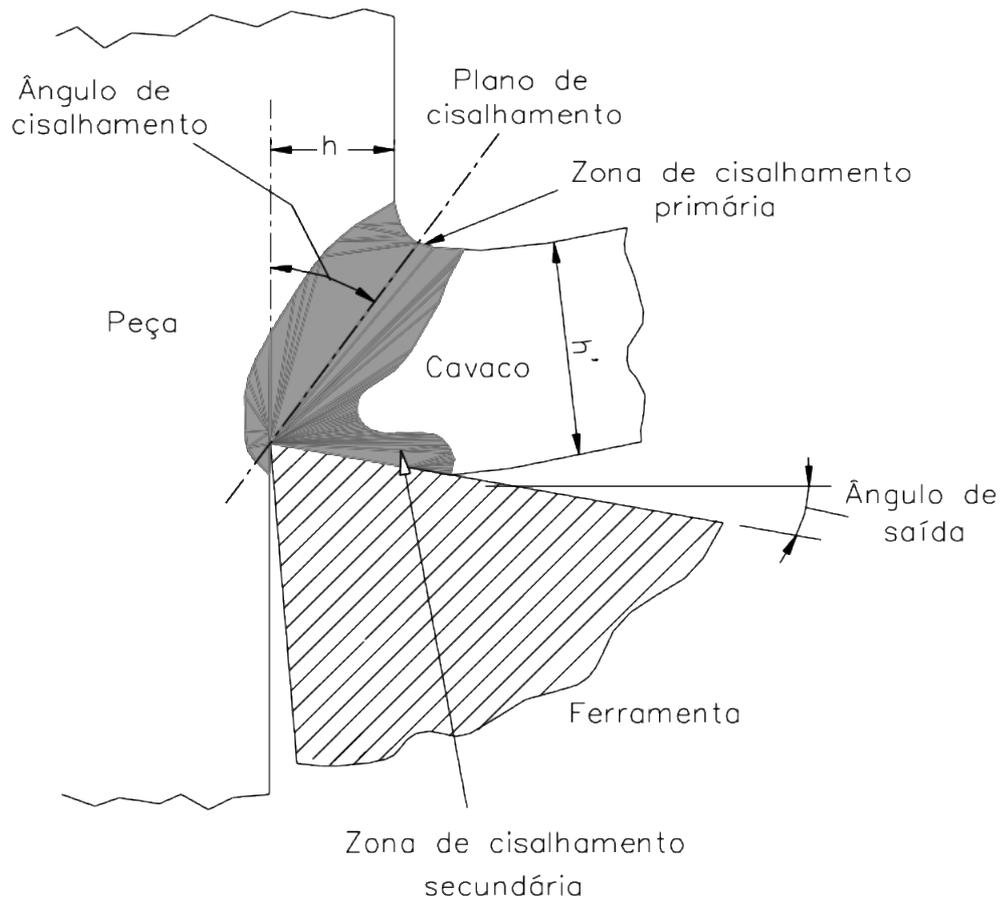


Figura 2.3 – Mecanismo da formação do cavaco (Machado et al., 2015)

Consoante com Machado et al. (2015), a formação do cavaco ocorre devido a ruptura do material da peça em altíssimas velocidades de deformação. Para melhor entendimento, a formação do cavaco pode ser dividido em etapas:

- Recalque: momento em que há a penetração da ferramenta no material.
- Deformação plástica e ruptura: inicialmente o material sofre deformação elástica e posteriormente uma deformação plástica, até a ruptura, que na maioria das vezes ocorre por cisalhamento. Em seguida, uma trinca é aberta e propagada com mecanismo próprio de cada material.
- Deslizamento das lamelas: dependendo da extensão da propagação das trincas da etapa anterior, as quais dependem do material usinado e das condições de corte, haverá a ruptura parcial ou completa do material, dando origem a cavacos contínuos ou descontínuos, conforme a resistência e dimensão das lamelas do material removido.

- Saída do cavaco: devido ao movimento relativo entre a ferramenta e o cavaco, atrelado a altas pressões, temperaturas e velocidades relativas, o atrito provoca o surgimento da zona de cisalhamento secundário, mostrado na figura 2.3.

2.1.2.2. Tipos e morfologia dos cavacos

De acordo com Machado et al. (2015) a morfologia dos cavacos depende de fatores como a ductilidade e condutividade térmica do material da peça, além dos parâmetros de corte utilizado, podendo ser classificados em quatro tipos:

- Contínuo: é caracterizado pelo grande comprimento e de diferentes formas; são formados quando a trinca aberta na aresta de corte não se propaga ao longo do plano de cisalhamento primário; são mais comuns em materiais dúcteis como aços e alumínio, e em condições de corte de alta velocidade, avanços baixos e médios e grandes ângulo de saída da ferramenta.
- Descontínuo: apresenta baixos comprimentos (fragmentos) e são mais comuns em materiais frágeis, nos quais possuem dificuldade de deformar sem ruptura, como ferro fundido e bronze e em condições de menor velocidade e maior avanço.
- Parcialmente contínuo: é o intermediário entre cavaco contínuo e descontínuo; ocorrem quando o cisalhamento é interrompido seja pela perda do contato entre o cavaco e a ferramenta devido a energia elástica, ou a presença de alta compressão no plano de cisalhamento, dificultando a propagação de trincas.
- Segmentado: ocorre em materiais com baixa condutividade térmica ou em velocidades elevadas conhecida como velocidade crítica, resultando no cisalhamento termoplástico catastrófico, uma vez que as altas temperaturas ocasionam o amolecimento, o qual se sobrepõe o efeito do encruamento; é comumente encontrado na usinagem de titânio e suas ligas, embora todo material possa produzir esta classe de cavaco, bastando para isso que as velocidades de corte estejam acima da crítica.

A norma ISO 3685 (1993) classifica ainda os cavacos quanto a sua forma, podendo ser em fita, helicoidal, espiral e lascas ou pedaços (fragmentados).

De acordo com Yilmaz, Karabulut e Güllü (2020), o controle do cavaco é importante para o processo, uma vez que pode apresentar riscos ao operador, pois cavacos em forma de fita podem ocasionar cortes profundos. Além disso pode causar danos à peça e ao equipamento, uma vez que o cavaco pode se enroscar, quebrando a ferramenta de corte ou riscar a superfície já usinada, aumentando a sua rugosidade. Outro problema é a possibilidade de gerar parada de máquina, além de dificuldade de manuseio e descarte, uma vez que cavaco em fita ocupa maior espaço no armazenamento e dificulta a retirada sobre o equipamento. Dessa forma, são utilizados quebra-cavacos a fim de diminuir os problemas retratados anteriormente. Segundo Santos e Sales (2007), os tipos mais comuns de quebra-cavacos são posição do tipo anteparo, integral do tipo anteparo e integral do tipo cratera.

2.1.3. TEMPERATURA NA USINAGEM

De acordo com Santos e Sales (2007), quase toda energia mecânica envolvida no processo de usinagem é transformada em energia térmica, com apenas 1 a 3 % sendo convertido em energia elástica. Para Machado et al. (2015), a temperatura na ferramenta sempre foi um fator de alto impacto em sua vida útil da ferramenta. A geração de calor ocorre principalmente em três regiões, na zona de cisalhamento primária (região A); zona de cisalhamento secundária (região B) e na interface entre a peça e a superfície de folga da ferramenta; também conhecida como zona de cisalhamento terciária (região C); conforme mostrado na figura 2.4, na qual as setas representando o sentido do fluxo de calor.

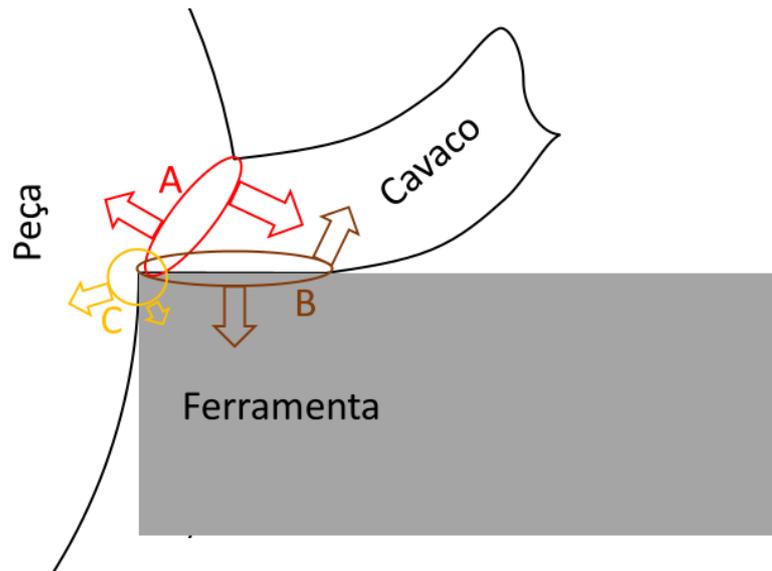


Figura 2.4 – Zonas de cisalhamento e o fluxo de calor

A zona de cisalhamento secundário é a principal responsável pelo aumento da temperatura na ferramenta, devido ao atrito elevado e o contato direto da ferramenta contra o cavaco. Já na zona de cisalhamento primário, o calor é absorvido principalmente pelo cavaco, ou seja, com menor impacto na ferramenta. Já na zona de interface peça-ferramenta só possui maior impacto quando é utilizado com pequenos avanços e profundidade de corte, ou em ferramentas com desgaste excessivo (SOUSA; SOUSA; MACHADO, 2011).

Estudos realizados como o de Santos et al. (2017), por exemplo, no qual tornearam a liga de alumínio 7075-T6, mostram que o aumento da velocidade de corte é o maior responsável pelo aumento da temperatura obtida por meio da técnica do termopar ferramenta-peça, apesar de outros fatores com o avanço de corte também influenciar nos resultados, conforme a figura 2.5. Segundo Silva et al. (2018), ao fresar ferro fundido vermicular também é possível afirmar que a temperatura aumenta proporcionalmente com a velocidade de corte, devido a maior energia cinética envolvida. Neste trabalho a temperatura do cavaco foi mensurada através de uma câmera termográfica.

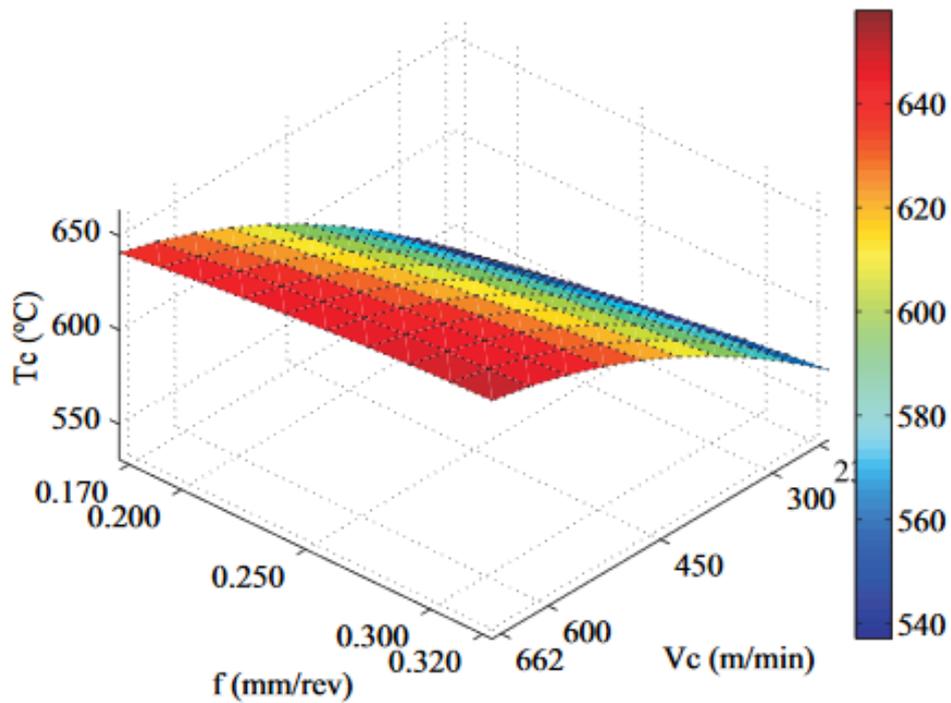


Figura 2.5 – Temperatura no torneamento da liga de alumínio 7075-T6 em função da velocidade de corte e avanço (SANTOS et al., 2017)

A figura 2.6 mostra a distribuição de temperatura no torneamento de aço endurecido D2 obtida a partir de simulação computacional bidimensional, utilizando velocidade de corte de 268,8 m/min, e profundidade de corte de 0,0508 mm, com temperaturas superiores a 1400 K. Já a figura 2.7 mostra a temperatura máxima em função da velocidade de corte para diferentes profundidades de corte (a_p), no qual a temperatura tende a subir de acordo com o aumento da velocidade e da profundidade de corte.

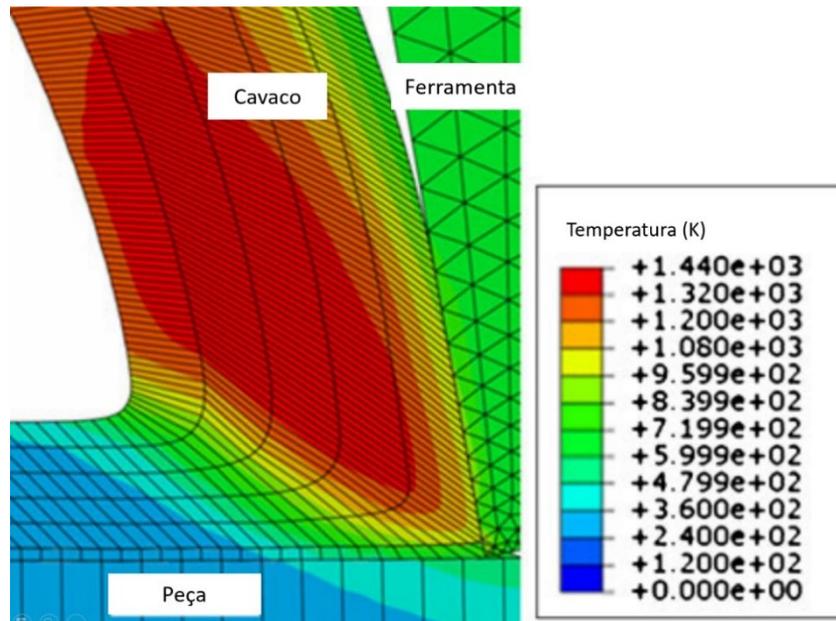


Figura 2.6 – Distribuição de temperatura no processo de torneamento de aço endurecido AISI D2, adaptado de (TANG; HUANG; XIE, 2011)

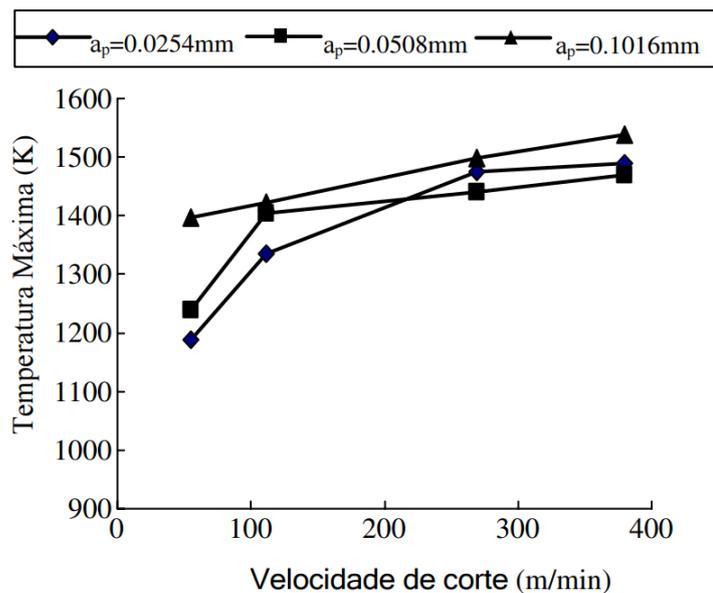


Figura 2.7 – Temperatura máxima em função da velocidade de corte e da profundidade de corte, no torneamento do aço endurecido AISI D2, adaptado de (TANG; HUANG; XIE, 2011)

2.1.4. FORÇA E POTÊNCIA DE CORTE

2.1.4.1. Força de corte

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2013) existem duas abordagens para o estudo das forças de corte na usinagem. A primeira é teórica, que parte do princípio de simplificações e simulações numéricas, modelando o contato da ferramenta e o cavaco em formação. Já a segunda abordagem é empírica, sendo realizada através de coeficientes obtidos por procedimentos experimentais.

Para Trent e Wright (2000) do ponto de vista teórico, a força de corte depende principalmente de dois fatores, que são as áreas dos planos de cisalhamento primário e secundário, além da resistência ao cisalhamento do material da peça nesses planos. Dessa forma, qualquer parâmetro pode ser analisado através desses fatores, sendo que o resultado depende da predominância de um sobre o outro, como segue.

- Material da peça: por via de regra a força de corte é proporcional a resistência do material no plano de cisalhamento, já em materiais dúcteis, a área de corte pode ser distorcida, alterando a força de corte.
- Material da ferramenta: a força de corte pode ser alterada mediante a afinidade química entre os materiais da ferramenta e da peça, alterando a zona de aderência, que é proporcional a força de corte, devido ao maior atrito.
- Velocidade de corte: existe tendência na redução da força de corte com o aumento da velocidade, devido à redução da resistência ao cisalhamento causado pela maior geração de calor, ao usinar materiais dúcteis; a baixas velocidades de corte pode ocorrer um fenômeno conhecido como aresta postiça de corte (APC), a qual diminui consideravelmente a força de corte.
- Avanço e profundidade de corte: são diretamente proporcionais à força de corte em uma relação quase linear, devido a maior área da seção de corte, a qual é definida justamente pelo produto do avanço pela profundidade.
- Ângulo de saída: o maior ângulo de saída permite maior facilidade no escoamento do cavaco, ocasionando em menores contatos e forças de corte.
- Afição da ferramenta: o desgaste de flanco, normalmente, aumenta a força de corte, devido ao maior contato da peça com a superfície de folga; já o desgaste de cratera pode diminuir a força de corte, devido ao aumento do ângulo de saída.
- Fluido de corte: em baixas velocidades, onde o principal fenômeno é a lubrificação, a tendência é diminuir a força de corte, já em maiores velocidades

de corte, onde predomina o efeito da refrigeração, a força de corte é maior, devido à redução da temperatura da peça.

2.1.4.2. Medição da força de corte

Segundo Ferraresi (1977), um dinamômetro, equipamento responsável pela medição de forças na usinagem, precisa ter: sensibilidade, precisão (com relação a menores erros de leitura, fidelidade, mobilidade e histerese), exatidão, além de insensibilidade com relação a variação de temperatura e umidade. Estes equipamentos podem ser separados em dois modos de medição, de maneira direta (piezoelétrica e magnetoestrícção), e indireta (mecânica, pneumática, hidráulica e elétrica).

Os dinamômetros com princípio de medição por cristais piezoelétricos utilizam da propriedade de alguns cristais, como quartzo e turmalina, os quais se polarizam mediante as deformações elásticas; dessa forma é possível mensurar a força através da medição da corrente elétrica gerada. Este tipo de dinamômetro é muito utilizado na usinagem devido ao tamanho mais compacto, menor massa, maior rigidez e frequências naturais mais altas do que um dinamômetro com princípio mecânico (MACHADO et al., 2015).

2.1.4.3. Potência de usinagem

Um dos métodos para calcular a potência no processo de torneamento é através da multiplicação da força obtido experimentalmente com a velocidade em cada eixo da máquina. Segundo Camargo (2011), a potência de corte (N_c), potência de avanço (N_f) e potência de usinagem (N_u), são definidas pela equações 2.8, 2.9 e 2.10, respectivamente.

$$N_c = F_c * V_c \quad (2.8)$$

$$N_f = F_f * V_f \quad (2.9)$$

$$N_u = N_c + N_f \text{ ou } N_u = F_u * V_e \quad (2.10)$$

Onde:

- F_f = força de avanço;

- F_c = força de corte;
- F_u = força de usinagem;
- N_c = potência de corte;
- N_f = potência de avanço;
- N_u = potência de usinagem.
- V_c = velocidade de corte;
- V_e = velocidade efetiva de corte;
- V_f = velocidade de avanço;

Outro método para a determinação da potência de corte é através de medição da corrente diretamente no motor do torno, por meio de sensor por efeito hall, com a potência real calculada em função da potência aferida sobre a eficiência do motor, conforme a equação 2.11. Em máquinas com mais de um motor, a potência pode ser obtida pela soma dos motores.

$$N_r = \frac{N_m}{\eta} \quad (2.11)$$

Onde:

- N_r = potência real;
- N_m = potência medida;
- η = rendimento do motor.

2.2. FERRAMENTAS DE CORTE

A ferramenta de corte é o único componente em contato com a peça a ser usinada, com a finalidade de remover material na forma de cavaco. Dessa forma sofre intenso desgaste provocado por altas temperaturas e pressões. Esta seção é dedicada aos principais materiais, com ênfase ao Nitreto Cúbico de Boro Policristalino (PCBN), material usado neste trabalho, além da sua geometria.

2.2.1. MATERIAIS PARA FERRAMENTAS DE CORTE

É vital que a ferramenta de corte tenha uma dureza maior que o material da peça. Para Bonfá (2013) na usinagem com corte interrompido, como no processo de fresamento ou ao usinar materiais frágeis, é necessário utilizar ferramentas com maiores tenacidades. Segundo Machado et al. (2015) é importante que as ferramentas de corte tenham as seguintes características.

- Alta dureza a quente;
- Tenacidade suficiente a fim de evitar falha por fratura;
- Alta resistência ao desgaste abrasivo;
- Alta resistência a compressão e ao cisalhamento;
- Boas propriedades mecânicas e térmicas em temperaturas elevadas;
- Alta resistência ao choque térmico;
- Alta resistência ao impacto;
- Ser inerte quimicamente com o material da peça.

Santos e Sales (2007) consideram que os requisitos mais importantes para a escolha dos materiais para ferramentas de corte são:

- Dureza do material da peça;
- Tipo de cavaco gerado;
- Parâmetros de usinagem e características do processo: corte interrompido ou contínuo, lubrificação do corte ou a seco, tempo de ciclo, acabamento ou desbaste, velocidade, avanço e profundidade de corte;
- Maquinário utilizado: rigidez potência, controles durante o processo;
- Forma e dimensão da ferramenta;
- O custo do material da ferramenta;
- Qualidade dimensional e superficial requerida.

2.2.1.1. Nitreto Cúbico de Boro Policristalino (PCBN)

Criado em 1957 pela General Electric, o Nitreto Cúbico de Boro Policristalino (PCBN) é o segundo material mais duro encontrado em ferramentas de corte, perdendo somente para o diamante no quesito dureza. Além disso, esse material possui tenacidade duas vezes maior que a alumina, possui estabilidade termoquímica, apresenta pouco desgaste devida à difusão em aço

e resiste a temperaturas acima de 1200 °C. Sua fabricação provém da combinação de Cloreto de Boro (BCl_3) com amônia (NH_3), resultando no Nitreto de Boro (BN) e ácido clorídrico (HCl) conforme a equação 2.12; este Nitreto de Boro está na forma hexagonal compacta (hc) e, por meio de um tratamento bastante lento, envolvendo pressões da ordem de 6-7 GPa e temperaturas da ordem de 1500 °C, são transformados em Nitreto Cúbico de Boro (CBN), na forma dura para emprego em ferramentas de corte. Os cristais assim produzidos, são utilizados para formar plaquetas por meio da metalurgia do pó, com ligantes metálicos (Al) ou cerâmicos (TiC, TiN ou Al_2O_3), as quais são recortadas e soldadas em uma matriz de metal duro ou no inserto.



De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2003), ferramentas de PCBN podem ser divididas em duas categorias de aplicação, para desbaste e para acabamento. Nas ferramentas para desbaste, com profundidade de corte maior do que 0,5 mm, apresenta maior concentração de Nitreto de Boro, cerca de 90 %, apresentando maior dureza entre os PCBN, são muito eficientes quanto a resistência a abrasão, mas carecem de características térmicas e químicas. Para o acabamento, profundidade de corte menor do que 0,5 mm, apresentam cerâmica na composição, garantindo maior estabilidade, apesar de diminuir a tenacidade e dureza. Mas são necessários alguns cuidados com relação a utilização de ferramentas de PCBN:

- Não é viável usinar materiais de fácil usinagem, como aços não endurecidos;
- O sistema máquina-ferramenta-peça deve ter poucas folgas e vibrações;
- O ângulo de saída deve ser negativo, para evitar choques, e deve haver ângulo de posição de no mínimo 15 °;
- A aresta de corte deve ser chanfrada;
- Usar fluido de corte sempre que possível.

2.2.3. DESGASTE E VIDA DA FERRAMENTA

Apesar de alta dureza e resistência, a ferramenta de corte sempre sofrerá desgaste, demandando posteriormente a sua substituição. Apesar do custo com ferramentas de corte representar uma pequena fração do custo de fabricação, o desgaste acelerado poderá acarretar

na maior frequência de parada de máquinas, podendo reduzir a produtividade (MACHADO et al., 2015). Segundo Ferraresi (1977), a vida da ferramenta corresponde ao tempo de trabalho efetivo, no qual é mantido o fio de corte ou até que seja atingido um critério de fim de vida que foi estabelecido previamente. De acordo com Camargo (2011) diversos fatores motivam a troca da ferramenta, como receio de quebra, piora no acabamento superficial, aumento das forças de usinagem, vibração e temperatura. Existem diversas formas de mensurar a vida da ferramenta, como número de peças produzidas, percurso de avanço, percurso efetivo de corte, volume de material removido e tempo de corte.

A figura 2.8 mostra três regiões da ferramenta de corte propícias ao desgaste, sendo que em condições de corte normais, umas destas formas de desgaste devem prevalecer (TRENT, E. M.; WRIGHT, 2000):

- Área A: desgaste de cratera, o qual normalmente está associado a altas temperaturas na interface cavaco-ferramenta, predominando mecanismos de difusão e adesão, podendo ocasionar quebras ou lascamento na ferramenta;
- Área B: desgaste de flanco, normalmente é o fator de maior impacto na vida das ferramentas de corte, provoca maior área de contato entre a peça e a ferramenta, aumentando a temperatura de corte e o atrito, além de proporcionar pior acabamento superficial e dimensional.
- Áreas C e D: desgaste de entalhe, não é bem explicado ainda pela literatura, mas é notória sua dependência das condições de corte e é também influenciado pelas condições atmosféricas, com possíveis formações de óxidos seguidas de arrancamentos das camadas destes óxidos, que comprometem a integridade da ferramenta, devido ao enfraquecimento da aresta na extremidade livre do cavaco.

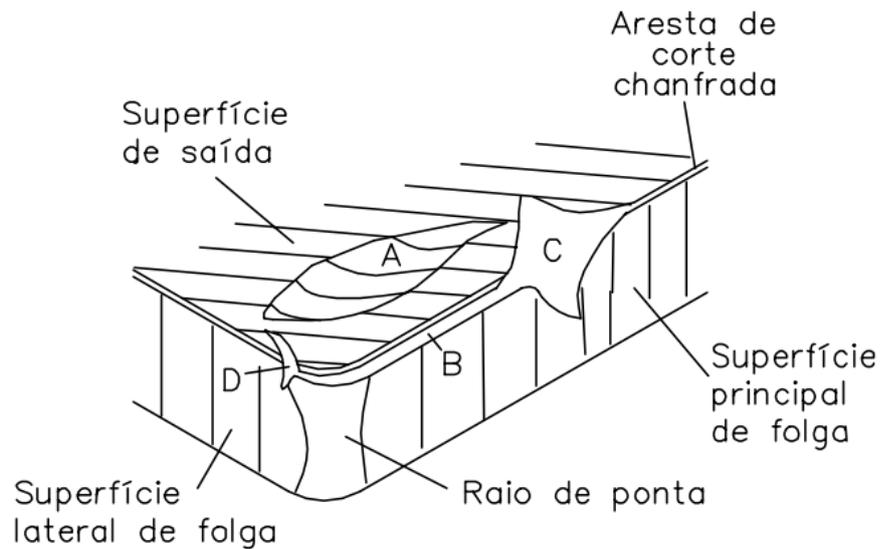


Figura 2.8 – Formas de desgaste, adaptado de (DEARNLEY; TRENT, 1982)

O desgaste de flanco possui uma curva característica de evolução, figura 2.9, a qual é dividida em 3 partes. A região II é caracterizada pela taxa de desgaste constante, representando, normalmente, a fase mais longa na usinagem. Já as regiões I e III são caracterizadas pelo alto desgaste, em I o maior desgaste inicial é devido à acomodação das condições iniciais da aresta de corte da ferramenta ao sistema tribológico. Já em III, o desgaste é acelerado devido as altas temperatura, forças e vibrações no corte, não devendo ser utilizada nesta situação devido ao maior risco de quebra repentina (ASTAKHOV, 2008).

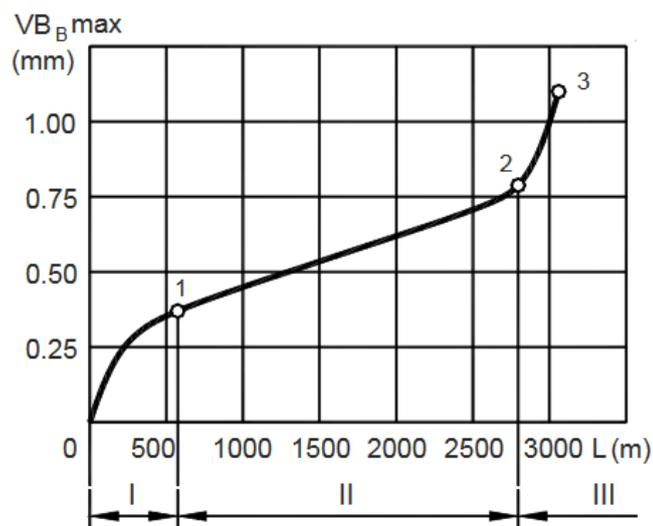


Figura 2.9 – Curva característica do desgaste de flanco (ASTAKHOV; DAVIM, 2008)

A figura 2.10 mostra como os mecanismos de desgaste, adesão, oxidação, abrasão e difusão se comportam em função da temperatura. É importante notar que a oxidação e a difusão

só ocorrem em altas temperaturas de corte, enquanto a adesão e a abrasão ocorrem em todas as faixas de temperatura (CARVALHO, 2017).

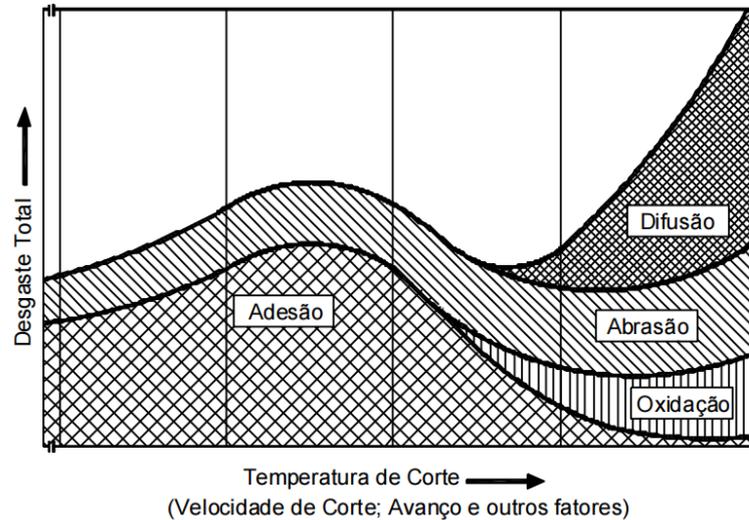


Figura 2.10 – Mecanismos de desgaste (KÖNIG; KLOCKE, 2002; apud MACHADO et al., 2015)

Segundo Carvalho (2017), apesar de variações entre os autores, os mecanismos de desgaste em seis:

- Deformação plástica superficial por cisalhamento em altas temperaturas: ocorre em regiões onde as temperaturas são mais altas entre a ferramenta e o cavaco, e as tensões de cisalhamento são altas o bastante para gerar deformação plástica na ferramenta. Dessa forma o material é arrancando na superfície de saída e a consequência final é a formação de uma cratera, figura 2.11a.
- Deformação plástica da aresta de corte sob altas tensões de compressão: ocorre devido a combinação de altas tensões de compressão com altas temperaturas na interface, ocasionando deformação na aresta de corte. Comumente acontece em altas velocidades e avanços, principalmente na usinagem em materiais com dureza elevada, podendo resultar em falha catastrófica na ferramenta, figura 2.11b.
- Difusão: ocorre mediante a transferência de átomos entre a ferramenta e o material da peça, sendo dependente da temperatura e solubilidade na zona de fluxo, formando uma superfície lisa vista no microscópio. A troca atômica acontece devido a uma zona de aderência formada na interface cavaco-ferramenta, a qual é renovada periodicamente devido a presença da zona de fluxo, figura 2.11c.

- Adesão: ocorre normalmente em baixas velocidades de corte e em fluxos de material irregular sobre a superfície da ferramenta, arrancando fragmentos microscópio da ferramenta. Possuem forma áspera ao ser observada com a ajuda de um microscópio, porque envolve perdas de grãos, figura 2.11d.
- Abrasão: é o tipo de desgaste mais comum, ocorre devido a perda de material por microcorte, microsulcamento ou microlascamento devido à presença de partículas com dureza relativa elevada, as quais podem ter origem no material da peça ou originárias da própria ferramenta. Este desgaste apresenta caráter previsível e estável durante a vida da ferramenta, figura 2.11e.
- Desgaste de entalhe: ocorre principalmente ao usinar materiais resistentes a altas temperaturas e com alto grau de encruamento, envolve oxidação, adesão e abrasão, figura 2.11f.

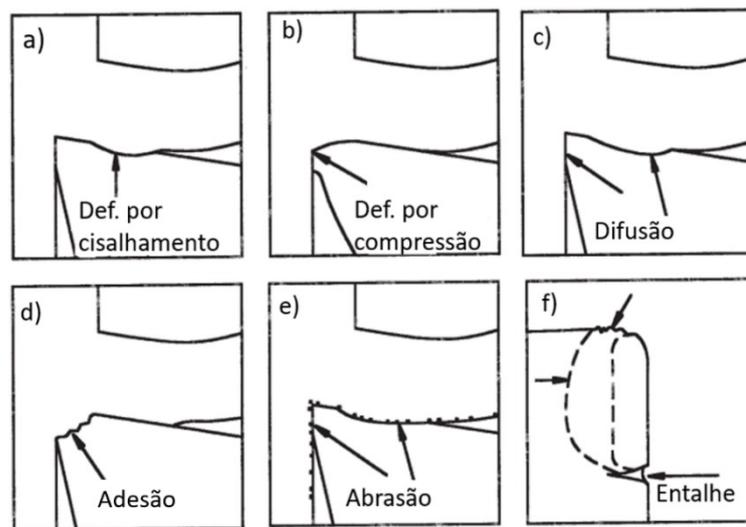


Figura 2.11 – Mecanismos de desgaste, adaptado de (TRENT; WRIGHT, 2000)

A norma ISO 3685 (1993) define o momento de troca de ferramenta de aço-rápido, metal duro e cerâmica quando é atingido o primeiro critério, entre os listados a seguir:

- Desgaste de flanco médio, $VB_B = 0.3 \text{ mm}$;
- Desgaste de flanco máximo, $VB_{B\text{máx}} = 0.6 \text{ mm}$;
- Profundidade de cratera, $K_T = 0,06 \text{ mm} + 0,3 f$ (avanço);
- Falha catastrófica.

Além desses valores, é mensurado o desgaste gerado na superfície de folga pelos entalhes (VN e VC). Na superfície de saída é medido a profundidade da cratera (KT), largura da cratera (KB) e a distância da aresta de corte ao centro da cratera (KM), conforme a figura 2.12.

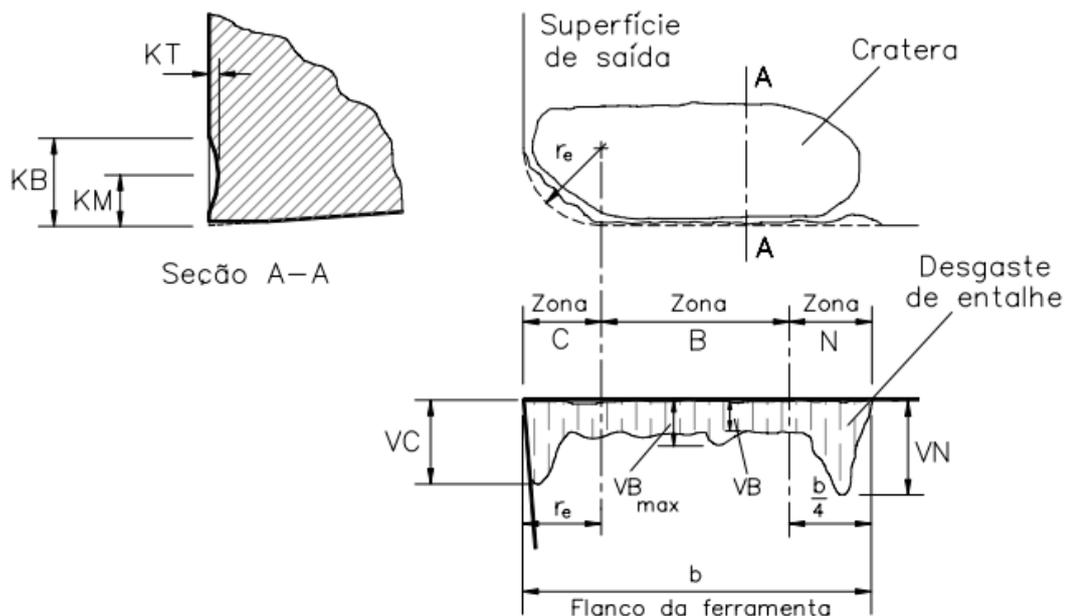


Figura 2.12 – Regiões de desgaste (ISO 3685, 1993)

2.3. INTEGRIDADE SUPERFICIAL E RUGOSIDADE

Segundo Machado et al. (2011), a rugosidade de uma superfície é composta por irregularidades finas ou de erros microgeométricos que são derivados de um processo de corte, através das marcas de avanço, desgaste da ferramenta e aresta de posição de corte. Em muitos casos, a rugosidade é utilizada como parâmetro de saída para controlar um processo de usinagem, sendo forte indicador do acabamento da peça. Segundo a norma ABNT NBR ISO 4287 (2002), o perfil de rugosidade e seus respectivos parâmetros são as únicas partes da caracterização da rugosidade superficial que são historicamente bem definidas; a figura 2.13 mostra o plano específico da medição de rugosidade. Estudos como o de Kumar et al. (2012) afirmam que a rugosidade aumenta de acordo com o aumento do avanço de corte, uma vez que o acabamento superficial é influenciado pelo movimento da ferramenta em torno da peça, produzindo sulcos paralelos no sentido do corte. Dessa forma, quanto maior o avanço, maior é

a distância entre os sulcos e maior a altura do perfil, devido ao ângulo de arredondamento da ferramenta.

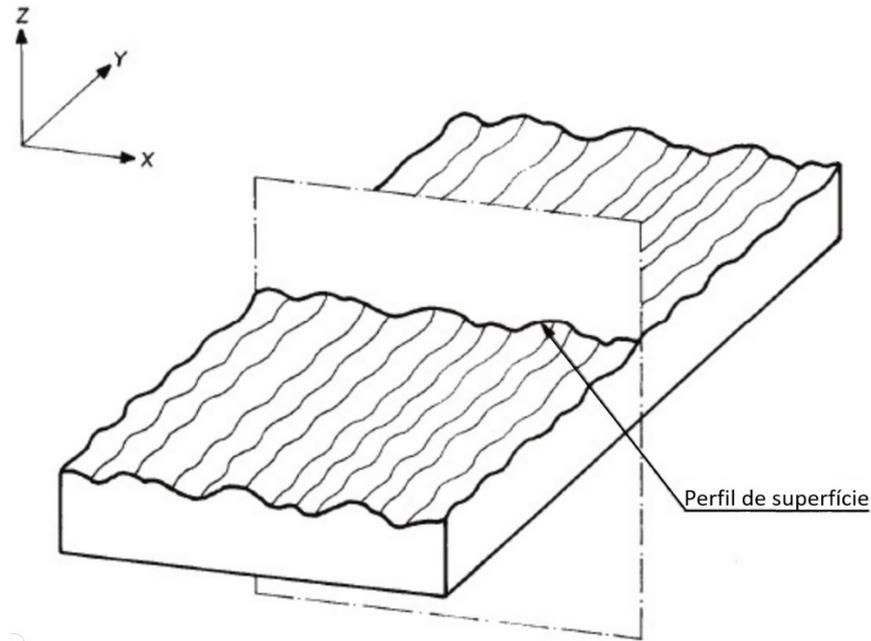


Figura 2.13 – Perfil de rugosidade (NBR ISO 4287, 2002)

De acordo com Santos e Sales (2007), existem diferentes tipos de parâmetros que são usados para quantificar a rugosidade de uma superfície, mas que podem ser divididos em três grupos de acordo com o perfil de rugosidade:

- Parâmetros de amplitude: nos quais são analisadas a altura dos picos e a profundidade dos vales.
- Parâmetros de espaçamento: nos quais são analisadas a distância entre as irregularidades na superfície.
- Parâmetros híbridos: nos quais são mesclados parâmetros de amplitude e de espaçamento.

Segundo Reis (2019), a norma ABNT NBR ISO 4287 (2002) define a rugosidade média (R_a), equação 2.15, como a média aritmética dos valores absolutos com relação à linha média. Já a altura máxima do perfil (R_z) é a média da diferença da altura máxima dos picos (Z_p) e a maior das profundidades dos vales (Z_v), equação 2.16, em cada comprimento de amostragem. O desvio médio quadrático (R_q), equação 2.17, é a raiz quadrada da média dos valores das ordenadas em cada comprimento de amostragem.

$$Ra = \frac{1}{l} * \int_0^l Z(x) * dx \quad (2.15)$$

$$Rz = \frac{Zp_1 + Zv_1 + Zp_1 + Zv_2 + \dots + Zp_n + Zv_n}{n} \quad (2.16)$$

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{l} * \int_0^l Z^2(x) * dx} \quad (2.17)$$

2.4.USINAGEM DE AÇOS ENDURECIDOS

Segundo Machado e Diniz (2017), antigamente o processo de retificação era o mais usado na usinagem de aços de elevada dureza, e devido ao surgimento de novos materiais para ferramentas de corte com alta dureza, como Nitreto Cúbico de Boro (CBN) e cerâmicos, o processo de torneamento se tornou mais atrativo. Estes materiais de ferramentas são os mais indicados na usinagem de aço endurecidos, devido a maior dureza a quente e resistência ao desgaste do que ferramentas de metal duro que são normalmente utilizadas em aço de baixa dureza, os quais não necessitam de tamanhas cargas térmicas e mecânicas.

Para Bartarya e Choudhury (2012), no torneamento de materiais com dureza maior do que 45 HRC é recomendável utilizar ferramentas de corte de Nitreto Cúbico de Boro Policristalino (PCBN), devido à alta resistência ao desgaste a altas temperaturas, sendo que a maior parte do calor é removida pelo cavaco. O corte ocorre em altas velocidades, comumente em média de 250 m/min, a fim de aumentar a temperatura da peça, chegando na ordem de 1200 °C, dependendo do material e das condições de corte, reduzindo a dureza desta, além de baixos avanços e profundidade de corte, exigindo alta rigidez e precisão do equipamento.

Chen (2000) utilizou ferramentas de CBN ao toronar aço endurecido BG 699-88, no qual a dureza pode variar de 45 a 55 HRC, e obteve resultados com ferramenta de corte chanfrada e com raio de arredamento muitas vezes maior do que a profundidade de corte, em que a força passiva apresentou o maior valor entre as três componente. Segundo o autor é influência direta do chanfro, uma vez que com ferramentas que possuíam arestas não chanfradas as forças foram três vezes menores. A rugosidade superficial reduziu conforme com o aumento do desgaste, devido ao achatamento da aresta de corte ocasionado pelo desgaste de flanco.

Na usinagem de aços endurecidos, como o ABNT D6, é comum a usinagem a seco, pois o calor desenvolvido durante a formação do cavaco é fundamental para manter a resistência ao cisalhamento em níveis suficientemente baixos para a ferramenta de corte conseguir cisalhar o material. A aplicação de um fluido, principalmente na forma de jorro, pode reduzir a temperatura e aumentar a dureza do material, o que prejudicaria a usinabilidade da peça, uma vez que a diferença de dureza entre peça e a ferramenta seria alterada de maneira não satisfatória (MACHADO et al., 2015). Dependendo das condições de corte, a técnica MQL se mostrou eficiente, superando a condição a seco, indicando que neste caso o resfriamento da peça não foi suficiente para comprometer a usinagem, embora em outras condições a condição a seco ainda foi superior (BONFÁ et al., 2019). Neste trabalho Bonfá e co-autores utilizaram o método MQL com fluido de corte de base mineral, sendo o jato aplicado individualmente em 3 direções diferentes (sobre-cabeça, entre a peça e a superfície de folga principal e entre a peça e a superfície de folga secundária), ao tornear aço ferramenta AISI D6 temperado com ferramentas de PCBN. O autor concluiu que o MQL aumentou a vida útil da ferramenta, provavelmente exercendo algum resfriamento e/ou lubrificação no sistema, em relação a usinagem a seco, com exceção ao MQL pulverizado sobre a face secundária.

Yaltese et al. (2009) estudaram o torneamento com pastilhas de CNB do aço temperado 100Cr6 com dureza de 60 HRC para uso em rolamentos. A velocidade de corte ótima para o desgaste foi de 120 m/min. Em velocidades de corte acima de 280 m/min o sistema de usinagem se tornou instável e produziu faíscas e vibrações em poucos minutos. A qualidade das superfícies obtidas no torneamento foi semelhante a obtida pelo processo de retificação.

Abrão, Aspinwall e Wise (1995) tornearam, em condições de desbaste e acabamento, aço para rolamento AISI E52100 com dureza de 62 HRc utilizando três diferentes ferramentas: PCBN de alta concentração, PCBN de baixa concentração e ferramentas de cerâmica mista convencional. Em condições de desbaste as ferramentas de PCBN de alta concentração apresentaram maior resistência ao desgaste, já para acabamento, as ferramentas de cerâmica e o PCBN em baixa concentração apresentaram melhores resultados de desgaste e acabamento superficial. Análises micrográficas no MEV, sugerem que a difusão e o desgaste abrasivo foram as principais causas de falha da ferramenta.

Suarez et al. (2019) estudaram o efeito do resfriamento ao tornear aço endurecido ABNT D6 com aplicação de MQL com a adição de MoS_2 , no torneamento com ferramentas PCBN, alterando a velocidade de corte, o avanço, além do sistema lubri-refrigerante: a seco, MQL e MQL com adição de bissulfeto de molibdênio (MoS_2). Constatou-se que o uso de lubrificante

sólido é viável na usinagem do material em questão, onde os principais mecanismos de desgaste da ferramenta foram adesão, abrasão e difusão.

Camargo et al. (2014) desenvolveram um método matemático computacional no qual relacionava o desgaste de ferramentas de PCBN, força de corte e rugosidade no torneamento de aço AISI D6 temperado e revenido com dureza de 57 HRc. Através de tratamento estatístico foi elaborado condições de corte ideais, reduzindo os danos na ferramenta sem comprometer a produtividade. A partir de análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV), o autor concluiu que o principal desgaste encontrado foi devido a abrasão, mas também foi encontrado metal aderido, responsável por desgaste adesivo.

2.5. MÉTODOS DE REDUÇÃO DE TEMPERATURA DE CORTE

2.5.1. FLUIDOS DE CORTE

Segundo Machado et al. (2015) qualquer esforço para aumentar a produtividade e reduzir custo deve ser levado em consideração em sistemas de manufatura, neste caso o fluido de corte traz uma série de benefícios nas condições de corte apropriadas, como mudanças no acabamento das peças e desgaste das ferramentas.

Os fluidos de cortes possuem os impactos negativos nas três vertentes do tripé da sustentabilidade o qual foi proposto por (ELKINGTON, 1997). Na esfera social, esses fluidos têm em suas composições aditivos danosos a saúde humana, como fungicidas e bactericidas, os quais podem causar sérios problemas de saúde aos operadores, como alergias e problemas respiratórios, incluindo relatos de mortes devido a toxicidade (PARK et al., 1988). Na esfera ambiental o fluido de corte tem difícil descarte, devido à presença de diversos contaminantes além de necessitar de grandes volumes de água para a limpeza da peça. Já na esfera econômica, seu custo de descarte também está aumentando cada vez mais devido a regulamentações ambientais mais rigorosas (DHAR; KAMRUZZAMAN, 2007), estudos comprovam que normalmente esses fluidos são responsáveis entre 7 a 17 % do custo total de usinagem (KING et al., 2001), mas em casos específicos em larga escala como na indústria podem corresponder a cerca de 25%, dependendo do tipo de operação.

Para Ferraresi (1977) experimentos indicam que a vida das ferramentas de corte podem ser aumentadas significativamente somente com pequenas reduções de temperatura. Esta redução pode ser alcançada através da presença de um fluido na região peça-ferramenta-cavaco, e este fluido é denominado de fluido de corte. A função primária do fluido de corte é a de remover o calor gerado durante a operação de corte, a fim de elevar a vida útil das ferramentas e garantir precisão dimensional devido à redução das distorções térmicas (SUKAYLO et al., 2004). Outra importante função é a lubrificação, apesar de ainda não estar claro como o fluido de corte penetra entre a superfície da ferramenta e a do cavaco nem até que ponto no qual consegue chegar, mas acredita-se que a capilaridade é a principal forma de penetração, e resulta em redução do atrito, aumentando o ângulo de cisalhamento e cavaco de menor espessura (SHARMA; TIWARI; DIXIT, 2016).

Os fluidos de corte podem ser divididos em duas classes: integrais, os quais são constituídos basicamente por óleos puros, sem adição de água; e miscíveis, contendo água e outros elementos químicos, estes são divididos em emulsões e soluções (DANDOLINI, 2001; GONÇALVES, 2019). A figura 2.14 mostra a ramificação das classificações de fluidos de corte.

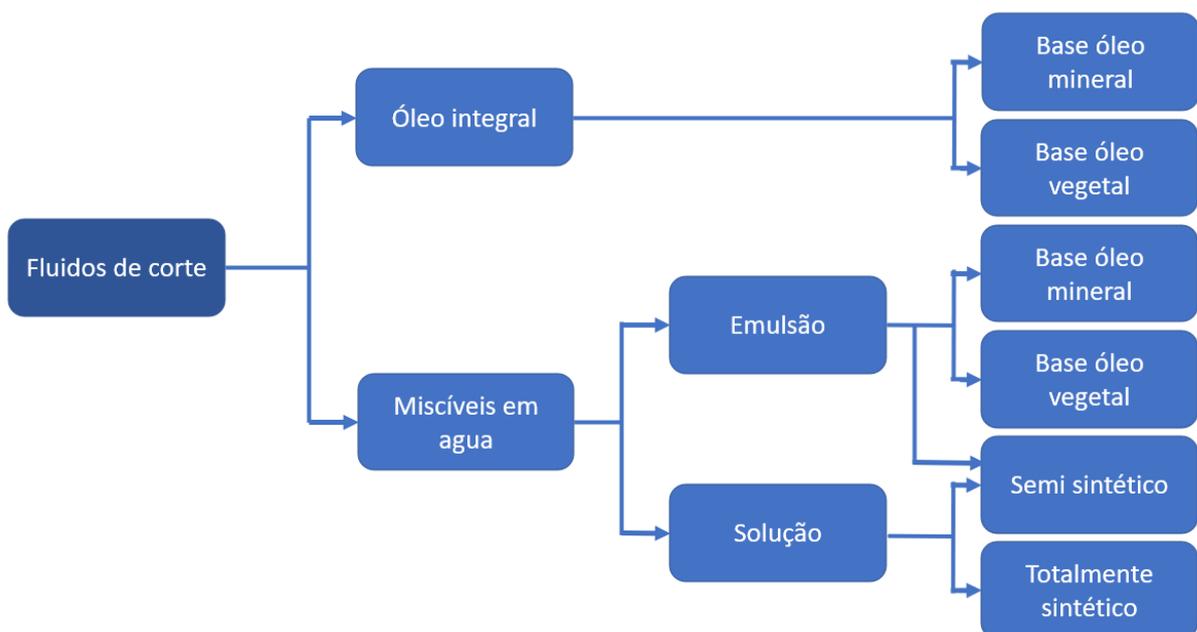


Figura 2.14 – Classificação dos tipos de fluido de corte, adaptado de (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2003; GONÇALVES, 2019)

Os fluidos de corte integrais são utilizados principalmente em operações de desbastes pesados envolvendo atrito e geração de calor em grandes quantidades, onde a lubrificação é

fundamental. Com aplicação desses óleos integrais há menores taxas de geração de calor na zona de corte, sendo que com baixas viscosidade, podem oferecer boa qualidade de refrigeração também (DANDOLINI, 2001; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2003).

Fluidos miscíveis podem ser divididos em duas subclasses (emulsão e solução), e possuem cerca de 90% de água com o restante de óleo. Devido a presença de produtos orgânicos, possui menor vida útil, devido a degradação gerada principalmente por microrganismos, resultando em altos valores do descarte final. Estes são utilizados principalmente em situações nas quais a refrigeração é fator mais relevante do que a lubrificação, e são frequentemente usados em operações de baixo e médio avanço e profundidade de corte e velocidades de corte médias a altas (GONÇALVES, 2019).

2.5.1.1. Descarte dos fluidos de corte

Com o passar do tempo, os fluidos de corte apresentam contaminação e degradação, dessa forma precisam ser descartados (GONÇALVES, 2013). Ao final da vida útil, estes fluidos não podem ser descartados de maneira inapropriada na natureza, devido a difícil biodegradabilidade, causada por substâncias como: derivados de petróleo, estabilizantes, óleos sintéticos, além de bactericidas, fungicidas e anticorrosivos, causando devastação a vida e contaminação à água e ao solo (SCHULTHEISS et al., 2013).

O descarte correto dos fluidos de corte é oneroso e precisa seguir a legislação vigente, devendo ser o último recurso a ser utilizado, devendo manter a preocupação com a manutenção apropriada dos fluidos (RUNGE; DUARTE, 1990). Devido a custos com o descarte e à preocupação ambiental, muitas empresas optam por escolher óleos solúveis, os quais possuem maior facilidade de tratamento e descarte depois de perder performance (DANDOLINI, 2001).

Segundo Santos e Sales (2007) o descarte de emulsões pode ser divididos em processos químicos e físicos, dependendo do estado de contaminação, das leis ambientais e do custo de cada processo, sendo, em ambas as formas, necessário a quebra da emulsão, separação do óleo e o tratamento da água separada. No processo químico é utilizado ácido na quebra e no processo físico a ultrafiltração.

Em fluidos de corte sintéticos do tipo solução são usados sistemas convencionais de descarte, o qual envolve a compreensão da química coloidal e tensoativa do fluido descartado. Como os óleos não são diluídos em fluidos sintéticos, não existe a etapa de separação do óleo, como no caso das emulsões, sendo aqui dispensada. Neste caso é utilizado um coagulante polimérico, o qual o fator a ser analisado é o pH. A taxa das reações de precipitação é controlada e a água efluente deve também ter o pH controlado para o seu descarte posterior (RUNGE; DUARTE, 1990).

2.5.2. ALTERNATIVAS AOS FLUIDOS DE CORTE

Atualmente, existem diversas pesquisas voltadas à redução do consumo de fluidos de corte por jorro, através de outras técnicas mais sustentáveis. Entre elas a usinagem a seco, mínima quantidade de lubrificante (MQL) e mais recentemente sistemas alternativos, como o sistema de refrigeração do porta-ferramenta, uso de *heat pipes* na ferramenta de corte, criogenia e fluidos gasosos. Além disso, existem estudos sobre a utilização de fluidos de corte alternativos à base de vegetais (FRANÇA, 2018). Por meio da aplicação de fluidos de corte biodegradáveis nos processos de usinagem torna-se possível a diminuição dos efeitos nocivos dos fluidos de corte convencionais de base mineral (DEBNATH; REDDY; YI, 2014; KATNA et al., 2017).

O ideal para o aspecto ambiental da sustentabilidade, segundo Sreejith e Ngoi (2000), é a usinagem a seco, a qual atualmente possui utilização limitada na usinagem, podendo ser usada em larga escala somente em alguns materiais, a exemplo de aços endurecidos. Para Sreejith e Ngoi (2000) a usinagem a seco é primeira forma de usinagem a ser utilizada. Esta se caracteriza pela não existência de nenhum outro método a fim de reduzir a temperatura da ferramenta de corte além do ar atmosférico. Na questão ambiental é uma das formas de usinagem mais ecológica devido ausência de fluido de corte (SCHULTHEISS et al., 2013).

De acordo com Fratila e Caizar (2011) aplicar fluidos de corte através de MQL é uma solução promissora na diminuição do uso de fluidos de corte, tornando a aplicação mais ecológica, podendo ser utilizada em vários processos, como torneamento, fresamento e furação. Neste método, o fluido de corte é pulverizado na forma de spray sobre a zona de corte com auxílio de um jato do ar comprimido (MARQUES et al., 2019). No trabalho de Dhar (2006), o qual buscou reduzir o volume de fluido de corte através da técnica de MQL no fresamento do

aço AISI-4340 em velocidades industriais, conseguiu reduzir significativamente o desgaste da ferramenta e rugosidade da superfície em comparação a usinagem a seco e com jorro, através da redução da temperatura na interface cavaco-ferramenta, em relação a usinagem a seco, com menor ciclo térmico em relação a usinagem com jorro.

Outro método utilizado é aplicar um refrigerante gasoso na interface cavaco-ferramenta, como o ar comprimido, que possui coeficiente de convecção maior que o ar atmosférico, além de poder ser refrigerado ou não. Um exemplo é o trabalho de Silva et al. (2018), no qual foi injetado ar comprimido com pressão média de 9 Bar, e comparou com outros métodos de refrigeração, MQL, a seco e jorro, em diferentes condições de corte. Foi constatado que, na média, a refrigeração por ar comprimido obteve menores forças de usinagem.

Diversos trabalhos apresentam a utilização de técnicas envolvendo temperaturas criogênicas, por exemplo Sun et al. (2015) verificaram que, ao injetar ar comprimido a 7 Bar e $-193\text{ }^{\circ}\text{C}$ na interface peça/cavaco/ferramenta em uma operação de torneamento da liga de titânio Ti-6Al-4V, obtiveram melhora na vida da ferramenta em 50%, em comparação com a usinagem a seco nas mesmas condições de corte. Inicialmente as forças de corte foram maiores que a usinagem a seco, mas no decorrer do tempo a diferença tendeu a diminuir, até a situação se inverter.

Nos trabalhos de Chiou et al. (2002) e Chiou et al. (2003) foram utilizados *heat pipes* no porta ferramenta, figura 2.15, a fim de aumentar a troca térmica e diminuir a temperatura na ferramenta de corte, reduzindo o desgaste e prolongando a vida da ferramenta. Além disso, pode diminuir o volume de fluidos de corte, reduzindo a contaminação ao meio ambiente e danos na saúde do operador.



Figura 2.15 – Instalação do *heat pipe* no porta-ferramentas (CHIOU et al., 2003)

Outra proposta é a refrigeração do porta ferramenta através de um sistema de refrigeração, como no trabalho de Ingraci Neto et al. (2016), o qual utilizou um sistema de refrigeração para diminuir a temperatura na ferramenta de corte no torneamento de aço AISI 1045. Foi utilizado um sistema no qual o porta-ferramentas foi modificado como o evaporador, o qual tem sua temperatura diminuída a fim de refrigerar a ferramenta de corte por condução, conforme a figura 2.16. Através de termopares instalados na superfície da ferramenta de corte, foi utilizado método inverso para a obtenção da temperatura na zona de corte. Os resultados apontaram uma redução de 10% na temperatura média na zona de contato do cavaco e a ferramenta. No torneamento interrompido, o resfriamento interno é capaz de estender a vida útil das ferramentas de corte em 58 % e 13 % em relação à aplicação de fluido de corte e o corte a seco, respectivamente, e em torneamento contínuo a vida da ferramenta foi aumentada de 7 % e 45% em relação à aplicação de fluido de corte e o corte a seco, respectivamente. Lino et al. (2021) utilizaram um porta-ferramentas modificado, o qual circulava uma mistura de 50 % de monoetilenoglicol com água na temperatura ambiente. Testes com este sistema mostraram que foi possível diminuir o desgaste da ferramenta em relação a usinagem a seco, sem alterar a rugosidade da peça.

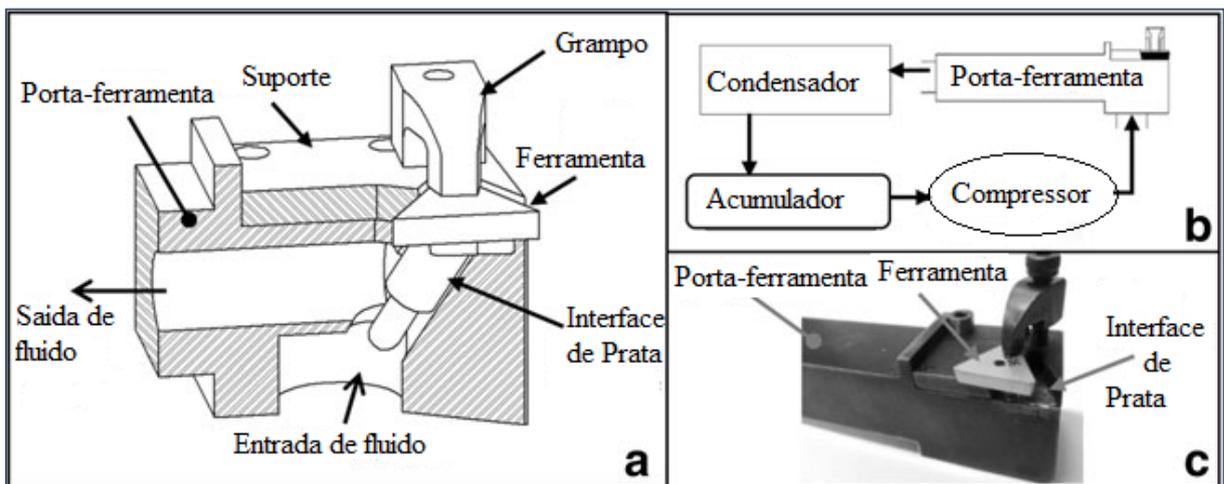


Figura 2.16 – Esquema do porta-ferramenta utilizado por Ingraci Neto et al., (2016) (adaptado).

Outro sistema utilizado é a redução indireta da temperatura na usinagem, por meio de ferramentas refrigeradas internamente, como o trabalho de Jeffries e Zerkle (1970), considerado o primeiro estudo realizado no qual modelaram numericamente um fluido que mudava de fase ao trocar calor com a ferramenta. Rozzi et al. (2011) adaptaram uma ferramentas de corte com micro canais a fim de circular nitrogênio líquido, figura 2.17, em circuito aberto, e retirar calor

do fluido no torneamento do aço inox AISI 416, resultando no aumento a vida útil da ferramenta em relação a usinagem a seco. O trabalho de Ferri et al. (2014) consistiu no torneamento cilíndrico externo da liga de alumínio AA6082-T6, e tinha como o objetivo de comparar ferramentas de metal duro convencionais, com ferramentas de metal duro com a presença de canais internos, figura 2.18, nos quais circulava água em circuito fechado. O autor constatou que a ferramenta com refrigeração interna apresentou menor temperatura, com maior destaque na condição de corte que possui a maior profundidade de corte.

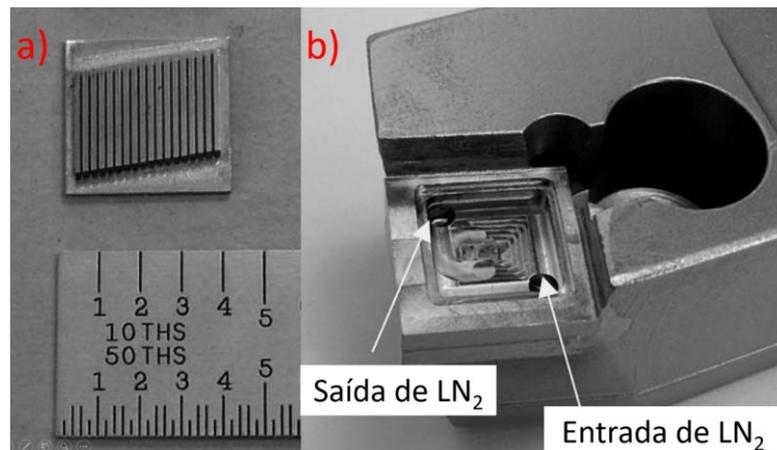


Figura 2.17 – Ferramenta com micro canais para a passagem de nitrogênio líquido (LN_2), a) micro canais, b) calço modificado, adaptado de (ROZZI; SANDERS; CHEN, 2011)

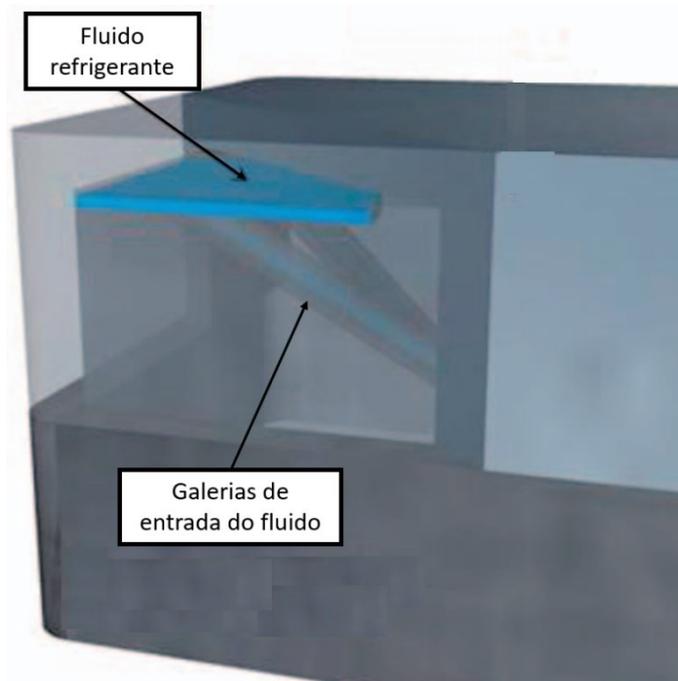


Figura 2.18 – Ferramenta com galeria interna de refrigeração proposta por Ferri et al. (2014), adaptado.

2.6. SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO

Para Çengel e Boles (2013) os sistemas de refrigeração tem por objetivo retirar calor de determinada região, através de dispositivos chamados de refrigeradores, os quais tem com princípio de funcionamento os ciclos de refrigeração. O ciclo mais utilizado a fim de reduzir a temperatura, é o ciclo de refrigeração por compressão de vapor, no qual o refrigerante é vaporizado e condensado alternadamente e comprimido na fase de vapor. A figura 2.19a mostra um esquema para o sistema de refrigeração por compressão de vapor, e a figura 2.19b mostra o diagrama de temperatura (T) e entalpia (s).

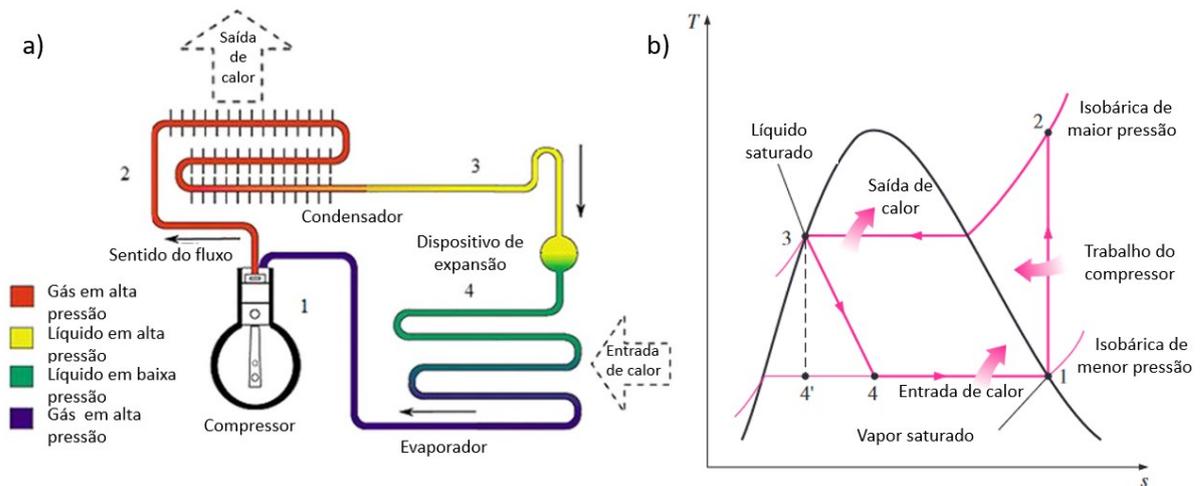


Figura 2.19 – a) Ciclo de refrigeração por compressão de vapor, adaptado de (ALTINKAYNAK, 2021), b) diagrama de temperatura e entropia de um ciclo de refrigeração, adaptado de (ÇENGEL; BOLES, 2013)

Segundo Altinkaynak (2021), o sistema de vapor padrão consiste basicamente em quatro componentes, compressor, condensador, dispositivo de expansão e evaporador. O fluido refrigerante entra no compressor, ponto 1, como vapor saturado é comprimido até a pressão do condensador, ponto 2, através da energia fornecida pelo trabalho do compressor. No estado superaquecido, ponto 2, o fluido refrigerante entra no condensador, onde é resfriado e condensado, através da troca térmica com a fonte quente (meio externo), se tornando líquido saturado ao sair do condensador, ponto 3.

O líquido saturado proveniente do condensador, é direcionado a um dispositivo de expansão, com o objetivo de diminuir a pressão sem troca térmica, expansão isoentálpica, resultando em baixas temperaturas. O ponto 4' representaria a expansão ideal, já o ponto 4 representa a situação real, na forma de vapor saturado seco. Na pressão do evaporador, o

refrigerante, com temperatura abaixo do ambiente, absorve calor da fonte fria (espaço refrigerado), mudando de estado e tornando vapor superaquecido, ponto 1. Por fim, retorna ao compressor para reiniciar o ciclo.

2.6.1. SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO COM FLUIDO SECUNDÁRIO

Fiori (2009) diz sistemas com fluido secundário tem como vantagem o menor uso de fluidos refrigerante, permitindo que este fique restrito ao circuito primário e não necessitando percorrer grandes distâncias, a exemplo de aplicações industrial ou estabelecimentos comerciais. Além disso, possui flexibilidade energética, devido a termoacumulação, dessa forma é possível armazenar o fluido secundário em um acumulador e utilizá-lo nos momentos de maior pico, ou desligar o compressor do sistema primário no momento de maior tarifa de energia.

De acordo com Benito (2012), um sistema refrigeração indireto é dividido em dois circuitos, como mostrado na figura 2.20. O circuito primário é análogo ao sistema de refrigeração direto, com a diferença do evaporador, no qual ocorre a troca calor do fluido de refrigeração com o fluido do circuito secundário, ao invés do meio externo. O circuito secundário é composto pelos trocadores primários, entre os pontos 5 e 6, no qual resfria o fluido secundário através do evaporador do circuito primário; uma bomba, entre os pontos 6 e 7, garante o fluxo do fluido secundário; e o trocador secundário, entre os pontos 7 e 5, é responsável pela troca de calor com o ambiente ou o equipamento em questão. Ao completar o ciclo o fluido secundário retorna ao trocador primário. O trocador de calor primário pode também servir de acumulador, ou ser implementado antes ou depois da bomba.

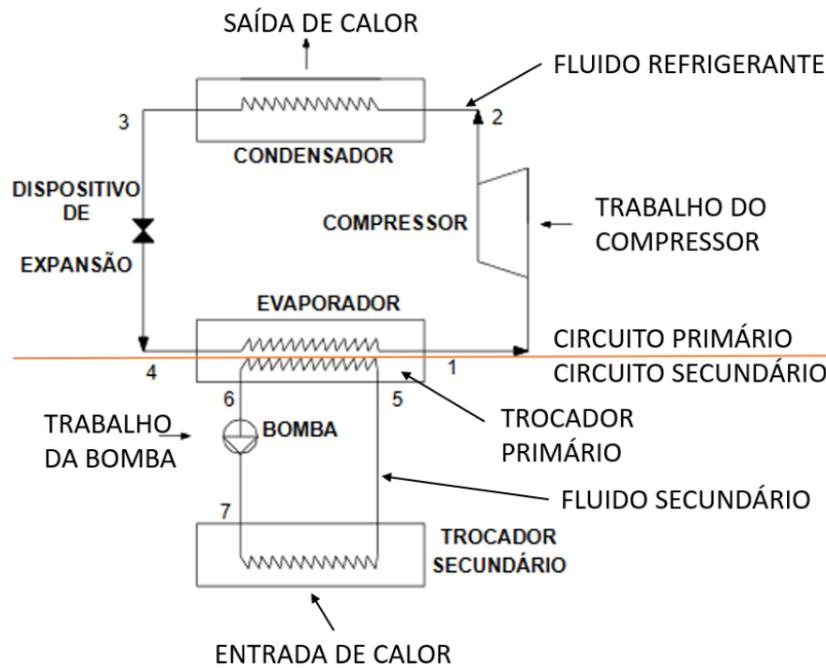


Figura 2.20 – Ciclo de refrigeração com fluido secundário (BENITO, 2012)

Segundo Freitas (2009) a escolha do fluido secundário de refrigeração é de extrema importância na otimização do sistema. É importante que o fluido não congele e que tenha grande capacidade de troca térmica, além de não comprometer o sistema, evitando corrosão. A água é muito utilizada como fluido de refrigeração secundária devido ao baixo custo e boa capacidade de troca térmica, devido à baixa viscosidade, e alto calor específico, apesar de propensão a corrosão em materiais ferrosos, e possui temperatura de congelamento considerada alta, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dessa forma é comumente utilizado água misturada a aditivos, conforme mostrado na figura 2.21, a fim de combinar características dos fluidos. Já a figura 2.22 mostra a viscosidade cinemática de diversos fluidos, que podem ser utilizados misturados à água, altos valores possuem influência negativa no coeficiente de convecção e gera resistência ao bombeamento.

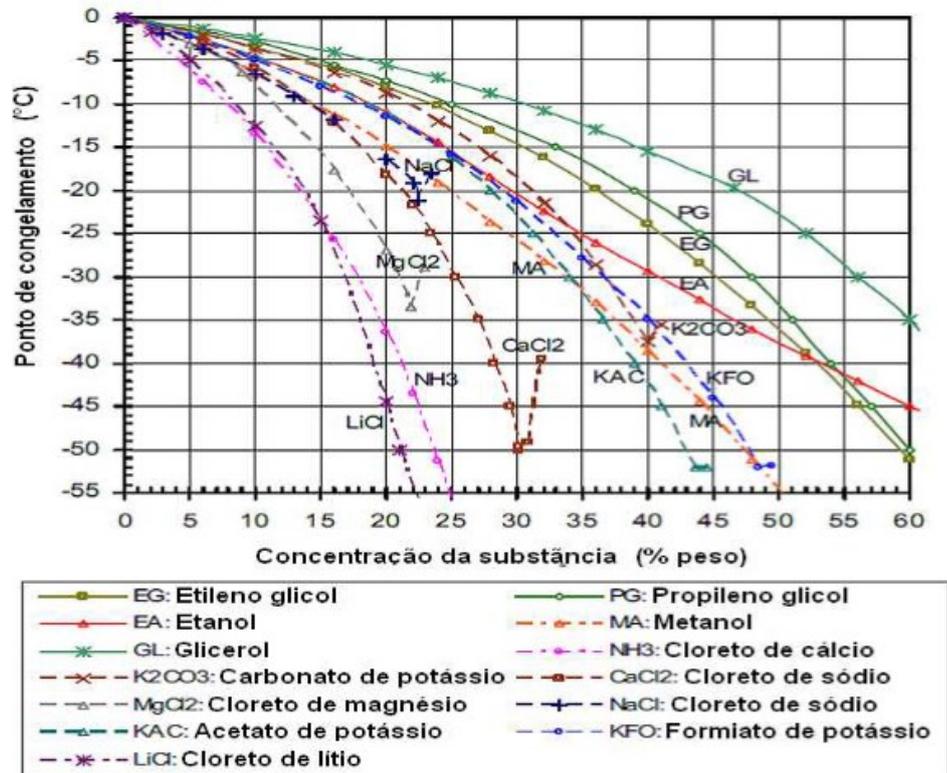


Figura 2.21 – Fluidos de refrigeração secundária e temperatura de congelamento (FREITAS, 2009)

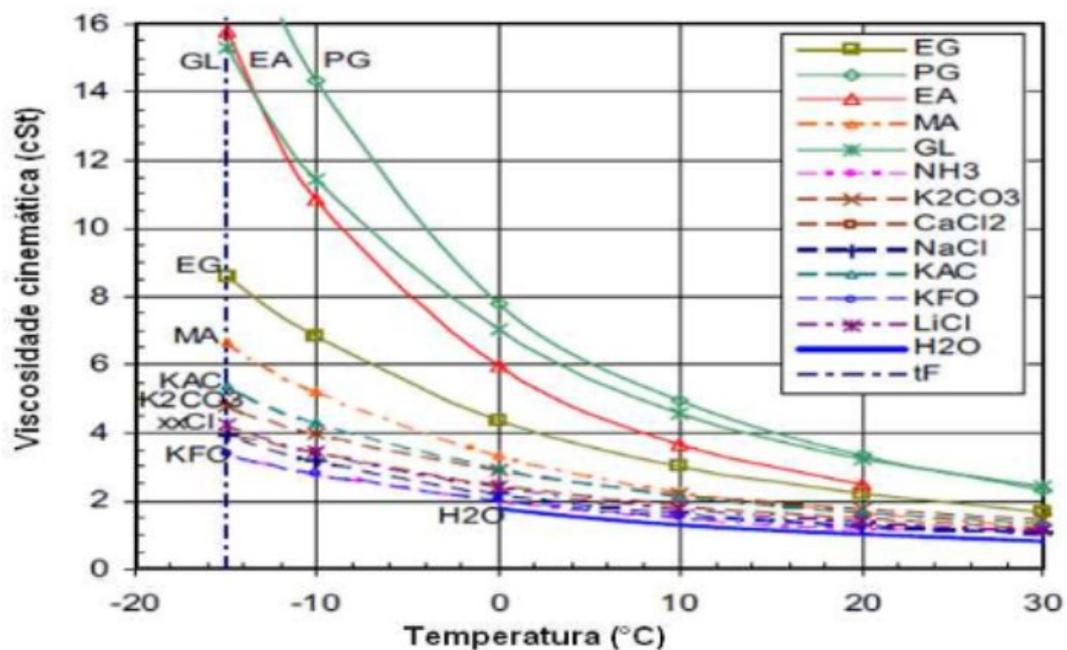


Figura 2.22 – Viscosidade cinemática em função da temperatura para líquidos de refrigeração secundário, (FREITAS, 2009)

CAPÍTULO III

3. METODOLOGIA

Neste capítulo é exposto a metodologia, os materiais, as ferramentas, equipamentos e processos utilizados na realização dos experimentos. Os testes de usinagem foram realizados no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). A figura 3.1 mostra o fluxograma com as variáveis utilizadas e os testes desenvolvidos, os quais são detalhados ao longo desse capítulo.

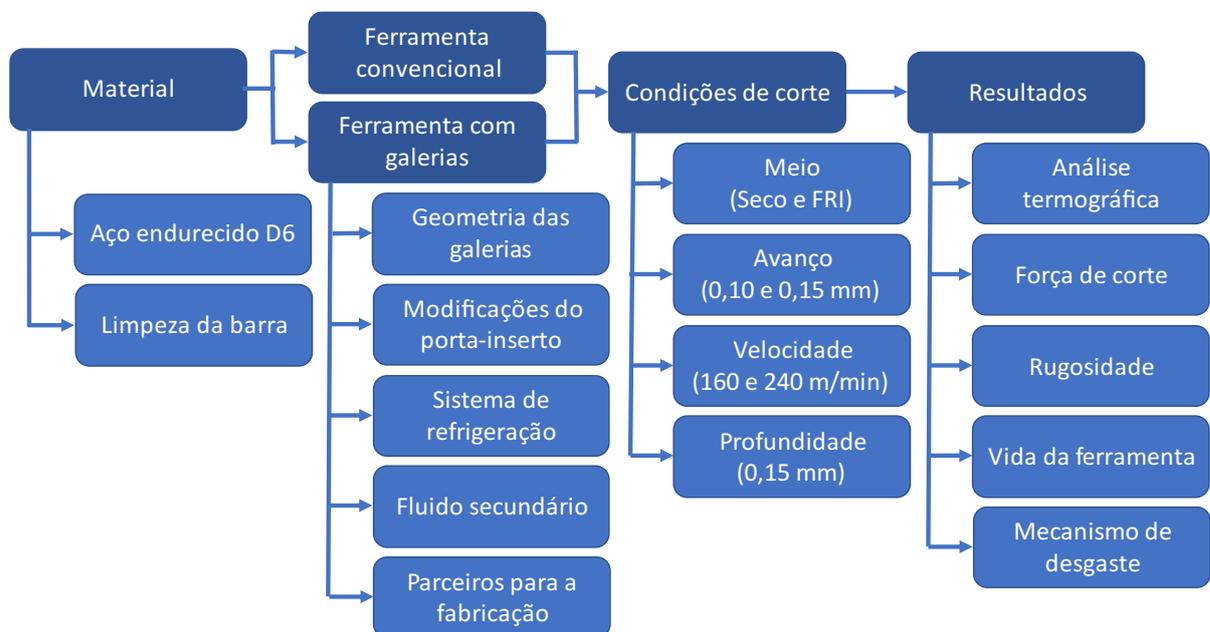


Figura 3.1 – Fluxograma dos experimentos

3.1. MATERIAL UTILIZADO

O material utilizado é aço endurecido D6 VC131 temperado e revenido, produzido pela Villares Metals, no qual a composição química é mostrada na tabela 3.1, apresentando elementos como: carbono, cromo, tungstênio e vanádio, além de ferro. Segundo o fabricante, a dureza do material varia de 56 HRc a 62 HRc (VILLARES METALS, 2009). Este material foi escolhido devido as altas temperaturas encontradas no seu torneamento, além da dificuldade na utilização de fluidos de corte. Dessa forma, espera-se que o sistema de refrigeração interno às ferramentas de corte apresente vantagens em relação a usinagem a seco, como por exemplo, a vida da ferramenta, que depende diretamente da temperatura.

Tabela 3.1 – Composição química do aço VC131 (VILLARES METALS, 2009)

Carbono	Cromo	Tungstênio	Vanádio	Ferro
2,10 %	11,5 %	0,7 %	0,15 %	Restante

O tarugo utilizado possui diâmetro nominal de 128 mm e comprimento total de 413 mm, sendo que destes é possível usinar 300 mm, com o restante destinado a fixação na placa do torno. A fim de determinar a dureza superficial do tarugo, foi realizado um teste de dureza antes do início da usinagem. Foi utilizado um durômetro de bancada da marca Digimess modelo 400.005. Após cinco impressões na superfície cilíndrica, ao longo da barra, a dureza superficial média do tarugo resultante foi de $58 \pm 0,7$ HRc.

3.2. SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO E SEUS COMPONENTES

O sistema de refrigeração interna da ferramenta é composto por duas partes, o subsistema de usinagem e o subsistema de refrigeração, com a tubulação flexível de 6,75 mm de diâmetro externo e 1 mm de espessura, ligando ambos os sistemas em um circuito fechado, conforme a figura 3.2. O método a ser utilizado é a refrigeração indireta, utilizando uma mistura de água com aditivo de 10 % de monoetilenoglicol (MEG) como fluido de corte secundário. Essa mistura foi utilizada devido a capacidade de troca térmica da água e da propriedade anticorrosiva do MEG, além disso, esta mistura atingiu a temperatura de fusão de $-4,3$ °C. Nos testes com usinagem a seco, não foram utilizados nenhum fluido de corte, e as ferramentas não possuíam galerias internas.

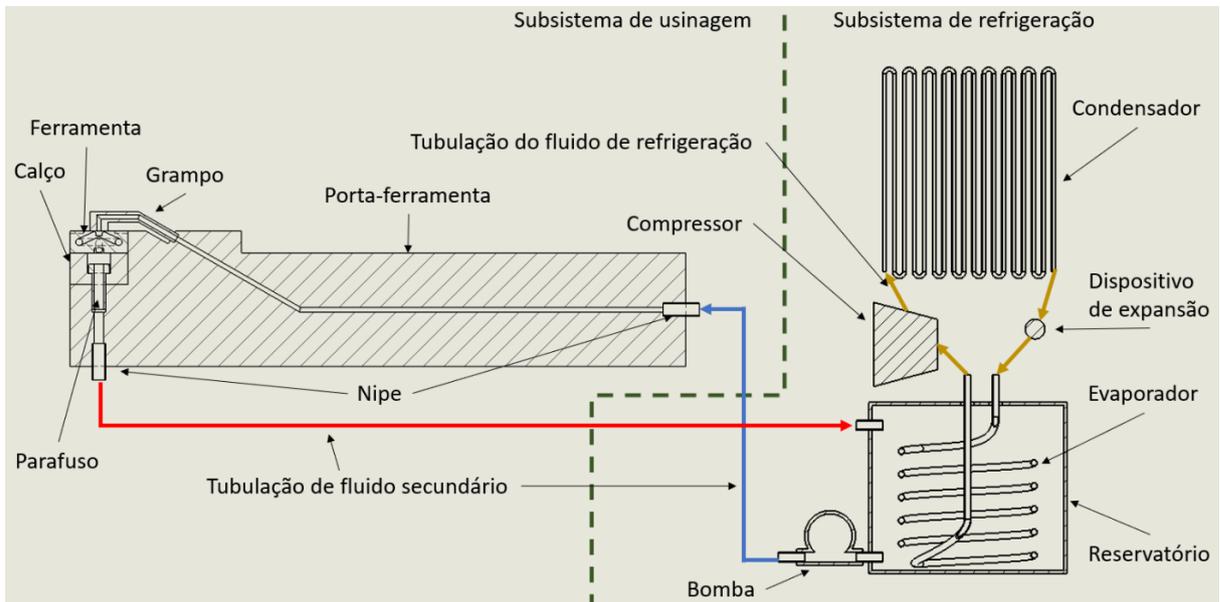


Figura 3.2 – Subsistemas de refrigeração e usinagem

3.2.1 SUBSISTEMA DE USINAGEM

O subsistema de usinagem é composto pela ferramenta, porta-ferramentas, grampo, calço e parafuso do calço, os quais possuem dutos para a passagem do fluido de refrigeração secundário. Esse fluido é proveniente do reservatório, e bombeado até o porta-ferramentas, passando pelo grampo, percorrendo as galerias dentro do inserto, depois pelo calço, até retornar para o reservatório, onde é armazenado e resfriado, reiniciando o ciclo fechado, conforme o desenho assistido por computador (CAD) na figura 3.3.

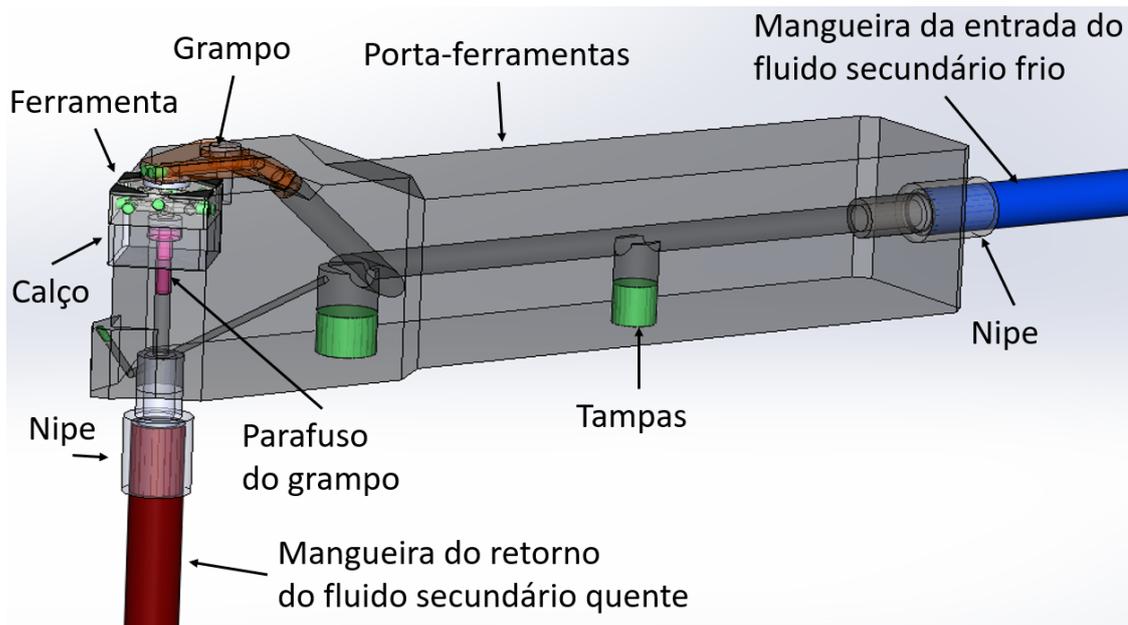


Figura 3.3 – Desenho CAD do subsistema da ferramenta

3.2.1.1. Ferramentas de corte de PCBN

O projeto das galerias foi desenvolvido pelo autor, com as premissas de utilizar quatro arestas das ferramentas de corte com a mesma eficiência de remoção de calor, ser construída através de equipamentos disponíveis nas fornecedoras de ferramentas de usinagem, não vazar e permitir a sua troca em tempo compatível próximo a ferramenta convencional. O projeto final foi apresentado para Mapal do Brasil, a qual as produziu. As ferramentas possuem corpo de metal duro com quatro blanks de PCBN nas pontas, ângulo de cunha de 90° , raio de ponta de 1,0 mm e chanfro de 0,06 mm no sentido da horizontal e 0,1 mm no sentido vertical, resultando em um ângulo com cerca de $30,96^\circ$, conforme mostrado na figura 3.4b. Foram utilizados dois tipos de ferramentas com dimensões e materiais idênticos, com a diferença das ferramentas do sistema FRI possuírem galerias internas com 1,5 mm de espessura na matriz de metal duro para a passagem do fluido secundário, e a ferramenta da usinagem a seco possuir a matriz de metal duro maciça, conforme a figura 3.4a.

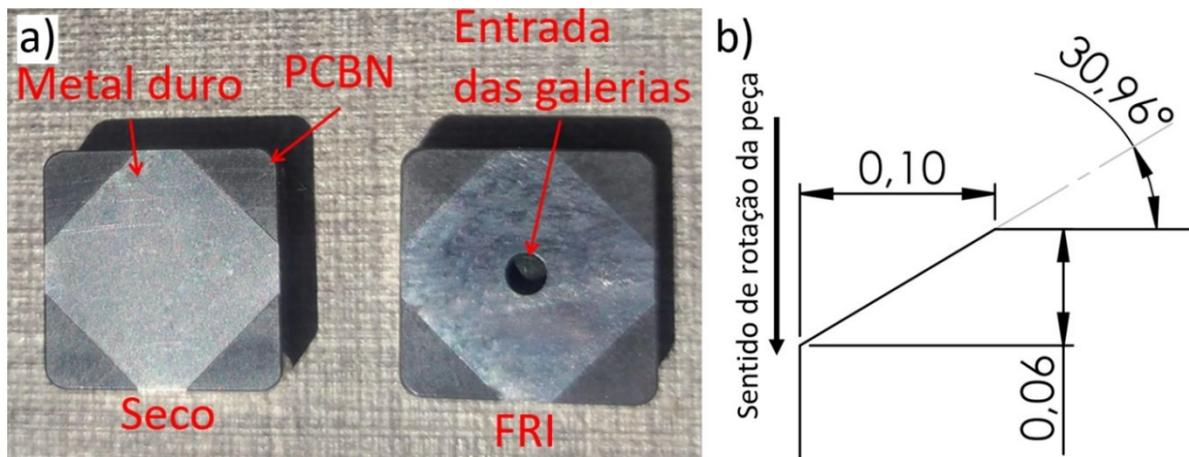


Figura 3.4 – a) Ferramentas utilizadas, b) detalhe do chanfro (dimensões em mm)

A figura 3.5 mostra o desenho CAD tridimensional das ferramentas de corte do sistema FRI, com a matriz de metal duro transparente a fim de permitir a visualização das galerias internas, as quais foram produzidas através da usinagem por eletroerosão. Devido a penetração do eletrodo rotativo, é necessário o prolongamento das galerias até a face externa da ferramenta, sendo que esta parte deve ser tampada com solda prata, mostrado na cor verde. As setas azuis mostram o caminho do fluido secundário no interior das galerias, sendo que a entrada deve acontecer na face superior, através do contato com o grampo e o retorno pela face inferior, através do calço e do parafuso do calço. As partes em preto são os *blanks* de PCBN. O desenho técnico completo da ferramenta de corte está presente no tópico 7.1., Apêndice I.

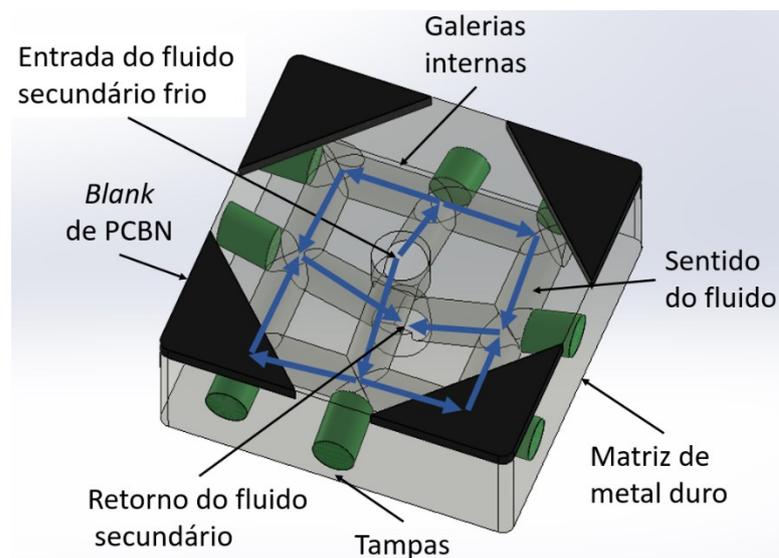


Figura 3.5 – Configuração das galerias na ferramenta do sistema FRI

3.2.1.2. Porta-ferramenta

Em todos os testes de usinagem, a seco e FRI, foi utilizado o mesmo porta-ferramenta, modelo DSSNR2525X12-P produzido pela Walter Tools, que em conjunto com a ferramenta, proporciona um ângulo de saída de -8° . Este suporte já possuía canais internos possibilitando que o fluido de corte seja injetado pelo grampo na superfície de saída da pastilha e pela parte inferior do porta-ferramentas na superfície de saída, com o layout das galerias internas da versão original mostrado na figura 3.6.

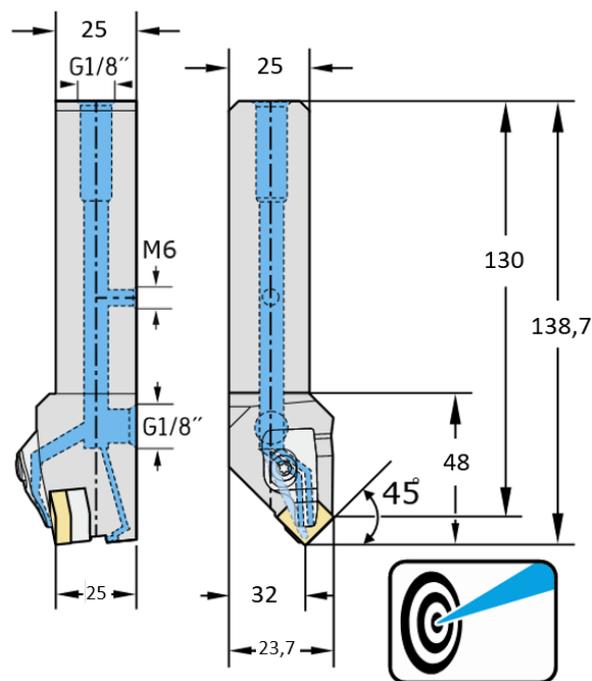


Figura 3.6 – Detalhes do porta-ferramentas DSSNR2525X12-P, adaptado de (WALTER TOOLS, 2021)

A fim de permitir a passagem do fluido na direção correta, a empresa Nipo-Tec realizou mudanças no porta-ferramenta. As saídas de fluido do corte do porta-ferramentas foram tampadas através de solda prata, além de manter os tampões na superfície inferior da haste. Para alimentar a ferramenta com o fluido secundário, foi realizado um furo na haste do grampo através da usinagem de eletroerosão por eletrodo rotativo. Para o retorno do fluido, foi feito um furo passante que atravessa o parafuso do calço e a parte inferior do porta-ferramentas, também por eletroerosão. Ambos os furos são mostrados pela seta em vermelha com o sentido de

penetração. No fim, foi aberto uma rosca e conectado a um nipe, para a conexão da mangueira conforme a figura 3.7.

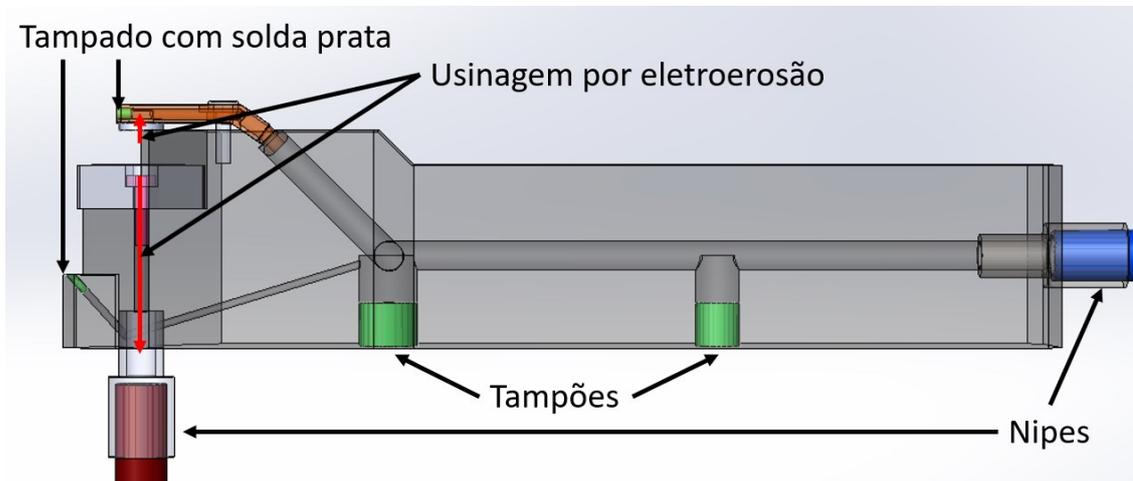


Figura 3.7 – Alterações no porta-ferramenta, grampo e parafuso

3.2.2. SUBSISTEMA DE REFRIGERAÇÃO

O subsistema de refrigeração, esquematizado na figura 3.8, é composto por freezer vertical modelo 04180CBC201 da marca Prosdócimo, com um compressor com potência de 124 W, foi utilizado o fluido refrigerante R401a. O evaporador foi modificado, a fim de permitir trocar calor entre o fluido de refrigeração e o fluido secundário, o qual fica armazenado no reservatório de fluido, situado no interior do freezer. Este reservatório, possui tanto a função de acumulador, com capacidade de 20 litros, quanto de trocador de calor primário. A troca térmica ocorre com o fluxo de energia no sentido do fluido secundário para o fluido de refrigeração primário, o qual passa dentro da serpentina de cobre do evaporador.

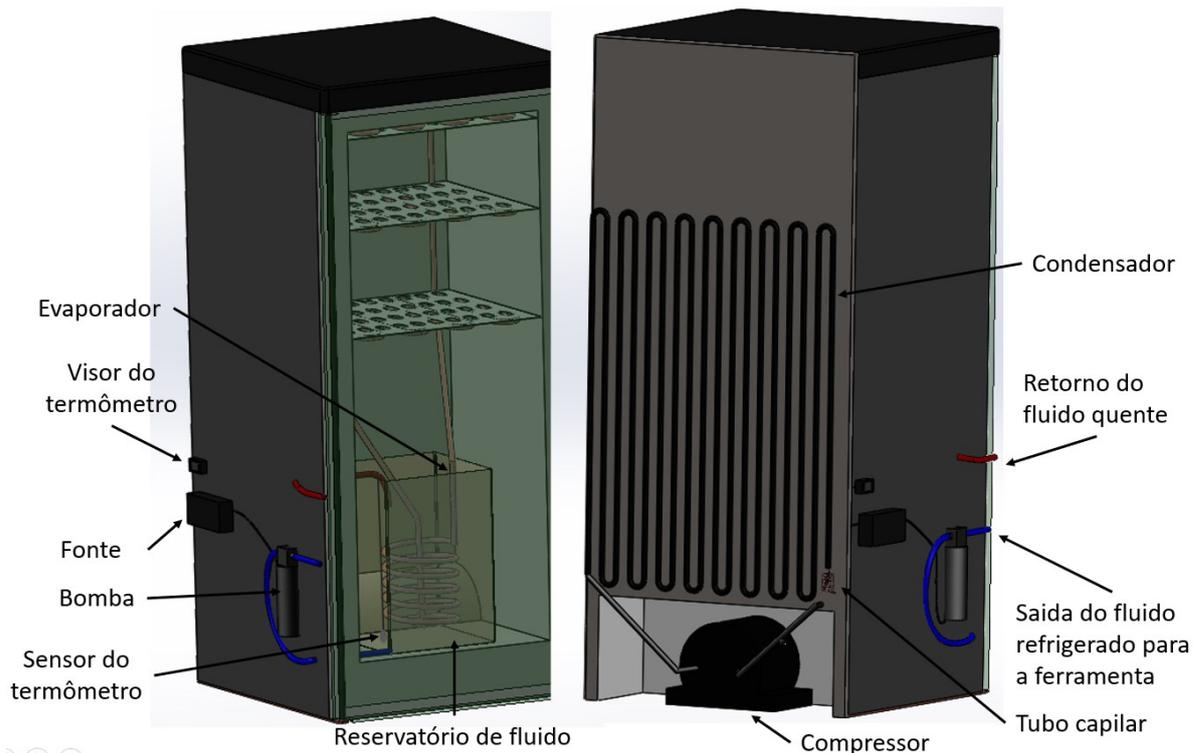


Figura 3.8 – Desenho CAD do subsistema de refrigeração

A fim de promover a circulação do fluido secundário entre o reservatório de fluido e a sistema de usinagem, foi utilizado uma bomba com princípio de funcionamento por diafragma modelo P142-30 da marca Propumps, figura 3.9, com pressão máxima de 0,7 MPa, fluxo máximo de 3 L/min e potência de 30 W. Para fornecer energia à bomba, foi utilizada uma fonte universal de notebook da marca Nativa, com tensão de 12 V a 24 V e potência máxima de 120 W, com o seletor na posição de 12 V, o mesmo da bomba. Após teste com todo o sistema montado, a vazão encontrada foi de 1,11 L/min. Para monitorar a temperatura do fluido de refrigeração secundário, foi instalado um termômetro digital modelo TA21 da marca TSSHOP, com faixa nominal de -50 °C a 110 °C, resolução de 0,1 °C e exatidão de ± 1 °C, este sensor foi posicionado imersa no fluido secundário, no interior do reservatório, e o visor na lateral do freezer. Em todo o tempo de usinagem, a temperatura no fluido secundário no interior do acumulador ficou entre -4 °C e 0 °C.

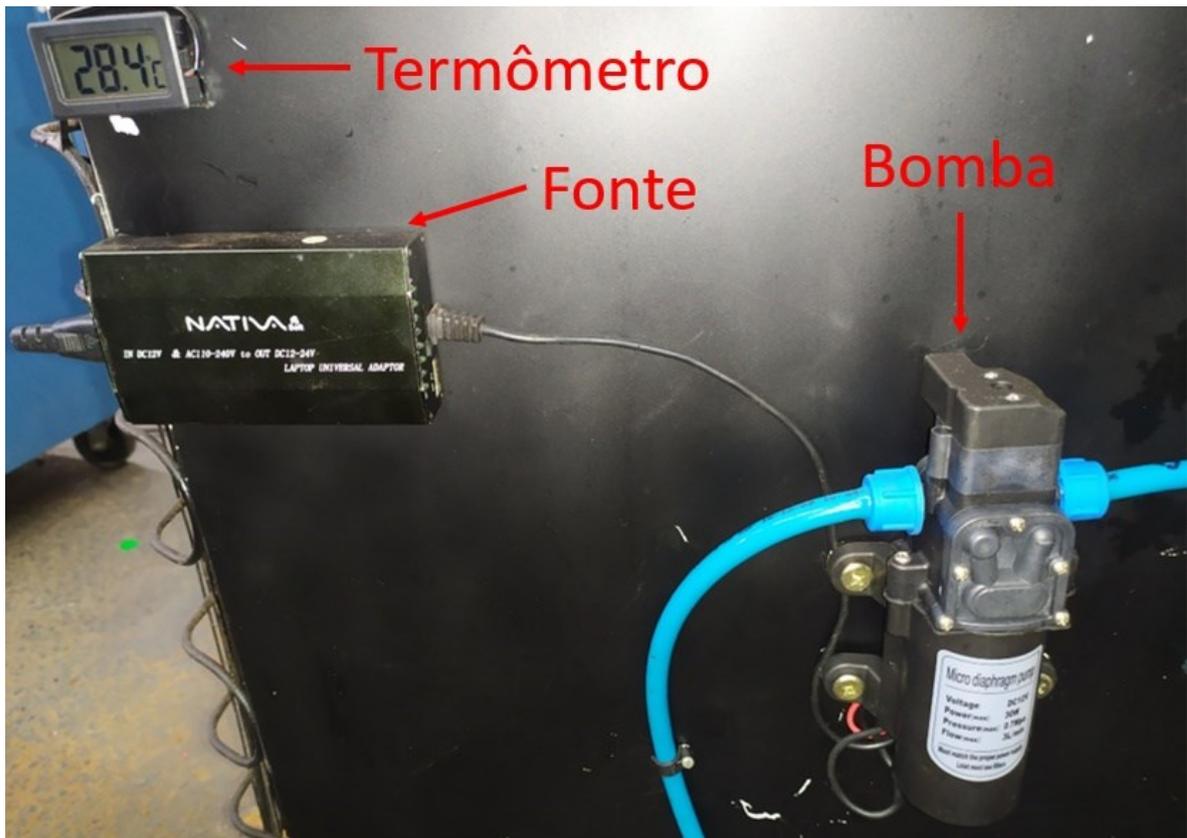


Figura 3.9 – Bomba do circuito secundário

3.3. PARÂMETROS DE CORTE E ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os valores da velocidade de corte, avanço e profundidade de corte utilizados neste trabalho tiveram como base valores usados em trabalhos que realizados com o mesmo material, na mesma máquina, além de também utilizarem ferramentas de PCBN, presentes na tabela 3.2. Destes, Bonfá (2013) estudou a utilização do método da mínima quantidade de fluido de corte (MQL), Camargo (2011) avaliou o modelo de desgaste para a avaliação de vida da ferramenta e Suarez et al. (2019) estudaram o uso de bissulfeto de molibdênio adicionado ao óleo lubrificante, aplicado via MQL.

Tabela 3.2 – Parâmetros utilizados por outros autores

Trabalho	Velocidade de corte (m/min)	Avanço (mm/rev)	Profundidade de corte (mm)
Bonfá (2013)	160 a 340	0,05 a 0,25	0,05
Camargo (2011)	160 a 340	0,05 a 0,25	0,05
Suarez et al. (2019)	150 a 300	0,05 a 0,15	0,20

Com os pré-teste realizados, nos quais a vibração e lascamento de arestas foram mais elevados em profundidade de corte acima de 0,20 mm foi definida a profundidade de corte constante de 0,15 mm/rev. Os parâmetros utilizados avanço, velocidade de corte e profundidade de corte, utilizados são valores intermediários entre os estudados pelos outros autores, com velocidade de 160 e 240 m/min e avanço de 0,10 e 0,15 mm/rev. As oito condições distintas são mostradas na tabela 3.3, onde o menor valor para cada variável é definido como -1 e o maior +1. A fim de diminuir a interferência da ordem nos resultados, os ensaios foram feitos de forma aleatorizada, com ordem diferente entre o primeiro e as duas réplicas. Outro fator importante é a entrada da ferramenta na peça, a qual se mostrou um entrave principalmente no avanço mais alto, dessa forma o avanço foi de 0,03 mm/rev até tocar a peça, e após o toque foi alterado para o valor do ensaio.

Tabela 3.3 – Parâmetros dos ensaios

Condição	Meio	Avanço (mm/rev.)	Velocidade (m/min)
1	Seco (-1)	0,10 (-1)	160 (-1)
2	FRI (+1)	0,10 (-1)	160 (-1)
3	Seco (-1)	0,15 (+1)	160 (-1)
4	FRI (+1)	0,15 (+1)	160 (-1)
5	Seco (-1)	0,10 (-1)	240 (+1)
6	FRI (+1)	0,10 (-1)	240 (+1)
7	Seco (-1)	0,15 (+1)	240 (+1)
8	FRI (+1)	0,15 (+1)	240 (+1)

Para validar estaticamente os dados obtidos nos ensaios realizados foi utilizado o software Statistica® versão 7, com nível de confiança de 95% para todos os experimentos.

Primeiramente foi feito uma tabela de análise de variância (ANOVA) com todos os parâmetros analisado, e em sequência uma tabela ajustada somente com as variáveis significativas. Por fim serão mostrados o diagrama de Pareto e o diagrama dos resíduos, para todos os cenários analisados.

Para os testes de vida da fermenta, foi utilizado um planejamento fatorial completo, composto por dois níveis, três fatores com duas réplicas por experimento, totalizando oito ensaios distintos e 24 no total. Nos testes de força e de temperatura foram utilizados um planejamento fatorial completo, composto por dois níveis, e três fatores sem réplicas, resultando em oito ensaios distintos, considerando as força de corte (F_c) e força de usinagem (F_u), e a média das maiores temperaturas encontradas nos quadros dos últimos cinco segundos. Já para o teste de rugosidade, foi utilizado planejamento fatorial completo, composto por dois níveis e quatro fatores com três medições diferentes por região, totalizando 16 configurações distintas, com os valores representando as médias das três medições das rugosidades (R_a , R_q e R_z). A diferença deste teste para os demais, é que a condição da aresta foi avaliada, sendo esta nova (-1) ou gasta (+1). A tabela 3.4 mostra os parâmetros estatísticos utilizados em cada teste.

Tabela 3.4 – Parâmetros estatísticos nos testes

Teste	Fatorial	Variáveis	Repetições
Térmica	2^3	Média das temperaturas máximas	Não
Força	2^3	Força de corte (F_c), força de usinagem (F_u)	Não
Rugosidade	2^4	Rugosidade R_a , R_q e R_z	Não
Vida	2^3	Volume de material removido	2 réplicas

3.4. EQUIPAMENTOS E MÉTODOS UTILIZADOS

Todos os testes de usinagem são realizados no torno CNC ROMI Multiplic 35D com potência no motor principal de 15 cv e rotação máxima de 3000 rpm, pertencente ao Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). A figura 3.10 mostra o torno em questão, com o subsistema de refrigeração montado ao seu lado.

A fim de preservar as ferramentas utilizadas nos testes, a barra foi limpa com ferramentas de metal duro com objetivo de remover a oxidação na superfície, além de retirar resquícios de excentricidade. A figura 3.11 mostra a montagem do tarugo limpo na castanha e no contra-ponto.



Figura 3.10 – Torno CNC ROMI Multiplic 35D com o subsistema de refrigeração

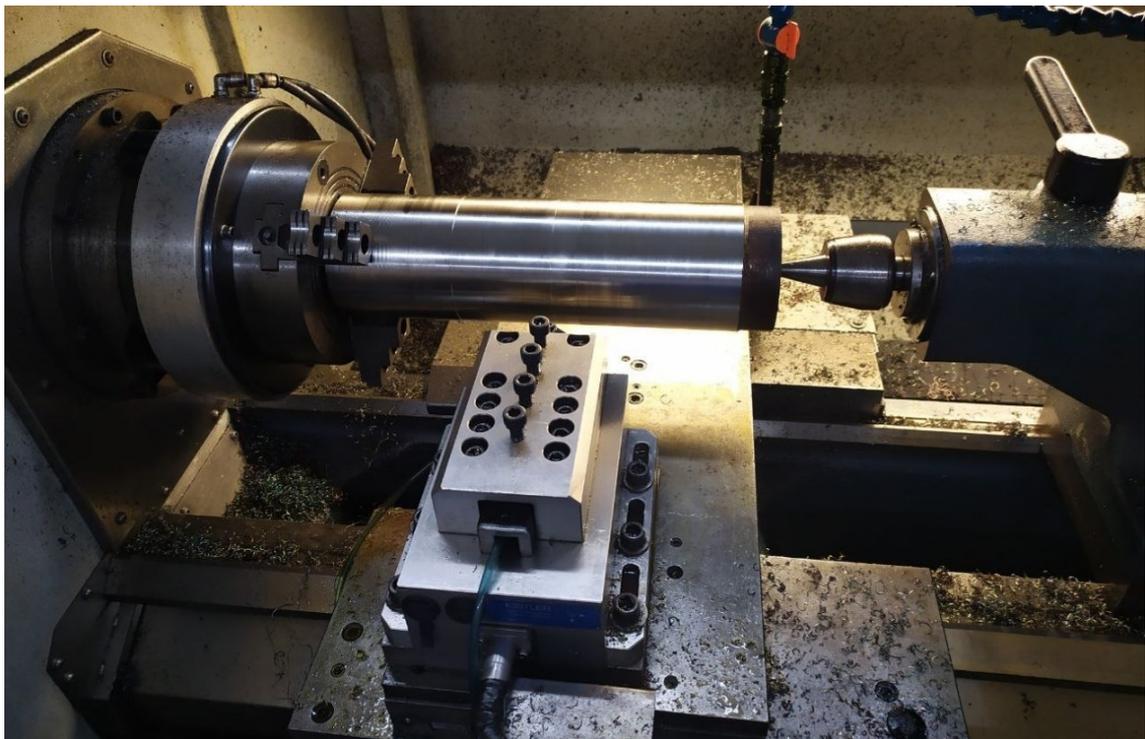


Figura 3.11 – Montagem do tarugo na castanha

Dentre os testes realizados, os ensaios de força de corte e rugosidade foram aferidos durante a primeira réplica do teste de vida útil, em caso de problemas em alguma das condições destes testes, como medição incorreta, ou valores extremamente discrepantes, este teste seria repetido durante a segunda réplica. A análise térmica foi realizada entre a primeira e segunda réplica, com ferramentas distintas, uma vez que a tinta preta, utilizada para homogeneizar a emissividade da ferramenta, aplicada sobre a superfície de saída atrapalha a medição do desgaste. A análise do desgaste foi realizada com as ferramentas provenientes do ensaio de vida. Cada teste individual será explicado nos tópicos a seguir.

3.4.1. ANÁLISE TERMOGRÁFICA

Na análise da influência da refrigeração na ferramenta, foi utilizada uma câmera termográfica Flir A325, a qual possui resolução de 320 x 240 pixels e taxa de aquisição de 30 Hz. A câmera fica protegida em uma caixa de aço, com vidro de germânio, conforme a figura 3.12a, com a montagem em relação ao torno, mostrada na figura 3.12b, a usinagem foi realizada com a porta do torno aberta. A distância entre a câmera e a peça foi de 650 mm. Antes dos testes de usinagem, foi realizado um ensaio com o torno desligado, para verificar se o fluido passando em temperatura menor que a ambiente diminuía a temperatura da ferramenta. Durante a usinagem, para cada uma das oito condições de corte, foi feito um vídeo de quinze segundos, o qual se iniciou quando a usinagem começou. A análise foi feita com base no último quadro do vídeo.

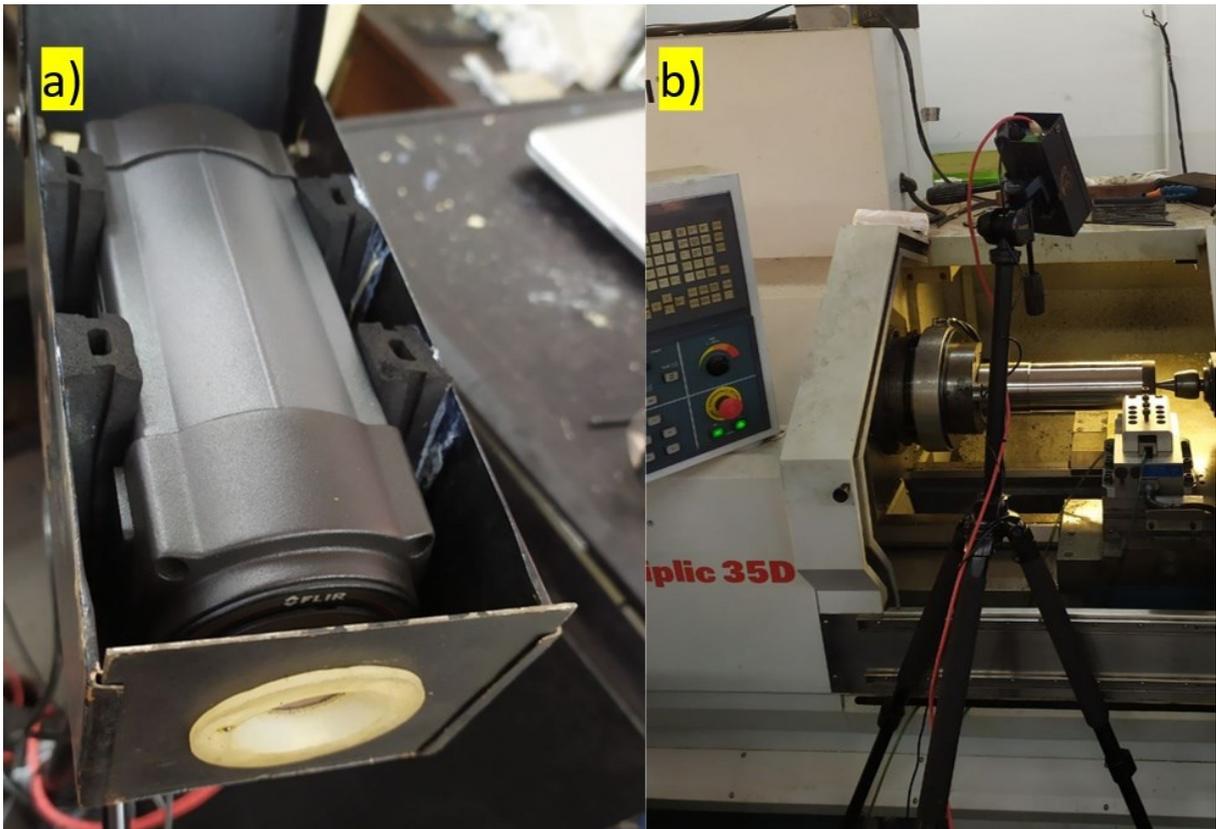


Figura 3.12 – a) Termocâmara Flir A325 na caixa protetora, b) posicionamento da câmera no torno

Devido a diferença de emissividade entre as arestas de PCBN e o corpo de metal duro, além da dificuldade em encontrar valores padrões para estes materiais, a superfície de saída da ferramenta foi toda pintada por tinta preta fosca que tem propriedades resistentes a altas temperaturas produzidas durante a usinagem, conforme retratado na figura 3.13, no qual o valor da emissividade foi de 0,95 com base no artigo disponível pelo fabricante da termocâmara (FLIR, 2015). Este método da pintura da superfície a ser aferida pela termocâmara foi utilizado por Da Silva et al. (2018) no fresamento de ferro fundido. A análise estatística da temperatura na ferramenta será feita com base nos pontos A e B da figura 3.13.

Foram testadas todas as oito condições de corte, além disso foram tiradas duas fotos térmicas, uma sem o sistema de refrigeração, e outra com o sistema ligado, a fim de verificar se a temperatura afetaria a temperatura da ferramenta.

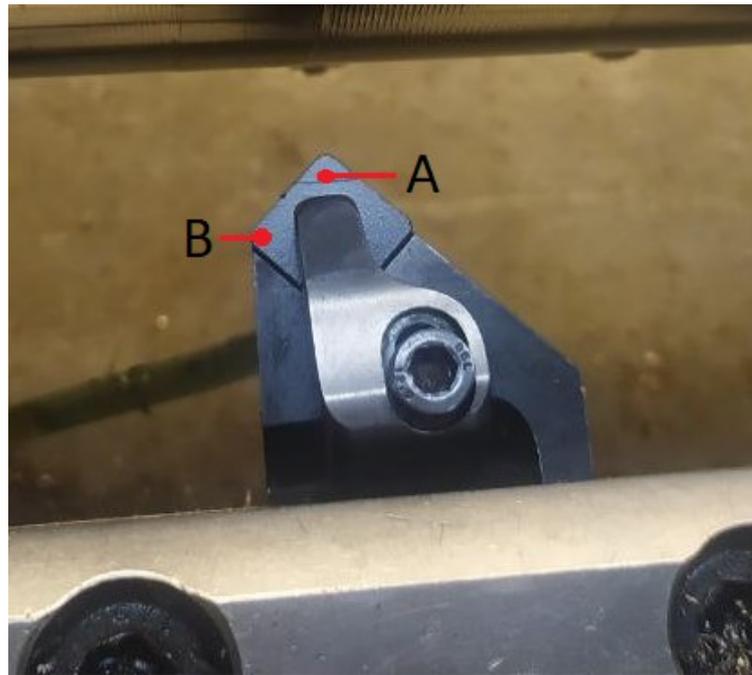


Figura 3.13 – Ferramenta com a face superior pintada e montada no porta-ferramentas

Com os dados importados pelo *software* MatLab®, foi possível determinar a temperatura máxima em cada quadro do vídeo, metodologia semelhante a utilizada por Silva et al. (2018). Na figura 3.14 é mostrado a temperatura máxima em função do tempo e a faixa para a retirada da média das temperaturas máximas, para a condição a seco, avanço de 0,15 mm/rev e velocidade de corte de 160 m/min. Dessa forma foi produzida uma tabela com o maior valor de temperatura encontrado por condição, além dos valores médios das temperaturas máximas dos quadros dos últimos cinco segundos, o que corresponde aos últimos 150 quadros.

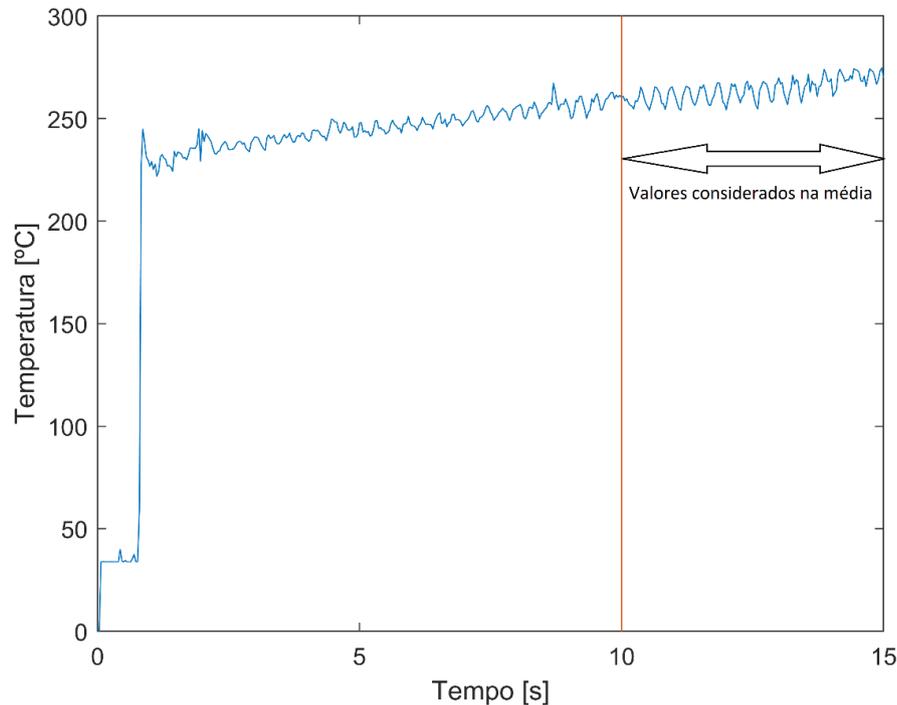


Figura 3.14 – Temperatura máxima em cada quadro do vídeo para a condição a seco, avanço de 0,15 mm/rev e velocidade de corte de 160 m/min

3.4.2. MEDIÇÃO DA FORÇA DE CORTE

Nos ensaios de força foi utilizado um dinamômetro 9265B, com o princípio de funcionamento por cristais piezoelétricos e um amplificador de sinal 5019A, ambos do fabricante Kistler Instrument, uma placa de aquisição de sinais modelo NI PCO-6036E da National Instrument, além de um computador com o programa Labview 7.6, figura 3.15.

O ensaio foi realizado no início do teste de vida, com as ferramentas sem desgaste. Foram aferidas as forças de corte (F_c), avanço (F_f) e passiva (F_p), com taxa de aquisição de 100 Hz e tempo de amostragem de dez segundos, resultando em mil pontos para cada componente. Além destas, foi calculada a força de usinagem (F_u) em cada ponto registrado pelo dinamômetro, através da equação 3.1. A força de corte (F_c) foi calibrada de acordo com a equação 3.2, na qual é utilizado o valor da força de corte medido pelo dinamômetro ($F_{c,medido}$).

$$F_u = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2} \quad (3.1)$$

$$F_c = 0,935 * F_{c,medido} - 21,34655 \pm 15 N \quad (3.2)$$

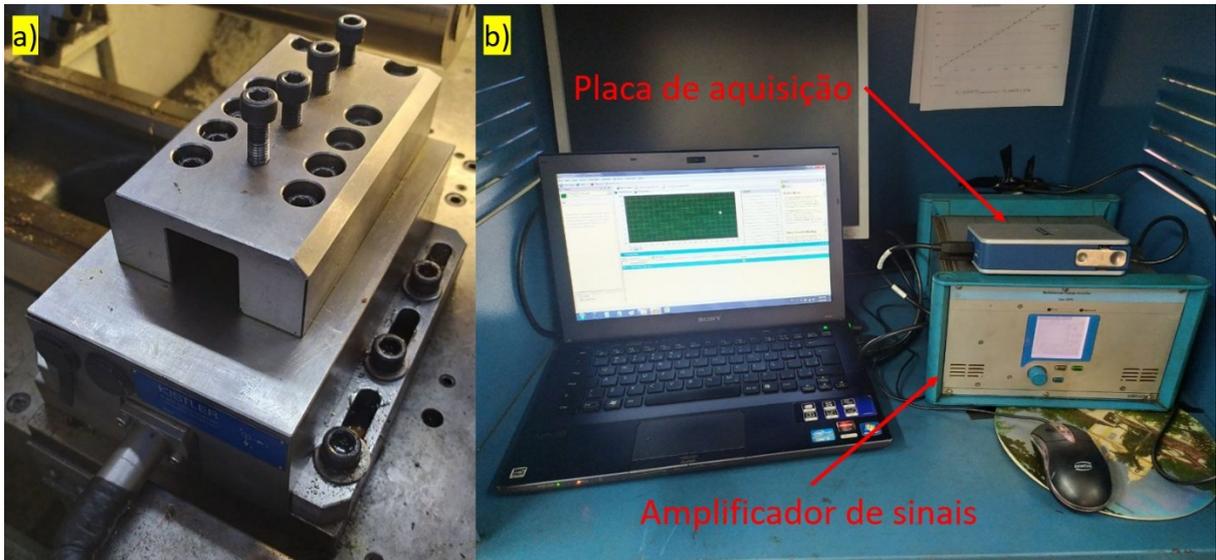


Figura 3.15 – a) Dinamômetro, b) amplificador de sinais e placa de aquisição de sinais

A fim de obter a força em cada medição, os dados brutos obtidos foram tratados através do software MatLab® R2018a. Foram realizadas comparações estatísticas em duas forças distintas, a força de corte (F_c) além da força de usinagem (F_u). A figura 3.16 mostra um exemplo com o gráfico das forças em função do tempo de aquisição, utilizando filtro de suavização por média móvel.

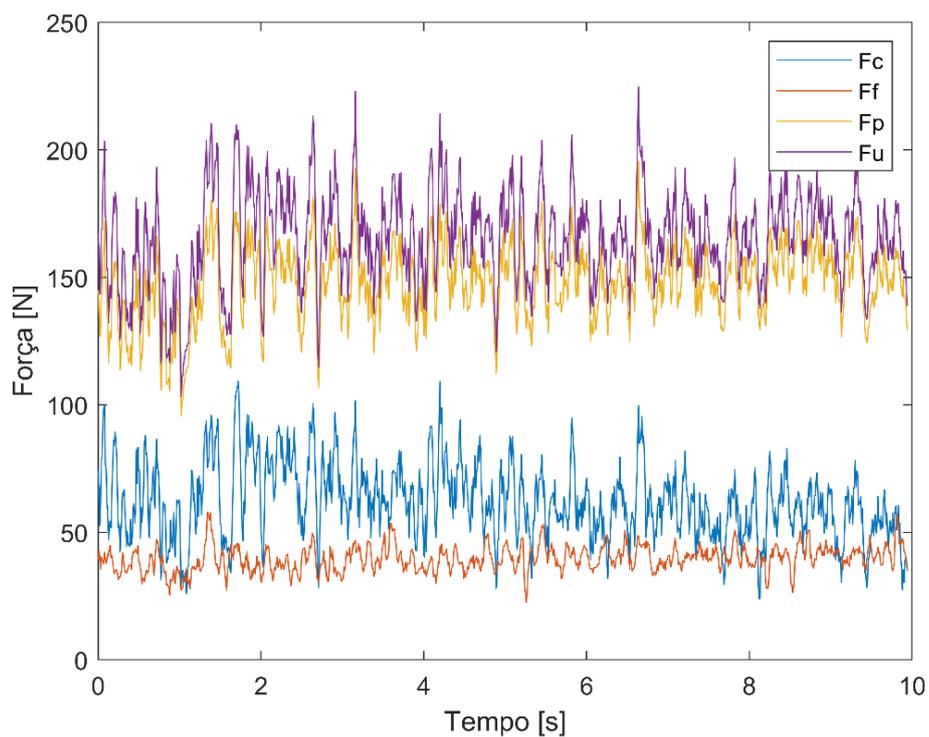


Figura 3.16 – Exemplo da medição das forças de corte para a condição a seco, avanço de 0,10 mm/rev e velocidade de corte de 240 m/min

3.4.3. MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE

A medição de rugosidade foi realizada com um rugosímetro TaylorHobson® modelo Surtronic-S128, com resolução de 0,05 μm e agulha do apalpador de diamante com raio de ponta de 0,2 μm . O rugosímetro foi montado em um suporte no qual era possível realizar as medições sem a retirada da peça da castanha, conforme a figura 3.17.

As medições da rugosidade foram realizadas durante a primeira réplica do teste de vida, feitas três medições para cada condição de corte no início da usinagem, ou seja, com a aresta nova, além de mais três medições no fim da usinagem de cada condição, com a aresta de corte já desgastada. Cada medição foi feita com espaçamento de 120°, mediante da rotação do tarugo no torno. Foi utilizado o filtro Gaussiano (*cut-off*) de 0,8 mm. Os arquivos gerados foram tratados no *software* TalyProfile Silver 8.2, conforme a norma ISO 4287 (2002), com filtro de nível, considerando os parâmetros R_a , R_z e R_q , conforme a figura 3.18. Estes foram utilizados posteriormente na análise estatística, com a diferença dos outros ensaios que foi incluído um quarto nível, correspondente a condição da aresta, o qual será nova, ou seja, no início da usinagem da aresta, ou gasta, com a aresta próxima do fim de vida.



Figura 3.17 – Rugosímetro Surtronic-S128 montado sobre o suporte para medição da rugosidade da peça no torno

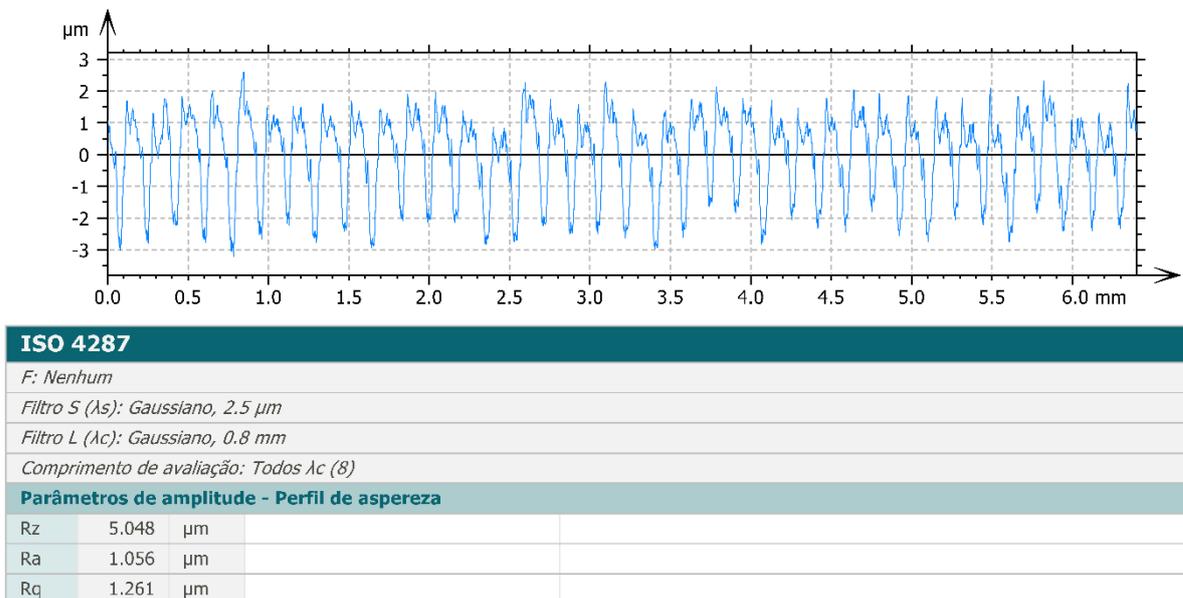


Figura 3.18 – Perfil de rugosidade para segunda medição para a condição a seco, avanço de 0,15 mm/rev e velocidade de corte de 160 m/min

3.4.4. ENSAIO DE VIDA DA FERRAMENTA

Para a mediação do desgaste foi utilizado o microscópio ferramenteiro SZ6145TR do fabricante OLYMPUS com o software Image-Pro Express, figura 3.19. O critério de fim de

vida utilizado é o desgaste de flanco máximo de 0,3 mm. Foram feitas no mínimo três paradas por aresta a fim de determinar a curva de vida, com o intervalo de paradas se diferenciando para cada condição, a figura 3.20 mostra um exemplo da medição de desgaste em uma das arestas.



Figura 3.19 – Microscópio ferramenteiro ‘SZ6145TR – OLYMPUS’

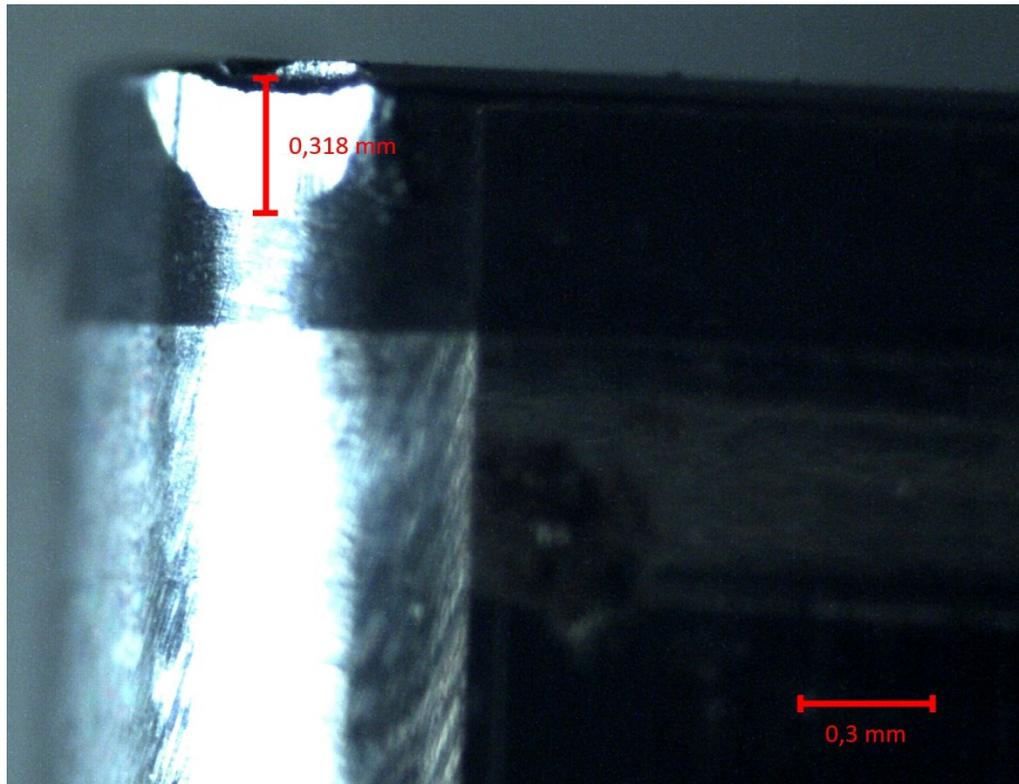


Figura 3.20 – Desgaste da ferramenta para a segunda réplica da condição FRI, avanço de 0,15 mm/rev e velocidade de corte de 160 m/min

Em cada parada do teste de vida, foi aferido o comprimento máximo do desgaste de flanco, medido entre a projeção da aresta do chanfro da ferramenta nova e o fim da marca do desgaste. Também foi aferido o valor da posição no eixo longitudinal do torno (Eixo Z), sendo que a diferença entre o valor inicial (Z_1) e o registrado em cada parada (Z_i) corresponde ao comprimento usinado ($L_{m,i}$), conforme a equação 3.2.

$$L_{m,i} = Z_i - Z_1 \quad (3.2)$$

Ao ultrapassar o desgaste de flanco de 0,3 mm, foi realizado uma interpolação linear a fim de determinar o comprimento usinado no fim de vida da aresta ($L_{m,fin}$), conforme a equação 3.3. Foi utilizado o comprimento usinado no ponto que ultrapassa o fim de vida ($L_{m,i}$), e o desgaste de flanco nesse ponto ($V_{B,i}$), além do ponto anterior a este ($L_{m,i-1}$), e o seu respectivo desgaste de flanco ($L_{m,i-1}$), para esta etapa foi utilizado o programa Microsoft Excel. A figura 3.21 mostra as curvas de vida para os três ensaios de vida da condição FRI, avanço de 0,15 mm/rev e velocidade de corte de 240 m/min.

$$L_{m, fim} = M_{i-1} + (L_{m,i} - L_{m,i-1}) * \left(\frac{0,3 - V_{B,i-1}}{V_{b,i} - V_{B,i-1}} \right) \quad (3.3)$$

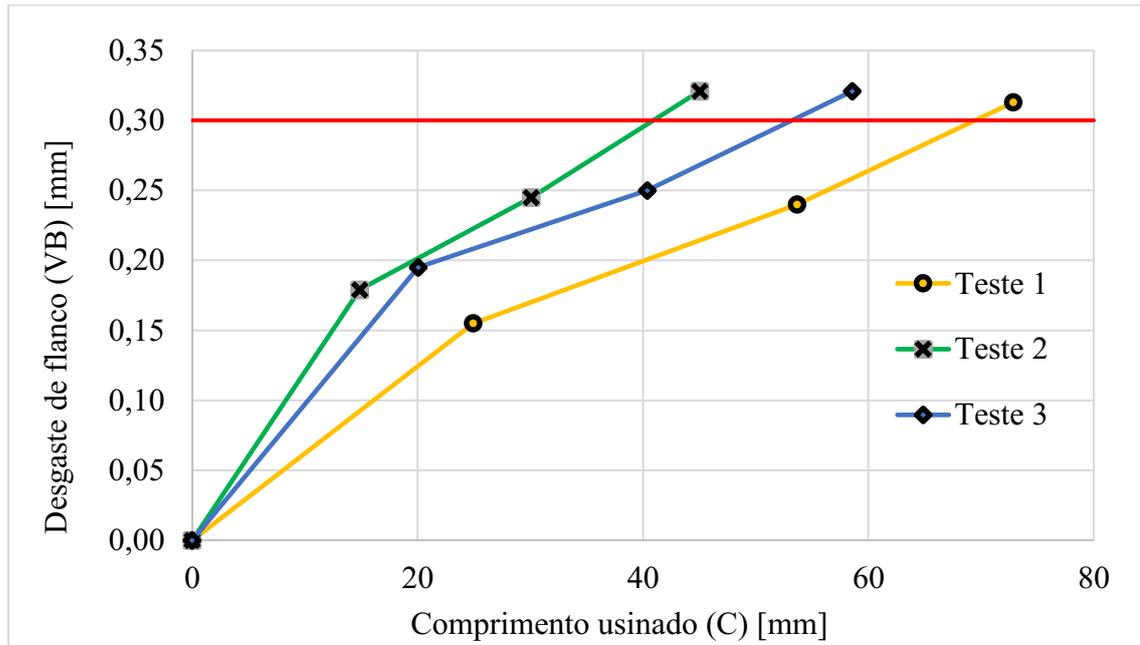


Figura 3.21 – Exemplo das curvas de vida para a condição FRI, avanço de 0,15 mm/rev e velocidade de corte de 240 m/min

Devido a diferença dos diâmetros entre os ensaios, os resultados finais do teste de vida, os quais serão utilizados nos testes estatísticos, foram convertidos em volume de material removido (V_r), através da equação 3.4. Foi utilizado o comprimento usinado no fim de vida de aresta ($L_{m, fim}$), o diâmetro (D_m) e a profundidade de corte (a_p), que se manteve constante em 0,15 mm/rev em todos os ensaios.

$$V_r = \pi * D_m * a_p * L_{m, fim} \quad (3.4)$$

3.4.5. MECANISMO DE DESGASTE

Após o teste de vida, foi selecionada uma aresta de cada condição para determinar o mecanismo de desgaste. Para a análise, foram tiradas fotos com ampliação de 200 vezes na

superfície de saída, 300 e 500 vezes na superfície de folga primária e 400 vezes na superfície de folga secundária. As ferramentas foram limpas pela imersão em etanol hidratado em uma banheira ultrassônica Cleaner DNS 3060. Foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura (MEV) modelo TM3000 da marca Hitachi, figura 3.22a. A figura 3.22b mostra o posicionamento das ferramentas de corte no MEV para a análise na superfície de saída.



Figura 3.22 – a) MEV TM300, b) posicionamento dos insertos no MEV

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS E DICUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados experimentais encontrados nesse trabalho, de modo a verificar a influência das variáveis refrigeração, avanço e velocidade de corte, uma vez que a profundidade de corte foi mantida constante com 0,15 mm/rev. São apresentados os resultados da análise termográfica, forças de corte e de usinagem, rugosidade (R_a , R_q e R_z) e vida da ferramenta. As tabelas com todos os dados estão disponíveis no Apêndice II, item 7.2. Com essas análises pretende-se atingir os objetivos preconizados, ou seja, confirmar o desenvolvimento de um sistema de refrigeração interna de ferramentas de PCBN aplicado na usinagem do aço endurecido ABNT D6 com sucesso.

4.1. ANÁLISE TERMOGRÁFICA

4.1.1. ANÁLISE TERMOGRÁFICA NA SUPERFÍCIE DE SAÍDA

Antes de iniciar os testes com a câmera térmica durante a usinagem do material, foi realizado uma medição da temperatura da superfície de saída da ferramenta sem usinar, primeiro sem ligar o fluido refrigerante e depois ligando o fluido de refrigeração interna, para comparação. Os resultados são mostrados na figura 4.1, onde é possível observar a redução da temperatura com o sistema FRI ligado, com a superfície da ferramenta de corte apresentando a menor temperatura de 5,7 °C, valor consideravelmente menor do que quando o fluido não estava circulando no interior da ferramenta, situação na qual a temperatura mínima encontrada foi de 23,3 °C. Essa diferença é causada pela circulação do fluido secundário com temperatura próxima de 0 °C, sendo este um indicativo que as galerias de refrigeração interna conseguem retirar calor através da convecção.

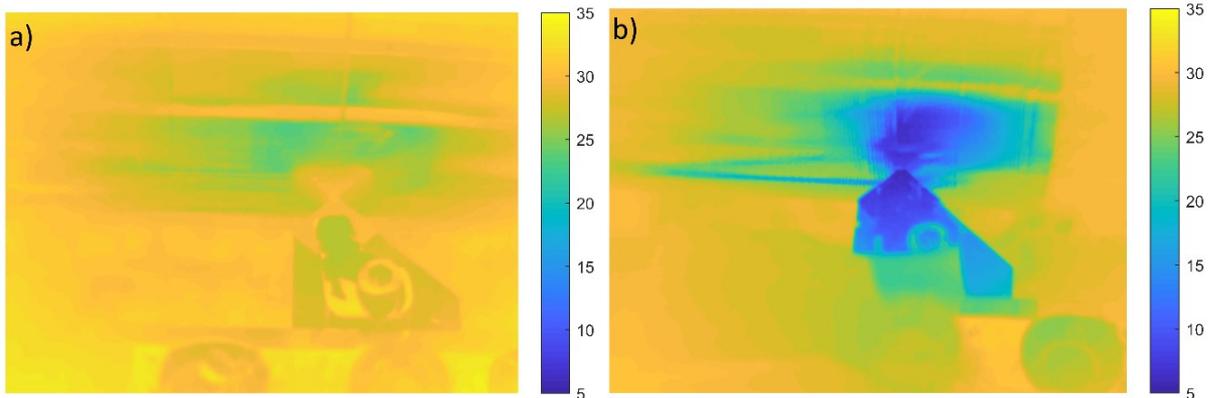


Figura 4.1 – Imagem termográfica sem usinagem da superfície de saída da ferramenta, com escala em °C, a) sistema de refrigeração desligado, b) sistema de refrigeração ligado

Nos testes com o torno em funcionamento, foram considerados os últimos frames dos vídeos de 15 segundos para cada uma das oito condições de corte mostradas tabela 3.3, presente na metodologia. A figura 4.2 mostra o mapa de temperatura na superfície de saída da ferramenta em todas as condições de corte, e a figura 4.3 mostra as temperaturas médias no ponto ‘A’, próximo a interface cava-ferramenta, e no ponto ‘B’, mais distante da ferramenta. Com estes dados foram feitas as análises estatísticas para a temperatura na ferramenta. A localização destes pontos é mostrada na figura 3.13 no tópico 3.4.1.

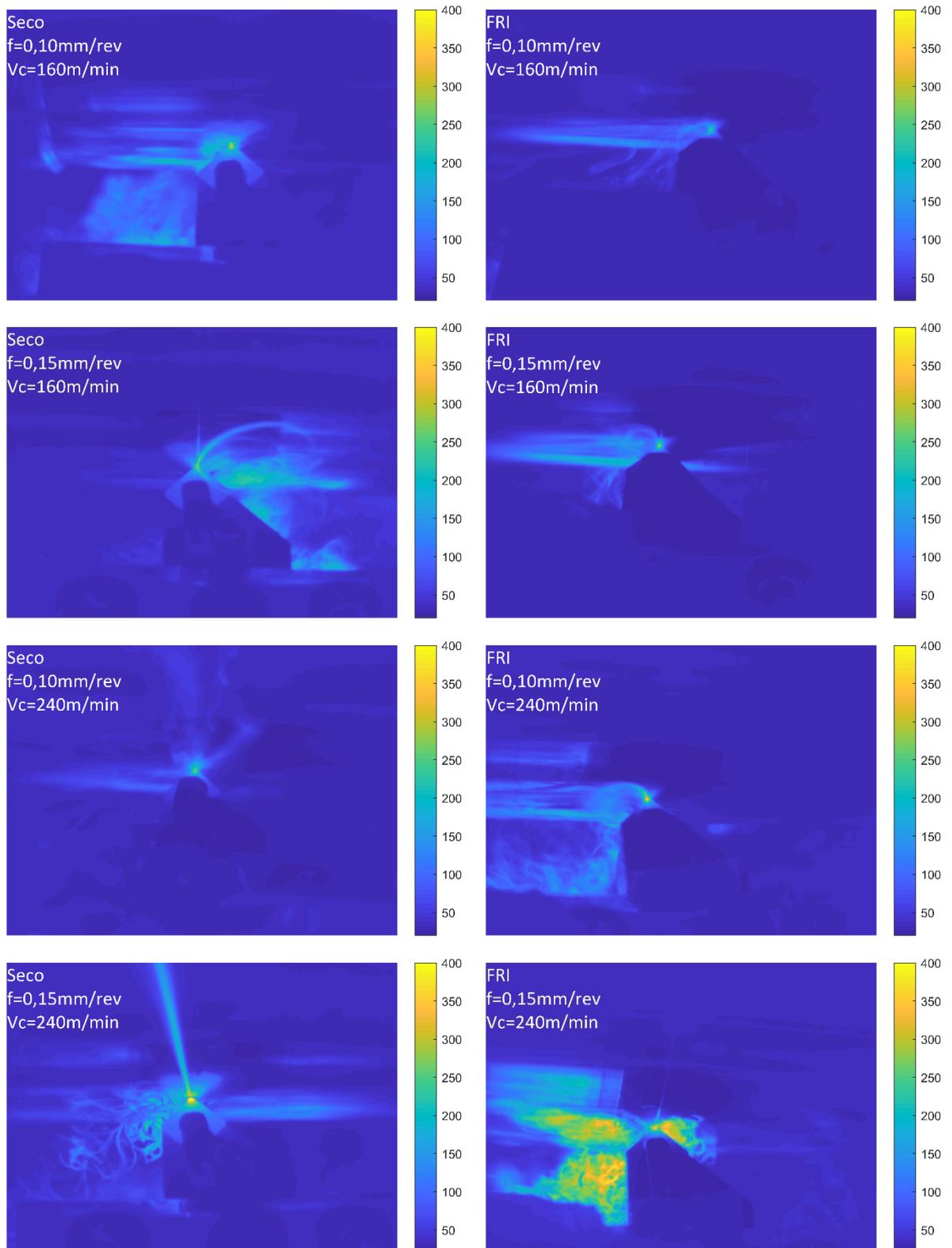


Figura 4.2 – Mapa de temperatura da região de corte para as diversas condições testadas

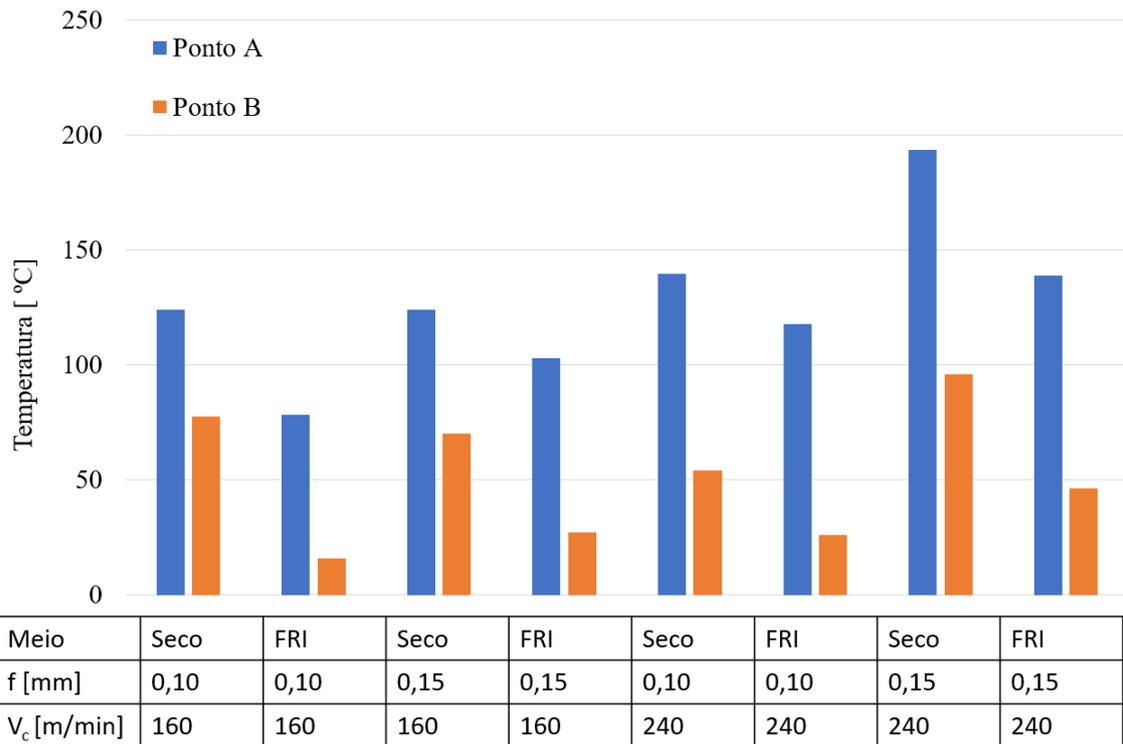


Figura 4.3 – Temperaturas médias encontradas nos pontos “A” e “B” na superfície de saída da ferramenta (conforme figura 3.13) para as diversas condições testadas.

As tabelas 4.1 e 4.2 mostram as análises de variância (ANOVA), considerando todas as variáveis de entrada para as temperaturas no ponto ‘A’ e ‘B’, respectivamente. Observa-se que nenhuma variável e suas interações foram consideradas significativas para o comportamento da temperatura ($p > 0,05$), para um índice de confiança de 95%, nível de significância de 5 % e coeficiente de correlação (R^2) de 0,94692 e 0,9634, respectivamente.

Tabela 4.1 – Análise de variância para a temperatura no ponto ‘A’

Fator	S.Q.	G.L.	Q.M.	F	Valor-p
Meio	2552,551	1	2552,551	6,176305	0,243543
Avanço	1252,501	1	1252,501	3,030627	0,331935
Velocidade	3228,061	1	3228,061	7,810810	0,218752
Meio X Avanço	9,461	1	9,461	0,022893	0,904402
Meio X Velocidade	11,761	1	11,761	0,028458	0,893607
Avanço X Velocidade	318,781	1	318,781	0,771342	0,541205

Erro	413,281	1	413,281
Total S.Q.	7786,399	7	

Tabela 4.2 – Análise de variância para a temperatura no ponto ‘B’

Fator	S.Q.	G.L.	Q.M.	F	Valor-p
Meio	4144,596	1	4144,596	20,46635	0,138494
Avanço	539,726	1	539,726	2,66521	0,349879
Velocidade	126,962	1	126,962	0,62695	0,573642
Meio X Avanço	1,178	1	1,178	0,00582	0,951537
Meio X Velocidade	90,653	1	90,653	0,44765	0,624609
Avanço X Velocidade	427,050	1	427,050	2,10881	0,383913
Erro	202,508	1	202,508		
Total S.Q.	5532,673	7			

A figura 4.4 apresenta o diagrama de Pareto para as temperaturas na ferramenta de corte no ponto ‘A’, o qual é mais próximo a aresta de corte e a figura 4.5 para o ponto ‘B’ mais afastado. Apesar dos fatores não se apresentarem estatisticamente significativos, os diagramas mostram a ordem dos fatores mais influentes no aumento da temperatura.

No ponto mais próximo à aresta de corte, a velocidade de corte foi o fator com maior relevância devido a maior potência envolvida no processo, no qual o aumento da velocidade de corte tendeu a aumentar a temperatura. O meio foi o segundo fator com maior relevância, com sistema de FRI reduzindo a temperatura em 24,6 %, em média em relação à usinagem a seco, devido a maior refrigeração. Já o avanço tendeu a elevar a temperatura devido a maior área de contato do cavaco com a ferramenta.

Em relação ao ponto mais distante da aresta de corte, a refrigeração teve maior impacto na temperatura, com a média de redução de temperatura 61,1 %, uma vez que a maior distância da zona de geração de calor mostrou maior diferença das temperaturas pela presença do fluido secundário circulando no interior das galerias internas. Outros fatores como aumento avanço e

velocidade de corte os quais tenderam a elevar a temperatura, e as interações entre os fatores, tiveram menor influência.

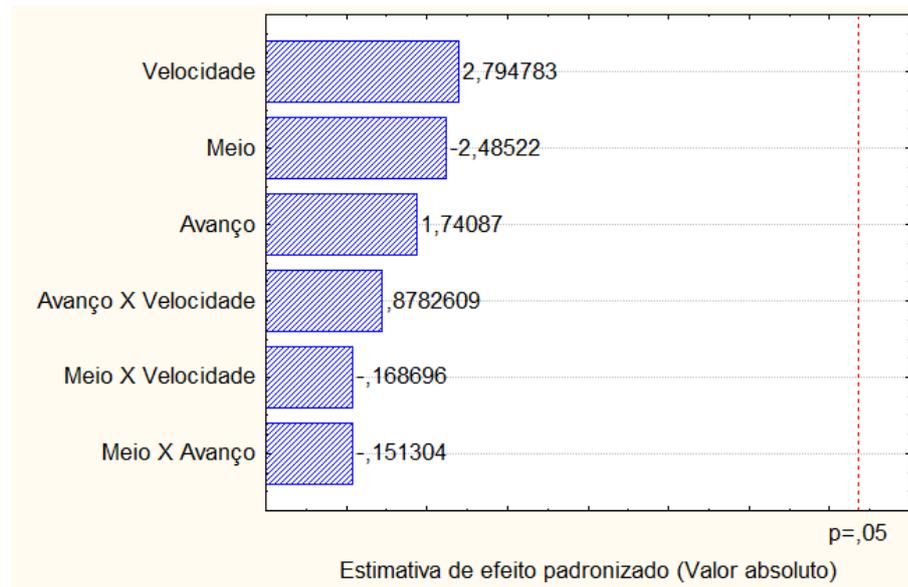


Figura 4.4 – Diagrama de Pareto para a temperatura no ponto 'A'

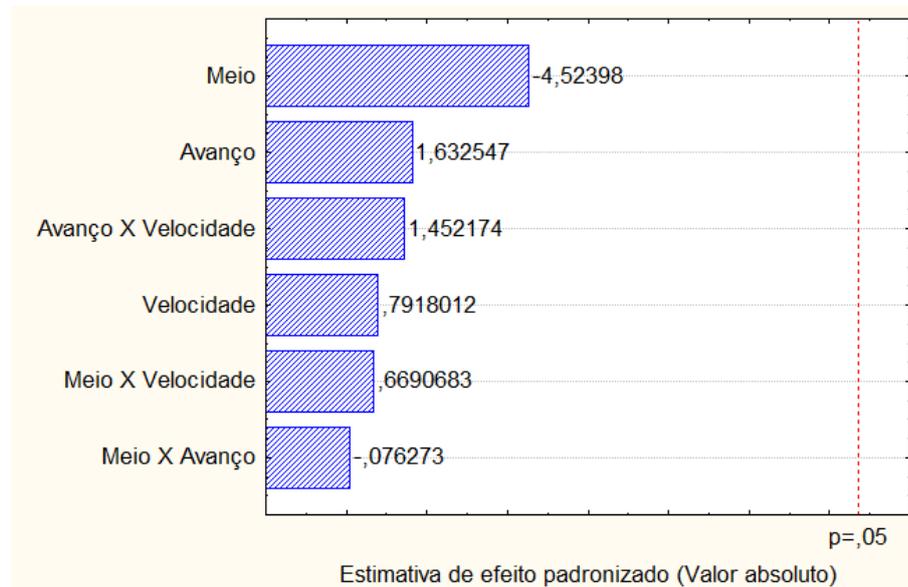


Figura 4.5 – Diagrama de Pareto para a temperatura no ponto 'B'

As dispersões dos resíduos brutos em função dos valores preditos para a temperatura nos pontos 'A' e 'B' são mostradas nas figuras 4.6 e 4.7, respectivamente. Os modelos tenderam

a padronizar a diferença entre o valor real e o esperado, devido a não existência de réplicas e haver interação entre os fatores.

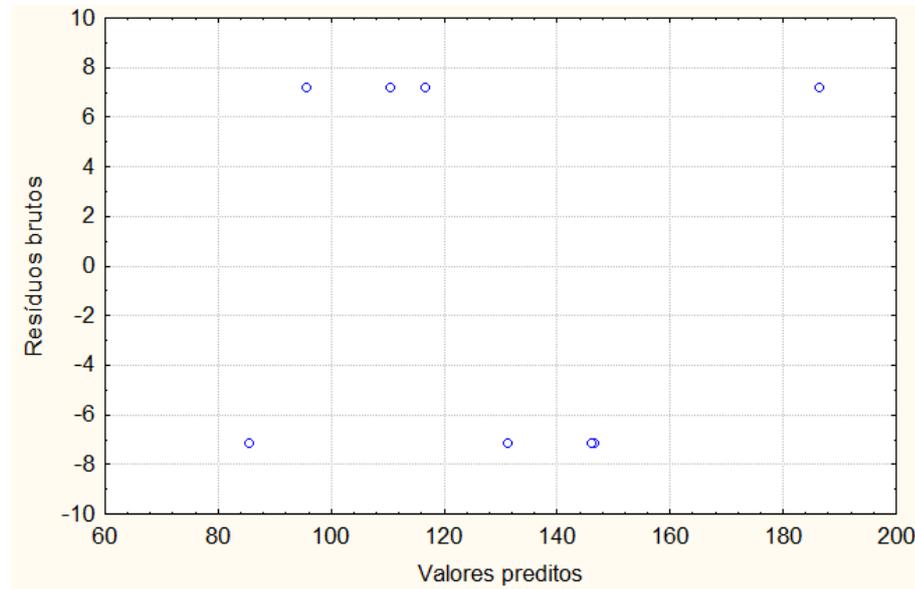


Figura 4.6 – Resíduos brutos em função dos valores preditos para a temperatura no ponto ‘A’

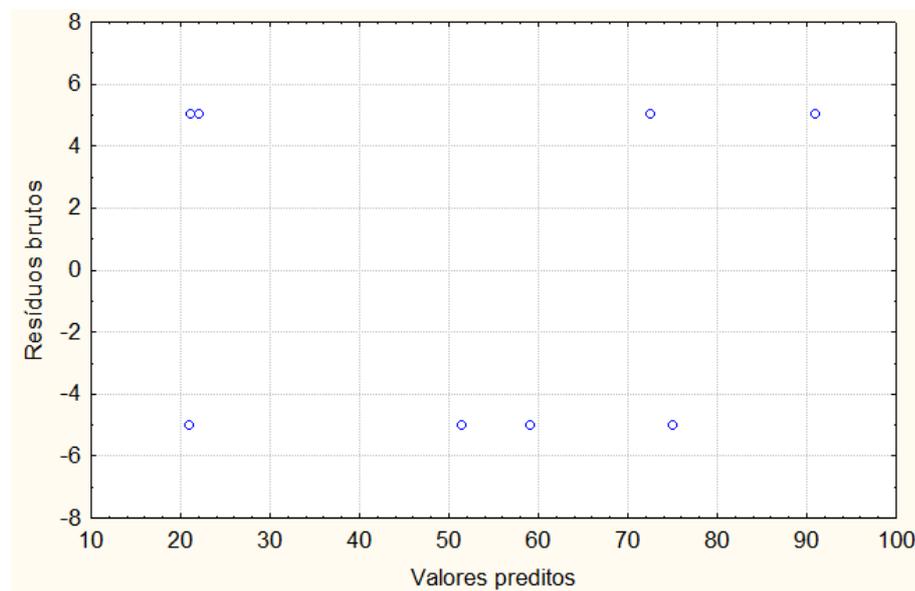


Figura 4.7 – Resíduos brutos em função dos valores preditos para a temperatura no ponto ‘B’

4.1.2. ANÁLISE TERMOGRÁFICA DAS TEMPERATURAS MÁXIMAS

A figura 4.8 mostra as maiores temperaturas aferidas em cada condição e a média das maiores temperaturas nos últimos 5 segundos, onde a barra de erro representa o desvio padrão da média das temperaturas máximas obtidas em cada quadro do vídeo.

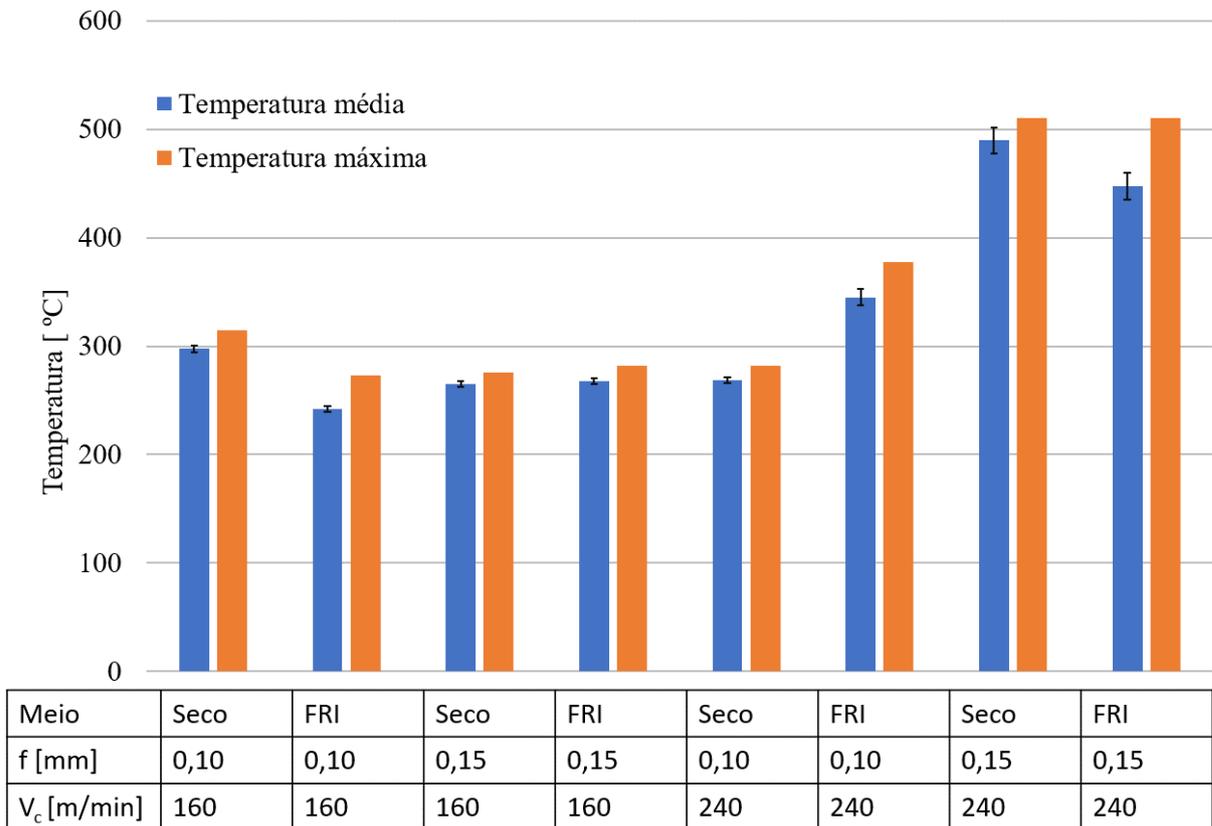


Figura 4.8 – Resultados da medição de temperatura

Para a análise das temperaturas de usinagem, optou-se por escolher a média das temperaturas máximas. A tabela 4.3 mostra a análise de variância considerando todas as variáveis de entrada. Observa-se que nenhuma variável e também suas interações foram consideradas significativas para o comportamento da temperatura máxima. O coeficiente de correlação (R^2) foi de 0,93489.

Tabela 4.3 – Análise de variância para a temperatura média

Fator	S.Q.	G.L.	Q.M.	F	Valor-p
Meio	43,78	1	43,78	0,011167	0,932975
Avanço	12543,85	1	12543,85	3,199260	0,324542

Velocidade	28690,02	1	28690,02	7,317274	0,225426
Meio X Avanço	453,98	1	453,98	0,115785	0,791200
Meio X Velocidade	958,92	1	958,92	0,244569	0,707620
Avanço X Velocidade	13609,04	1	13609,04	3,470930	0,313611
Erro	3920,86	1	3920,86		
Total S.Q.	60220,45	7			

A partir do diagrama de Pareto para a média das temperaturas máximas, figura 4.9, apesar de não ser estatisticamente significativo, a velocidade foi o fator mais influente, mediante ao acréscimo da potência de corte. O aumento do avanço também elevou as temperaturas, devido a maior energia envolvida no processo, outro fator que pode contribuir, é que o aumento da espessura do cavaco favoreça a sensibilidade da leitura dos *pixels* da câmera.

Apesar do meio refrigerante ter sido o fator menos influente, ele reduziu a temperatura em três das quatro comparações, com redução média de 1,4 % aproximadamente. Portanto, não significa que o sistema FRI não é efetivo em reduzir temperatura da ferramenta, ou na interface cavaco-ferramenta. A câmara termográfica mede as temperaturas externas, considerando todo o sistema peça/cavaco/ferramenta/suporte. A utilização de outro sistema de medição, como por exemplo o método do termopar ferramenta-peça, que mede a temperatura na interface pode mostrar resultados diferentes para as temperaturas máximas. No trabalho de França (2021), o qual utilizou termopar ferramenta-peça no torneamento de ferro fundido cinzento, o sistema FRI reduziu as temperaturas na interface em até 21,5 %, em comparação a usinagem a seco sem refrigeração.

Em relação as interações, a união do avanço com a velocidade foi o mais influente. Nas interações com o sistema de refrigeração, a união deste com a velocidade mostra que o sistema é mais efetivo em menores velocidades, devido ao maior tempo de troca, para a interação do meio com o avanço, a maior área de contato provocou a diminuição da temperatura.

Comparando a estatística das temperaturas na ferramenta de corte com as temperaturas máximas nos quadros, as quais ocorrem no cavaco. É possível afirmar que a maior diferença foi notada na superfície da ferramenta, apesar de ambos tenderem a reduzir a temperatura com a utilização do sistema de refrigeração por galerias internas.

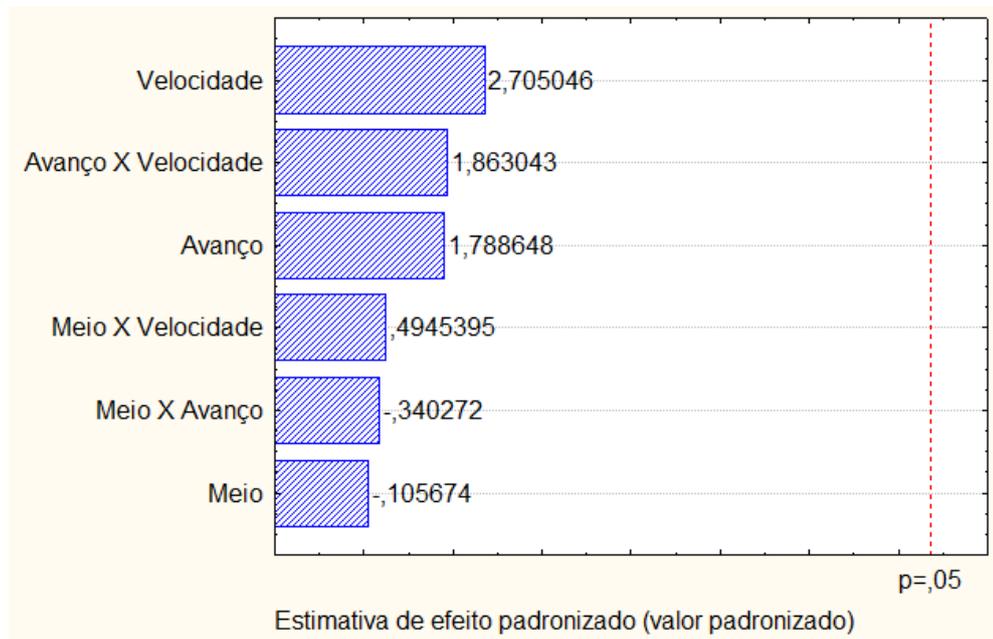


Figura 4.9 – Diagrama de Pareto para as médias das maiores temperaturas dos quadros

A dispersão dos resíduos em função dos valores preditos para a média das temperaturas máximas, figura 4.10, mostra que o modelo tendeu padronizar a diferença entre o valor real e o esperado, devido a não utilização de réplicas e haver interação entre os fatores.

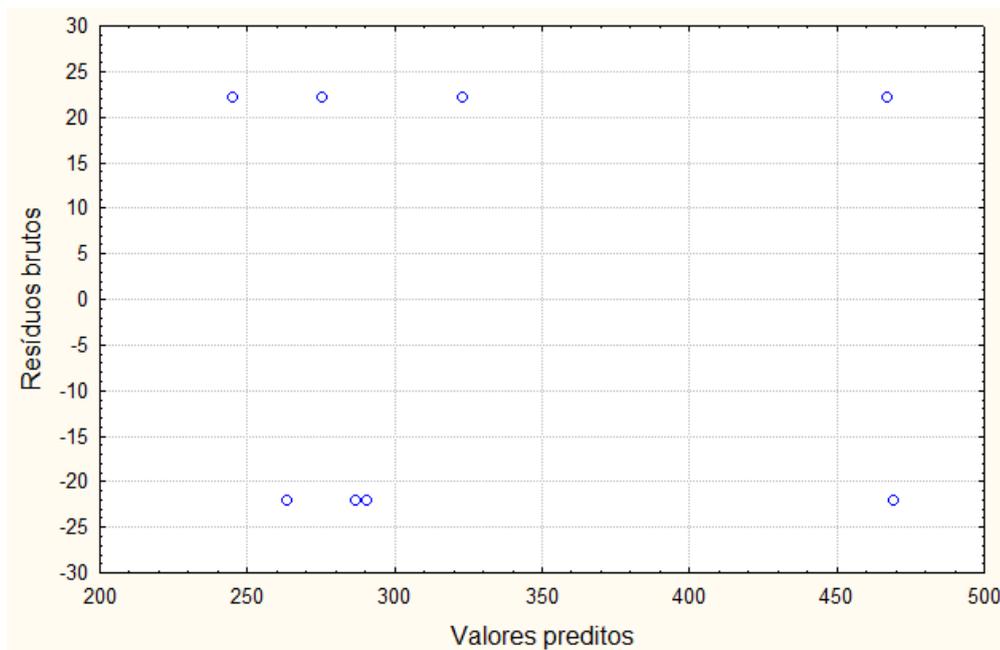


Figura 4.10 – Resíduos brutos em função dos valores preditos para as médias das maiores temperaturas dos quadros

4.2. FORÇAS AVALIADAS NO PROCESSO DE USINAGEM

A figura 4.11 mostra os resultados das componentes das forças além da força de usinagem (F_u) para todas as condições de corte no trabalho. A barra de erro representando o desvio padrão entre os pontos obtidos. Em todos os testes, a força passiva (f_p) foi a que apresentou maiores valores, isso se deve ao alto raio de arredondamento da aresta de corte, 1 mm, em comparação a profundidade de corte muito pequena, 0,15 mm/rev, o que favorece a maior força passiva em relação a força de corte e de avanço, o ângulo de saída negativo da ferramenta, tende a afastar a ferramenta da peça, fato agravado pelo chanfro da ferramenta. O maior valor da força passiva também foi encontrado no trabalho de (CHEN, 2000).

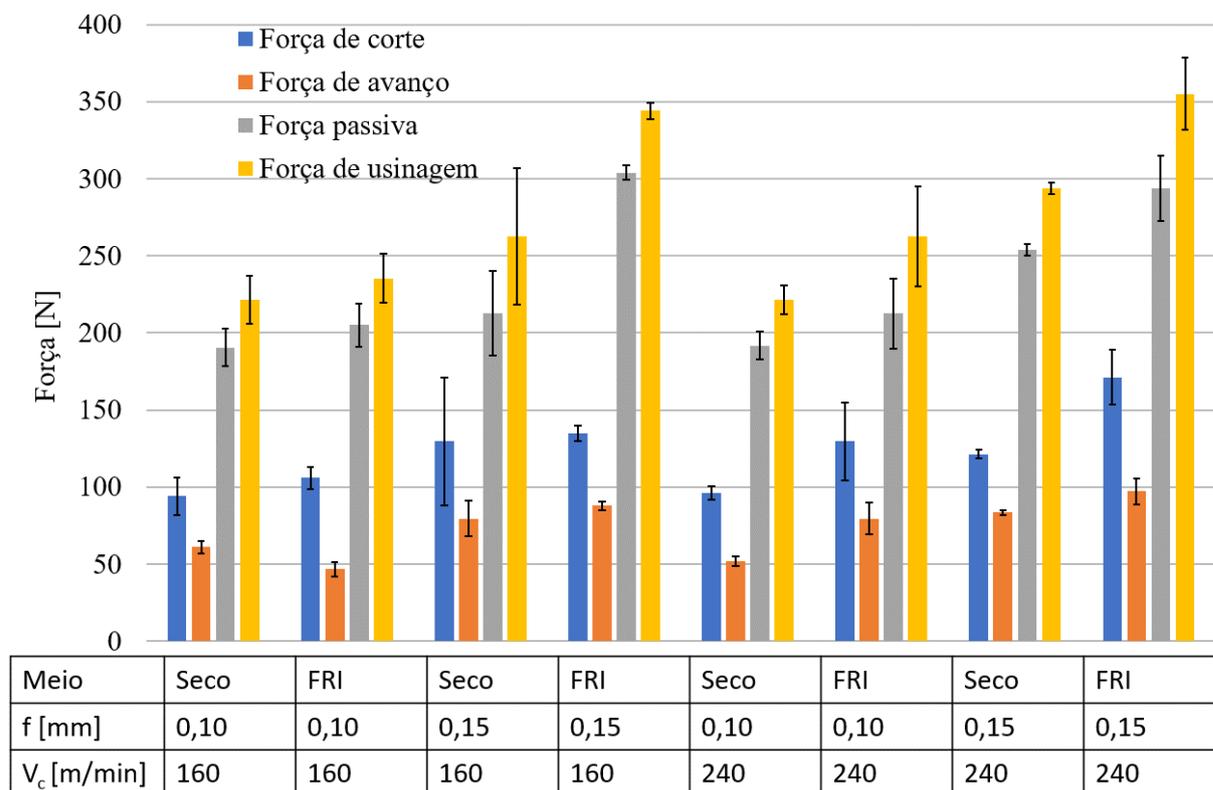


Figura 4.11 – Resultados do teste de força em cada componente

4.2.1. FORÇA DE CORTE

Para a análise do efeito da refrigeração interna da ferramenta, optou-se por escolher a força de corte (F_c) e a força de usinagem (F_u), por representarem a componente considerada, normalmente, a mais importante e a força total. A tabela 4.4 mostra a análise de variância (ANOVA) da força de corte (F_c) considerando todas as variáveis de entrada. Observa-se que nenhuma variável e também suas interações foram consideradas significativas para o comportamento da força de corte, o coeficiente de correlação (R^2) foi de de 0,9835.

Tabela 4.4 – Análise de variância preliminar para a força de corte com todos os fatores

Fator	S.Q.	G.L.	Q.M.	F	Valor-p
Meio	1261,526	1	1261,526	17,11942	0,150968
Avanço	2174,701	1	2174,701	29,51156	0,115891
Velocidade	372,099	1	372,099	5,04953	0,266553
Meio X Avanço	13,210	1	13,210	0,17926	0,745028
Meio X Velocidade	568,856	1	568,856	7,71961	0,219941
Avanço X Velocidade	0,938	1	0,938	0,01274	0,928460
Erro	73,690	1	73,690		
Total S.Q.	4465,021	7			

Ao analisar o diagrama de Pareto, figura 4.12, é possível concluir que o avanço é responsável pela variação da força de corte de forma diretamente proporcional, isto se deve a maior área a ser cisalhada. O meio foi o segundo fator mais influente, com o sistema de refrigeração sendo responsável pelo aumento da força de corte em 18,5 %. Este resultado corrobora com a hipótese lançada no tópico 4.1, Análise Termográfica, na qual a menor temperatura na superfície de saída mostrada por imagem térmica influencia na interface cavaco-ferramenta. A diminuição da temperatura de corte tende a aumentar as forças de corte, devido ao menor amolecimento térmico que, quando crescente, as forças tendem a cair conforme a temperatura se eleva.

A interação entre a velocidade e o meio apresentou valores crescentes, uma possível interpretação é que o sistema FRI obteve maior resfriamento em maiores velocidade de corte, as quais teoricamente causariam maior temperatura. Diferente do encontrado na literatura, no

qual a maior velocidade eleva a temperatura e por consequência reduz as forças de corte, o aumento da velocidade elevou a força de corte.

Em comparação com outros trabalhos, Bonfá (2019), não encontrou nenhuma variável significativa, enquanto Camargo et al. (CAMARGO et al., 2014) encontrou somente o avanço como significativo.

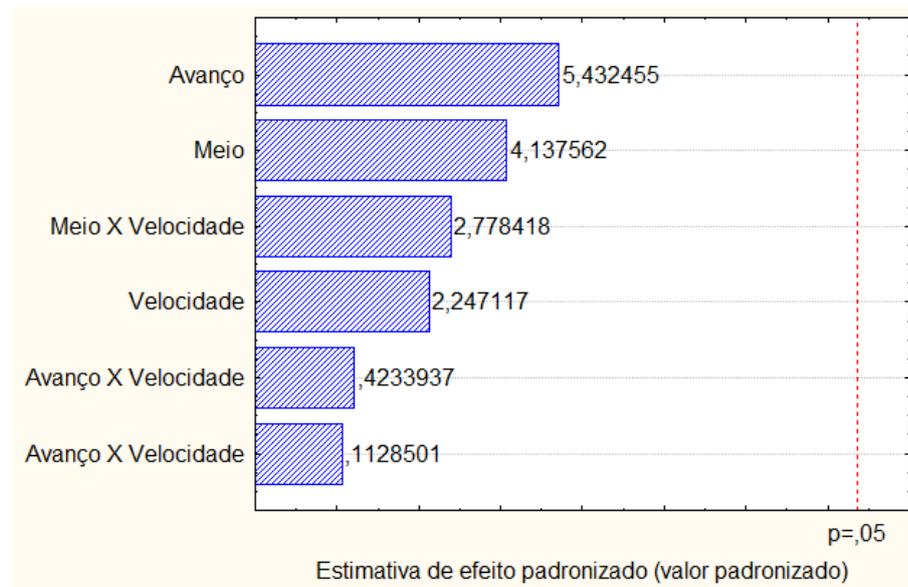


Figura 4.12 – Diagrama de Pareto para o teste de força de corte

Devido a não utilização de réplicas no fatorial de dois níveis e três fatores, ao observar o gráfico do resíduo em função do valor predito, figura 4.13, os resíduos tenderam ao espaçamento uniforme.

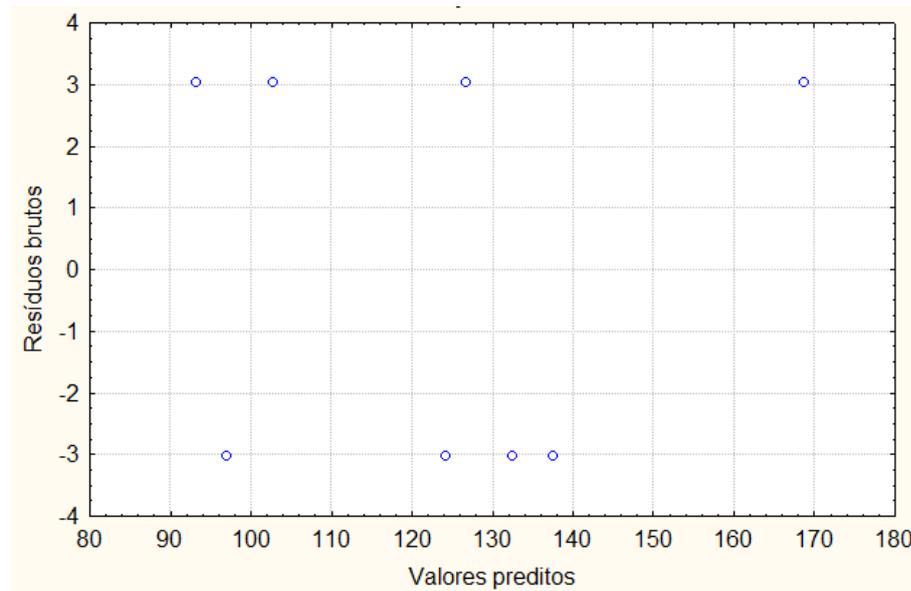


Figura 4.13 – Resíduos brutos em função dos valores preditos para a força de corte

4.2.2. FORÇA DE USINAGEM

Seguindo o mesmo comportamento da análise estatística da força de corte, a força de usinagem (F_u) não apresentou fatores significativos na ANOVA considerando as variáveis de entrada independentes e suas interações de segunda ordem, conforme a tabela 4.5, o coeficiente de determinação (R^2) foi de 0,8748.

Tabela 4.5 – Análise de variância preliminar para a força de usinagem com todos os fatores

Fator	S.Q.	G.L.	Q.M.	F	Valor-p
Meio	2443,01	1	2443,005	1,551383	0,430663
Avanço	7793,76	1	7793,761	4,949277	0,268932
Velocidade	16,07	1	16,074	0,010208	0,935898
Meio X Avanço	107,75	1	107,751	0,068425	0,837121
Meio X Velocidade	412,42	1	412,419	0,261899	0,698871
Avanço X Velocidade	233,93	1	233,928	0,148552	0,765802
Erro	1574,73	1	1574,727		
Total S.Q.	12581,67	7			

A análise do diagrama de Pareto para a força de usinagem, figura 4.14, mostra que a ordem de influência dos efeitos significativos foi a mesma que a força de corte, com o avanço sendo o maior responsável pela força de corte, seguido pela ação do sistema de refrigeração, o qual reduziu a força de usinagem em 1,41 %. A figura 4.15 mostra que o comportamento dos resíduos em função dos valores preditos, se comportaram de maneira parecida com a força de corte, devido as características do planejamento fatorial utilizado.

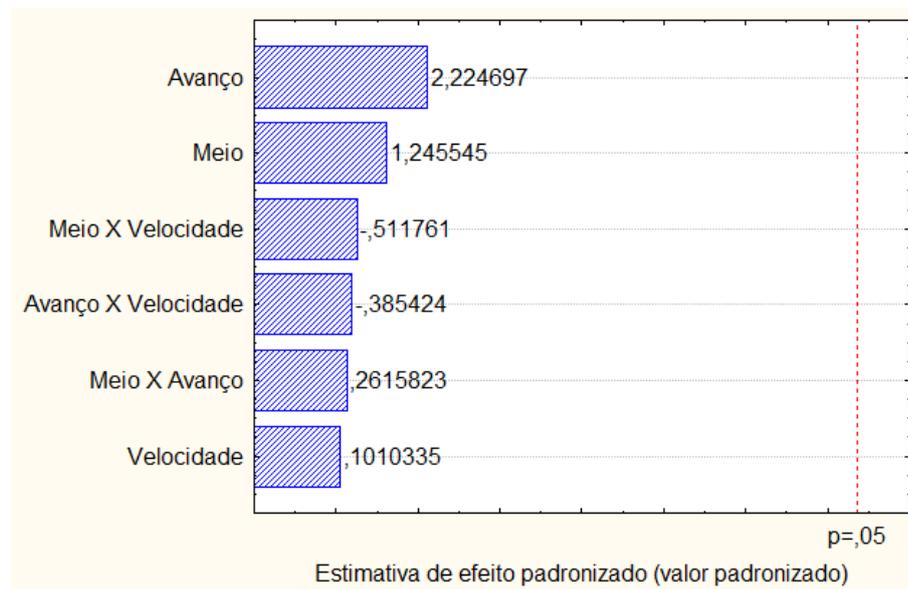


Figura 4.14 – Diagrama de Pareto para a força de usinagem

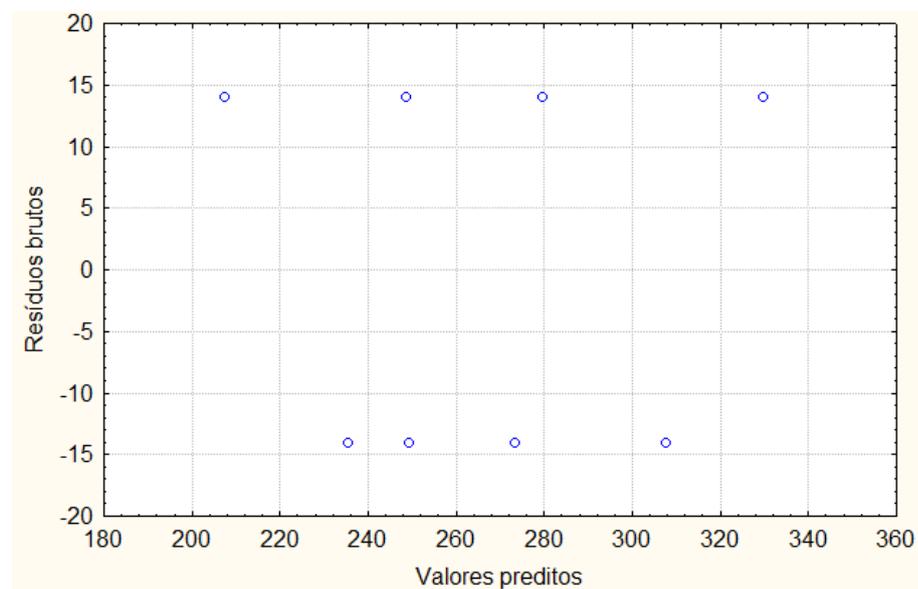


Figura 4.15 – Resíduos brutos em função dos valores preditos para a força de usinagem

4.3. RUGOSIDADE AVALIADA NA SUPERFÍCIE USINADA

Diferente da força de corte, a qual a medição foi realizada somente com a ferramenta nova, logo após a sua troca, na rugosidade foi considerado um quarto fator em sua análise, o desgaste da ferramenta. Os parâmetros de rugosidade foram medidos no início da vida da ferramenta, isto é, com a aresta nova, nível inferior (-1) e no final da vida, isto é, com aresta gasta, nível superior (+1). As figuras 4.16, 4.17 e 4.18, mostram as rugosidades R_a , R_q e R_z , respectivamente, sendo que a barra de erro representa o desvio padrão das três medições.

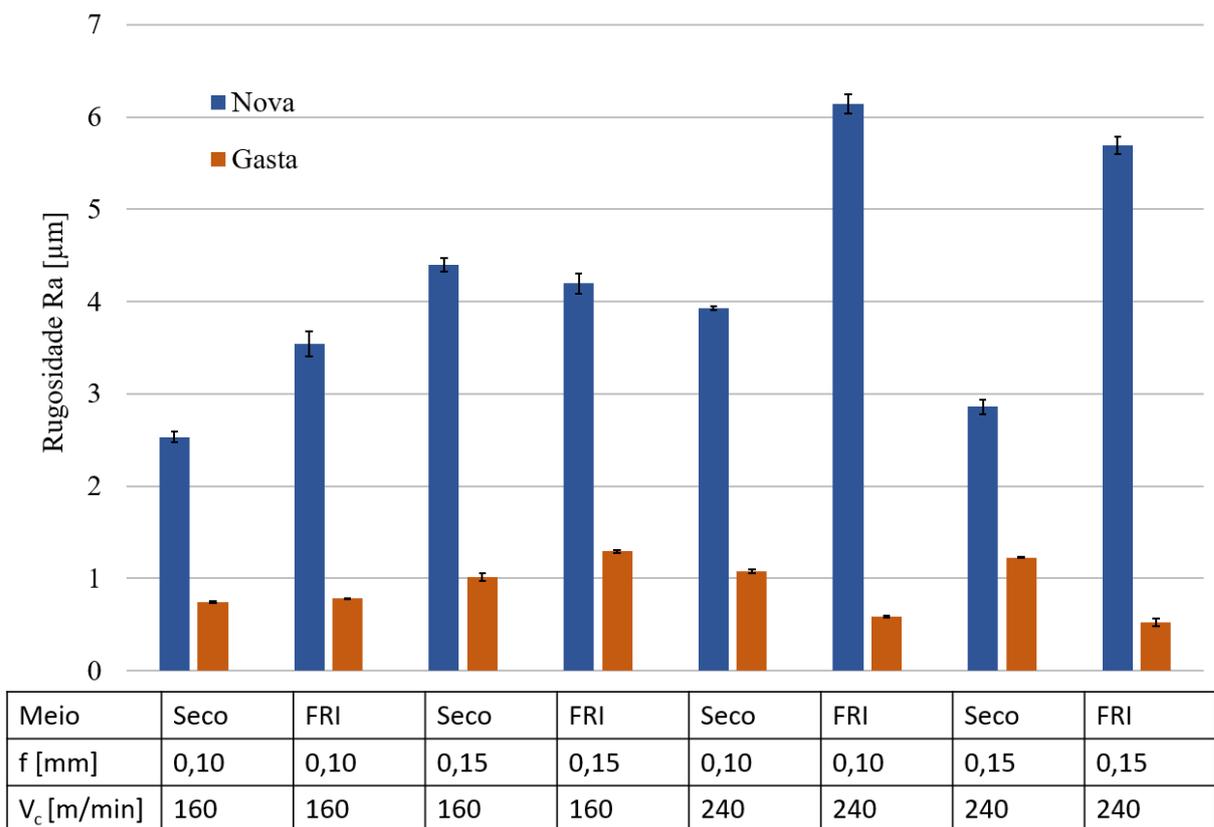


Figura 4.16 – Resultados para a rugosidade R_a para a ferramenta nova e gasta

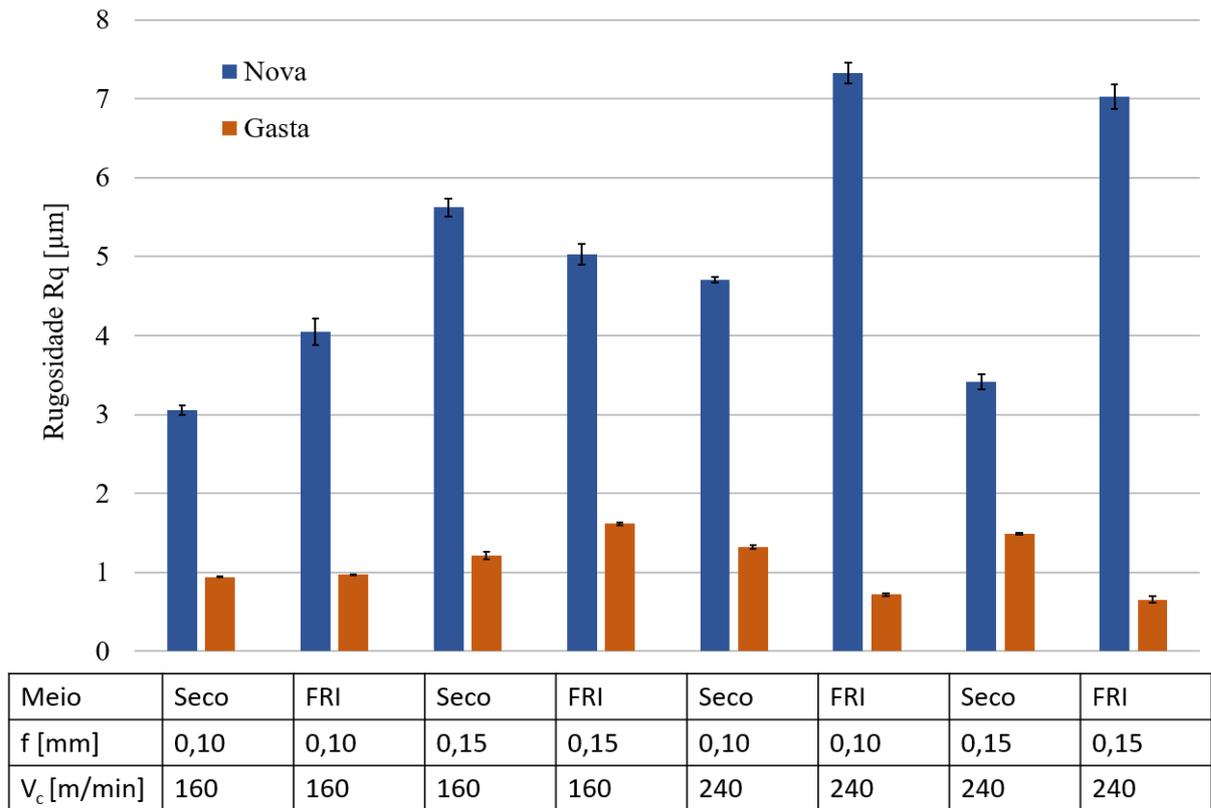


Figura 4.17 – Resultados para a rugosidade R_q para a ferramenta nova e gasta

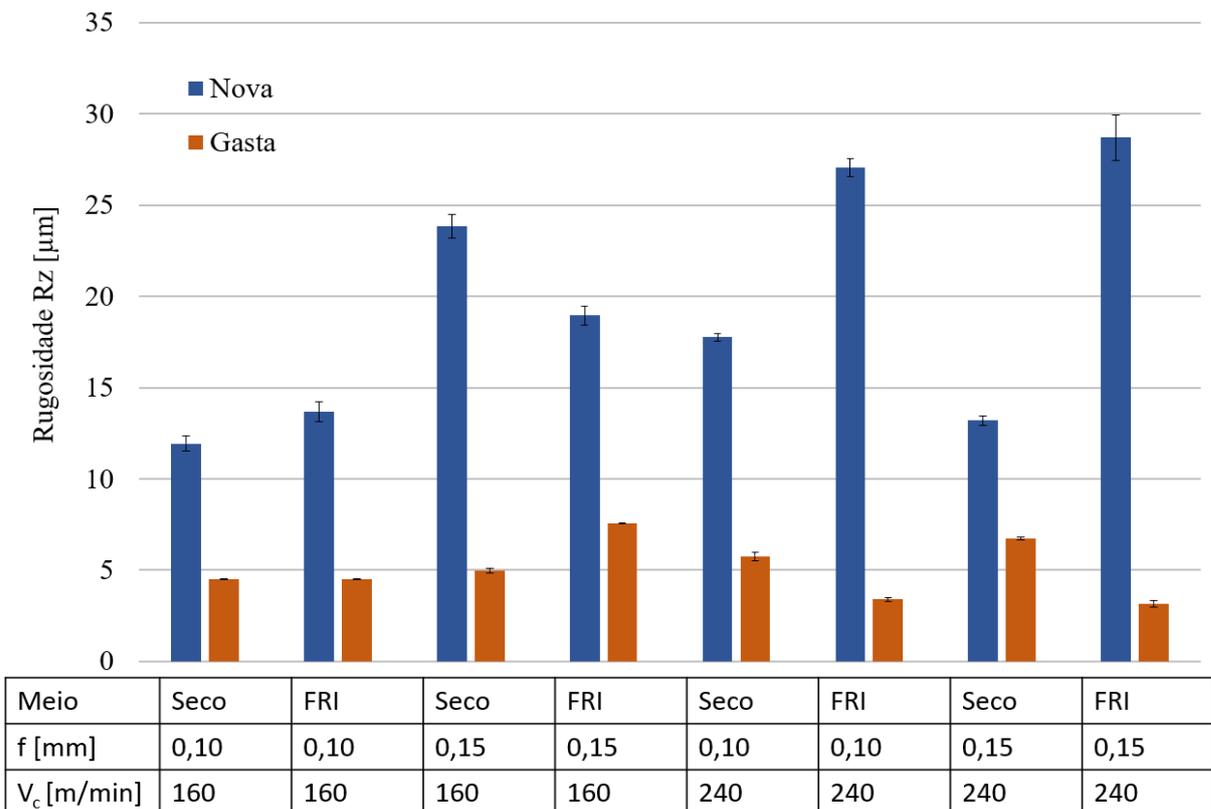


Figura 4.18 – Resultados para a rugosidade R_z para a ferramenta nova e gasta

As tabelas 4.6, 4.7 e 4.8, mostram a análise de variância com todas as variáveis para as rugosidades R_a , R_q e R_z , respectivamente, nas quais, coeficientes de determinação encontrados foram de 0,8198; 0,7807 e 0,8900, na mesma ordem.

Tabela 4.6 – Análise de variância preliminar para a rugosidade R_a com todos os fatores

Fator	S.Q.	G.L.	Q.M.	F	Valor-p
Meio	1,54871	1	1,54871	2,38276	0,183331
Avanço	0,21997	1	0,21997	0,33843	0,585980
Velocidade	0,77734	1	0,77734	1,19597	0,323995
Condição	42,39684	1	42,39684	65,22920	0,000471
Meio X Avanço	0,01941	1	0,01941	0,02986	0,869589
Meio X Velocidade	0,46502	1	0,46502	0,71546	0,436236
Meio X Condição	2,83023	1	2,83023	4,35442	0,091279
Avanço X Velocidade	1,39760	1	1,39760	2,15026	0,202454
Avanço X Condição	0,00114	1	0,00114	0,00176	0,968188
Velocidade X Condição	1,18824	1	1,18824	1,82815	0,234285
Erro	3,24984	5	0,64997		
Total S.Q.	54,09434	15			

Tabela 4.7 – Análise de variância preliminar para a rugosidade R_q com todos os fatores

Fator	S.Q.	G.L.	Q.M.	F	Valor-p
Meio	1,98313	1	1,98313	1,70971	0,247915
Avanço	0,55612	1	0,55612	0,47945	0,519508
Velocidade	1,08188	1	1,08188	0,93272	0,378513
Condição	61,23991	1	61,23991	52,79661	0,000772
Meio X Avanço	0,01277	1	0,01277	0,01101	0,920505
Meio X Velocidade	0,99133	1	0,99133	0,85466	0,397662
Meio X Condição	3,64556	1	3,64556	3,14294	0,136449

Avanço X Velocidade	2,22140	1	2,22140	1,91513	0,224985
Avanço X Condição	0,05660	1	0,05660	0,04879	0,833911
Velocidade X Condição	1,73980	1	1,73980	1,49993	0,275229
Erro	5,79961	5	1,15992		
Total S.Q.	79,32812	15			

Tabela 4.8 – Análise de variância preliminar para a rugosidade R_z com todos os fatores

Fator	S.Q.	G.L.	Q.M.	F	Valor-p
Meio	20,884	1	20,8841	0,83962	0,401541
Avanço	21,672	1	21,6716	0,87128	0,393449
Velocidade	15,604	1	15,6036	0,62732	0,464241
Condição	819,083	1	819,0834	32,93018	0,002251
Meio X Avanço	0,064	1	0,0638	0,00257	0,961555
Meio X Velocidade	23,625	1	23,6253	0,94982	0,374524
Meio X Condição	39,192	1	39,1922	1,57567	0,264856
Avanço X Velocidade	32,670	1	32,6702	1,31346	0,303640
Avanço X Condição	6,209	1	6,2086	0,24961	0,638555
Velocidade X Condição	27,027	1	27,0270	1,08659	0,344984
Erro	124,367	5	24,8733		
Total S.Q.	1130,396	15			

O diagrama de Pareto apontado nas figuras 4.19, 4.20 e 4.21, demonstram que a rugosidade tende a cair conforme o aumento do desgaste da ferramenta, com a redução média de 78,9 %, 78,6 % e 74,8 % para os parâmetros de rugosidade R_a , R_q e R_z , respectivamente. Isto se deve a mudança da geometria do chanfro, o qual concentra a maior parte do contato entre a ferramenta e o cavaco devido à baixa profundidade. Por meio de imagens obtidas através do MEV, é possível observar que as ferramentas desgastadas apresentaram maior ângulo de saída na região de formação de cavaco do que as arestas gastas, o que proporcionam uma redução na vibração, e por consequência, influenciando a rugosidade. A análise completa do desgaste é

melhor discutida no t3pico 4.5. Um fator que ajuda muito a compreender a influ3ncia da condi3o aresta de corte da ferramenta no processo 3 a an3lise dos cavacos, figura 4.22. Os cavacos produzidos pela aresta nova (figura 4.22a) apresentam-se bastante irregulares, t3picos de condi3es desfavor3veis, com grandes deforma3es e temperaturas envolvidas; enquanto os cavacos formados pela aresta desgastada (figura 4.22b) s3o bem mais regulares e limpos, indicando um processo muito mais favor3vel. Estes fatos corroboram com os resultados encontrados para a rugosidade, os quais foram semelhantes aos encontrados por (CHEN, 2000).

Fatores como o avan3o de corte, o qual costuma influenciar diretamente a usinagem n3o apresentou influ3ncia significativa, isto tamb3m ocorreu com a velocidade de corte, possivelmente foram ofuscados pelo efeito das condi3es da aresta de corte. Em rela3o ao meio, o sistema de refrigera3o apresentou uma piora na rugosidade, com o aumento m3dio de 33,2 %, 31,7 % e 24,5 % para os par3metros de rugosidade R_a , R_q e R_z , respectivamente, sendo que o principal motivo 3 o desgaste de cratera, o qual foi maior nas condi3es a seco.

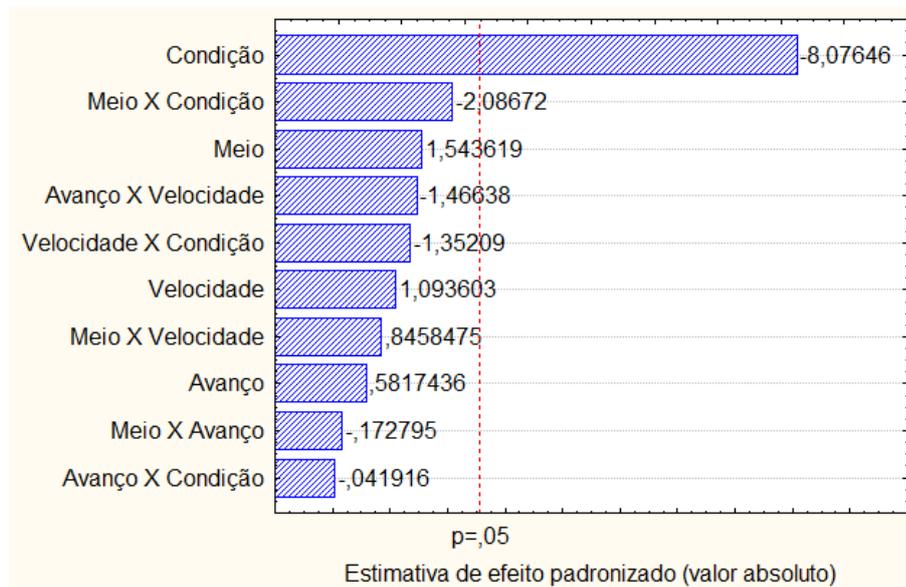


Figura 4.19 – Diagrama de Pareto para a rugosidade R_a

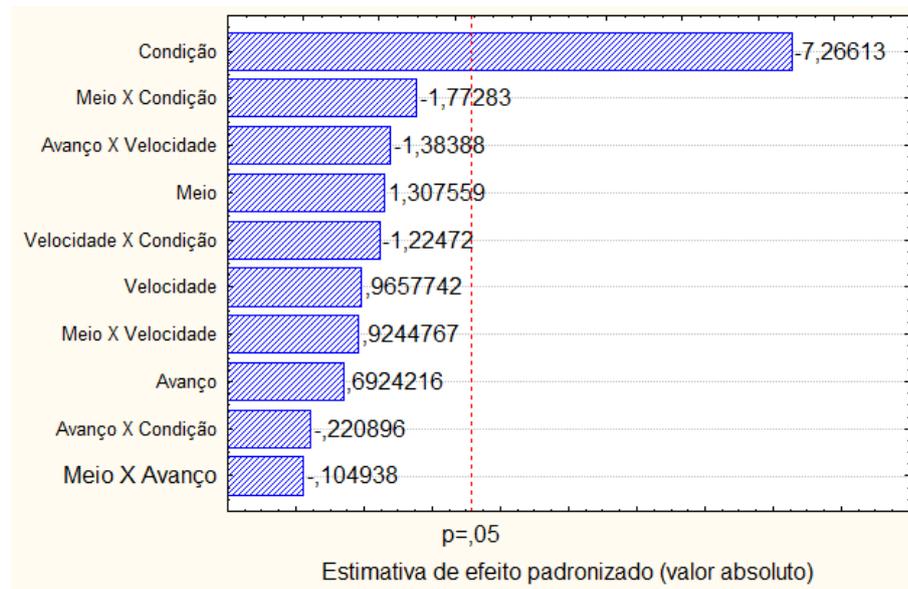


Figura 4.20 – Diagrama de Pareto para a rugosidade R_q

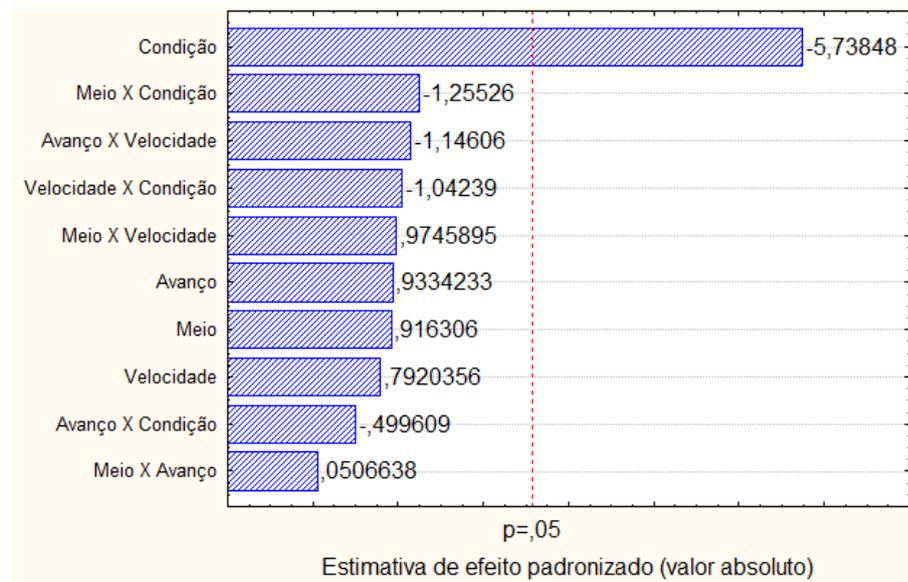


Figura 4.21 – Diagrama de Pareto para a rugosidade R_z

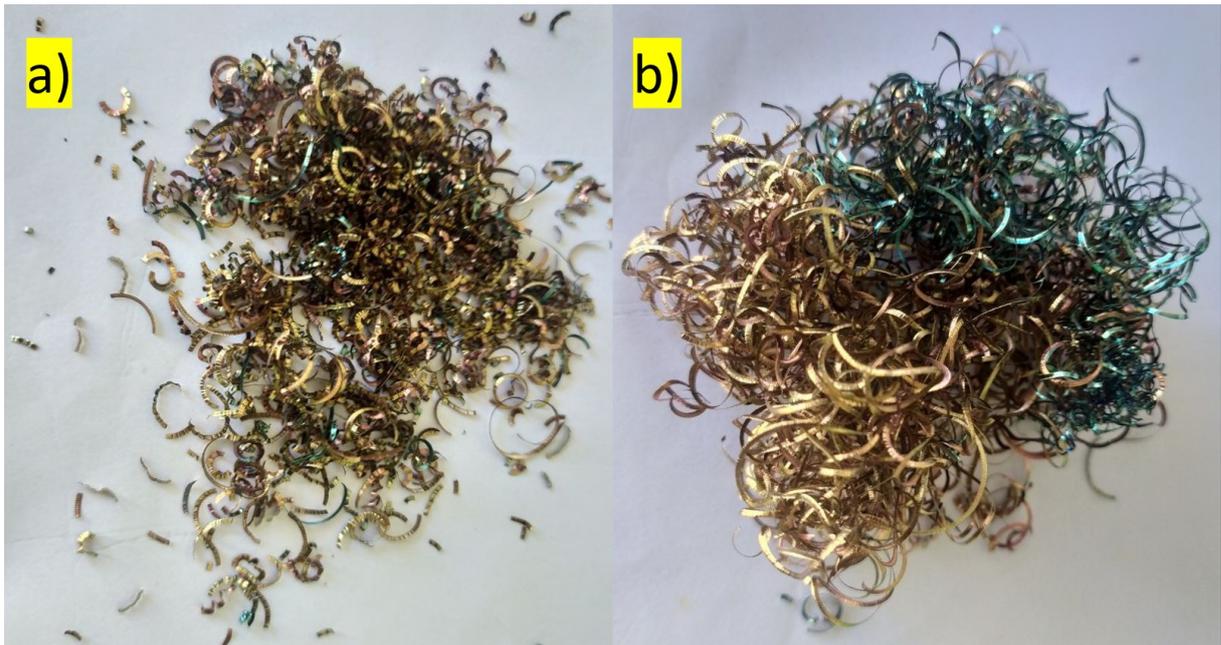


Figura 4.22 – Cavaco formado na condição a seco, avanço de 0,15 mm/rev e velocidade de corte de 240 m/min, a) aresta nova, b) aresta gasta

A partir dos resíduos em função dos valores preditos, figuras 4.23, 4.24 e 4.25, para os parâmetros R_a , R_q e R_z , foi possível perceber que os pontos estão distribuídos de forma aleatória, sem nenhuma incidência, o que indica a não existência de erros sistemáticos.

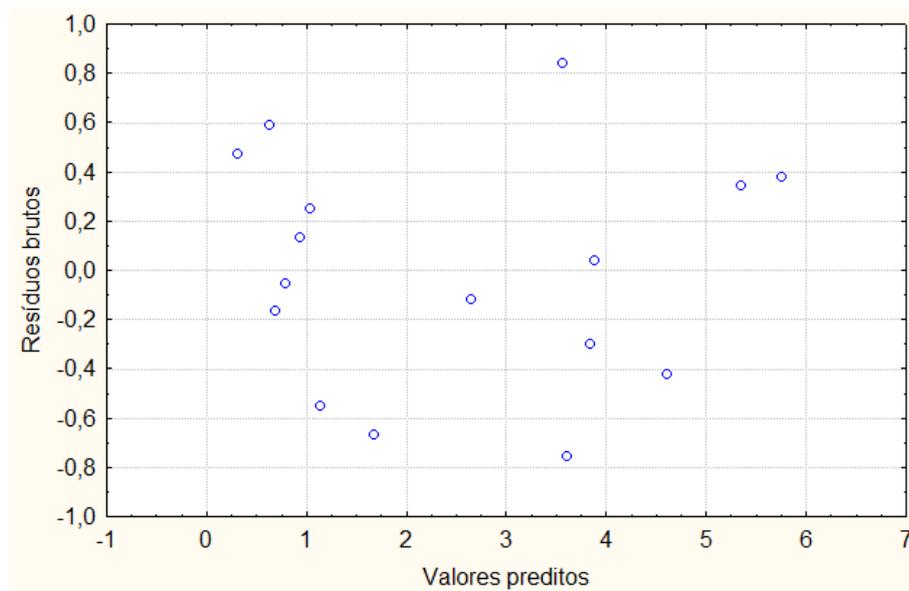


Figura 4.23 – Resíduos brutos em função dos valores preditos para a rugosidade R_a

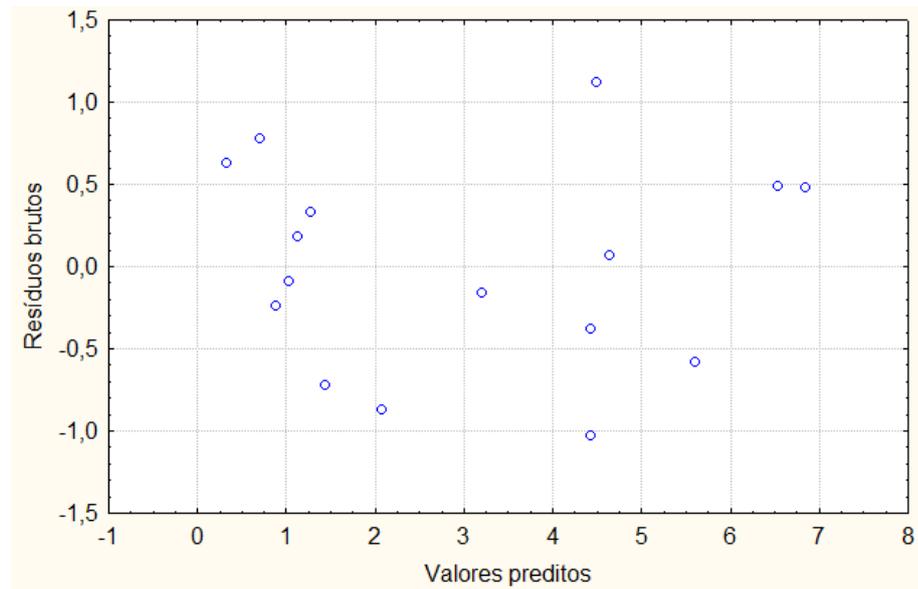


Figura 4.24 – Resíduos brutos em função dos valores preditos para a rugosidade R_q

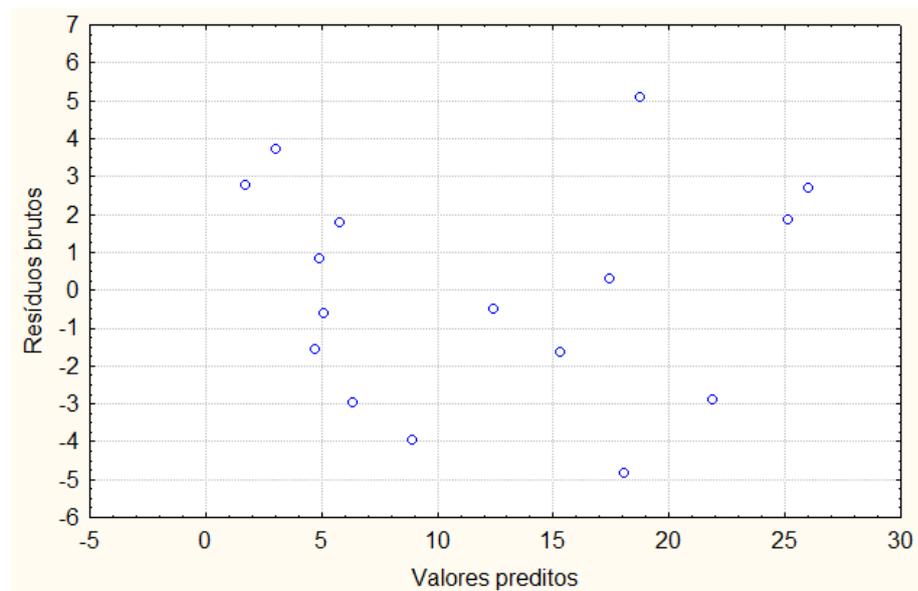


Figura 4.25 – Resíduos brutos em função dos valores preditos para a rugosidade R_z

4.4. ANÁLISE DA VIDA DA FERRAMENTA

A figura 4.26 mostra o volume de material removido em cada condição de corte estudada, sendo que a barra de erro está relacionada com o desvio padrão entre os testes. Diferente dos demais ensaios estatísticos, foram utilizados três testes para cada uma das oito

condições de corte, totalizando 24 arestas, onde a vida da ferramenta é apresentada em função o volume de material removido (V_r).

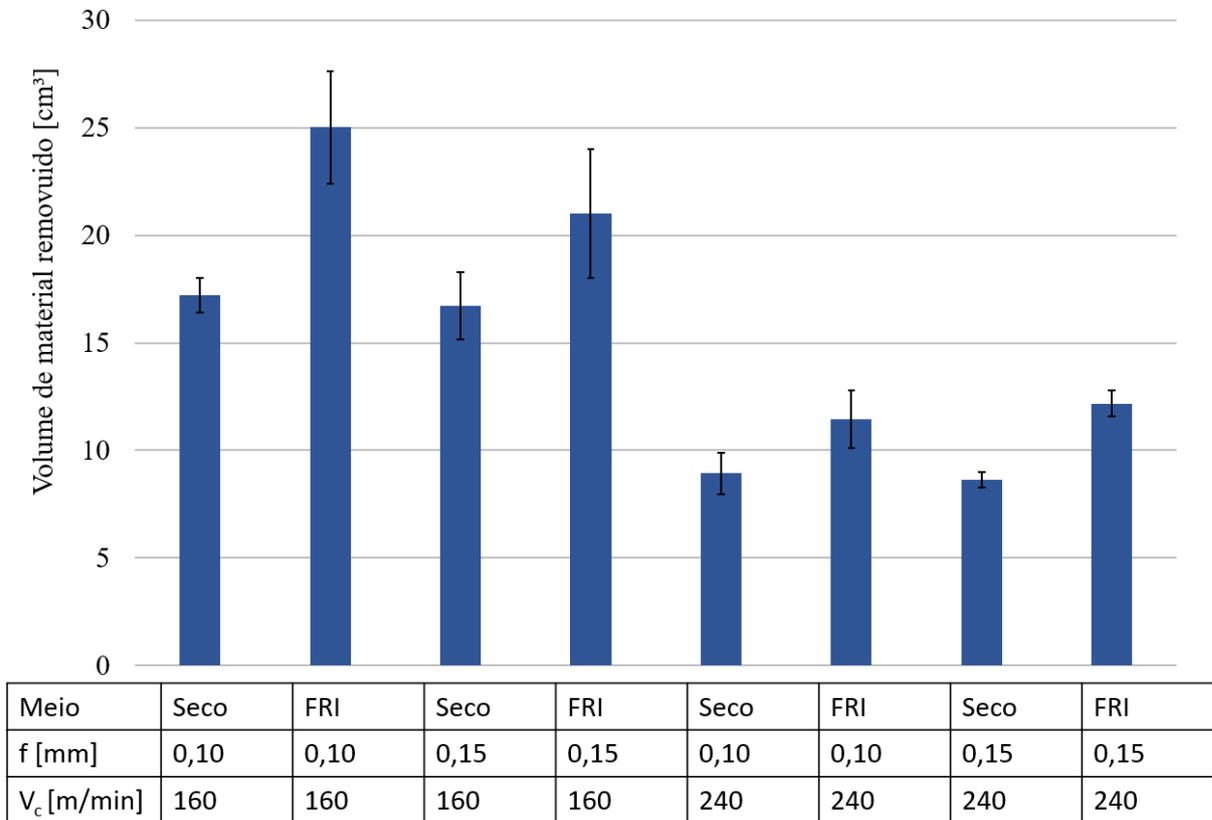


Figura 4.26 – Resultados do ensaio de vida da ferramenta

A tabela 4.9, mostra a análise de variância com todas as variáveis e todas as interações, o coeficiente de correlação encontrado foi de 0,7951. Nesta análise a velocidade de corte e o sistema de refrigeração (meio) apresentaram influência significativa na vida da ferramenta considerando um índice de confiança de 95% e 5% nível de significância. O avanço e as interações não apresentaram influências significativas.

Tabela 4.9 – Análise de variância preliminar para a vida da ferramenta com todos os fatores

Fator	S.Q.	G.L.	Q.M.	F	Valor-p
Meio	123,6387	1	123,6387	11,34844	0,003646
Avanço	6,0690	1	6,0690	0,55706	0,465645
Velocidade	563,7521	1	563,7521	51,74518	0,000002
Meio X Avanço	2,3725	1	2,3725	0,21776	0,646674

Meio X Velocidade	13,7010	1	13,7010	1,25758	0,277701
Avanço X Velocidade	8,9671	1	8,9671	0,82306	0,376967
Erro	185,2112	17	10,8948		
Total S.Q.	903,7116	23			

A partir do diagrama de Pareto, figura 4.27, é possível afirmar que a velocidade de corte foi a variável que mais influenciou a vida da ferramenta, de maneira inversamente proporcional. Outros trabalhos como Bonfá et al. (2019), Camargo et al., (2014) e Suarez et al. (2019), apresentaram resultados semelhantes com relação à influência da velocidade de corte, diminuindo a vida da ferramenta, devido as maiores temperaturas geradas pelo processo, que aceleram o desgaste da cunha cortante.

O outro fator que foi significativo foi o sistema de refrigeração, principal estudo deste trabalho. O sistema FRI elevou a remoção de material numa média de 35,1 % em comparação ao teste que utilizou ferramentas sem refrigeração interna, o que dá mais robustez a hipótese lançada no tópico 4.1, no sistema FRI pode alterar a temperatura da interface cavaco-ferramenta. Estes resultados são animadores para a aplicação do método, uma vez que a usinagem de aços endurecidos apresenta grandes complicações, e o método de refrigeração interna da ferramenta pode contribuir para melhorar a usinabilidade. Diferente dos trabalhos apresentados anteriormente, o avanço não foi estatisticamente influente.

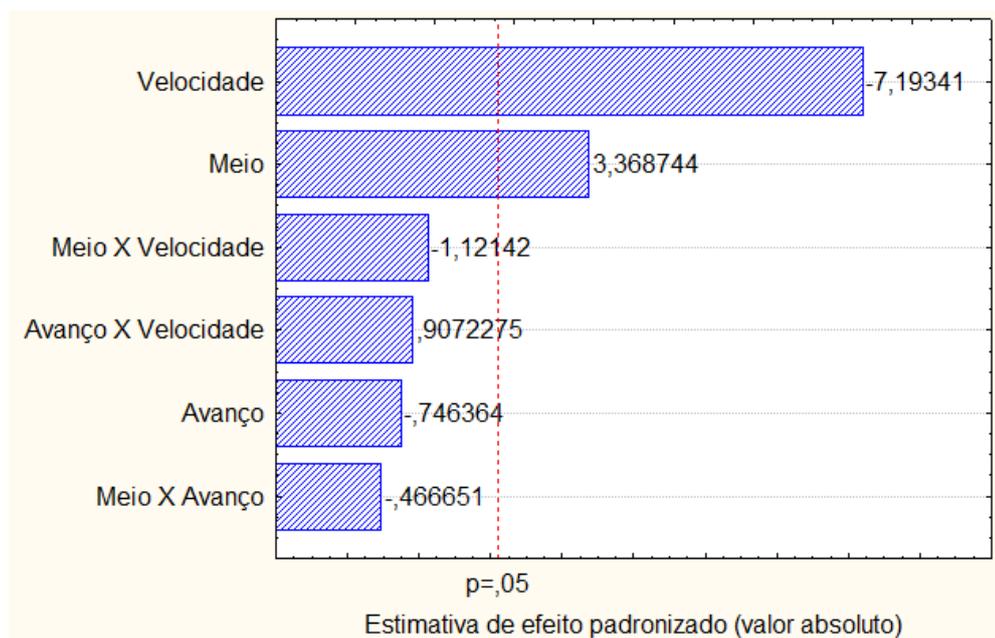


Figura 4.27 – Diagrama de Pareto para o ensaio de vida da ferramenta

A figura 4.28 mostra os resíduos proveniente do teste de vida, apresentando leve tendência ao crescimento do erro mediante ao aumento do valor esperado, mas de forma proporcional ao valor predito. Também é possível perceber uma aleatoriedade entre os pontos, indicando a ausência de erros sistemáticos durante as medições.

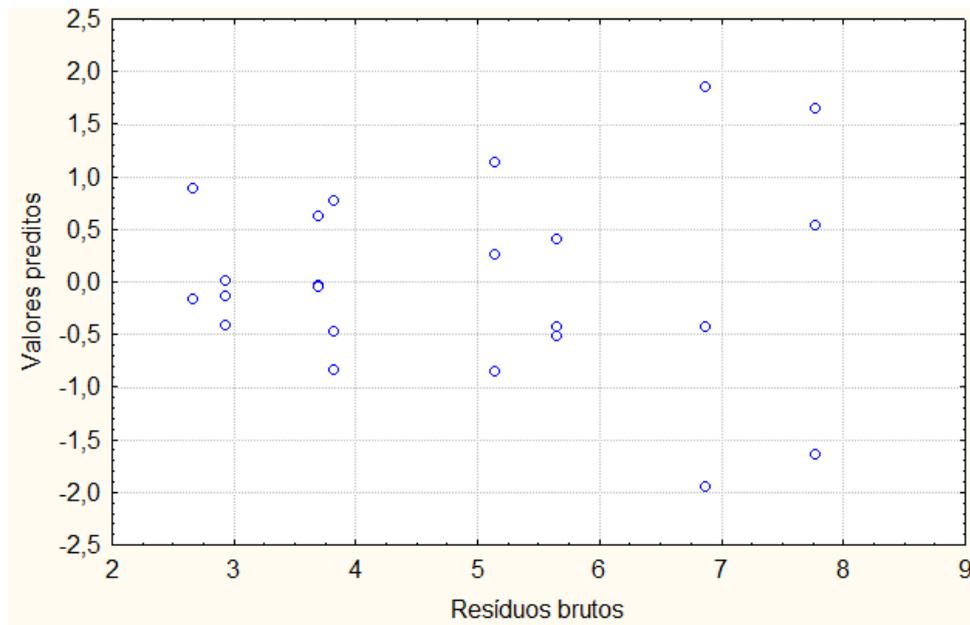


Figura 4.28 – Resíduos brutos em função dos valores preditos para o ensaio de vida da ferramenta

4.5. MECANISMO DE DESGASTE

Para verificar os mecanismos de desgaste atuantes nas ferramentas, foram realizadas análises no MEV nas superfícies de folga principal, com ampliação de 300 vezes na figura 4.29 e 500 vezes na figura 4.30; na figura 4.31, na superfície de folga secundária com ampliação de 400 vezes; e a figura 4.32 mostra a superfície saída com ampliação de 200 vezes, para cada umas das oito condições de corte.

Em todas as situações houve desgaste adesivo (superfícies ásperas) e intenso desgaste abrasivo caracterizado pelos sulcos (ou microsulcos) paralelos na superfície de folga da ferramenta. Segundo Suarez et al. (2019) e Boing, Schoeter e Oliveira (2018), este desgaste é bastante observado em materiais que, assim como o utilizado neste trabalho, possuem carbonetos de tungstênio, vanádio e cromo, os quais possuem alta dureza e proporcionam

partículas abrasivas. Essas partículas duras, juntamente com as partículas da própria ferramenta, arrancadas por adesão (attrition), ao serem expulsas da peça e do material da ferramenta, devido ao elevado atrito, deslizam/rolam sobre a interface cavaco/ferramenta/peça, elevando ainda mais o desgaste através de mecanismos abrasão de dois corpos e três corpos.

Assim como no trabalho de Bonfá et al. (2019), foi observado além de desgaste de flanco, o desgaste de cratera, bastante próximo a aresta de corte, porém dentro do chanfro da ferramenta, devido ao baixo avanço. O aparecimento de desgaste de cratera é um forte indicador da presença do mecanismo de difusão, o qual é associado as altas temperaturas, as quais podem ultrapassar os 1200 °C, nesse tipo de material (DOSBAEVA et al., 2015). Algumas regiões da cratera com características bem lisas são indicadores da presença desse mecanismo difusivo de desgaste.

Apareceram também micro lascamentos na região do chanfro nas condições: a seco, avanço de 0,10 mm/rev e velocidade de corte de 160 m/min; a seco, avanço de 0,10 mm/rev e velocidade de corte de 240 m/min; a seco, avanço de 0,15 mm/rev e velocidade de corte de 240 m/min; e FRI, avanço de 0,15 mm/rev e velocidade de corte de 240 m/min. As quais se caracterizam pelo destacamento de uma pequena parte da aresta da ferramenta.

Comparando aos dois sistemas de refrigeração, aparentemente há maior desgaste de cratera com maior profundidade na usinagem nas condições em que não houve refrigeração interna da ferramenta, o qual possui como principal responsável a difusão, esta que acontece em maiores temperaturas. Outro fato a ser analisado é que a taxa de desgaste do sistema FRI, foi menor do que a usinagem sem a refrigeração interna, mediante a dados do ensaio de vida.

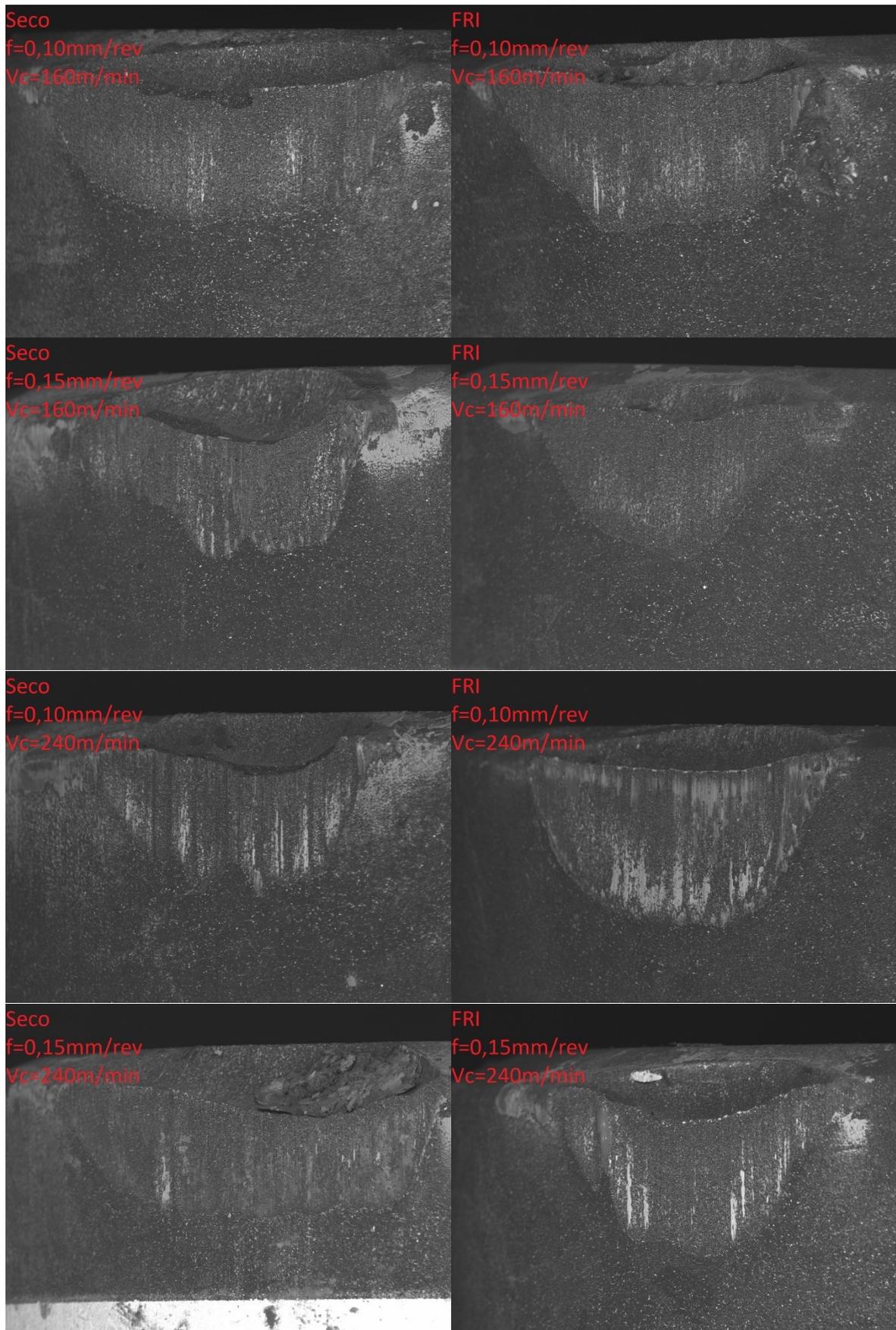


Figura 4.29 – MEV da superfície de folga principal com ampliação de 300 vezes

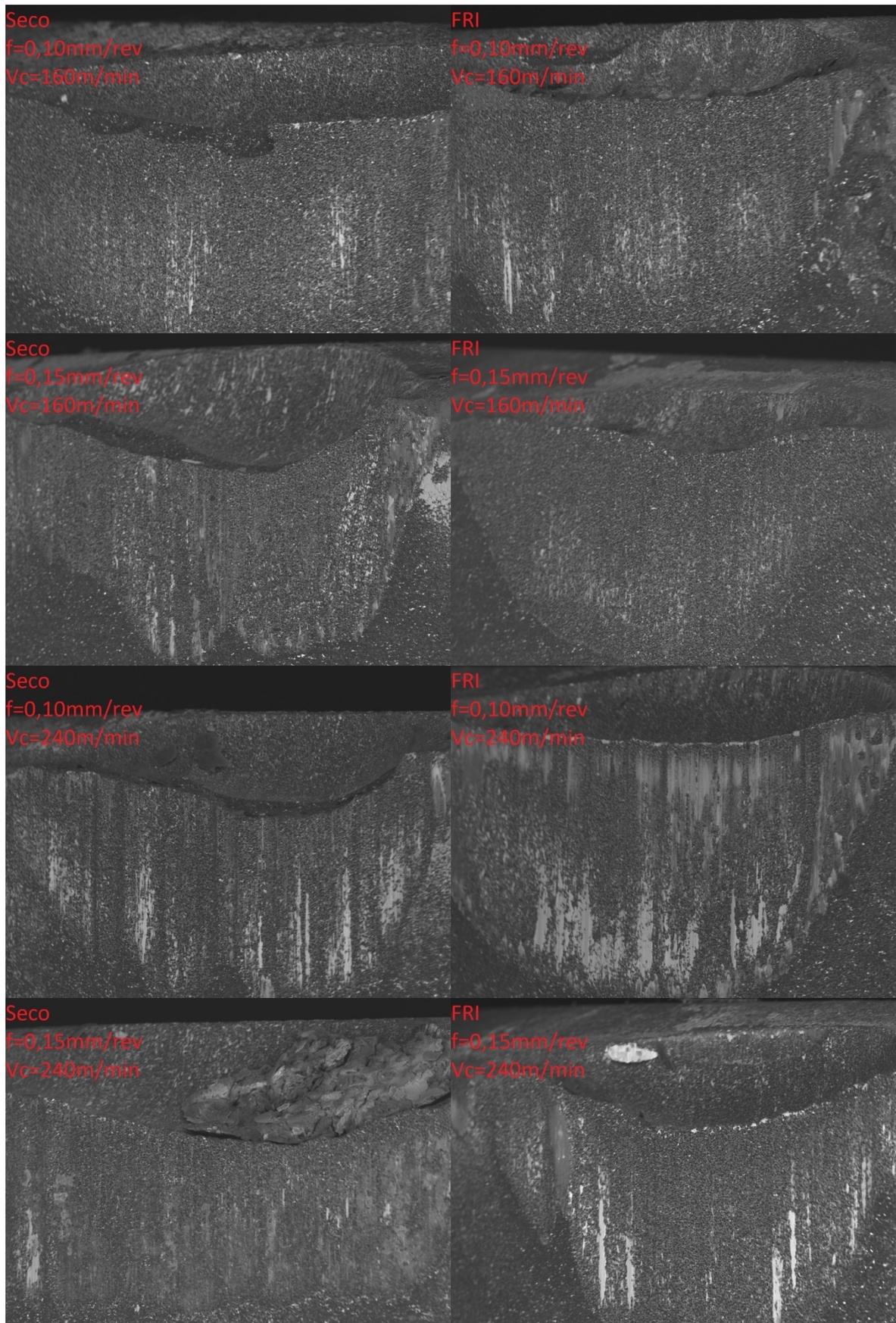


Figura 4.30 – MEV da superfície de folga principal com ampliação de 300 vezes

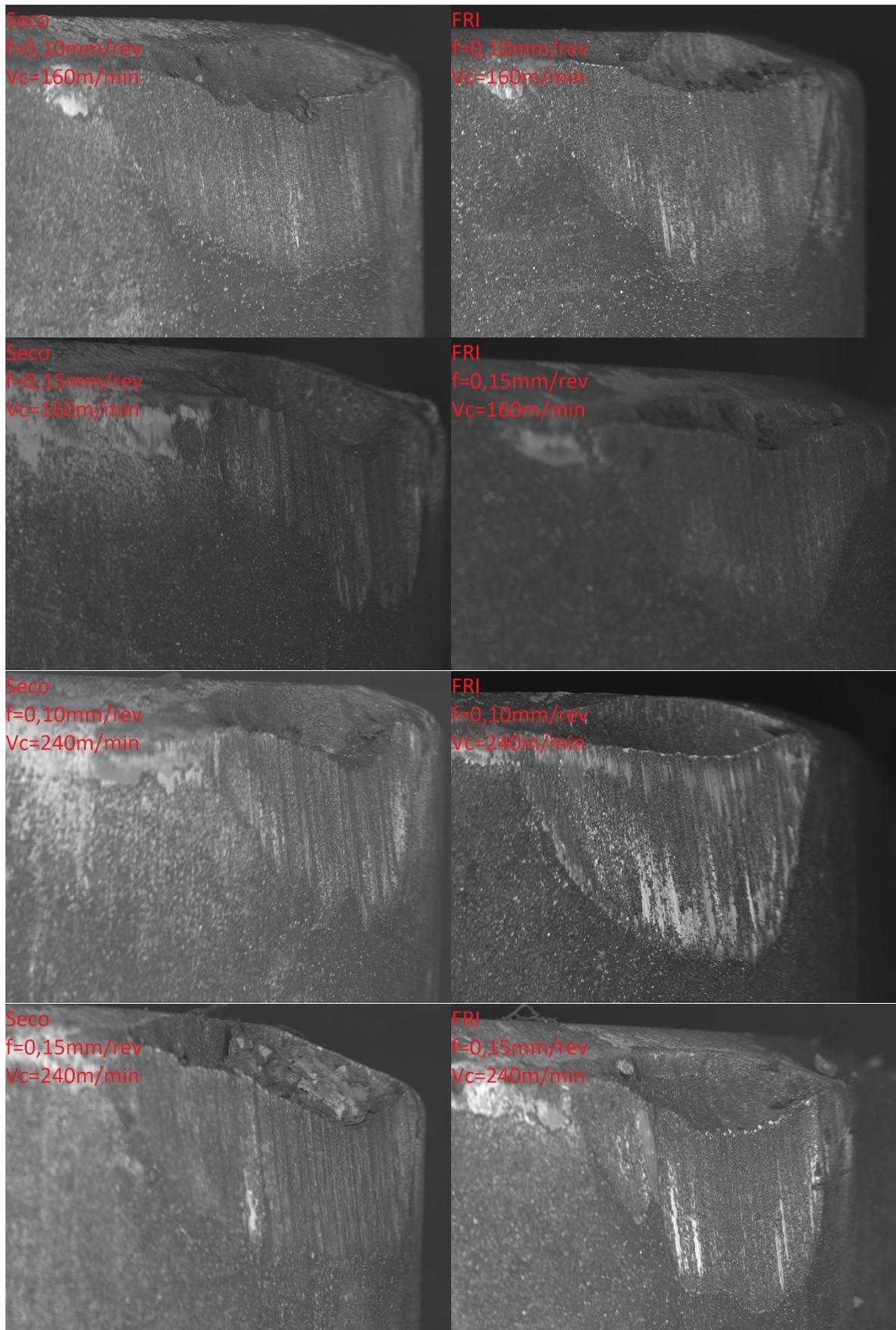


Figura 4.31 – MEV da superfície de folga principal com ampliação de 300 vezes

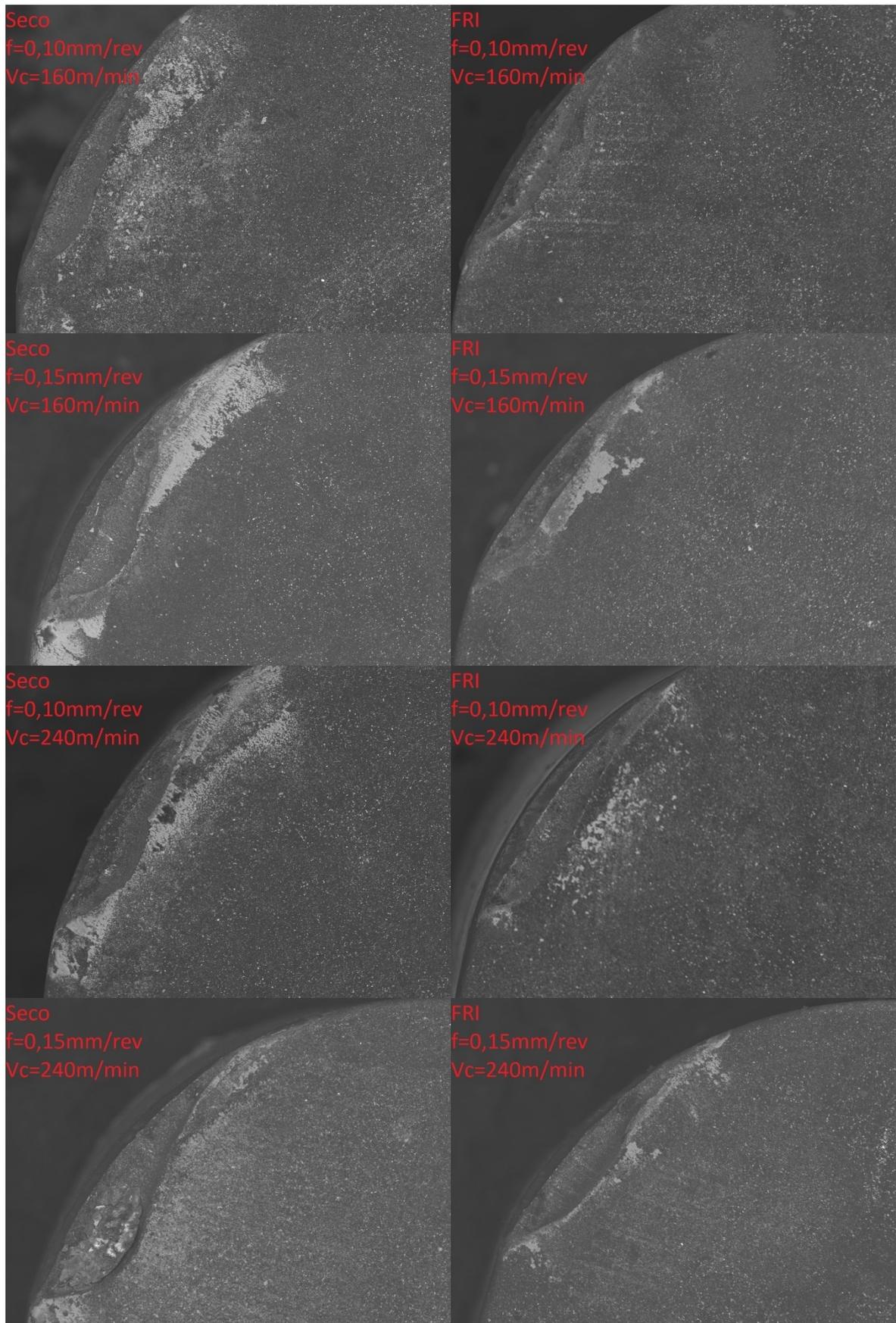


Figura 4.32 – MEV da superfície de folga principal com ampliação de 300 vezes

CAPÍTULO V

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1. CONCLUSÕES

Com o objetivo de compreender a utilização de ferramentas com refrigeração interna (FRI) ao tornear aço endurecido D6 com ferramentas de PCBN, através de testes de termografia, força, rugosidade, vida e mecanismos de desgaste, foram encontrados resultados promissores para o sistema FRI. Os resultados comprovam que os objetivos do trabalho de desenvolver, projetar, fabricar e testar um sistema em que ferramentas de PCBN é refrigerada por fluido interno foram bem sucedidos, mostrando bons resultados na usinagem do aço ABNT D6.

A medição da temperatura utilizando por termografia mostrou queda abrupta na temperatura na superfície de saída da ferramenta de corte ao utilizar o sistema FRI em relação a usinagem sem a refrigeração interna da ferramenta em todas as condições de avanço e velocidade estudadas. Em relação as temperaturas máximas obtidas, as variáveis mais influentes foram a velocidade de corte e o avanço, ambas elevando a temperatura, já o sistema FRI reduziu as temperaturas em relação ao processo de usinagem a seco.

Nos ensaios de força a componente de maior módulo foi a força passiva, devido a presença do chanfro da ferramenta e o raio de ponta ser muitas vezes maior que a profundidade de corte. O aumento do avanço e utilização do sistema FRI foram os fatores mais influentes os quais elevaram as força de corte e de usinagem, sendo este um indicativo que a refrigeração interna altera a interface cavaco-ferramenta.

O sistema de refrigeração apresentou baixo impactos na rugosidade da peça, sendo que o único fator estatisticamente significativo foi o desgaste da ferramenta, onde a ferramenta com desgaste apresentou menores valores dos parâmetros de rugosidade R_a , R_q e R_z , do que as

ferramentas novas, devido a mudança da geometria do chanfro. Fotos dos cavacos produzidos pelos dois sistemas testados mostram o favorecimento da geometria modificada pelo desgaste no processo de formação do cavaco. O sistema refrigerado aumentou rugosidade na peça devido ao menor desgaste de cratera.

Nos testes da vida de ferramenta de corte as variáveis mais importantes foram a velocidade de corte, a qual se mostrou inversamente proporcional. Além do sistema de refrigeração, onde nos testes com FRI houve o prolongamento da vida útil da ferramenta em todas as condições.

No desgaste de flanco, vários mecanismos de desgastes foram percebidos na ferramenta de corte, com destaque para a adesão e abrasão, mas também ocorreram microlascamento, em algumas situações. Além do desgaste de flanco, ocorreu desgaste de cratera na superfície do chanfro em todas as situações, onde, além da adesão e abrasão, ocorreu também difusão. Foi observado maior taxa de desgaste de flanco na usinagem sem a refrigeração interna da ferramenta, além de aparentemente apresentar maior desgaste de cratera, o qual tende acontecer em maiores temperaturas. Outro fator a ser analisado que houve maior taxa de desgaste nas condições sem refrigeração.

Desta forma, os resultados encontrados apontam que a refrigeração interna da ferramenta além da diminuir a temperatura na superfície da ferramenta, reduziu a temperatura na interface cavaco-ferramenta, devido ao aumento da força de corte, o aumento da vida da ferramenta e a diminuição do desgaste de cratera.

5.2. PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Devido ao fato de o sistema de refrigeração interna da ferramenta ser eficaz ao aumentar a vida das ferramentas de corte de PCNB, sugere-se realizar testes com diferentes materiais metálicos e também com compósitos, além de outras classes de materiais de ferramentas.

Outra sugestão seria alterar o fluido secundário, podendo utilizar fluidos que consigam menores temperaturas, ou até mesmo circular fluidos criogênicos.

Sugere-se testar este sistema simultaneamente com outros métodos, podendo alcançar resultados relevantes aliado ao MQL.

Realizar simulações conciliando a fluidodinâmica computacional do fluido no interior dos canais, com a simulação térmica e estrutural através do método dos elementos finitos.

Por fim o sistema FRI pode ser utilizado em outros processos de usinagem, como o fresamento, no qual o fluido aplicado pelo método convencional de jorro pode gerar trincas térmicas devido ao alto gradiente térmico. Esse problema pode ser reduzido com este sistema, uma vez que o fluido percorre com vazão constante no interior da ferramenta.

CAPÍTULO VI

6. REFERÊNCIAS

ABRÃO, A. M.; ASPINWALL, D. K.; WISE, M. L. H. Tool Wear, Cutting Forces and Temperature Evaluation When Turning Hardened Bearing Steel Using PCBN and Ceramic Tool Materials. *In: Proceedings of the Thirty-First International Matador Conference*. [s.l.] : Macmillan Education UK, 1995. p. 209–216. DOI: 10.1007/978-1-349-13796-1_33. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-349-13796-1_33. Acesso em: 1 mar. 2021.

ALTINKAYNAK, Mehmet. Exergetic performance analysis of low GWP alternative refrigerants for R404A in a refrigeration system. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, [S. l.], v. 00, p. 1–9, 2021. DOI: 10.1093/ijlct/ctaa104. Disponível em: <https://academic.oup.com/ijlct/advance-article/doi/10.1093/ijlct/ctaa104/6146872>. Acesso em: 8 mar. 2021.

AMORIM, Heraldo José De. **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro**. 2002. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, [S. l.], 2002.

ASTAKHOV, Viktor P. Ecological machining: near-dry machining. *In: Machining*. [s.l.] : Springer, 2008. p. 195–223.

ASTAKHOV, Viktor P.; DAVIM, João Paulo. Tools (geometry and material) and tool wear. *In: Machining: Fundamentals and Recent Advances*. [s.l.] : Springer London, 2008. p. 29–57. DOI: 10.1007/978-1-84800-213-5_2.

BARTARYA, Gaurav; CHOUDHURY, S. K. **State of the art in hard**

turning *International Journal of Machine Tools and Manufacture* Elsevier Ltd, , 2012. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2011.08.019.

BENITO, YIPSY ROQUE. **APLICAÇÃO DE NANOFLUIDOS EM SISTEMAS SECUNDÁRIOS DE REFRIGERAÇÃO**. 2012. PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO, Rio de Janeiro, Brazil, 2012. DOI: 10.17771/PUCRio.acad.20507. Disponível em: http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/Busca_etds.php?strSecao=resultado&nrSeq=20507@1. Acesso em: 10 mar. 2021.

BOING, Denis; SCHROETER, Rolf Bertrand; DE OLIVEIRA, Adilson José. Three-dimensional wear parameters and wear mechanisms in turning hardened steels with PCBN tools. *Wear*, [S. l.], v. 398–399, p. 69–78, 2018. DOI: 10.1016/j.wear.2017.11.017.

BONFÁ, Miguel Mandú. Torneamento do aço endurecido AISI D6 utilizando mínima quantidade de fluido de corte. [S. l.], p. 123, 2013.

BONFÁ, Miguel Mandú; COSTA, Éder Silva; SALES, Wisley Falco; AMORIM, Fred Lacerda; MAIA, Luis Henrique Andrade; MACHADO, Álisson Rocha. Evaluation of tool life and workpiece surface roughness in turning of AISI D6 hardened steel using PCBN tools and minimum quantity of lubricant (MQL) applied at different directions. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, [S. l.], v. 103, n. 1–4, p. 971–984, 2019. DOI: 10.1007/s00170-019-03619-z.

CAMARGO, José C.; DOMINGUEZ, Dany Sanchez; EZUGWU, Emmanuel O.; MACHADO, Álisson R. Wear model in turning of hardened steel with PCBN tool. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, [S. l.], v. 47, p. 61–70, 2014. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2014.06.019.

CAMARGO, José Carlos. **Modelo de desgaste para avaliação da vida da ferramenta de corte em processo de torneamento de material beneficiado**. 2011. Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, 2011.

CARVALHO, Déborah oliveira almeida. **Comparação do desempenho de fluidos de corte de base vegetal e mineral no torneamento do aço ABNT 1050**. 2017. Universidade Federal de Uberlândia, [S. l.], 2017.

ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. **Thermodynamics - An Engineering Approach**. 7^o ed. [s.l.] : AMGH, 2013.

CHEN, Wuyi. Cutting forces and surface finish when machining medium hardness steel using CBN tools. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, [S. l.], v. 40, n. 3, p. 455–466, 2000. DOI: 10.1016/S0890-6955(99)00011-5.

CHIOU, Richard Y.; CHEN, Jim S. J.; LU, Lin; COLE, Ian. Prediction of heat transfer behavior of carbide inserts with embedded heat pipes for dry machining. *In*: ASME INTERNATIONAL MECHANICAL ENGINEERING CONGRESS AND EXPOSITION, PROCEEDINGS 2002, **Anais** [...]. : American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2002. p. 83–90. DOI: 10.1115/IMECE2002-32656.

CHIOU, Richard Y.; CHEN, Jim S. J.; LU, Lin; NORTH, Mark T. The effect of an embedded heat pipe in a cutting tool on temperature and wear. *In*: AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, HEAT TRANSFER DIVISION, (PUBLICATION) HTD 2003, **Anais** [...]. : American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2003. p. 369–376. DOI: 10.1115/IMECE2003-55464. Disponível em: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=1593805>. Acesso em: 26 abr. 2020.

DA SILVA, Leonardo Rosa Ribeiro; FILHO, Antonio Favero; COSTA, Eder Silva; MARCUCCI PICO, David Fernando; SALES, Wisley Falco; GUESSER, Wilson Luiz; MACHADO, Alisson Rocha. Cutting Temperatures in End Milling of Compacted Graphite Irons. *In*: PROCEDIA MANUFACTURING 2018, **Anais** [...]. : Elsevier B.V., 2018. p. 474–484. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.07.056.

DANDOLINI, D. L. Gerenciamento Ambiental de Fluidos De Corte Em Indústrias Metal-Mecânicas. [S. l.], 2001.

DEARNLEY, P. A.; TRENT, E. M. Wear mechanisms of coated carbide tools. **Metals Technology**, [S. l.], v. 9, n. 1, p. 60–75, 1982. DOI: 10.1179/030716982803285909.

DEBNATH, Sujan; REDDY, Moola Mohan; YI, Qua Sok. Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: a review. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 83, p. 33–47, 2014. DOI: 10.1016/J.JCLEPRO.2014.07.071. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652614007999>. Acesso em: 11 nov. 2019.

DHAR, N. R.; ISLAM, Md Wahidul; ISLAM, Sumaiya; MITHU, Md Abu Hayat. The influence of minimum quantity of lubrication (MQL) on cutting temperature, chip and dimensional accuracy in turning AISI-1040 steel. **Journal of materials processing technology**, [S. l.], v. 171, n. 1, p. 93–99, 2006.

DHAR, N. R.; KAMRUZZAMAN, M. Cutting temperature, tool wear, surface roughness and dimensional deviation in turning AISI-4037 steel under cryogenic condition. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, [S. l.], v. 47, n. 5, p. 754–759, 2007. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2006.09.018. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S089069550600229X>.

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da usinagem dos metais**. [s.l: s.n.]. v. 4

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais** Artliber Editora Ltda., 2013.

DOSBAEVA, G. K.; EL HAKIM, M. A.; SHALABY, M. A.; KRZANOWSKI, J. E.; VELDHUIS, S. C. Cutting temperature effect on PCBN and CVD coated carbide tools in hard turning of D2 tool steel. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, [S. l.], v. 50, p. 1–8, 2015. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2014.11.001.

ELKINGTON, John. Cannibals with Forks: The triple bottom line of 21st century The triple bottom line of 21st century. **Alternative Management Observatory**, [S. l.], n. April, p. 1–16, 1997. DOI: <http://doi.wiley.com/10.1002/tqem.3310080106>. Disponível em: http://pdf-release.net/external/242064/pdf-release-dot-net-148_en.pdf. Acesso em: 20 abr. 2020.

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da Usinagem dos Materiais.pdf**, 1977.

FERRI, Carlo; MINTON, Timothy; GHANI, Saiful Bin Che; CHENG, Kai. Internally cooled tools and cutting temperature in contamination-free machining. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science**, [S. l.], v. 228, n. 1, p. 135–145, 2014. DOI: 10.1177/0954406213480312.

FIORI, Juliano Jose. **Avaliação do desempenho energético e operação de uma câmara de estocagem com fluido secundário termoacumulado**. 2009. UNICAMP, [S. l.], 2009. Disponível em: moz-extension://d8edf58e-a850-4e03-b2a0-1223c2fba7d8/enhanced-reader.html?openApp&pdf=http%3A%2F%2Frepositorio.unicamp.br%2Fbitstream%2FREP_OSIP%2F255774%2F1%2FFiori_JulianoJose_M.pdf. Acesso em: 10 mar. 2021.

FLIR. **Use Low-Cost Materials to Increase Target Emissivity | Teledyne FLIR**. 2015. Disponível em: <https://www.flir.com/discover/rd-science/use-low-cost-materials-to-increase-target-emissivity/>. Acesso em: 1 jun. 2021.

FRANÇA, LUCIANO JERCY. **DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE EMULSÕES DE ÓLEO DE BABAÇU E ÓLEO DE MAMONA PARA APLICAÇÃO COMO FLUIDOS DE CORTE DE USINAGEM**. 2018. Universidade Federal de Pernambuco, [S. l.], 2018. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/articleDetails.jsp?arnumber=6751036%0Awww.ijesrr.org%0Ahttp://ieeexplore.ieee.org/document/6114690/>.

FRANÇA, Pedro Henrique Pires. **ESTUDO DA TEMPERATURA EM FERRAMENTAS DE USINAGEM COM CANAIS DE REFRIGERAÇÃO INTERNO NO TORNEAMENTO DO FERRO FUNDIDO CINZENTO**. 2021. Universidade Federal de Uberlândia, [S. l.], 2021.

FRATILA, Domnita; CAIZAR, Cristian. Application of Taguchi method to selection of optimal lubrication and cutting conditions in face milling of AlMg3. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 19, n. 6–7, p. 640–645, 2011. DOI: 10.1016/j.jclepro.2010.12.007.

FREITAS, Samuel Scarassatti. **Aplicação de um sistema de refrigeração com fluido secundário e termoacumulação em câmara de congelados**. 2009. UNICAMP, [S. l.], 2009.

GONÇALVES, Paulo César. **Reutilização da água recuperada da quebra da emulsão de fluido de corte degradado proveniente de indústria metal-mecânica**. 2019. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, [S. l.], 2019.

HAGLUND, A. J.; KISHAWY, H. A.; ROGERS, R. J. An exploration of friction models for the chip-tool interface using an Arbitrary Lagrangian-Eulerian finite element model. **Wear**, [S. l.], v. 265, n. 3–4, p. 452–460, 2008. DOI: 10.1016/j.wear.2007.11.025.

INGRACINETO, Rubens R.; SCALON, Vicente L.; FIOCCHI, Arthur A.; SANCHEZ, Luiz E. A. Indirect cooling of the cutting tool with a pumped two-phase system in turning of AISI 1045 steel. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S. l.], v. 87, n. 9–12, p. 2485–2495, 2016. DOI: 10.1007/s00170-016-8620-6.

ISO 3685. **Tool-life testing with single-point turning tools**, 1993.

JEFFRIES, N. P.; ZERKLE, R. D. Thermal analysis of an internally-cooled metal-cutting tool. **International Journal of Machine Tool Design and Research**, [S. l.], v. 10, n. 3, p. 381–399, 1970. DOI: 10.1016/0020-7357(70)90019-3.

KARAGUZEL, Umut; BUDAK, Erhan. Investigating effects of milling conditions on cutting temperatures through analytical and experimental methods. **Journal of Materials Processing Technology**, [S. l.], v. 262, p. 532–540, 2018. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2018.07.024. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013618303200>. Acesso em: 27 abr. 2020.

KATNA, Rahul; SINGH, Kanwarjeet; AGRAWAL, Narayan; JAIN, Swati. Green manufacturing—performance of a biodegradable cutting fluid. **Materials and Manufacturing Processes**, [S. l.], v. 32, n. 13, p. 1522–1527, 2017. DOI: 10.1080/10426914.2017.1328119. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10426914.2017.1328119>. Acesso em: 25 abr. 2020.

KING, Nathan; KERANEN, Lucas; GUNTER, Kenneth; SUTHERLAND, John. Wet versus dry turning: A comparison of machining costs, product quality, and aerosol formation. *In: SAE TECHNICAL PAPERS 2001, Anais [...]*. : SAE International, 2001. DOI: 10.4271/2001-01-0343.

KOHO, Mikko; TAPANINAHO, Mikko; TORVINEN, Seppo. Towards Sustainable Development and Sustainable Production in Finnish Manufacturing Industry. *In: Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability*. [s.l.] : Springer Berlin Heidelberg, 2012. p. 422–427. DOI: 10.1007/978-3-642-23860-4_69.

KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Tecnologia da Usinagem com Ferramenta de Corte de Geometria Definida – Parte I**. Traduzido ed. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.

KROLICZYK, G. M.; MARUDA, R. W.; KROLICZYK, J. B.; WOJCIECHOWSKI, S.; MIA, M.; NIESLONY, P.; BUDZIK, G. **Ecological trends in machining as a key factor in sustainable production – A review** *Journal of Cleaner Production* Elsevier Ltd, , 2019. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.02.017.

LINO, Andreas Castro; VENTURA, Geovane Novaes; RODRIGUES, Pedro Henrique Gomes; BARBOSA, Lucas Melo Queiroz; FRANÇA, Pedro Henrique Pires; GUSTAVO HENRIQUE NAZARENO FERNANDES. PERFORMANCE OF AN INTERNALLY COOLED TOOL HOLDER WHEN TURNING ABNT 1045 STEEL. **11th Brazilian Congress on Manufacturing Engineering**, [S. l.], 2021.

MACHADO, Alisson Rocha; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; DA SILVA, M. B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. [s.l.] : Edgard Blucher, São Paulo, 2015.

MACHADO, Álisson Rocha; DINIZ, Anselmo Eduardo. Tool wear analysis in the machining of hardened steels. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S. l.], v. 92, n. 9–12, p. 4095–4109, 2017. DOI: 10.1007/s00170-017-0455-2. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-017-0455-2>. Acesso em: 24 fev. 2021.

MARQUES, Armando; PAIPA SUAREZ, Mauro; FALCO SALES, Wisley; ROCHA MACHADO, Álisson. Turning of Inconel 718 with whisker-reinforced ceramic tools applying vegetable-based cutting fluid mixed with solid lubricants by MQL. **Journal of Materials Processing Technology**, [S. l.], v. 266, p. 530–543, 2019. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2018.11.032. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092401361830520X>. Acesso em: 26 abr. 2020.

NBR ISO 4287. **Nbr Iso 4287 - Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade : Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade**. Nbr Iso 4287 ABNT, , 2002.

NING, Jinqiang; LIANG, Steven. Predictive Modeling of Machining Temperatures with Force–Temperature Correlation Using Cutting Mechanics and Constitutive Relation. **Materials**, [S. l.], v. 12, n. 2, p. 284, 2019. DOI: 10.3390/ma12020284. Disponível em: <http://www.mdpi.com/1996-1944/12/2/284>. Acesso em: 8 abr. 2020.

PARK, Robert M.; WEGMAN, David H.; SILVERSTEIN, Michael A.; MAIZLISH, Neil A.; MIRER, Franklin E. Causes of death among workers in a bearing manufacturing plant. **American Journal of Industrial Medicine**, [S. l.], v. 13, n. 5, p. 569–580, 1988. DOI: 10.1002/ajim.4700130505. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1002/ajim.4700130505>. Acesso em: 25 abr. 2020.

ROKHMAWATI, Andewi; SATHYE, Milind; SATHYE, Suneeta. The Effect of GHG Emission, Environmental Performance, and Social Performance on Financial Performance of Listed Manufacturing Firms in Indonesia. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, [S. l.], v. 211, p. 461–470, 2015. DOI: 10.1016/j.sbspro.2015.11.061.

ROZZI, Jay C.; SANDERS, John K.; CHEN, Weibo. The Experimental and Theoretical Evaluation of an Indirect Cooling System for Machining. [S. l.], v. 133, n. March 2011, p. 1–10, 2011. DOI: 10.1115/1.4002446.

RUNGE, P. R. F.; DUARTE, G. N. **Lubrificantes nas indústrias**. São Paulo: LTC, 1990.

SANCHES, HENRIQUE AUGUSTO BELIZÁRIO. **AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE USINAGEM COM CORTE INTERROMPIDO UTILIZANDO A ANÁLISE DE ESFORÇOS E FREQUÊNCIAS**. 2011. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, [S. l.], 2011.

SANTOS, M. C.; ARAÚJO FILHO, J. S.; BARROZO, M. A. S.; JACKSON, M. J.; MACHADO, A. R. Development and application of a temperature measurement device using the tool-workpiece thermocouple method in turning at high cutting speeds. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S. l.], v. 89, n. 5–8, p. 2287–2298, 2017. DOI: 10.1007/s00170-016-9281-1.

SANTOS, S. C.; SALES, W. F. Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais. **Artliber**, [S. l.], v. 53, n. 9, p. 1689–1699, 2007. DOI: 10.1017/CBO9781107415324.004.

SCHULTHEISS, Fredrik; ZHOU, Jinming; GRÖNTOFT, Elias; STÅHL, Jan Eric. Sustainable machining through increasing the cutting tool utilization. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 59, p. 298–307, 2013. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.06.058.

SHARMA, Anuj Kumar; TIWARI, Arun Kumar; DIXIT, Amit Rai. Effects of Minimum Quantity Lubrication (MQL) in machining processes using conventional and nanofluid based cutting fluids: A comprehensive review. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 127, p. 1–18, 2016. DOI: 10.1016/J.JCLEPRO.2016.03.146. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616302293>. Acesso em: 11 nov. 2019.

SILVA, Leonardo Rosa Ribeiro Da; COSTA, Eder Silva; PIRES FRANÇA, Pedro Henrique; RAMOS, CARLA; SALES, Wisley; ROCHA MACHADO, Álisson. Performance of Coated Cemented Carbide Drills in Drilling of Gray Cast Iron Under Different Lubri-Cooling Conditions. [S. l.], 2018. DOI: 10.26678/abcm.cobem2017.cob17-1133.

SOUSA, José Aécio Gomes De; SOUSA, Marcelo do Nascimento; MACHADO, Álisson Rocha. Análise da Temperatura de Usinagem no Corte Ortogonal de Alumínio. In: ANAIS DO 20º POSMEC - SIMPÓSIO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA 2011, Uberlândia. **Anais** [...]. Uberlândia p. 1–8. Disponível em: <http://web.posfemec.org/posmec/20/PDF/Alisson-POSMEC20JoseAecioGomesdeSousa.pdf>.

SREEJITH, P. S.; NGOI, B. K. A. Dry machining: Machining of the future. **Journal of Materials Processing Technology**, [S. l.], v. 101, n. 1, p. 287–291, 2000. DOI: 10.1016/S0924-0136(00)00445-3.

SUAREZ, Mauro Paipa; MARQUES, Armando; BOING, Denis; AMORIM, Fred Lacerda; MACHADO, Álisson Rocha. MoS₂ solid lubricant application in turning of AISI D6 hardened steel with PCBN tools. **Journal of Manufacturing Processes**, [S. l.], v. 47, n. January, p. 337–346, 2019. a. DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.10.001. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.10.001>.

SUAREZ, Mauro Paipa; MARQUES, Armando; BOING, Denis; AMORIM, Fred Lacerda; MACHADO, Álisson Rocha. MoS₂ solid lubricant application in turning of AISI D6 hardened steel with PCBN tools. **Journal of Manufacturing Processes**, [S. l.], v. 47, p. 337–346, 2019. b. DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.10.001.

SUKAYLO, V. A.; KALDOS, A.; KRUKOVSKY, G.; LIERATH, F.; EMMER, T.;

PIEPER, H. J.; KUNDRAK, J.; BANA, V. Development and verification of a computer model for thermal distortions in hard turning. **Journal of Materials Processing Technology**, [S. l.], v. 155–156, n. 1–3, p. 1821–1827, 2004. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.169. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092401360400545X>. Acesso em: 25 abr. 2020.

SUN, Shoujin; BRANDT, Milan; PALANISAMY, Suresh; DARGUSCH, Matthew S. Effect of cryogenic compressed air on the evolution of cutting force and tool wear during machining of Ti-6Al-4V alloy. **Journal of Materials Processing Technology**, [S. l.], v. 221, p. 243–254, 2015. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2015.02.017.

TANG, Linhu; HUANG, Jianlong; XIE, Liming. Finite element modeling and simulation in dry hard orthogonal cutting AISI D2 tool steel with CBN cutting tool. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S. l.], v. 53, n. 9–12, p. 1167–1181, 2011. DOI: 10.1007/s00170-010-2901-2.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **No Title**. [s.l.: s.n.].

TRENT, Edward Moor; WRIGHT, Paul K. **Metal cutting**. [s.l.] : Butterworth-Heinemann, 2000.

VILLARES METALS. Catálogo aços para trabalho a frio - VC 131. [S. l.], 2009. Disponível em: <http://www.villaresmetals.com.br/content/download/28447/288001/file/VC131-pt.pdf>.

WALTER TOOLS. **Catálogo de produtos Walter Tools - Porta-ferramentas DSSNL2525X12-P**. 2021. Disponível em: <https://www.walter-tools.com/pt-pt/search/pages/default.aspx#/product/DSSNL2525X12-P?query=%7B%22t%22:%22productdetails%22%7D>. Acesso em: 24 mar. 2021.

YALLESE, Mohamed Athmane; CHAOUI, Kamel; ZEGHIB, Nassereddine; BOULANOUAR, Lakhdar; RIGAL, Jean-François. Hard machining of hardened bearing steel using cubic boron nitride tool. **Journal of Materials Processing Technology**, [S. l.], v. 209, n. 2, p. 1092–1104, 2009. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2008.03.014. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013608002355>.

YILMAZ, Bahattin; KARABULUT, Şener; GÜLLÜ, Abdulkadir. **A review of the chip breaking methods for continuous chips in turning** *Journal of Manufacturing Processes* Elsevier Ltd, , 2020. DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.10.026.

CAPÍTULO VII

7. APÊNDICES

7.1. APÊNDICE I - DESENHO TÉCNICO DAS GALERIAS

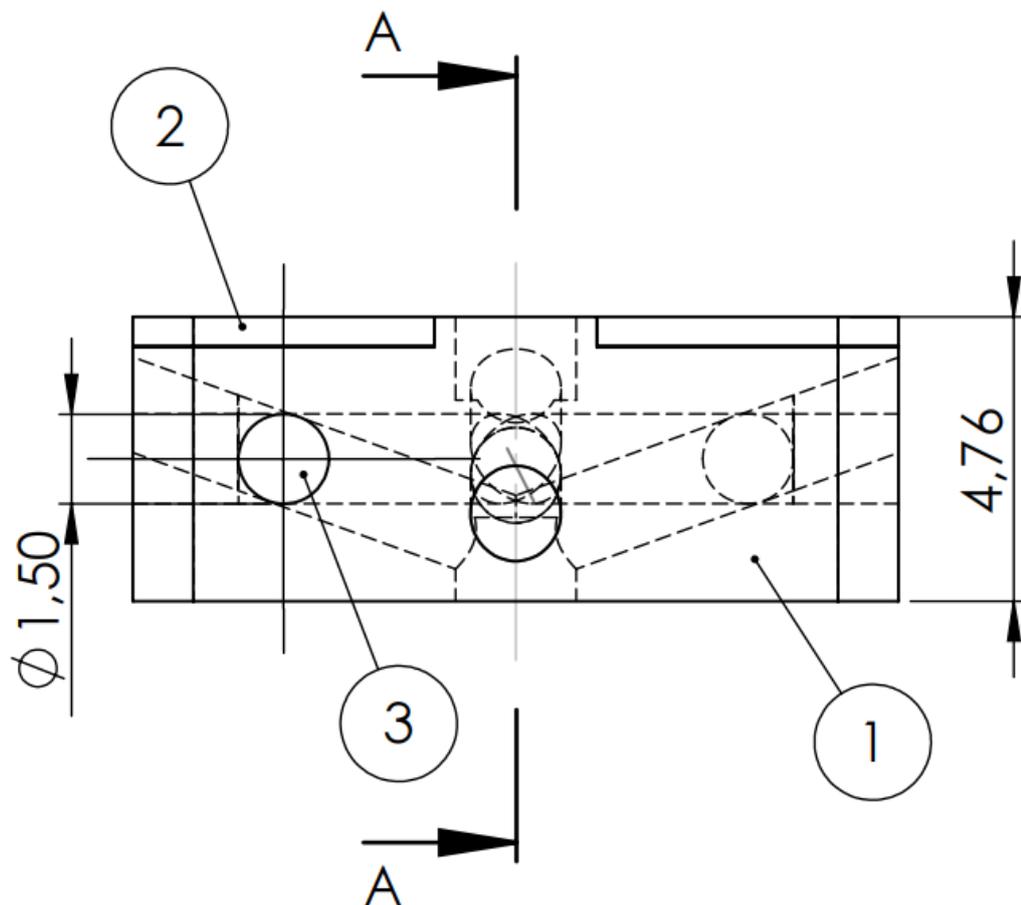


Figura 7.1 – Vista lateral da ferramenta; onde o corte A-A é mostrado na figura 7.2, e a lista de referência dos números mostrado na tabela 7.1

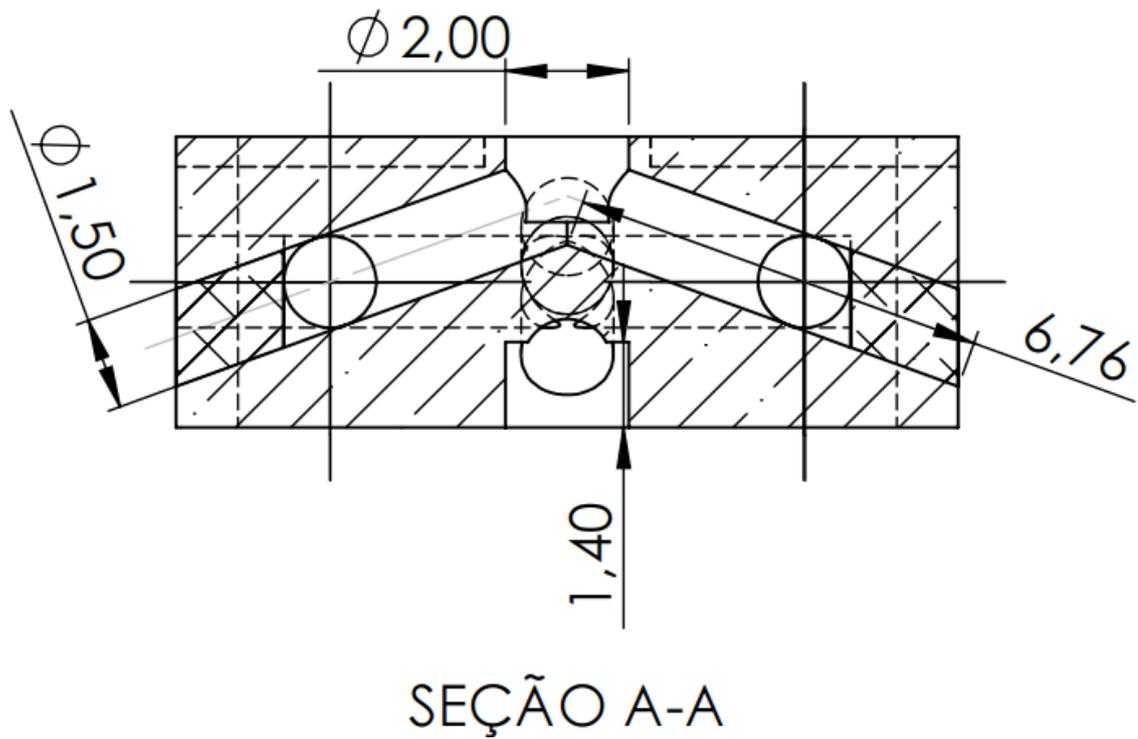


Figura 7.2 – Corte A-A da ferramenta

Tabela 7.1 – Referência para o número dos componentes da figura 7.1

Número	Quantidade	Nome	Material
1	1	Matriz	Metal duro
2	4	<i>Blank</i>	PCBN
3	6	Tampas	Solda prata

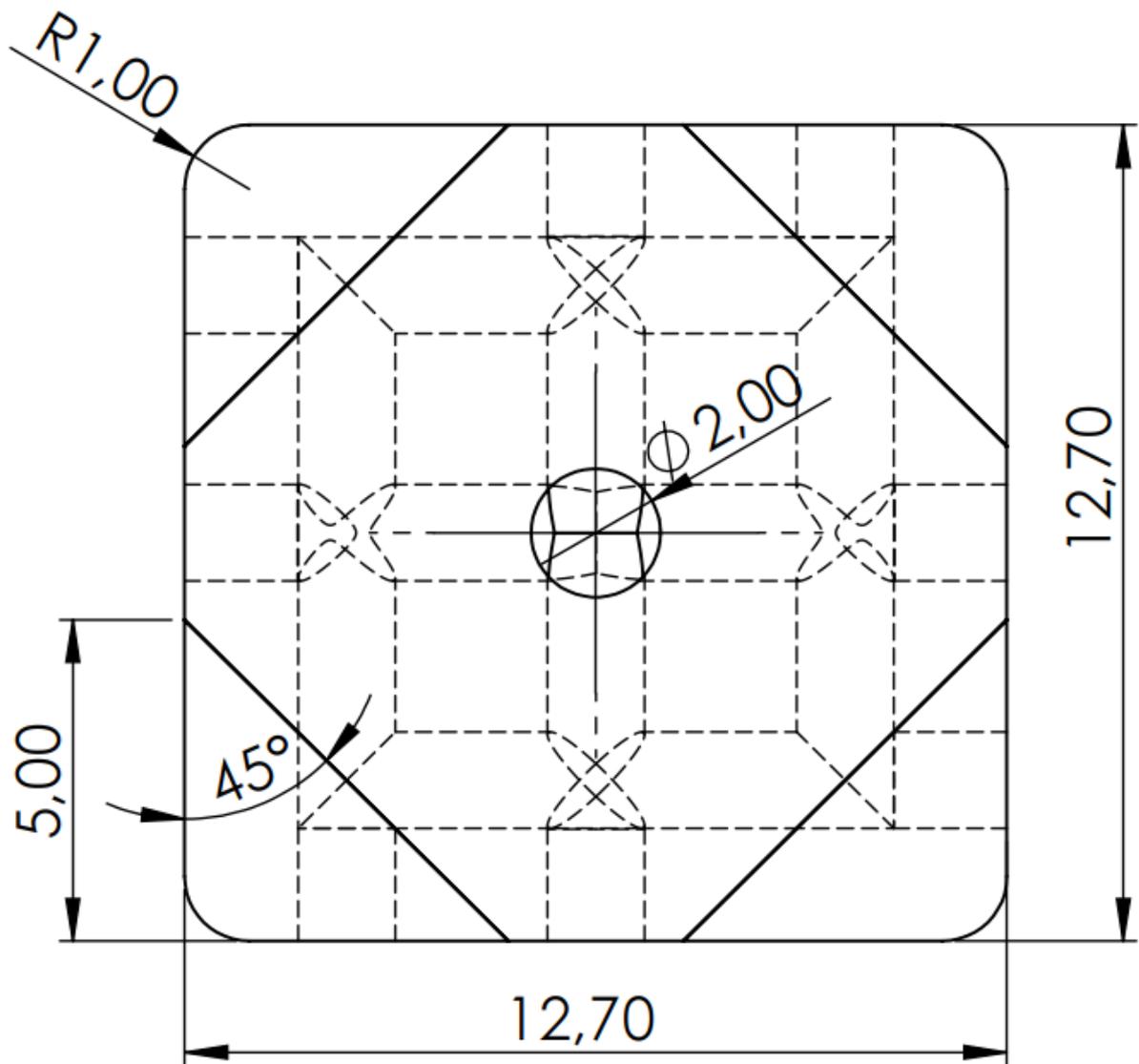


Figura 7.3 – Vista da superfície de saída da ferramenta

7.2. APÊNDICE II - TABELAS DE RESULTADOS

Tabela 7.2 – Resultados do teste de temperatura na ferramenta no ponto ‘A’

Meio	Avanço [mm/rev]	Velocidade [m/min]	Temperatura [°C]
Seco	0,10	160	123,9
FRI	0,10	160	78,4
Seco	0,15	160	124,1
FRI	0,15	160	103,0
Seco	0,10	240	139,5
FRI	0,10	240	117,9
Seco	0,15	240	193,7
FRI	0,15	240	139,0

Tabela 7.3 – Resultados do teste de temperatura na ferramenta no ponto ‘B’

Meio	Avanço [mm/rev]	Velocidade [m/min]	Temperatura [°C]
Seco	0,10	160	77,6
FRI	0,10	160	16,1
Seco	0,15	160	70,1
FRI	0,15	160	27,2
Seco	0,10	240	54,2
FRI	0,10	240	26,2
Seco	0,15	240	96,0
FRI	0,15	240	46,4

Tabela 7.4 – Resultados do teste da média das temperaturas máximas

Meio	Avanço [mm/rev]	Velocidade [m/min]	Temperatura média [°C]	Temperatura máxima [°C]
Seco	0,10	160	297,5	314,7
FRI	0,10	160	241,7	271,0
Seco	0,15	160	264,9	275,9
FRI	0,15	160	267,6	281,4
Seco	0,10	240	268,6	281,8
FRI	0,10	240	345,1	377,1
Seco	0,15	240	489,6	510,1
FRI	0,15	240	447,5	510,1

Tabela 7.5 – Resultados do teste de força

Meio	Avanço [mm/rev]	Velocidade [m/min]	Força de corte [N]	Força de avanço [N]	Força passiva [N]	Força de usinagem [N]
Seco	0,10	160	94,04	60,95	190,36	221,46
FRI	0,10	160	105,79	46,63	204,93	235,37
Seco	0,15	160	129,83	59,95	215,82	259,30
FRI	0,15	160	134,58	87,81	304,02	344,01
Seco	0,10	240	96,20	51,82	191,60	221,41
FRI	0,10	240	129,54	79,40	212,51	262,72
Seco	0,15	240	121,22	83,48	253,77	293,74
FRI	0,15	240	171,84	76,58	223,69	293,61

Tabela 7.6 – Resultados do teste de rugosidade R_a

Condição	Meio	Avanço [mm/rev]	Velocidade [m/min]	Medida 1 [μm]	Medida 2 [μm]	Medida 3 [μm]
Nova	Seco	0,10	160	2,66	2,48	2,45
Gasta	Seco	0,10	160	0,73	0,74	0,77
Nova	FRI	0,10	160	3,64	3,23	3,76
Gasta	FRI	0,10	160	0,78	0,78	0,78
Nova	Seco	0,15	160	4,57	4,33	4,31
Gasta	Seco	0,15	160	1,06	1,06	0,92
Nova	FRI	0,15	160	4,11	4,03	4,45
Gasta	FRI	0,15	160	1,33	1,29	1,27
Nova	Seco	0,10	240	3,89	3,97	3,92
Gasta	Seco	0,10	240	1,10	1,10	1,03
Nova	FRI	0,10	240	6,31	6,21	5,90
Gasta	FRI	0,10	240	0,61	0,59	0,56
Nova	Seco	0,15	240	2,98	2,92	2,68
Gasta	Seco	0,15	240	1,24	1,22	1,22
Nova	FRI	0,15	240	5,50	5,72	5,86
Gasta	FRI	0,15	240	0,62	0,49	0,47

Tabela 7.7 – Resultados do teste de rugosidade R_q

Condição	Meio	Avanço [mm/rev]	Velocidade [m/min]	Medida 1 [μm]	Medida 2 [μm]	Medida 3 [μm]
Nova	Seco	0,10	160	3,20	3,01	2,96
Gasta	Seco	0,10	160	0,93	0,93	0,96
Nova	FRI	0,10	160	4,14	3,67	4,33
Gasta	FRI	0,10	160	0,96	0,97	0,97
Nova	Seco	0,15	160	5,89	5,51	5,47
Gasta	Seco	0,15	160	1,26	1,26	1,11
Nova	FRI	0,15	160	4,94	4,82	5,32
Gasta	FRI	0,15	160	1,64	1,62	1,58
Nova	Seco	0,10	240	4,67	4,78	4,65
Gasta	Seco	0,10	240	1,36	1,34	1,27
Nova	FRI	0,10	240	7,48	7,48	7,03
Gasta	FRI	0,10	240	0,75	0,72	0,68
Nova	Seco	0,15	240	3,57	3,46	3,21
Gasta	Seco	0,15	240	1,50	1,49	1,46
Nova	FRI	0,15	240	7,13	6,68	7,28
Gasta	FRI	0,15	240	0,76	0,61	0,59

Tabela 7.8 – Resultados do teste de rugosidade R_z

Condição	Meio	Avanço [mm/rev]	Velocidade [m/min]	Medida 1 [μm]	Medida 2 [μm]	Medida 3 [μm]
Nova	Seco	0,10	160	11,85	11,17	12,78
Gasta	Seco	0,10	160	4,45	4,59	4,51
Nova	FRI	0,10	160	13,94	12,49	14,60
Gasta	FRI	0,10	160	4,42	4,49	4,53
Nova	Seco	0,15	160	25,31	23,20	22,99
Gasta	Seco	0,15	160	5,21	5,05	4,68
Nova	FRI	0,15	160	18,20	18,56	20,11
Gasta	FRI	0,15	160	7,59	7,58	7,55
Nova	Seco	0,10	240	17,75	18,21	17,30
Gasta	Seco	0,10	240	6,03	5,96	5,26
Nova	FRI	0,10	240	27,26	27,89	25,97
Gasta	FRI	0,10	240	3,63	3,38	3,17
Nova	Seco	0,15	240	13,73	13,18	12,67
Gasta	Seco	0,15	240	6,75	6,91	6,58
Nova	FRI	0,15	240	30,89	26,02	29,22
Gasta	FRI	0,15	240	3,59	2,99	2,91

Tabela 7.9 – Resultados do teste de vida da ferramenta

Meio	Avanço [mm/rev]	Velocidade [m/min]	Vida 1 [cm^3]	Vida 2 [cm^3]	Vida 3 [cm^3]	Média [cm^3]
Seco	0,10	160	5,22	6,06	5,14	5,47
FRI	0,10	160	9,43	8,31	6,14	7,96
Seco	0,15	160	4,29	6,29	5,4	5,33
FRI	0,15	160	4,92	8,72	6,43	6,69
Seco	0,10	240	2,49	2,49	3,55	2,84
FRI	0,10	240	2,98	3,35	4,6	3,64
Seco	0,15	240	2,79	2,95	2,51	2,75
FRI	0,15	240	3,66	3,65	4,32	3,88